



ÉTOILES DOUBLES

Revue francophone des observateurs d'étoiles doubles

N° 03 - Décembre 2021

SOMMAIRE

Page 01 : Édito

Par le comité de rédaction

Page 02 : L'étoile variable EX Leo, une nouvelle étoile double visuelle ?

Par Jean-François Coliac

Page 04 : Évolution de l'étoile Dzêta Cancri - Un pli cacheté à l'académie des sciences relance l'étude des compagnons invisibles

Par Jean-Claude Thorel

Page 15 : L'observation des étoiles de types binaires à éclipses (aspects pratiques)

Par Laurent Corp

Page 21 : Initiation à l'interférométrie des tavelures - 2ème partie

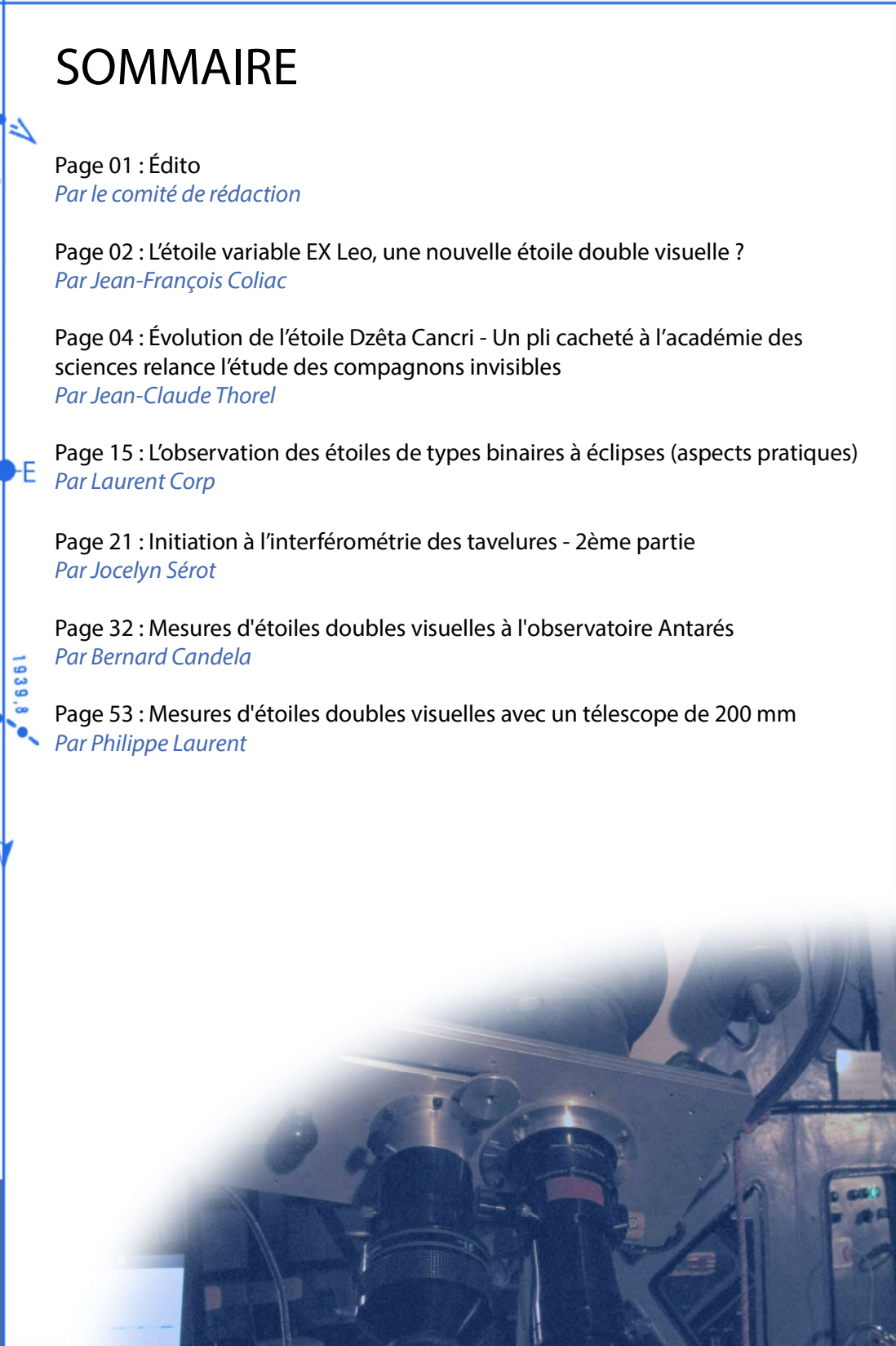
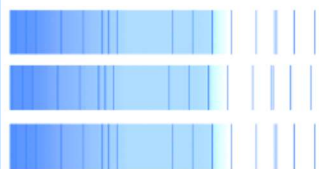
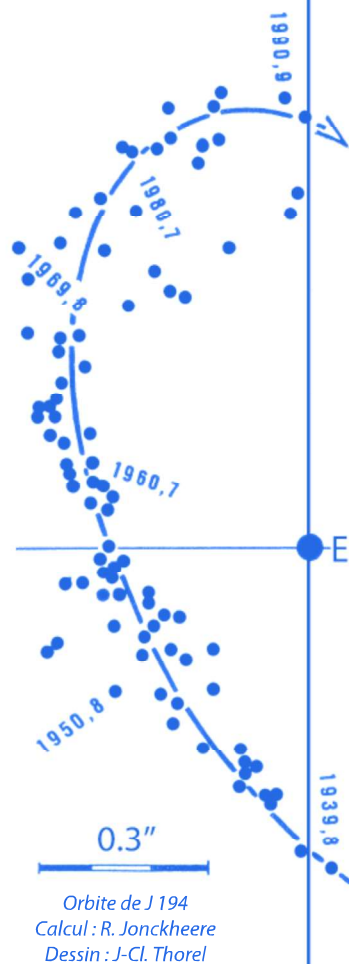
Par Jocelyn Sérot

Page 32 : Mesures d'étoiles doubles visuelles à l'observatoire Antarés

Par Bernard Candela

Page 53 : Mesures d'étoiles doubles visuelles avec un télescope de 200 mm

Par Philippe Laurent



Éditée par l'association Jonckheere avec le soutien de l'observatoire de l'université de Lille

ISSN 2742-7358

ÉTOILES DOUBLES

Revue francophone des observateurs d'étoiles doubles



Éditorial

Voici maintenant un an que la revue Étoiles Doubles a vu le jour. Elle permet de publier rapidement et régulièrement les travaux des observateurs francophones d'étoiles doubles de tous types. Avec cette première bougie, nous tenons à remercier les reviewers qui ont pris de leur temps pour relire, proposer des corrections, des ajouts et autres suggestions aux articles publiés permettant à notre revue de faire partie des publications de référence sur le sujet des étoiles doubles.

Dans le premier numéro, vous avez pu lire les premières parties de deux articles sur des aspects théoriques de l'observation des étoiles doubles, l'un sur les binaires à éclipses, l'autre sur l'interférométrie des tavelures. Vous pourrez lire les suites de ces articles de fond dans ce nouveau numéro. Laurent Corp et Jocelyn Sérot reprennent ou prennent le clavier pour nous faire découvrir les aspects pratiques de ces deux types d'observations. Vous trouverez aussi un nouvel article historique de Jean-Claude Thorel sur la longue histoire de plus de 250 ans des découvertes des composantes de l'étoile ζ Cancri. Jean-François Coliac, observateur assidu, notamment de binaires à éclipses, nous fait part de la découverte d'une nouvelle étoile double visuelle dans le Lion. Enfin, nous publions les travaux de mesures de Bernard Candela et Philippe Laurent qui totalisent à eux deux 1278 mesures.

Nous espérons que vous lirez les pages qui suivent avec intérêt et puisque la fin de l'année approche, nous vous souhaitons de bonnes fêtes et une très bonne année 2022 !

Le comité de rédaction



ÉTOILES DOUBLES

Décembre 2021 - numéro 3

ISSN 2742-7358

revue éditée par

l'association Jonckheere

les amis de l'observatoire de Lille

1, Impasse de l'observatoire 59000 LILLE

<https://asso-jonckheere.wixsite.com/accueil>



et soutenue par

l'observatoire de l'université de Lille

1, Impasse de l'observatoire 59000 LILLE

<http://astronomie.univ-lille.fr/>



Comité de rédaction

André Amossé
Philippe Laurent
Florent Losse

Comité scientifique

Daniel Bonneau
Patricia Lampens
Josefina Ling
Alain Vienne

Notes aux auteurs sur

<https://etoiledoubles.org>

Contact

contact@etoiledoubles.org

© 2021 Étoiles Doubles



Robert JONCKHEERE a été l'astronome français des étoiles doubles du début du XXème siècle et le maître à penser de Paul COUTEAU. Son patrimoine astronomique est à l'observatoire de Lille. Cette publication trouve naturellement sa place à Lille où « l'association Jonckheere, les amis de l'observatoire de Lille » valorise et entretient ce patrimoine scientifique et avec lequel elle réalise des mesures d'étoiles doubles visuelles.

L'ÉTOILE VARIABLE EX LEO, UNE NOUVELLE ÉTOILE DOUBLE VISUELLE ?

The variable star EX Leo, a new visual double star ?

Jean-françois Coliac

O.A.B.A.C. (Observatoire Astronomique du Beausset pour l'Astronomie Collaborative) France - AAVSO - SAF/Commission des Étoiles Doubles

Email : jfcoliac@free.fr

Site web : "Etoiles binaires, entre Terre et Soleils" : <http://www.astrosurf.com/jfcoliac/>



Résumé

Une nouvelle étoile double visuelle non répertoriée a été identifiée dans la constellation du Lion. Il s'agit de EX LEO. La séparation angulaire a été mesurée à 13,50 secondes d'arc et l'angle de position à 171,41°. Les catalogues Gaia DR2 et eDR3 ont été utilisés pour apporter des informations complémentaires sur ces deux étoiles. Une intégration au Washington Double Star Catalog est proposée.

Abstract

A new unlisted visual double star has been identified in the constellation Leo. This is EX LEO. The angular separation was measured at 13,50 arc seconds and the position angle at 171,41°. The Gaia DR2 and eDR3 catalogs were used to provide additional information on these two stars. Integration into the Washington Double Star Catalog is proposed.

Keywords: proper motion, astrometry, binaries : visual



Introduction

Une nouvelle étoile double a été identifiée visuellement sur une session d'images de l'étoile variable EX Leo le 24 mars 2021 lors d'une soirée passée à identifier des étoiles variables. Comme je le fais sur chaque image d'étoiles variables que je prends, je vérifie le champ en totalité pour voir s'il peut y avoir une étoile double visuelle non répertoriée.

L'étoile A est l'étoile variable EX LEO de type EW. C'est une binaire à éclipse à composantes semi-détachées dont la magnitude varie de 8,27 à 8,49 sur un période de 9,8 heures selon les données de l'AAVSO.

L'étoile B est une étoile rouge de magnitude 13,8 et de faible température de surface avec un indice de couleur B-V important de 1,76

Un examen avec l'outil Aladin [1] m'a confirmé que ce système ne faisait pas partie du Washington Double Star Catalog [2] (WDS).

Le catalogue Gaia eDR3 fournit les distances et les mouvements propres de ces deux étoiles. L'analyse de ces données portent à croire que les deux étoiles peuvent former un couple physique.

L'étoile primaire se trouve aux coordonnées 10h45m06,77s +16°20'03,22" (équinoxe J2000) d'après l'affichage du catalogue Gaia DR2 dans Aladin.

La table 1 donne les caractéristiques des deux étoiles dans le catalogue Gaia DR2 [3]

	Primaire	Secondaire
Gaia DR2 numéro	3982399779723342336	3982398645852922624
Magnitude G	8,14	13,79
T eff (°K)	6417	3608
Luminosité en luminosité solaire	3,851	0,047
Rayon en rayon solaire	1,59	0,55
B-V	0,49	1,76

Table 1 : Données du catalogue Gaia DR2

Latest Details ?			
Log in to retrieve additional aliases from SIMBAD.			
Name	EX Leo		
AAVSO UID	000-BCZ-886 (303 observations)		
Constellation	Leo	» Sequence	
J2000.0	10 45 06.77 +16 20 15.7 (161.27821 +16.33769)		» Search nearby
B1950.0	10 42 26.69 +16 36 04.9		
Proper motion	RA: -28.329 +/- 0.074 mas/y	Dec: -37.124 +/- 0.056 mas/y	Source: Gaia DR1
Galactic coord.	226.622 +58.852		
Other names (Internal only)	1RXS J104506.8+162016 ASAS J104507+1620.3 HD 93077 SAO 99275	AAVSO 1039+16 BD+17 2269 HIP 52580 TYC 1428-562-1	ASAS J104506+1620.2 GSC 01428-00562 PPM 127667 (Not logged in) » Add name
Variability type	EW ?		
Spectral type	F6V		
Mag. range	8.12 - 8.35 V ?		
Discoverer	--		
Epoch	31 Aug 1991 (HJD 2448500.008)		» Ephemeris
Outburst	--		
Period	0.4086041 d (9.80650 h)		
Rise/eclipse dur.	--		

Image 1 : informations de la base de données de VSX de l'AAVSO <https://www.aavso.org/vsx/index.php?view=detail.top&oid=17198>

L'exploitation de mon image et les données du catalogue Gaia DR 2 permettent d'estimer la séparation du couple à 13,5" et son orientation à 171,4°.

L'image 2 montre l'image prise avec mon instrument (Cassegrain de 200 mm F/D 12, équipé d'une caméra ZWO 183 MM pro et un filtre V), tandis que l'image 3 montre la position des deux étoiles dans Gaia DR2 superposée à l'image du DSS2 color [4]. Le WDS est lui aussi chargé sur cette image et les deux étoiles n'y figurent pas.

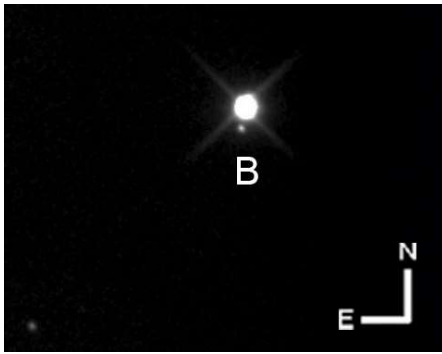


Image 2 : image en filtre V Johnson 50 poses de 20 sec.

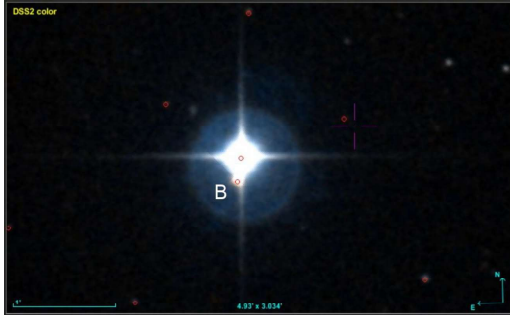


Image 3 : l'image du DSS2 color sur l'outil Aladin.

Procédure d'acquisition et estimation des caractéristiques du couple

Cinquante images de vingt secondes chacune ont été réalisées avec le filtre V Johnson, puis recalées et additionnées en mode moyenne pour n'obtenir qu'une seule image. Cette image a été traitée astrométriquement avec Prism V10 [5] et le catalogue NOMAD [6]. L'échantillonnage a été mesuré à 0,824 secondes d'arc par pixel avec des pixels de 2,4 microns en binning 4x4.

Connaissant l'échantillonnage de 0,824 seconde d'arc par pixel, **une séparation moyenne de 13,50" et un angle de position de 171,41° ont été trouvés après 4 réductions de cette image.**

Analyse de la distance de l'étoile double grâce aux données de Gaia eDR3

Le catalogue Gaia eDR3 [7] donne des incertitudes de mesures trois à quatre fois plus petites que Gaia DR2 pour les parallaxes et les mouvements propres. Ce catalogue sera donc utilisé pour étudier ces grandeurs. Les données figurent dans la table 2.

	Primaire Gaia eDR3	Secondaire Gaia eDR3
Parallaxe (mas)	10,2982± 0,0252	10,2733± 0,0215
Distance minimum (parsec)	96,87	97,14
Distance maximum (parsec)	97,34	97,54

Table 2 : éléments sur la distance des étoiles

Nous voyons que les distances entre l'étoile principale et le compagnon sont proches et se chevauchent dans une zone commune, située entre 97,14 et 97,34 parsecs.



Jean-François Coliac

Je pratique l'astronomie depuis l'âge de 15 ans. Je passe mon temps libre à l'observation des étoiles doubles, des étoiles variables et des occultations d'étoiles par des astéroïdes. J'ai notamment participé à des observations des Phénomènes Mutuels (Phému) d'Uranus en 2007, les Phému de Jupiter en 2015 et 2021, l'occultation d'une étoile par Triton en octobre 2017 et celles de l'astéroïde double Kalliope.

Analyse des mouvements propres

La catalogue Gaia eDR3 fournit également les valeurs des mouvements propres ainsi que les incertitudes de mesure et nous pouvons aussi les analyser. Nous calculons les mouvements propres corrigés des incertitudes de façon à générer les écarts entre le mouvement propre minimum d'une étoile avec le mouvement propre maximum de l'autre étoile. Ils sont indiqués dans la table 3.

	Primaire Gaia eDR3	Secondaire Gaia eDR3	rMP Gaia eDR3
MP en AD (mas / an)	-28,454 ± 0,029	-27,451 ± 0,023	3,5 %
plus grande différence avec les incertitudes	-28,454 - 0,029 -28,483	-27,451 + 0,023 -27,428	3,7 %
MP en Déc (mas / an)	-37,102 ± 0,030	-36,264 ± 0,018	2,3 %
plus grande différence avec les incertitudes	-37,102 - 0,030 -37,132	-36,264 + 0,018 -36,246	2,4 %

Table 3 : éléments sur les mouvements propres des deux étoiles

La similitude des mouvements propres des deux étoiles est vérifiée en calculant la différence relative des mouvements propres (noté rMP dans la table 3), en retenant la plus grande différence avec les incertitudes, par rapport à celui de l'étoile principale. Nous constatons que les mouvements propres des deux étoiles sont similaires car rMP ne dépasse pas 4 %.

Conclusion

Nous pouvons donc considérer que EX LEO en plus d'être une variable à éclipses et aussi une étoile double visuelle.

L'image obtenue a permis de faire une première estimation de ses caractéristiques, mais d'autres mesures seront nécessaires afin de confirmer cette première détermination.

Nous avons vu que ces deux étoiles ont une distance et des mouvements propres similaires, nous pouvons donc penser que ces deux étoiles sont liées physiquement.

Je propose que ce couple soit intégré dans le WDS.

Remerciements

Je remercie le Washington Double Star Catalog, l'American Association of Variable Stars Observers, le Journal of Double Star Observations pour toutes les informations utiles fournies et la revue Étoiles Doubles pour leurs conseils. Ce travail a été réalisé avec l'outil The Aladin Sky Atlas et le logiciel PRISM de Cyril Cavadore.

References

- [1] Aladin Sky Atlas : <https://aladin.u-strasbg.fr/>
- [2] WDS : <http://www.astro.gsu.edu/wds/>
- [3] Gaia DR2 : <https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/dr2>
- [4] DSS 2 : <https://archive.stsci.edu/dss/index.html>
- [5] Prism : <http://www.prism-astro.com/fr/index.html>
- [6] NOMAD : <https://www.usno.navy.mil/USNO/astrometry/optical-IR-prod/nomad>
- [7] eDR3 : <https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/edr3-gcns>



ÉVOLUTION DE L'ÉTOILE DZÊTA CANCRI

UN PLI CACHETÉ À L'ACADÉMIE DES SCIENCES RELANCE L'ÉTUDE DES COMPAGNONS INVISIBLES

Evolution of the star ζ Cancri - A sealed fold at the Academy of Sciences revives study of invisible companions

Jean-Claude Thorel

Invité scientifique à l'observatoire de la Côte d'Azur

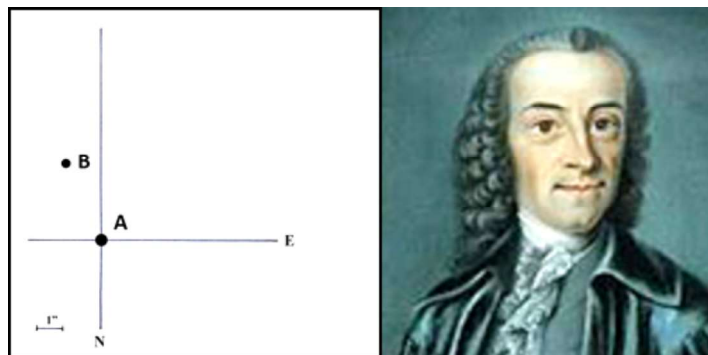


Résumé

Cet article présente l'histoire de l'étude de l'étoile ζ Cancri en tant qu'étoile multiple. Alors que l'existence de trois composantes de ce système est bien établie dès 1825 par James South, l'analyse du mouvement orbital de la composante C autour de AB suggère la présence d'un quatrième corps comme le proposent Otto Struve et Camille Flammarion qui ont tous deux envoyé indépendamment une note à l'Académie de Sciences. On confirmera ce quatrième compagnon autour de la composante C en 1983 par des observations interférométriques. Des mesures effectuées à la suite d'une occultation lunaire en 1998 feront même apparaître un cinquième corps E, proche de CD. L'étoile ζ Cancri, connue aussi sous le nom de STF 1196 serait donc un système quintuple.

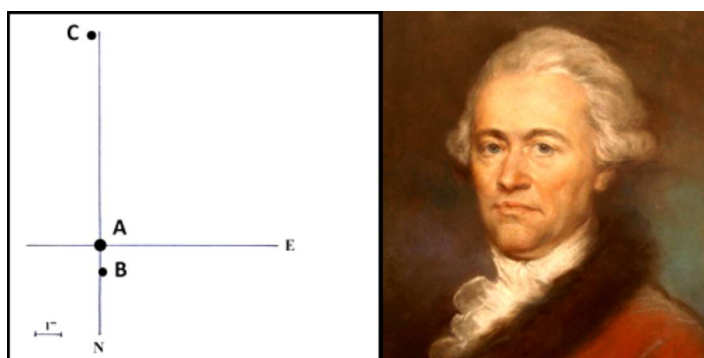
Abstract

This article presents the history of the study of the star ζ Cancri as a multiple star. While the existence of three components of this system is well established in 1825 by James South, the analysis of the orbital motion of the component C around AB suggests the presence of a fourth body as proposed by Otto Struve and Camille Flammarion who both independently sent a note to the Academy of Sciences. This fourth companion around the C component will be confirmed in 1983 by interferometric observations. Measurements made following a lunar occultation in 1998 will even reveal a fifth body E, close to CD. The star ζ Cancri, also known as STF 1196, would therefore be a quintuple system.

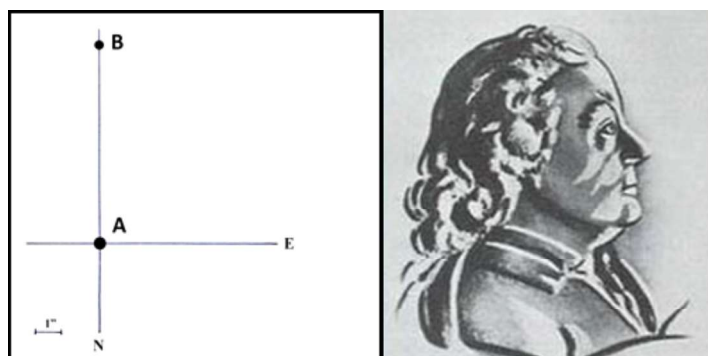


C'est **Tobias MEYER** (1723-1762) qui découvre, en **1756**, la duplicité de ζ Cancri. Il détermine la position relative des composantes par la différence des ascensions droites observées 4 fois, et des déclinaisons observées 7 fois, au quart de cercle mural de Göttingen. Les paramètres mesurés sont : angle de position (thêta) $\theta = 205,4^\circ$ et séparation (rho) $\rho = 3,3''$ (secondes de degré).

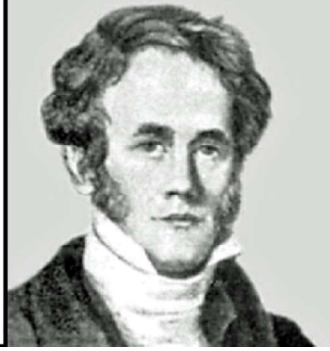
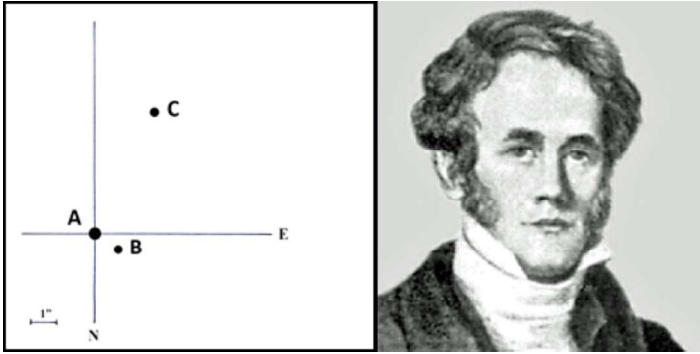
En **1778**, **Christian MAYER** (1719-1783), frère jésuite vivant à Mannheim, l'observe avec un quart de cercle mural de Bird de 8 pouces et avec un grossissement de 85 fois. Il trouve **180° pour θ et $7,7''$ pour ρ** . La valeur de l'angle de position ne cesse de diminuer, tandis que celle de la séparation reste à peu près constante, ce qui donne une orbite sensiblement circulaire.



Mais c'est à **Friedrich Wilhelm HERSCHEL** (Frederick William) (1738-1822), qui a commencé, en 1776, un véritable travail sur les étoiles doubles, conséquence de ses recherches observationnelles sur les parallaxes stellaires, que revient la découverte du compagnon de l'étoile principale. Il observe ζ Cnc le **21 novembre 1781** et mesure l'angle de position $\theta = 3,475^\circ$, mais il doute encore de l'existence de ce compagnon.



L'ère des étoiles doubles visuelles commence

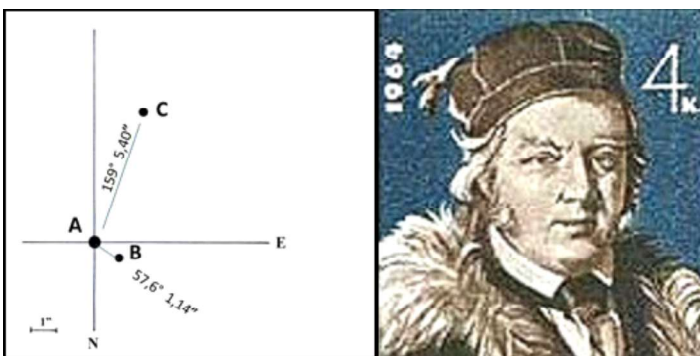


Même **John Frederick William HERSCHEL** (1792-1871), et **James SOUTH** (1785-1867) ce dernier observant à Blackmann Street avec un équatorial de 5 pieds de foyer, ne mentionnent pas l'observation de 1781 dans leur ouvrage commun sur leurs mesures de ζ Cnc, présenté à la Société Royale de Londres, ni en 1824.



Portrait de James SOUTH

Il faut attendre **1825** et les observations faites du 3 au 14 avril par ce même James SOUTH, avec un équatorial de 3 $\frac{3}{4}$ pouces et de 7 pieds, et un grossissement de 413 fois, depuis son observatoire privé de Passy près de Paris, pour avoir une confirmation de ce compagnon. La moyenne de ses mesures donne pour **AB 57,8° pour l'angle de position θ et 1,09'' pour la séparation ρ , et pour AC 150° et 5,30''**. Le compagnon de l'étoile principale A qui s'appelait B devient C.



En 1824, **Friedrich Georg Wilhelm STRUVE** (1793-1864) l'observe à l'observatoire de Dorpat (Tartu), Estonie, avec un équatorial de 24cm x 4,30m dont le pouvoir séparateur atteint $\rho = 0,50''$.

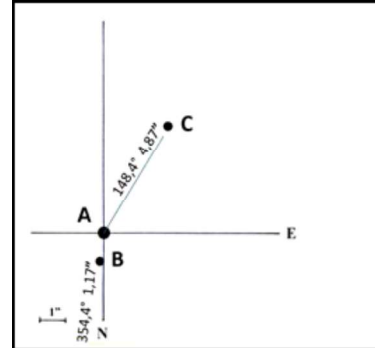
Le 21 mars 1826, il observe ζ Cancr et mesure un angle de position $\theta = 57,6^\circ$ avec une séparation $\rho = 1,140''$.

En avril 1826, il mesure AB/2-C : $\theta = 158,97^\circ$ $\rho = 5,400''$ mgv A = 5,0 mgv B = 5,7 mgv C = 5,3.

Il dénommera ce couple Σ 1196 (STF 1196 AB) dans son catalogue "*Stellarum Duplicium et Mutiplicium Mensuræ Micrometrica*" publié en 1837. Plus connu sous le nom de

"*Catalogue de Dorpat*", il sera la "bible" des observateurs jusqu'à la parution des grands catalogues de Thomas LEWIS en 1906, de Sherburne Wesley BURNHAM (BDS) également en 1906 et de Robert Grant AITKEN (ADS) en 1932. Il mesure à nouveau ce couple en 1828, 1831, 1832, 1833, 1835, 1836. En 1834, il est appelé par le tsar Nicolas 1er pour être directeur du nouvel observatoire de Pulkovo.

L'ère des grandes lunettes et de l'astrométrie des étoiles doubles commence



Otto Wilhelm STRUVE (1819-1905) succède à son père. Il a fait l'observation de 17 000 étoiles doubles et en a découvert 514 serrées, référencées O Σ (STT) avec le grand réfracteur de Merz et Mahler de Munich, de diamètre 38cm et de distance focale de 6,88m donnant un pouvoir séparateur $\rho = 0,32''$.

Le 16 avril 1843, il mesure ζ Cancr et trouve :

AB $\theta = 354,4^\circ$ $\rho = 1,17''$ et AC $\theta = 148,4^\circ$ $\rho = 4,87''$

En 1873, avec les mesures faites à Dorpat et Poulkovo, il commence l'étude du système ζ Cnc. Le compagnon B ne s'écarte jamais à plus de 1,20'' et en 1842, MÄDLER donnera une période P de 58,9 ans.

Dans la figure 1 ci-dessous, il représente les positions de B par rapport à A supposée immobile. L'orbite de B est circulaire avec une position fortement excentrique de A.

La figure 2 représente les positions des trois étoiles par rapport au centre optique O entre A et B, lequel est supposé immobile

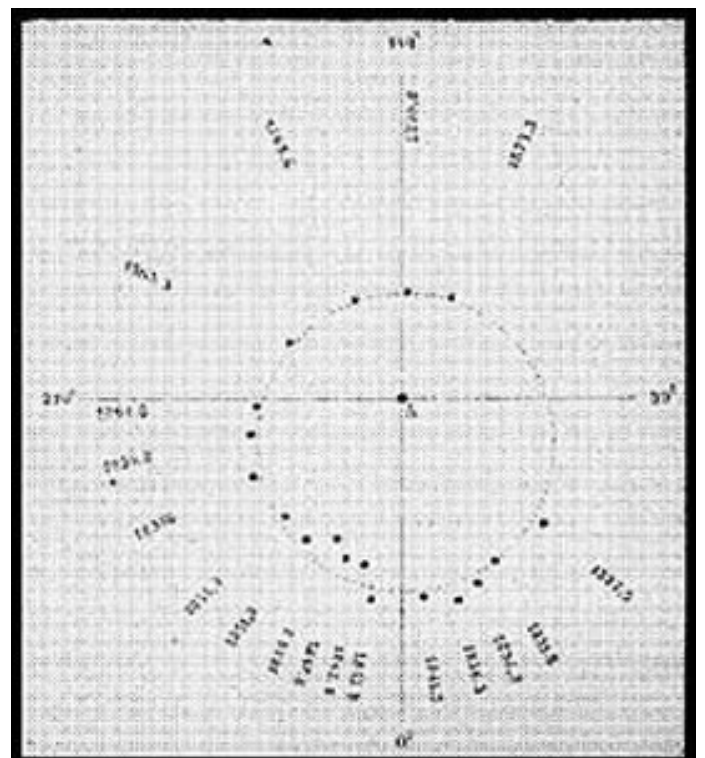


Figure 1 : positions de la composante B par rapport à A du système ζ Cnc reporté par Otto Struve

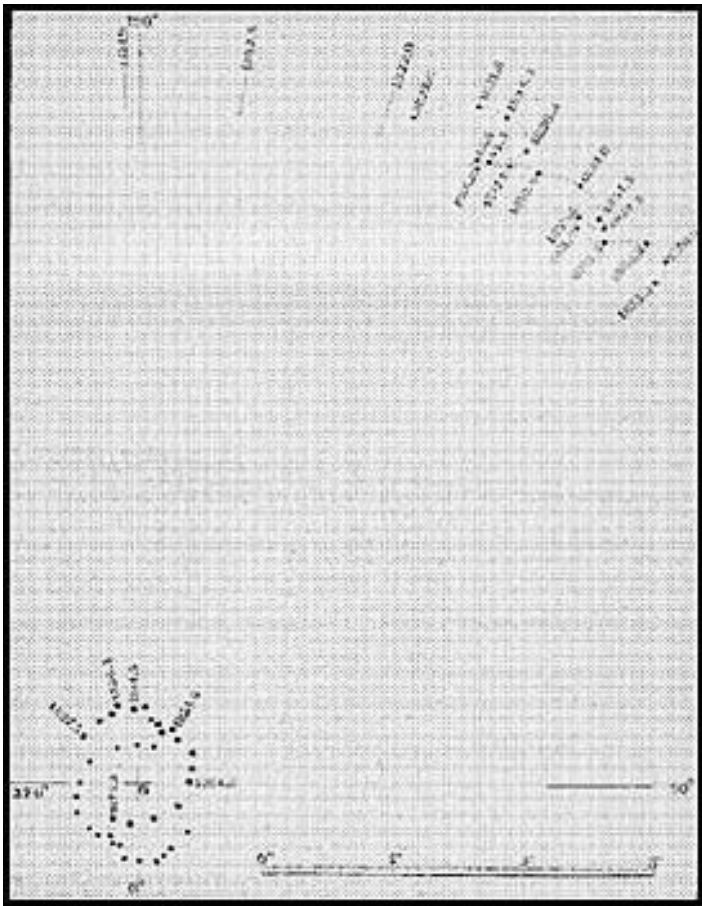


Figure 2 : positions de la composante C par rapport au centre optique entre A et B de ζ Cnc reporté par Otto Struve

ou transporté dans l'espace par un mouvement uniforme. L'angle de position de C, tantôt plus rapide tantôt nul ou même rétrograde montre que les mouvements angulaires plus rapides sont toujours accompagnés d'une augmentation de la distance, les mouvements rétrogrades, au contraire, d'une diminution.

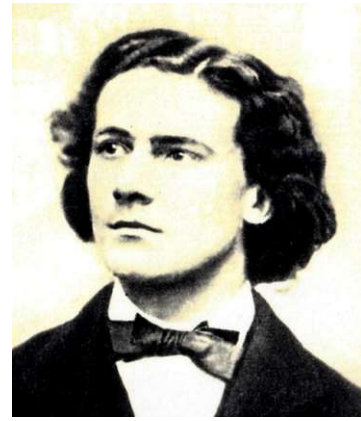
Otto STRUVE écrit : « Il serait inadmissible d'attribuer ces irrégularités aux imperfections des mesures. À la distance de 5", des erreurs de 6 degrés seraient déjà intolérables dans des observations isolées, à plus forte raison lorsqu'il s'agit de la moyenne de nombreuses mesures ... Les inégalités observées sont donc réelles et doivent trouver leur origine dans les lois de la nature.

Elles trouveraient une explication satisfaisante si l'étoile C, en poursuivant en moyenne une orbite uniforme autour de O, décrivait en même temps une orbite secondaire, approximativement circulaire, de 0,3" de rayon, dans une période de 20 ans. Une pareille orbite secondaire devrait probablement se produire s'il y avait encore un corps troublant, peut-être opaque ou moins luisant, dans le voisinage immédiat de C ».

Otto STRUVE évoque une 4ème composante en orbite autour de C à 0,3" en 20 ans dans un compte rendu qu'il envoie à l'Académie des Sciences.

Pendant ce temps là en France ? Un astronome, Camille FLAMMARION, commence l'étude du système ζ Cnc

1856-1858 : Il apprend le dessin chez un ciseleur-graveur où il est apprenti et découvre la photographie grâce à son père employé aux studios Tourmachon-Nadar. Il suit des cours du soir et obtient les bacs de Lettres et de Sciences et il écrit des ouvrages d'astronomie. Surmené, il fait régulièrement appel à un médecin. Le Docteur FOURNIER, par relation, lui ouvre les portes de l'observatoire impérial de Paris. Il est reçu brièvement par le directeur Urbain Le VERRIER, puis passe un examen évalué par Victor Alexandre PUISEUX. Le 25 juin 1858, il est embauché



Portrait de Camille FLAMMARION

comme élève astronome au Bureau des calculs. Il travaille à la correction des positions apparentes des étoiles observées à la lunette méridienne. Devenu assistant de Jean CHACORNAC, il fait des observations de la Lune avec le petit réfracteur de 30,5cm de diamètre de la Tour de l'Ouest.

1862 : C'est la parution de "La pluralité des mondes habités" chez Mallet-Bachelier, éditeur de l'observatoire de Paris. Il est sèchement congédié par Le VERRIER. Est-ce à cause de l'ouvrage, de l'édition ... ? Il est réengagé au Bureau des Longitudes par Charles Eugène DELAUNAY, comme calculateur des positions de la Lune publiées dans la « Connaissance des Temps ».

1873 : fort de ses connaissances et de ses pratiques, il rassemble les mesures de nombreux observateurs et commence l'étude du système ζ Cnc. Il est frappé par les irrégularités de l'étoile C et dessine 4 trajectoires (Fig. 3). Il donne une période de 60,45 ans. Mais en analysant les mesures déjà effectuées, il trouve que le mouvement orbital de C autour de AB n'est pas uniforme, et présente un festonnage. Il calcule une période orbitale de 772 ans. Mais il faut faire attention avec les données utilisées, car certains observateurs ont mesuré C par rapport à A et d'autre par rapport à AB/2. L'étoile C s'arrête vers 1836, rétrograde jusqu'en 1840-45, repart jusqu'en 1855, rétrograde de nouveau jusqu'en 1860, puis repart, formant ainsi un cycle de festons d'une période de 19/20 ans

En mars 1874, il communique cette curieuse orbite à plusieurs astronomes (FAYE, Directeur du Bureau des Longitudes, aux frères HENRY de l'Observatoire de Paris, Charles BOISSAY, rédacteurs des "Mondes", ..., et à José GONZALÈS Directeur de l'Observatoire Flammarion à Bogota, Colombie). Il demande à Otto STRUVE, directeur de l'observatoire de Poulkovo, de bien vouloir lui communiquer ses observations.

Otto STRUVE, qui travaille déjà sur un problème similaire de compagnon invisible pour Procyon (α CMi) et pour Sirius (α CMa), ne répond pas à FLAMMARION. En 1873, avec son réfracteur de 38cm de diamètre, la lunette la plus puissante du Monde à cette époque, il croit voir le compagnon perturbateur de ζ Cancri C. En 1874, il est affecté, perturbé, par le jeu de cache-cache du compagnon de Procyon. En effet les deux chiens de la mythologie céleste, Sirius et Procyon ne marchent pas droit. Ils reniflent tantôt d'un côté du sentier, tantôt de l'autre. Son père avait estimé des compagnons invisibles pour Sirius et Procyon. Malheureusement celui de Sirius fut découvert par Alan Graham CLARK (1832-1897) le 31 janvier 1862.

Mais les Américains viennent d'inaugurer la lunette de Washington de 66 cm de diamètre pour une distance focale de 9,90 m. Pour s'assurer d'une éventuelle priorité pour le compagnon de Procyon, il fait part de sa découverte à Simon

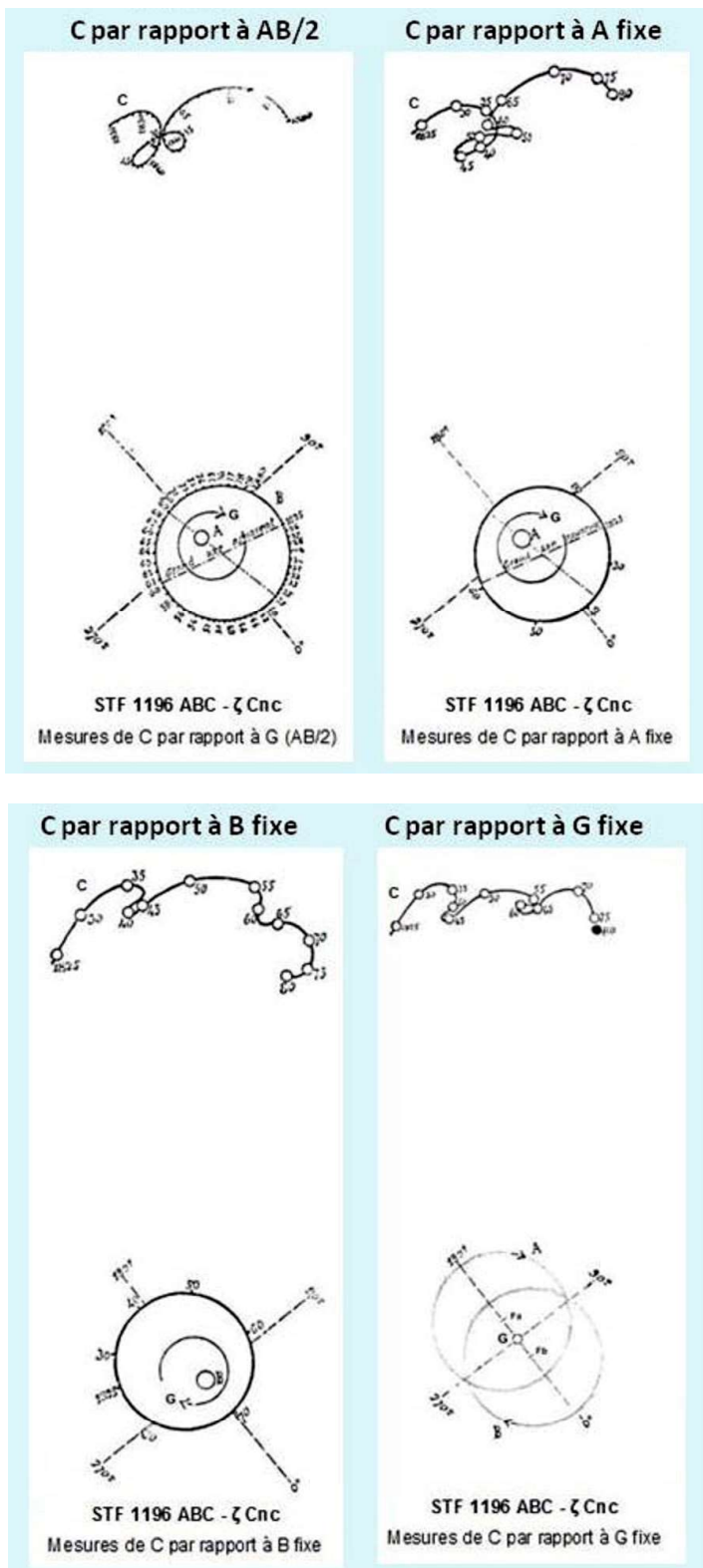


Figure 3 : dessins des trajectoires de la composante C réalisés par FLAMMARION en 1873

NEWCOMB (1835-1909). Dès le printemps 1874, Otto observe Procyon et note la présence du compagnon, et dès le mois de mai, en fait part à la Royal Astronomical Society. Il a un doute et demande à NEWCOMB d'observer Procyon, mais la météo est défavorable. Otto est rongé par le doute, et a peur d'être déconsidéré à la suite de sa note à la Royal Astronomical Society. Car en fait il n'a vu qu'un reflet, il en aura la certitude plus tard. Finalement John Martin SCHAEERLE (1853-1924) découvrira ce compagnon en 1896.

C'est dans cet état d'esprit qu'Otto STRUVE reçoit la demande de FLAMMARION. Avec son père, depuis 1826, ils suivent

régulièrement ζ Cnc et, pour ne pas perdre le fruit d'un long travail de deux générations, il ne peut pas lâcher ζ Cancri après avoir été leurré par le Petit Chien. Il ne répond pas à FLAMMARION et ne donne pas ses observations à cet astronome français qu'il considère davantage comme un écrivain.

Il n'a jamais accusé réception de la demande et le 14 décembre 1874, par l'entremise de Le VERRIER, l'Académie des Sciences reçoit de Pulkovo, une note d'Otto STRUVE relative aux : « Mesures micrométriques de l'étoile triple ζ Cnc ».

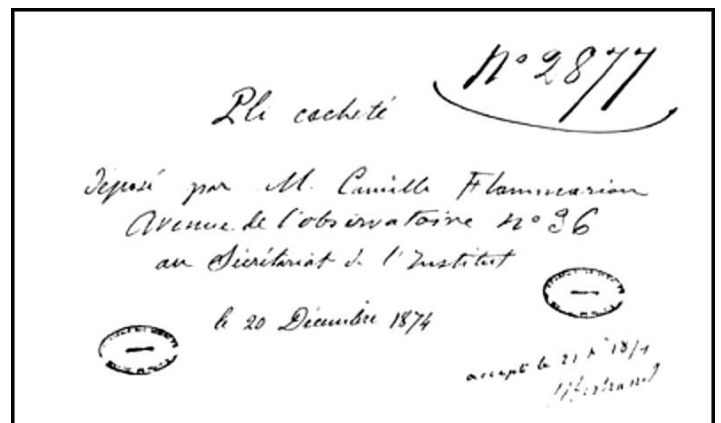
Petite histoire d'un pli cacheté à l'Académie des Sciences

Apprenant cela, FLAMMARION réagit vigoureusement et transmet à son tour à l'Académie des Sciences, le dimanche 20 décembre 1874, un pli cacheté (n° 2877) qui est accepté par Joseph BERTRAND, Président de l'Académie : « Sur l'étoile triple ζ du Cancer ». Il s'exprime ainsi :

« C'est une coïncidence bien remarquable que M. Otto STRUVE ait justement fait cette découverte après avoir reçu ma lettre ; c'en est une autre non moins curieuse qu'il se soit justement occupé de l'analyse de cette étoile en même temps que moi (qui consacrais alors exclusivement mon temps - 1873 et 1874 - à cette analyse des couples rapides); c'en est une troisième qu'il ait construit l'orbite apparente par la méthode graphique que j'employais comme première approximation de préférence à l'analyse mathématique; c'en est une quatrième qu'il ait envoyé sa découverte en France contrairement à ses habitudes allemande et russe, etc ... En raison de ces curieuses coïncidences, j'ai, le jour même de la publication de son travail dans les "Comptes Rendus", remis à l'Académie des Sciences un pli cacheté constatant les résultats auxquels j'étais parvenu, indépendamment de l'astronome russe (ne pas lire rusé) et antérieurement à leur publication. (Ce document est toujours à l'Académie des Sciences, et on le décachettera quand M. Otto STRUVE le désirera) ».

Il sera envoyé à Jean-Claude PECKER, membre de l'Académie des Sciences, et sera ouvert le 23 novembre 1989.

Mais le pli de FLAMMARION est d'un style fleuri dans lequel on perçoit le théoricien. Il est moins précis que celui d'Otto STRUVE,



Pli cacheté de Camille FLAMMARION déposé à l'Académie des Sciences

il ne prend date que sur les résultats, il ne contient aucune conclusion et ne présente aucune hypothèse : « L'orbite de l'étoile B est régulière, peu excentrique, comme on le voit sur la figure ci-incluse (Fig. 4). Cette étoile accomplit autour de A sa révolution en 59 ans. Pour parler rigoureusement, il faut dire que les deux étoiles A et B gravitent ensemble autour de leur centre commun de gravité, situé dans l'espace entre elles-deux. Éloignée à 5 fois environ la distance AB, l'étoile C suit une orbite qui n'a encore été tracée par aucun astronome, et qui a été, de la part de Sir John HERSCHEL entre autres le sujet d'un embarras dont il a déclaré ne pouvoir sortir.

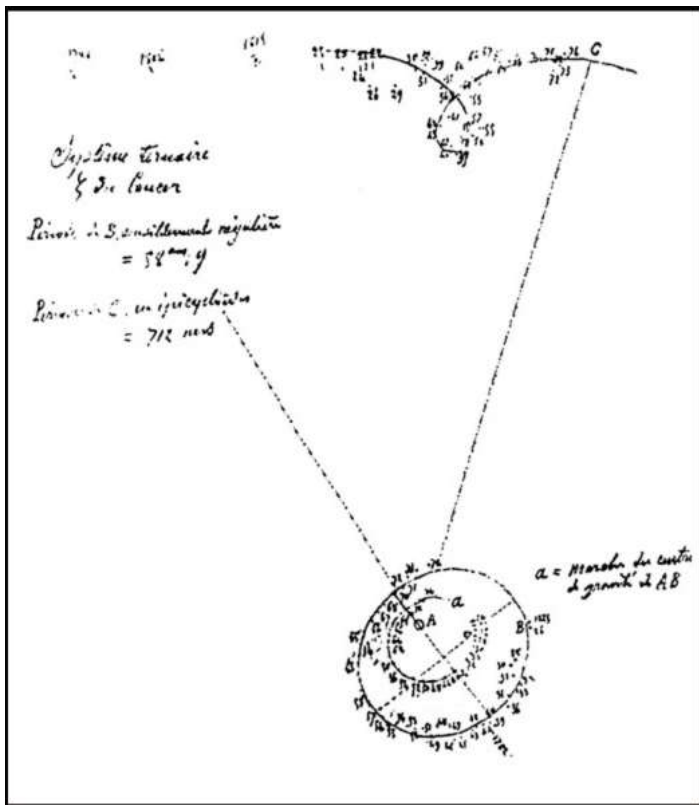


Figure 4 : dessin des trajectoires des composantes du système ζ Cnc par FLAMMARION envoyé à l'Académie des Sciences en 1874

L'étoile C accomplit sa translation autour du centre de gravité de AB, lequel centre se déplaçant suivant la courbe fermée indiquée sur la figure fait décrire à C le long de son orbite une courbe analogue, comme si l'étoile s'était rattachée à ce centre par une règle rigide.

L'orbite de C se compose ainsi de boucles successives et s'accomplit en 712 ans.

Les deux orbites sont à peu près entre elle comme celles d'Uranus et Jupiter. Cette marche en épicycloïdes est le fait nouveau et capital qui résulte de la comparaison de toutes les observations que j'ai pu réunir ».

Sur le dessin (Fig. 4), il est noté :

AB : P = 58,9 ans et AC : P = 712 ans

Il affina ses calculs dans son catalogue, en 1878 :

AB : P = 60,45 ans et AC : P = 772 ans

La copie du Russe est meilleure. Otto Wilhelm STRUVE, en 9 pages, présente les observations de son père : 26 mesures de AB et 27 mesures de AB/2-C, et les siennes : 90 mesures de AB et 84 mesures de AB/2-C. Les mesures y sont discutées et des propositions d'orbites en sont déduites et expliquées et une analyse détaillée du système est développée et des suppositions de résolution sont proposées. Il étudie avec précision les observations et conclut en supposant la présence d'un quatrième corps, compagnon de l'étoile C, décrivant autour de cette dernière une orbite relative ayant pour rayon 0,3" de degré, dans une période de 20 ans. Bien entendu, il ne cite FLAMMARION en aucun moment.

De 1876 à 1878 Camille FLAMMARION observe les étoiles doubles avec le grand réfracteur de 38cm de diamètre et 8,83 m de distance focale, de la Tour de l'Est de l'observatoire de Paris, et en août 1878, il publie le fruit de son travail : « Catalogue des étoiles doubles et multiples en mouvement relatif certain ». En 1882, il écrit dans son livre « Les étoiles et les curiosités du ciel » : « Pour moi, je ne regarde jamais cette toile qui scintille d'une calme lumière dans l'alignement de Castor et Pollux, sans m'intéresser à

ces balancements mystérieux et sans rêver au calendrier fantastique de ce lointain univers ».

En 1887, Vasily d'ENGELHARDT (1828-1915) et en 1913, Giorgio ABETTI (1882-1982), ajoutent 4 composantes (3+1) qui forment 6 systèmes cités dans le WDS sous l'identifiant 08122+1739 de STF 1196. Compte tenu de leur éloignement de ζ Cancri, ils ne sont pas considérés dans la présente étude.

À la poursuite du quatrième corps

En 1888, Hugo von SEELIGER (1849-1924) observe au Sternwarte von München avec le réfracteur de 10,5 Zoll (28,4cm) de diamètre et de 15 Füßen (4,87m) avec un pouvoir séparateur $\rho = 0,42''$. Il calcule l'orbite de AB sans tenir compte du compagnon C et trouve : $a = 0,85''$ et $P = 60$ ans

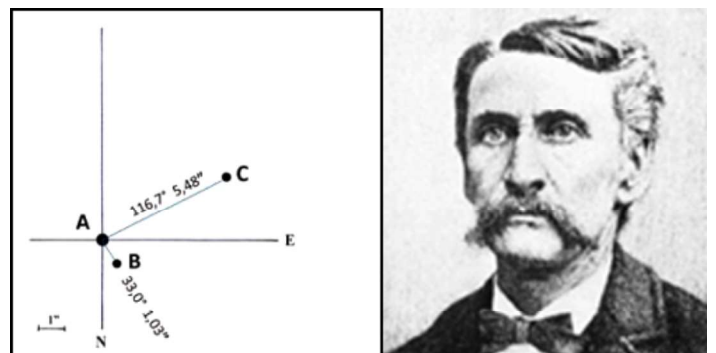
Il constate que le compagnon C n'a pratiquement pas d'action sur les éléments orbitaux de AB, et le barycentre ne diffère pas du milieu de la distance entre A et B. Le mouvement du compagnon C rapporté à A donne une séparation $\rho = 5,44''$ et une période $P = 706$ ans.



Portrait de Hugo von SEELIGER

Par contre, le compagnon C parcourt cette orbite avec un mouvement onduleux, donnant les paramètres orbitaux suivants : demi grand axe de l'orbite $a = 0,22''$, période de révolution P de 17,6 ans et une excentricité de l'orbite $e = 0,111$, avec un passage au périastre $T = 1860,13$.

Il conclut que les irrégularités apparentes dans le mouvement de C seraient expliquées par une quatrième étoile sombre D.



Depuis 1888, Sherburne Wesley BURNHAM (1839-1921) travaille au Lick Observatory, au Mont Hamilton, USA. Il observe avec le grand réfracteur de 91cm de diamètre et de 17,60m de distance focale. En février et mars 1892, il mesure les paramètres de ζ Cancri et obtient :

• 1892,17 AB $\theta = 33,0^\circ$ $\rho = 1,03''$

• 1892,14 AC $\theta = 116,7^\circ$ $\rho = 5,48''$

Le 9 février 1894, il reçoit la Médaille d'Or de la Royal

Astronomical Society : « *For his Discoveries and Measurements of Double Stars* ».

En 1906, pour vérifier le mouvement du compagnon C, il mesure sa position par rapport à une étoile extérieure au système. Les positions observées (Fig. 5) donnent un mouvement rectiligne. BURNHAM nie la réalité des irrégularités du mouvement de C et les attribue à des erreurs d'observations et note avec quelque perfidie : « *On peut toujours arranger des erreurs pour en tirer quelque chose* ».

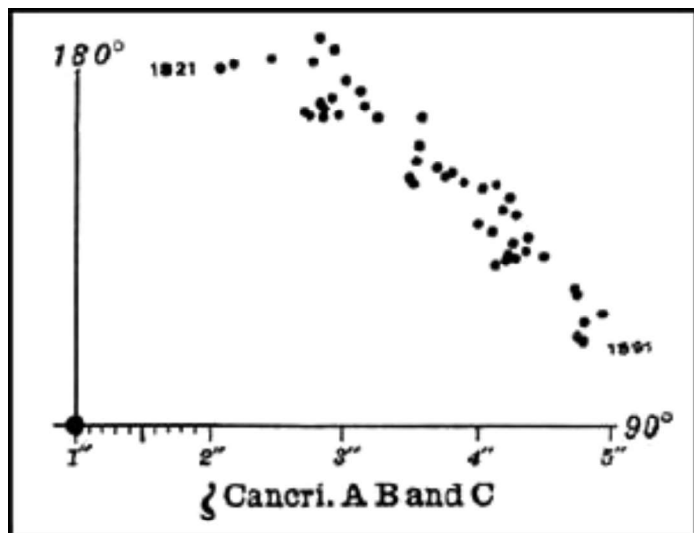


Figure 5 : positions de la composante C reportées par BURNHAM en 1906



En 1933, Maud Worcester MAKEMSON (1891-1977), à la suite des travaux d'Hugo von SEELIGER, étudie le système ζ Cancri et son mystérieux corps sombre. Pour les calculs d'orbite, elle utilise la méthode de Thorvald Nicolai THIELE (1838-1910) et se base sur les mesures publiées par William August DOBERCK (1852-1941) et les combinaisons figurant dans l'ADS à la page 554, à savoir : AB, AC, AB/2-C, BC, AB-D, CD. Elle appelle c (petit c) le compagnon sombre de C. Pour rester homogène avec les écrits précédents, nous l'appellerons D, donc Cc = CD. Elle donne les résultats suivants :

Le système AB :

- Masse $M = 2,177 M_{\odot}$
- Demi grand-axe de l'orbite $a = 0,949'' = 19,77 \text{ua}$
- Période $P = 59,6 \text{ ans}$ (\approx Soleil à Uranus*)

Le système CD :

- Masse $M = 0,386 M_{\odot}$
- Demi grand-axe de l'orbite $a = 0,236'' = 4,92 \text{ua}$
- Période $P = 17,64 \text{ ans}$ (\approx Soleil à Jupiter*)

*Résultats qui confirment ceux de FLAMMARION donnés dans son pli cacheté.

Pour le système AB-CD, c'est-à-dire CD tournant autour de AB, elle donne les éléments orbitaux : $a = 7,285'' = 151,8 \text{ua}$ avec le périastre à 104 ua et l'apoastre à 199 ua $P = 1137 \text{ ans}$ avec passage au périastre $T = 1871,6$ L'ensemble du système ABCD aurait une masse $M = 2,56 M_{\odot}$ (selon MAB+MCD) ou $M = 2,73 M_{\odot}$ (selon le court arc de l'orbite AB-CD).

En 1938, cela fait déjà 5 années que Paul BAIZE (1901-1995) observe avec le petit équatorial de la Tour de l'Ouest de l'observatoire de Paris. Avec un diamètre de 30,5cm et une distance focale de 5,25 m, cet instrument offre une résolution ρ d'environ 0,40". Médecin pédiatre, il s'intéressa aux étoiles doubles depuis son plus jeune âge et son travail sur les étoiles doubles attira l'attention d'Ernest Benjamin ESCLAGON (1876-1954), alors directeur de l'observatoire de Paris qui lui permit d'utiliser ce prodigieux instrument pour un amateur.



Portrait de Paul BAIZE

BAIZE montre que BURNHAM a tort avec sa réflexion sur les irrégularités (Fig. 6). Il donne une des causes possibles des irrégularités sur les mesures. « *La principale source d'erreurs tient à ce que les observateurs n'indiquent pas toujours avec exactitude s'ils mesurent AC ou bien BC, ou bien encore C rapporté milieu de AB. Cependant que l'on considère les mesures de AC ou de AB/2 C, les irrégularités périodiques dans la marche de C persistent, et l'on ne peut aujourd'hui douter sérieusement de leur existence* ».

En 1938, 249 (1er avril), il mesure :

- AB : $\theta = 99,3^{\circ}$ et $\rho = 0,76''$ - AB jaune clair
- AC : $\theta = 100,9^{\circ}$ et $\rho = 5,81''$ - C jaune + foncé
- BC : $\theta = 101,4^{\circ}$ et $\rho = 4,99''$

Il confirme les études de SEELIGER et fait la remarque que les trois étoiles sont alignées.

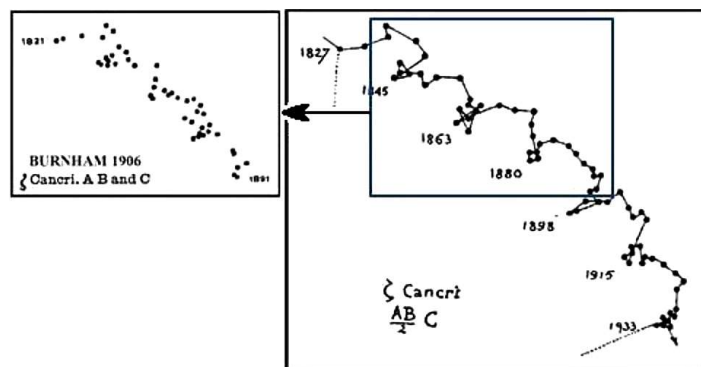


Figure 6 : positions de la composante C reportées par Paul BAIZE

Évocation d'une seconde binaire serrée

En 1949, Peter van de KAMP (1901-1995), directeur de l'observatoire Sproul, s'intéresse aux perturbations de l'orbite C qui lui apparaissent établies hors de tout doute. Il observe avec le réfracteur de 61cm de diamètre et 10,98m de distance focale,

avec un pouvoir de résolution p de $0,20''$. Il reprend l'étude de ζ Cancri. Le but est de voir quels renseignements peuvent être obtenus sur les masses de C et D à partir de l'orbite observée de C. Les observations visuelles observées sont censées se référer au centre du système CD, l'orbite de ce photo-centre est supposée similaire à l'orbite relative de CD.



Portrait de Peter Van de KAMP

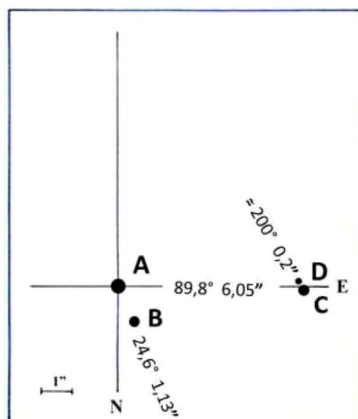
Pour la valeur adoptée d'une parallaxe de $0,039''$, la valeur linéaire du demi grand axe est de $6,05$ ua. Tant que le compagnon D demeure invisible nous ne pouvons pas connaître la valeur du demi grand axe de l'orbite relative de C et D.

Toutefois, elle peut être estimée en faisant des hypothèses raisonnables sur la somme des masses. Puisque C est une étoile de type G0 sur la séquence principale, la masse du système CD est susceptible d'être supérieure à la masse du Soleil. Pour affiner le choix, il suppose que la masse de C soit égale à la masse du Soleil, $M+m$ donnerait $2,7 M_{\odot}$ et $1,7 M_{\odot}$, le demi grand axe de l'orbite relative serait alors de $9,4$ ua soit $0,37''$. Il conclut à la présence effective d'un compagnon D et d'une magnitude deux à trois fois plus pâle que C.

C'est Peter van de KAMP qui a suggéré pour la première fois que le composant invisible D de ζ Cnc pourrait être une naine blanche et même une binaire, ce qui ferait de ζ Cnc un système quintuple.

Charles GASTEYER (1927-1978) travaille au Dearborn Observatory, Evanston, Illinois, USA. En 1954, à partir d'observations photographiques réalisées depuis 1914, et ses propres mesures, il donne les résultats suivants, et il nomme D le compagnon de C. :

- **AB : $\theta = 24,6^{\circ}$ et $p = 1,13''$**
- **AC : $\theta = 89,8^{\circ}$ et $p = 6,05''$**



Il confirme l'hypothèse de Peter van de KAMP que D serait une naine blanche. Ce compagnon serait de mgv de 8 à 10 et à $0,2''$ de C. Il détermine les différences de magnitudes, les orbites et les masses des différentes combinaisons :

• **différences de magnitude :**

- AB = Δm 0,3
- BC = Δm 0,2
- AB-C = Δm 1,1

• **orbites :**

AB :	P = 59,7 ans	e = 0,32	T = 1930
AB-C :	P = 1150 ans	e = 0,26	T = 1960
CD :	P = 17,5 ans	e = 0,11	T = 1944

• **masses :**

- MA = $0,99 M_{\odot}$
- MB = $0,88 M_{\odot}$
- MC = $0,90 M_{\odot}$
- MD = $0,90 M_{\odot}$

Avec l'ère de l'interférométrie appliquée aux grands télescopes, les astronomes disposent de puissants moyens pour observer les étoiles doubles très serrées. En vain, à l'observatoire de Kitt Peak (Kitt Peak National Observatory ou KPNO), près de Tucson en Arizona, USA, avec le télescope Mayall de 4m de diamètre, ils n'ont jamais rien décelé malgré de nombreuses tentatives qui s'échelonnent de 1974 à 1990.

Simultanément, la vitesse radiale de ce système est surveillée dans le but d'observer le couple CD comme binaire spectroscopique. En 1975, **Helmut Arthur ABT** (1925 -) trouve bien une variation de vitesse du compagnon D durant les 17,5 années de période, mais il juge ses données insuffisantes pour en tirer des éléments spectroscopiques.

En 1983, **Donald William McCARTHY Jr** annonce la détection du fameux compagnon de C, par l'interférométrie des tavelures en infrarouge. Il présente des résultats obtenus avec les télescopes Bok de 2,3 m et Mayall de 4 m des observatoires Stewart et Kitt Peak en Arizona. Le compagnon aurait été décelé à la longueur d'onde de $2,2 \mu m$ et à seulement 10° de la position angulaire prédite, et avec une séparation de $0,34''$ de l'étoile C, position prédite par Otto STRUVE en 1874. La masse de ce corps D serait de 1,25 masse solaire, soit un peu plus fort que celle calculée par l'astrométrie.

Problème résolu en astrométrie, mais non en astrophysique.

Wulff Dieter HEINTZ (1930-2006) a été une des figures géantes dans l'astronomie des étoiles doubles pendant de nombreuses décennies. Il reste le plus grand contributeur privilégié d'orbites pour le sixième catalogue d'étoiles binaires visuelles. Il travaille au Sproul Observatory, Swarthmore, Pennsylvanie, USA, et il observe avec le réfracteur qu'a utilisé Peter van de Kamp avant lui.



Portrait de Wulff Dieter HEINTZ

Il poursuit l'étude et les discussions sur ζ Cancri, système très complexe qui se compose d'une paire visuelle AB (magnitudes 5,6-6,0 classe spectrale F8 V) et d'une étoile C éloignée à 6" (magnitude 6,3 classe spectrale G0 V) avec un composant D non résolu sur une orbite de 17 ans.

La période de CD autour de AB est d'environ 1100 ans et l'épicycle de C a été observé neuf fois. L'objet est inhabituel par les quatre masses presque égales.

La figure 7 représente le système de ζ Cancri soumis à l'étude de W. D. HEINTZ.

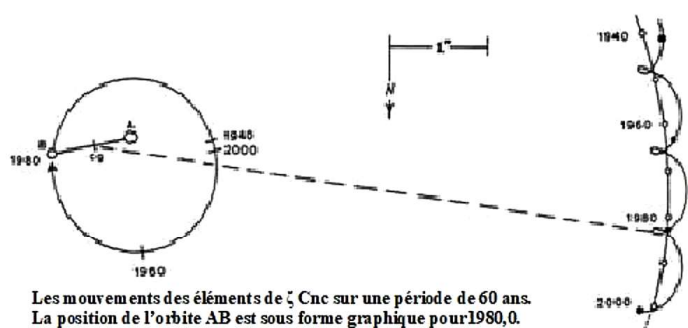


Figure 7 : les orbites selon Heintz

Pour son étude, datée de 1993, il a opté pour quelques simplifications :

- l'orbite de CD est assez petite pour ne pas être sensiblement perturbée.
- les masses de C et D étant presque égales, CD peut être approximativement considéré comme un seul corps agissant sur l'orbite de AB.

Pour accomplir cette étude, il dispose de 3000 observations visuelles sur 170 ans de la paire AB, et quelques mesures speckle récentes. Les positions de C proviennent également de nombreuses observations visuelles et photographiques, de 135 plaques de parallaxe du réfracteur de Sproul réparties sur 69 ans et des mesures avec quatre étoiles de référence.

La parallaxe adoptée est $0,045'' \pm 0,002$.

De nombreuses mesures visuelles, en particulier dans les petits télescopes, sont enregistrées sous forme de AB/2-C, sans préciser exactement le point de référence, comme le centre géométrique ou le centre lumineux de AB. Avec le réfracteur de 61cm de diamètre du Sproul Observatory il mesure :

- **1992,11 AB : $\theta = 149,6''$ $\rho = 0,66''$**
- **1992,12 AB-C : $\theta = 78,5''$ $\rho = 6,43''$**

En 1996, il donne :

• **les éléments orbitaux :**

CD : $P = 19,5$ a = $0,3728''$ $e = 0,5967$ $T = 1748$

• **les masses solaires :**

A = $1,11 M_{\odot}$
 B = $1,00 M_{\odot}$
 C = $0,99 M_{\odot}$
 D = $0,93 M_{\odot}$

Ce qui est en désaccord avec le rapport de masse des étoiles simples de classe G et M.

• **Magnitude visuelle et type spectral :**

mgv A = 5,6 F8V - mgv B = 6,0 F8V - mgv C = 6,2 G0V

Ses travaux le conduisent à formuler que D serait une naine blanche massive

John Barrie HUTCHINGS (1941 -) est un astronome à l'Herzberg Institute of Astro-physics, National Research Council of Canada à Victoria, en Colombie Britannique. **Roger Francis GRIFFIN** (1936 -) est astronome à l'observatoire de Cambridge dans l'Est de l'Angleterre.

Dans leur publication, après avoir rappelé ce qui est connu du système ζ Cancri, ils se posent la question principale restée en suspens : quelle est la nature du compagnon D de l'étoile C, puisque l'orbite de C a révélé un compagnon de masse comparable et une distance $\rho \approx 0,4''$? C'est clair qu'il doit être beaucoup plus pâle aux longueurs d'onde visibles. Ils suggèrent par conséquent que ce compagnon serait une naine blanche ou bien une paire serrée d'étoiles de classe M assez faible dans le visible. Cette binarité de D a déjà été évoquée par Peter van de KAMP.

En janvier et février 2000, ils observent à Hawaï avec le télescope de 3,58m (CFHT = Canada France Hawaï Telescope) équipé d'une caméra à optique adaptative, aux longueurs d'onde de 1,2 et 1,7 et 2,2 μ m. Ils mettent en évidence le compagnon D (Fig. 8) et ils concluent que les différences de couleur entre C et D montrent un type spectral G0 et M2.

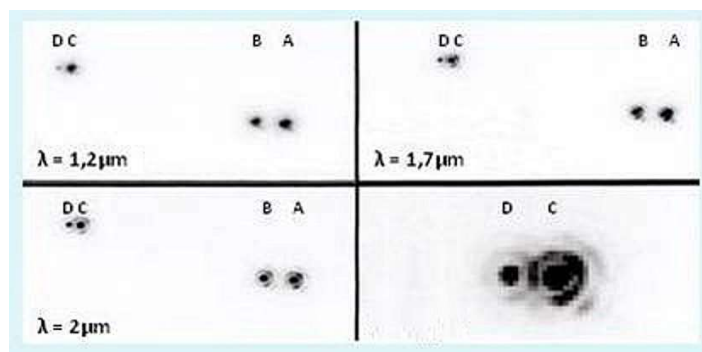


Figure 8 : image de ζ Cancri guidée sur l'étoile C. Le Nord est à 2,8° à gauche de la verticale et l'Est est à gauche.

Les filtres sont :

- J (en haut à gauche, 1,2 μ m),
- Continuum de Fe II (en haut à droite, 1,7 μ m),
- Bry (en bas à gauche, 2 μ m).

En bas à droite est le détail de la Paire CD avec filtre continuum Fe II. Séparation de CD de 0,32''.

En reprenant les masses solaires calculées par HEINTZ en 1996 (C = $0,99 M_{\odot}$ et D = $0,93 M_{\odot}$) le compagnon D serait une binaire non résolue de classe M. Le rapport de masse C/D ne concorde pas avec le rapport de masse des étoiles simples de type G et M de la séquence principale. Toutefois si D est un système binaire de deux étoiles proches de type spectral M2 la masse serait de $0,78 M_{\odot}$, et pour une paire de type M0, la masse serait de $0,94 M_{\odot}$.

HUTCHINGS renforce l'évocation d'Otto STRUVE par une orbite spectroscopique qu'il appelle HUT 1 Ca,Cb et dont les paramètres sont les suivants (Fig. 9) :

Système Ca-Cb :

- **a = 0,3728''**
- **P = 19,05 ans**
- **e = 0,088**
- **T = 1973,05**
- **grade 4.**

Les mesures en angle de position et de séparation, sont :

le 24 janvier 2000 :

- AB : $\theta = 83,69^\circ$ $\rho = 0,837''$
- Ca-Cb : $\theta = 86,2^\circ$ $\rho = 0,336''$

21 février 2000 :

- AB : $\theta = 82,97^\circ$ $\rho = 0,841''$
- Ca-Cb : $\theta = 84,5^\circ$ $\rho = 0,317''$

Toutes les étoiles sont à la même distance. L'utilisation de la magnitude absolue pour obtenir le Δm entre Ca et Cb ($M - M = 5 \log(D) - 5$ soit $m = M - 5 + 5 \log(D)$ avec D en parsecs) donne :

Δm dans le V ($0,5\mu m$) = 4,5 si Cb est de classe M2 et 3,5 si Cb est de classe M0 par rapport à G0

Δm dans le K ($2,2\mu m$) = 4,1 si Cb est de classe M2 et 3,5 si Cb est de classe M0 par rapport à G0

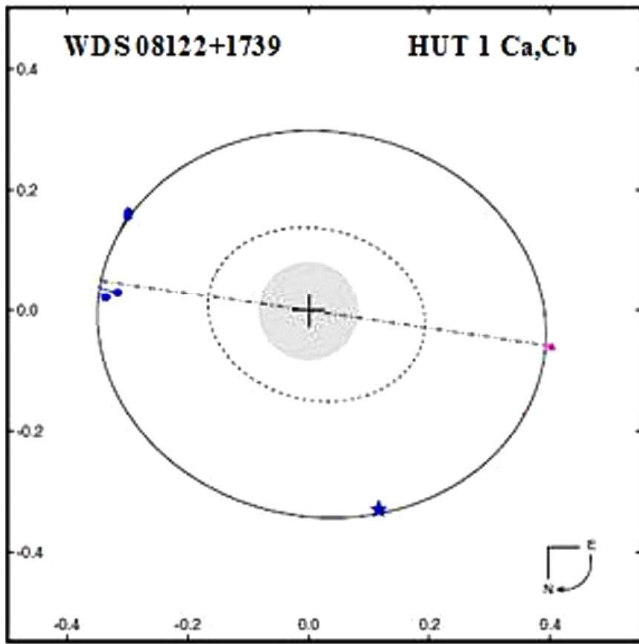


Figure 9 : Orbite spectroscopique de Ca-Cb

Mise en évidence d'une 5ème composante ?

À la même époque, **Andrea RICHICHI** (1962 -) travaille à l'European Southern Observatory à Garching, près de Munich, en Allemagne. Il observe à l'observatoire de Calar Alto. Jusqu'en 2018, cet observatoire était conjointement géré par le gouvernement régional d'Andalousie, Espagne, et l'Institut Max Planck d'Heidelberg en Allemagne. Maintenant c'est le Centro Astronomico Hispano en Andalucia, en Espagne.

Le 07 décembre 1998 avec le télescope de 1,23m, il constate un compagnon supplémentaire dans le système de ζ Cnc. Cette découverte a été faite lors d'une occultation par la Lune. Les résultats de ses travaux sont publiés en décembre 2000.

Un filtre de large bande K standard à $2,2\mu m$ et un diaphragme de $21''$ sont utilisés. Le signal est à la limite de détection, mais il est confirmé par trois méthodes d'analyse de données indépendantes. Ce sont :

- **Figure 10**, la méthode LSM utilise un modèle-ajustage de précision de moindres carrés pour s'adapter à la courbe de lumière obtenue par occultation. Dans le cas de binaire les paramètres obtenus sont la position et la luminosité de chaque composante. Le trait plein est le meilleur ajustement LSM pour une partie de la courbe de lumière qui englobe le système CD uniquement. Les points sont les données fournies par l'occultation lunaire LO.

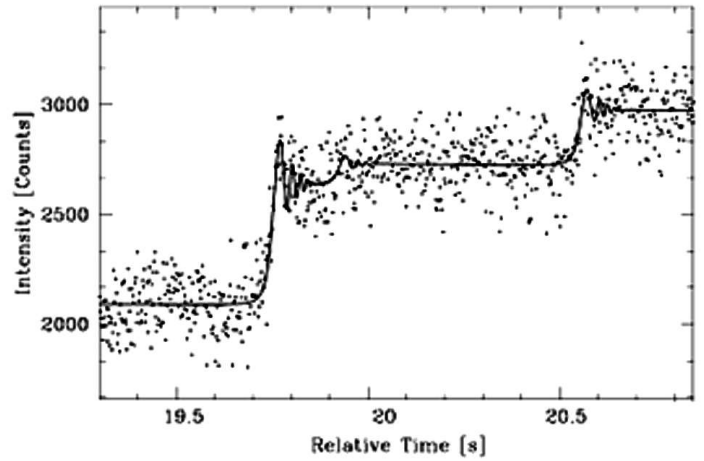


Figure 10 : profil de luminosité selon la méthode LSM

- **Figure 11**, la méthode BB, dite "Pont de Bolzano" consiste en une sorte d'intégration des données de calcul. Le tracé qui en résulte se compose idéalement en ligne segmentée. Les points où se produisent les changements de pente sont indicatifs de la présence de composantes stellaires (semblables à des points) et sont marqués par des étiquettes C, D, E.

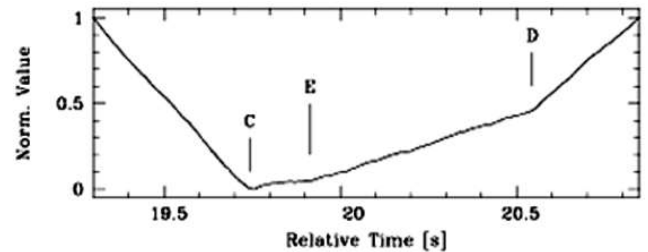


Figure 11 : profil de luminosité selon la méthode BB

- **Figure 12**, la méthode CAL est utilisée en l'absence d'informations sur le profil de luminosité de la source. Un profil initial est modifié par itération en utilisant un algorithme jusqu'à ce qu'un critère de convergence soit satisfait. Dans ce cas, les itérations ont cessé lorsque l'écart atteint a été le même que celui obtenu avec la méthode LSM.

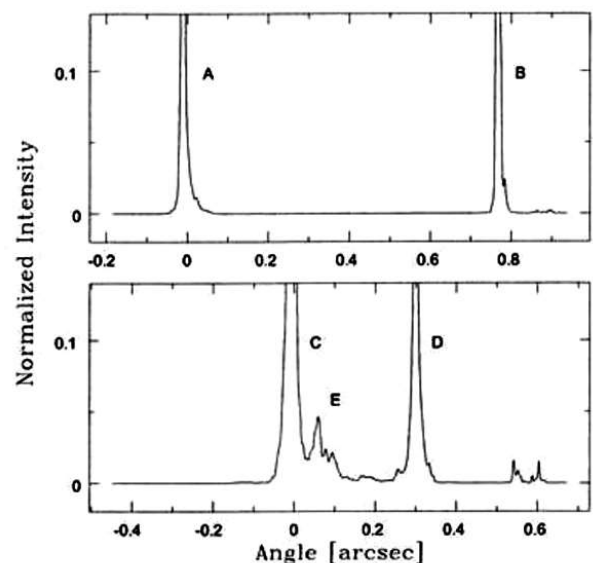


Figure 12 : partie supérieure : Profil de luminosité récupéré par la méthode de CAL pour une section de 3,2s de la courbe de lumière centrée sur la paire AB. Partie inférieure : Idem, avec la section à 3,2s centrée sur la paire CD. La pointe supplémentaire au-dessus du niveau de bruit, est révélatrice de la présence de E

Le point principal est que les 3 méthodes conduisent à la présence d'un compagnon supplémentaire appelé E par RICHICHI, dans le système CD.

Par les occultations lunaires :

CD = orbite en 17,5 ans

CE = orbite en ≈ 2 ans

1998,34 - HEINTZ

C-D $\theta = 116^\circ$ et $\rho = 0,32''$

2000,06 - HUTCHINGS-GRIFFIN

Ca-Cb $\theta = 86,2^\circ$ et $\rho = 0,336''$ (Ca-Cb = CD)

2000,10 HEINTZ

C-D $\theta = 91^\circ$ et $\rho = 0,37''$

2000,14 - HUTCHINGS-GRIFFIN

Ca-Cb $\theta = 84,5^\circ$ et $\rho = 0,317''$ (Ca-Cb = CD)

2000,04 - RICHICHI

(band K)

AB : $\theta = 99,3^\circ$ et $\rho = 0,7747'' \pm 0,0021$ m1 - m2 : 4,60 - 4,89

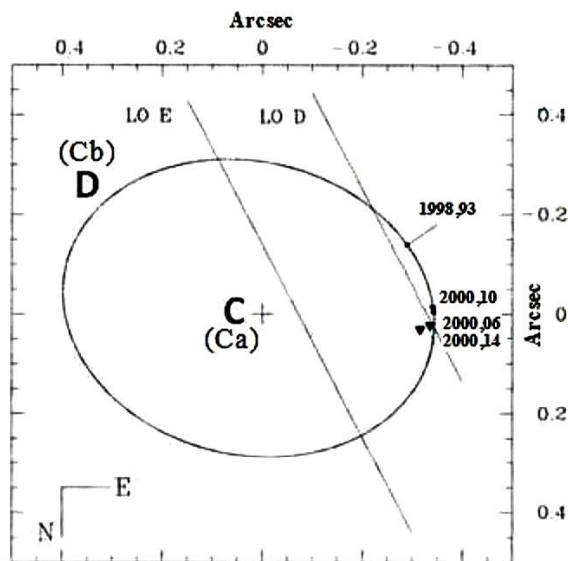
AC : $\theta = 114,0^\circ$ et $\rho = 5,0600'' \pm 0,019$ m1 - m2 : 4,60 - 5,15

Ca-Cb : $\theta = 117,3^\circ$ et $\rho = 0,2928'' \pm 0,0013$ m1 - m2 : 5,15 - 5,99

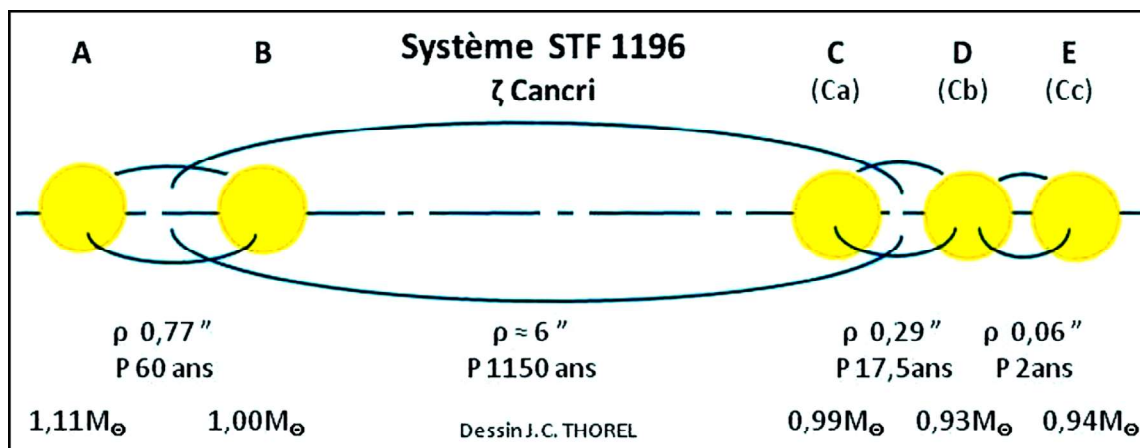
CE : $\theta = 117,3^\circ$ et $\rho = 0,0637'' \pm 0,006$ m1 - m2 : 5,15 - 7,02

Si E devait être beaucoup plus proche de C que de D, cela pourrait être une naine de classe M2 à M5 avec une période aussi courte que 2 ans environ.

Il ne faut pas confondre le compagnon E cité par Andrea RICHICHI avec celui de Vasily ENGELHARD recensé dans le WDS (ENH 1 AB, E et EF) situé à plus de 9 minutes de degré de ζ Cancri.



Orbite calculée de D autour de C.



Représentation graphique des combinaisons des cinq étoiles

En février 2008, **Jean-Claude THOREL** observe à l'observatoire de Nice, par bonnes nuits et images nettes, avec le réfracteur de 50cm de diamètre utile et de 7,501m de distance focale, équipé d'un micromètre à enregistrement électronique. Il mesure dzêta Cancri AB et AB-C. Il n'aperçoit pas le dédoublement de C, et compare ses observations avec les orbites calculées.

AB : orbite calculée par Staffan SÖDERHJELM

(Sod1999 - grade 1)

P = 60 ans - T = 1889,19

a = 0,862'' - e = 0,32

• **Calculé :** 2008,137 $\theta = 43,3^\circ$ $\rho = 1,03''$

• **Observé :** 2008,137 $\theta = 43,3^\circ$ $\rho = 1,12''$

• **Écart O-C :** $\theta = 0,0^\circ$ $\rho = +0,09''$

AB-C : orbite calculée par Wulff Dieter HEINTZ

(Hei 1996b de grade 4)

P = 1115 ans - T = 1970

a = 7.70'' - e = 0,34

• **Calculé :** 2008,137 $\theta = 69,2^\circ$ $\rho = 5,91''$

• **Observé :** 2008,137 $\theta = 68,1^\circ$ $\rho = 6,09''$

• **Écart O-C :** $\theta = -1,1^\circ$ $\rho = +0,18''$

Appellation de ζ Cnc dans les différentes publications

- **ζ Cnc** - Uranometria de Johann BAYER, 1603
- **16 Cnc** - Historia Coelestis Britannica de FLAMSTEED, 1725
- **ADS 6650** - New General Catalogue of Double stars within 120° of the North Pole de Robert Grant AITKEN, 1932
- **AGK3+17°867** - Astronomische Gesellschaft Katalog (Dritte), 1975
- **BD+18°1867** - Bonner Durchmusterung, 1862-1883
- **BDS 4477** - A General Catalogue of Double Stars within 121° of the North Pole de Sherburne Wesley BURNHAM, 1906
- **CCDM 08123+1738** - Catalogue des Composantes d'étoiles Doubles et Multiple 1994 et 2002.
- **GC 11142-11143** - General Catalogue of 33,342 Stars, Benjamin Boss, 1936.
- **HD 68257-68255-68256** - Henry Draper Catalogue of Stellar Spectra, 1918-1924
- **H I.24 et H III.19** - XII - Catalogue of double Stars, by M. HERSCHEL F.R.S. - The Philosophical Transactions of the Royal Society of London, vol. 72, 1782, pages 121 et 132.
- **HIP 40167** - HIPPARCOS Double and Multiple Systems Annex
- **HR 3208-3209-3210** - Harvard Revised Photometry Catalogue créé en 1908 par l'observatoire de Harvard.
- **SAO 97645-9764** - Smithsonian Astrophysical Observatory Star Catalogue.

- **Sh 90** - Observations of the Apparent Distances and Positions of 380 Double and Triple Stars, Made in the Years 1821, 1822 by SOUTH James et HERSCHEL John -The Philosophical Transactions of the Royal Society of London, vol. 114, 1824, p 115-116.
- **STF 1196** - Stellarum Duplicium et Multiplicium Mensuræ Micrometricæ. Petropoli, 1837 Friedrich Georg Wilhelm STRUVE
- **Tegmine** - Le nom propre Tegmine a été officialisé pour l'étoile **ζ Cancri A** par l'Union astronomique internationale le 12 septembre 2016.
- **WDS 08122+1729** - Washington Double Star catalogue maintained by the United States Naval Observatory.

Références bibliographiques

- **BAIZE Paul** - Système où l'existence d'un corps invisible est certaine - L'Astronomie, Société Astronomique de France, 1936, p 376
- **BAIZE Paul** - Mesures d'étoiles doubles faites à l'équatorial de 0,305 m de l'Observatoire de Paris- Journal des Observateurs, vol. 26, n° 7, p. 69, juillet 1943
- **BATTEN Alan** -The Lives of Wilhelm and Otto STRUVE - Reidel Publishing Company, Dordrech, Holland
- **BURNHAM Sherburne Wesley** - Double star observations made with L 36inch and L 12inch in Lick from August 1888 to June 1892 - Publications of the Lick Observatory of the University of California Vol. II, p 66, 1894
- **BURNHAM Sherburne Wesley** - For his Discoveries and Measurements of Double Stars - Memoirs of the Royal Astronomical Society, vol. LIII, p.309-1899
- **BURNHAM Sherburne Wesley** - A General Catalogue of Double Stars within 121° of the North Pole - 1906, The Carnegie Institution of Washington
- **COUTEAU Paul** - Les dessous d'un pli cacheté déposé par Camille FLAMMARION - La vie des Sciences - Comptes rendus, série générale, tome 7, 1990, n° 1, p. 81
- **FLAMMARION Camille** - Catalogue des Étoiles Doubles et Multiples en Mouvement Relatif Certain - pp 47/49, 1878 - Imprimeur-Libraire GAUTIER-VILLARS, Paris
- **FLAMMARION Camille** - Les étoiles et les Curiosité du Ciel - pp337/342, 1892 - Librairie MARPON et FLAMMARION
- **FLAMMARION Camille** - Mémoires Biographiques et Philosophiques d'un Astronome - 1911 - Ernest FLAMMARION éditeur
- **GASTEYER Charles** - The Quadruple system ζ Cancri - Astronomical Journal, vol. 59 Number 7 n° 1219 pp 242-250 August 1954
- **GRIFFIN Roger Francis** - Spectroscopic Binary Orbits from Photoelectric Radial Velocities - Paper 150 : ζ Cancri C - The Observatory, volume 120, n° 1154, February 2000.
- **HEINTZ Wulff Dieter** - Mikrometermessungen von Doppelsternen - Astronomische Nachrichten Band 285 Heft 5/6 pp 249/254 1960
- **HEINTZ Wulff Dieter** - Observations (3320) of 1150 double stars and 221 new double stars (HEI 610 to HEI

683) with L 61cm, L 91cm, T 60cm, T 100cm and T 91cm - XV - Astrophysical Journal Supplement Series, n° 83 p 362 December 1992

- **HEINTZ Wulff Dieter** - Observations of double stars and new pairs - XVII - 722 ** et new HEI 850 to HEI 900 with L 61cm - Astrophysical Journal Supplement Series, vol. 105-p. 475/480-August 1996
- **HEINTZ Wulff Dieter** - A Study of Multiple star System - ζ Cancri (ADS 6650) - Astronomical Journal, vol 111 n° 1-pp 408-411 January 1996
- **HUTCHINGS John Barrie** - Direct Observation of the Fourth Star in the ζ Cancri system - Publication of the Astronomical Society of the Pacific, n° 112, p 833-836, June 2000
- **KAMP Peter van de** - On the Mass of the Unseen Companion in ζ Cancri - Astronomical Journal, vol. 053-n° 07/1171-p. 207/209-June 1948
- **LEWIS Thomas** - Mesures of the Double Stars contained in the Mensuræ Micrometricæ of F.G.W. STRUVE - Memoirs of the Royal Astronomical Society, 1906
- **MAKEMSON Maud Worcester** - The Multiple System of Zeta Cancri - Astronomical Journal, vol. XLII n° 17/988 April 1933
- **RICHICHI Andrea** - An investigation of the multiple star Zet Cnc by a lunar occultation - Astronomy & Astrophysics, vol. 364-p. 225/231-September 2000
- **SEELIGER Hugo von** - Fortgesetzte untersuch, über das mehrfache system ζ Cancri- Abhandlungen der Akademie der Wissenschaften in München, 1888
- **SEELIGER Hugo von** - Bemerkung über Dzêta Cancri - Astronomische Nachrichten Band 128 n° 3051 p. 047. 1891
- **SEELIGER Hugo von** - Über das Mehrfache Sternsystem ζ Cancri - Astronomische Nachrichten Band 199 n° 4769 p. 273. 191
- **SOUTH James** - Observations of the Apparent Distances and Positions of 380 Double and Triple Stars, Made in the Years 1821, 1822, and 1823 - The Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1824, vol. III, page 115
- **SOUTH James** - Observations of the Apparent Distances and Positions of 458 Double and Triple Stars, Made in the Years 1823, 1824, and 1825; together with a re-examination of 36 stars of the same description, the distances and positions of which were communicated in a former Memoir - The Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1826, page 322
- **THOREL Jean-Claude** - Mesures de 61 étoiles doubles visuelles, 20ème série, avec L 52cm de Nice - Observations et Travaux, n° 72, page 17/20, mai 2009
- **STRUVE Otto** - Mesures micrométriques de l'étoile triple ζ Cancer - Comptes rendus hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences, tome 79 - juillet/août 1874, page 1463.



Jean-Claude Thorel

Invité scientifique à l'Observatoire de la Côte d'Azur, Jean-Claude est un observateur chevronné qui a produit plus de 6 000 mesures micrométriques d'étoiles doubles avec les grands réfracteurs de l'observatoire. Passionné d'histoire et habile dessinateur, il est aussi l'auteur d'ouvrages historiques et recueils de dessins

L'OBSERVATION DES ÉTOILES DE TYPES BINAIRES À ÉCLIPSES

ASPECTS PRATIQUES

Observation of Eclipsing Binary Stars - Practical aspects

Laurent Corp

AAVSO – GEOS – Commission Etoiles Doubles SAF
<http://www.astrosurf.com/lcorp/>
astro.laucorp@orange.fr



Résumé

Cet article a pour but d'expliquer comment observer les étoiles de types binaires à éclipses en décrivant les processus en mettre en œuvre, de la préparation des observations à l'envoi des données.

Abstract

This article aims to describe the different types of binary stars with eclipses, which are observable by amateurs and are part of a long-term monitoring.

Keywords: photometry, binaries: eclipsing



1 Introduction

Après avoir décrit les différents types de binaires à éclipses dans la Revue Etoiles Doubles n°1 [1], je vous propose maintenant de traiter des méthodes et outils à mettre en œuvre afin de réussir ses observations.

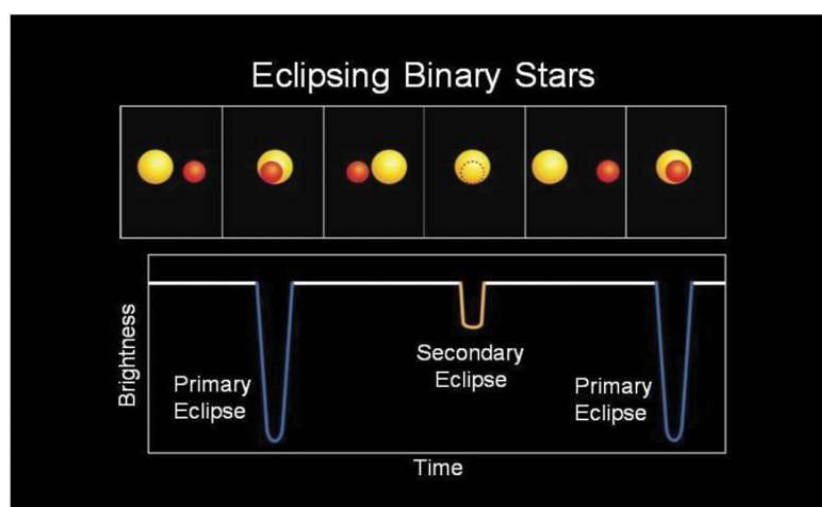
Nous allons passer en revue les 4 étapes essentielles :

La préparation : il est indispensable de savoir à quels instants vont se produire les minima et les maxima. Nous allons voir comment les rechercher,

L'acquisition : quelles sont les précautions à prendre afin de faire des images qui permettent d'enregistrer les instants des minima,

Le dépouillement : une fois l'acquisition de centaines d'images faite, un traitement est nécessaire afin d'obtenir une courbe de lumière,

L'envoi des données : après la réduction des images et l'obtention d'un jeu de données, il est très important de les diffuser. Nous verrons comment et à qui.



<http://kepler.nasa.gov/>

Figure 1 : Morphologie d'une courbe de lumière d'une binaire à éclipse

2 Rappels et prérequis

Une étoile binaire à éclipses est une étoile binaire dont le plan de révolution se trouve sensiblement sur la ligne de visée de l'observateur, les deux astres s'éclipsent ainsi mutuellement de façon périodique.

Bien que l'on puisse surveiller les variations de luminosité à l'oculaire de son instrument, il est quand même préférable d'utiliser une caméra (CCD ou CMOS) ou un appareil photo numérique afin de les enregistrer.

Il va de soi que pour s'adonner à ce genre de pratiques, la maîtrise de l'instrument doit être acquise, de la mise en station à la focalisation en passant par l'acquisition des images.

De la prédiction des minima à la mesure puis à l'interprétation des données, toutes les étapes sont importantes et requièrent le plus grand soin.

Il faut chercher impérativement à avoir des données de qualité plutôt que des quantités de données inexploitable.

3 Ephémérides

Les éphémérides permettent de déterminer l'instant des minima primaire et secondaire. Ils sont donnés par la formule suivante :

$$T = T_0 + P \times E$$

dans laquelle :

T_0 = Début de la phase en jour julien

P = Période en jours

E = Cycle : nombre sans unité représentant le nombre d'évènements – minima primaire ou secondaire

Chaque binaire à éclipses est caractérisée par les éléments ci-dessus. En revanche, il manque souvent un élément important : la durée du minima. Celle-ci est aussi un paramètre qui conditionne la mesure de l'instant du début du minima et la durée d'observation nécessaire.

Les prévisions de minima sont obtenues soit à l'aide de sites Internet dédiés qui fournissent des éphémérides d'éclipses en ligne soit à l'aide de logiciels spécialisés, pour lesquels le choix est assez restreint.

Une remarque très importante : les heures données par les différents sites internet ou logiciels sont fournies en Temps Universel (TU) ou en Temps Local. Il faut considérer ces prédictions comme une indication pour l'heure du minimum. Je conseille de travailler toujours en TU, une habitude à prendre dès aujourd'hui.

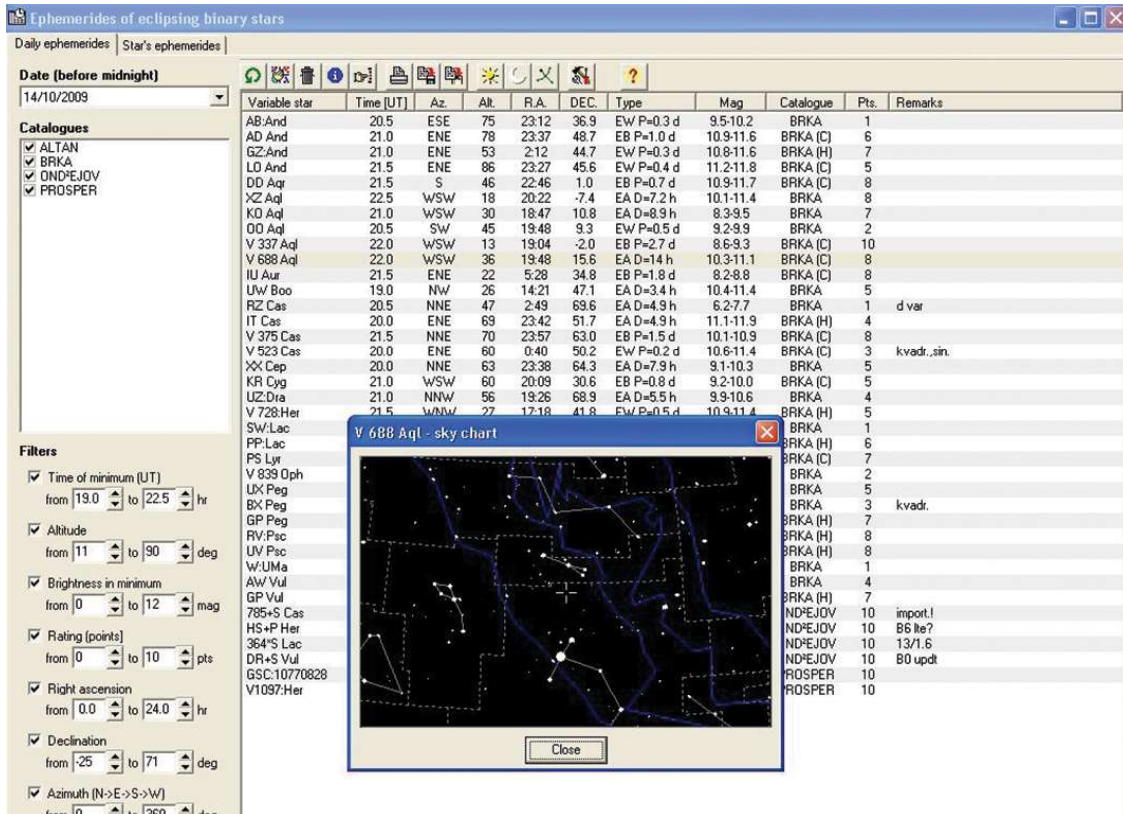


Figure 2 : Copie d'écran du logiciel EPHEMERIDES

3.1 Logiciel EPHEMERIDES

Ce logiciel écrit par David Motl [2], permet de faire des prédictions sur le terrain, même sans disposer d'une connexion internet (figure 2).

Il propose différents critères (magnitude, ascension droite, déclinaison, etc ...) et différents catalogues pour la sélection des étoiles à étudier.

Il est souvent très utile de constituer ses propres catalogues.

Un point important à noter est que les éphémérides sont indiquées à 30 minutes près.

3.2 Logiciel EBMIN 20

Ce logiciel est écrit par Bob Nelson [3], observateur assidu

de ce type d'étoiles. On notera que le temps indiqué est volontairement approximatif afin de ne pas influencer l'observateur.

3.3 Sites internet de prévision de minima

Le premier site proposé est celui de J.M. Kreiner, du Mt. Suhora Astronomical Observatory Cracow Pedagogical University [4].

Ce site présente les minima primaires et secondaires d'une étoile dont on connaît le nom et la constellation (figure 3) ainsi que le diagramme des O-C (figure 4).

Un diagramme des O-C représente la différence entre l'instant prévu du minima (théorique) et l'instant de son observation réelle. Chaque point sur la courbe représente un instant de

Light elements: HJD = 2452500.341 + E x 0.6289298	
Current JD 2459505.36053	
Current cycle (epoch) 11138	
Current orbital phase 0.99908	
Assumed eclipse duration : D= (in period unit)	
Computed times of minima :	
Date:	Time: Type: HJD:

17-10-2021 07:34	pri 2459504.73218
17-10-2021 15:07	sec 2459505.04665
17-10-2021 22:40	pri 2459505.36111
18-10-2021 06:12	sec 2459505.67558
18-10-2021 13:45	pri 2459505.99004
18-10-2021 21:18	sec 2459506.30451
19-10-2021 04:51	pri 2459506.61897
19-10-2021 12:24	sec 2459506.93344
19-10-2021 19:56	pri 2459507.24790
20-10-2021 03:29	sec 2459507.56237
20-10-2021 11:02	pri 2459507.87683
20-10-2021 18:35	sec 2459508.19130
21-10-2021 02:08	pri 2459508.50576

Figure 3 : Ephémérides des minima primaires et secondaires d'une binaire à éclipses

Source : <http://www.as.up.krakow.pl/ephem>

minima.

Même si les heures sont indiquées de manière très précise, là aussi il faut considérer que celles-ci présentent une marge d'erreur.

Il existe aussi le site Eclipsing Binary Ephemeris Generator [5]. Ce site géré par Shawn Dvorak prend en compte plusieurs catalogues et les prévisions tiennent compte de la latitude, de la longitude, de la date et l'heure d'observation. Il est aussi possible de filtrer les résultats sur des critères de déclinaisons (maximales et minimales) et de magnitudes (maximales et minimales.)

4 Comment choisir sa cible ?

Le choix de l'étoile à observer dépend en premier lieu du temps disponible pour être opérationnel. En effet, le temps d'installation et de pointage sera beaucoup plus court pour un observateur qui possède un observatoire dans son jardin que pour un observateur itinérant qui doit faire deux heures de trajet et qui aura besoin d'une bonne heure supplémentaire avant d'être fin prêt.

Le choix dépend également des conditions d'observation (pollution lumineuse), de l'expérience de l'observateur (pour les premières mesures, on choisira des étoiles faciles à repérer et relativement lumineuses), des performances du matériel utilisé (caméra, télescope, monture) et du temps disponible. Pour obtenir des résultats probants, l'idéal est de commencer les mesures 1h30 avant le minima et de les continuer jusqu'à 1h30 après.

Pour celui qui n'a jamais mesuré ce type d'étoiles, je conseille de choisir des cibles dont l'écart en magnitude entre le minima et le maxima est important (plus d'une demie magnitude) afin d'avoir une courbe de lumière facile à construire.

Il est possible aussi de choisir une étoile qui a été observée depuis peu de temps afin de comparer les mesures trouvées à des mesures précédentes effectuées par d'autres.

Quand enfin la cible est choisie, il faut se procurer la carte de référence et la table photométrique qui sont téléchargeables sur le site internet de l'AAVSO [6].

Les cartes indiquent le nom de l'étoile, le numéro de la carte, le champ, l'orientation, les magnitudes mini et maxi, le type d'étoile ainsi que son type spectral (figure 5).

Les chiffres portés à côté des étoiles représentent les magnitudes des étoiles de comparaison. Les chiffres ne sont

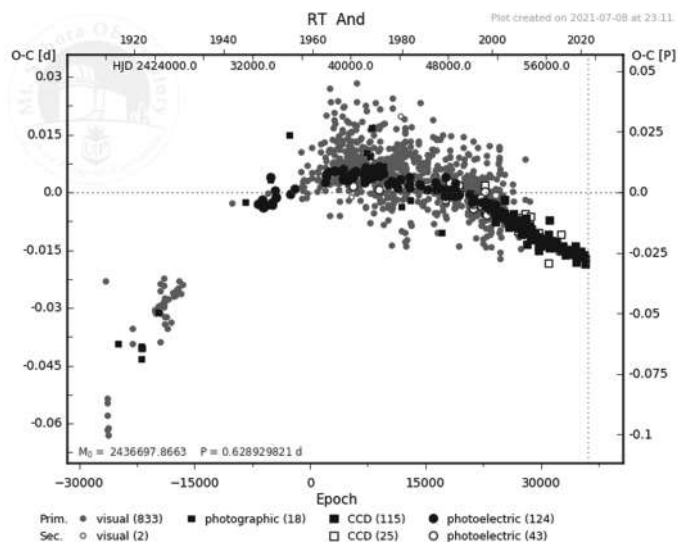


Figure 4 : Diagramme O-C de la binaire à éclipses RT Andromède
Source : <https://www.as.up.krakow.pl/minicalc/ANDRT.HTM>

pas séparés par des virgules ou des points pour éviter toute confusion. La carte photométrique indique les magnitudes des étoiles de comparaison avec de multiples bandes mais les plus utilisées sont U, B, V et R. Les autres ne sont pas nécessaires.

Une autre chose importante à vérifier sur la carte ou alors avec un logiciel de cartographie (tel que GUIDE 9, C2A, Carte du Ciel, Stellarium...) est que l'étoile à mesurer ne soit pas « polluée » par d'autres étoiles à proximité car il y aura alors le risque de mesurer le flux de l'étoile cible cumulé avec celui de l'étoile voisine.

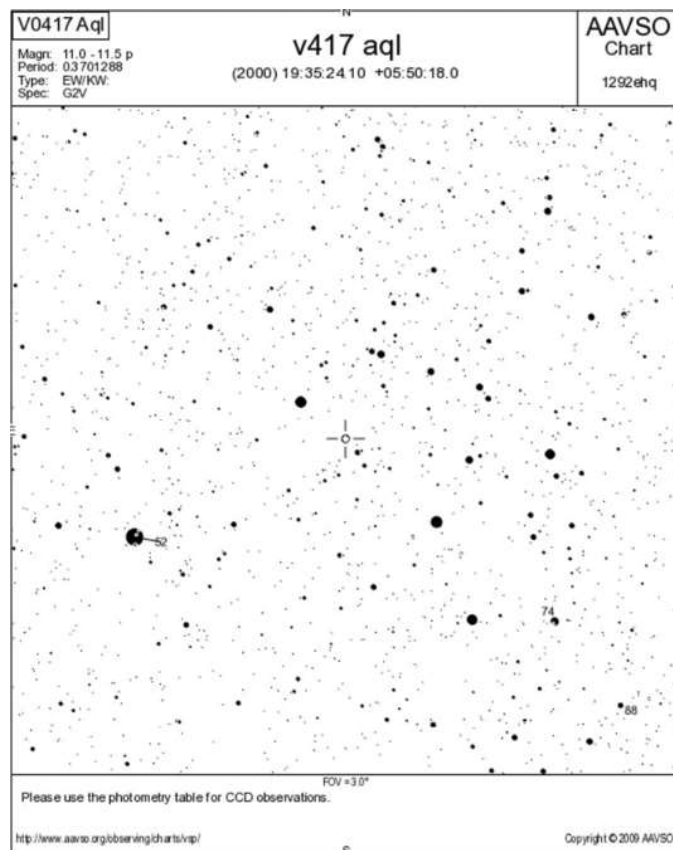


Figure 5 : Carte de champ de V417 Aql ©AAVSO

5 Choix du matériel

Je ne traiterai pas ici des réglages liés à l'utilisation du télescope : mise en station, collimation, guidage... Leur maîtrise est bien sûr nécessaire afin de réaliser avec succès vos images.

L'objectif est d'arriver à faire des mesures avec une précision de l'ordre du centième de magnitude. Seules les techniques d'imagerie numérique permettent d'atteindre cette précision. Il sera possible d'utiliser un appareil photo numérique ou une caméra CCD ou CMOS.

Concernant les optiques, de nombreuses combinaisons sont possibles. Un simple appareil photo numérique muni d'un téléobjectif de 200mm posé sur un trépied et le tout sans suivi est utilisable. Dans ce cas, le temps de pose ne devra pas dépasser 2 secondes avec un réglage à 800 ISO. Il est possible également d'utiliser une caméra avec un simple objectif de 135mm sur une monture motorisée.

Bien entendu toutes sortes d'instruments peuvent être utilisés (des Newtons aux Schmidt Cassegrain en passant par les lunettes), mais le champ couvert avec des instruments de plus longue distance focale sera beaucoup plus petit qu'avec un objectif de 135 à 300mm de distance focale et les étoiles de comparaison seront quelquefois plus difficiles à trouver.

Concernant l'utilisation d'une caméra CCD, voici les paramètres qui doivent être contrôlés : celle-ci doit être monochrome, thermo-régulée et de préférence Non AntiBleeding.

L'utilisation des télescopes on-line disponibles sur internet soit gratuitement, soit par abonnement est possible, à la condition d'obtenir le nombre d'images voulues sur la durée souhaitée. Il n'est pas acceptable que la prise d'images intervienne dans une période aléatoire. Il n'est pas trop pénalisant d'avoir des mesures échelonnées dans le temps pour suivre une étoile à grande période. Mais dans le cas d'une étoile à courte période (moins de 8h), il y aura une perte de points de mesures et le minima risque fort de ne pas être mesurable.

Certains organismes ou observatoires demandent à ce que les observations soient réalisées avec un filtre soit V (vert), soit R (rouge) de type photométrique. Il existe plusieurs types de filtres sur le marché, les plus anciens sont les filtres photométriques de type JOHNSON-COUSINS (figure 6).

Les filtres de type SLOAN, dont la bande passante n'est pas du tout la même, sont aussi utilisables (figure 7).

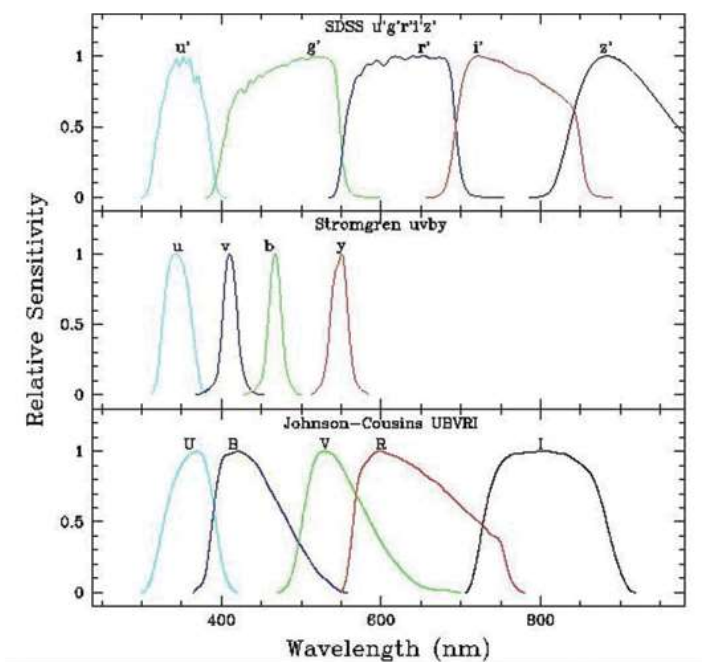


Figure 6: Transmission spectrale de différents filtres

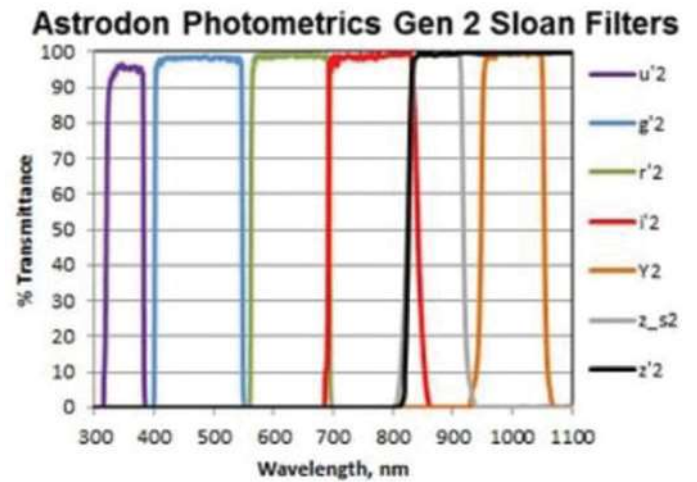


Figure 7: Transmission spectrale des filtres de type SLOAN © Astrodon

6 Acquisition

Une fois la cible et le matériel définis, je vais énoncer quelques conseils pour la phase d'acquisition d'images.

Sur le terrain, il faut veiller à ce que celles-ci fonctionnent correctement, c'est à dire que les étoiles ne soient pas saturées quels que soient les capteurs utilisés. Il faut aussi obtenir un rapport signal sur bruit (SNR) suffisant. Le SNR que vous devez obtenir doit être égal ou supérieur à 50. Le logiciel d'acquisition doit fournir cette valeur instantanément de manière à vérifier que cette condition soit remplie au cours de l'ensemble de la séquence d'acquisition.

Le logiciel doit pouvoir gérer le filtrage de manière automatique si vous en utilisez un, c'est à dire de faire des poses en V et R en alternance. Si cela n'est pas possible d'origine, il faudra alors programmer un script spécifique afin que cela soit réalisable.

Pour que les mesures soient exploitables, il faut également que l'ordinateur soit réglé de manière précise sur l'heure locale ou TU. Plusieurs logiciels peuvent remplir cette fonction et sont disponibles sur le WEB. Ils permettent de maintenir à l'heure votre ordinateur via une connexion Internet. Le logiciel NetTime [7] remplit pleinement cette fonction.

Sans disposer d'une telle connexion, il est impératif de s'assurer que l'ordinateur soit précisément à l'heure avant la première image. Il est nécessaire de disposer d'une précision inférieure à la seconde durant l'acquisition des images, l'horodatage étant stocké dans l'entête des fichiers images.

Dès que tous les réglages et contrôles sont terminés, il est temps de lancer une « time-serie », c'est à dire l'acquisition d'une série d'images. Je conseille de travailler en continu, en effectuant par exemple 300 poses de 30 secondes sans interruption, plutôt que 150 poses de 30 secondes espacées de 30 secondes.

Suivant la saison et l'étoile choisie, il sera possible de faire des mesures sur une à trois étoiles par nuit au maximum pour rechercher exclusivement des minima mais il est souvent préférable d'avoir le plus de mesures possibles. Cela permettra ensuite d'aborder la modélisation 3D de ce type d'étoiles, mais c'est une autre histoire.

En effet, il faut avant tout privilégier la qualité à la quantité, le résultat final en dépend.

Certains professionnels souhaitent avoir la totalité de la phase plutôt que le minimum, dans ce cas il n'y aura qu'un seul objectif : une seule étoile durant toute la nuit et les nuits suivantes si besoin.

Bien entendu pour faire des mesures précises, il faut impérativement faire de bonnes images de calibration

(offset, darks et flats). Le prétraitement des images sera fait conformément aux règles de l'art et bien sûr il est totalement proscrit de faire un quelconque traitement «cosmétique» des images prétraitées.

Il ne faut surtout pas utiliser un logiciel de retouche d'image qui rendrait les images plus flatteuses à votre regard, car les résultats finaux en seraient faussés.

Les images de calibration influent sur le résultat final des mesures, il est donc indispensable de porter un grand soin à leurs réalisations.

Durant la première heure d'acquisition, il est souhaitable de faire une mini réduction des données pour savoir si une baisse de magnitude est constatée et d'avoir ainsi une courbe de lumière montrant effectivement un minima.

La sauvegarde des données est également un autre point important. Il n'est pas rare au cours d'une nuit de se retrouver avec plusieurs centaines d'images. Il est donc indispensable de les sauvegarder sur plusieurs supports informatiques et de les archiver.

Il se peut que quelques années après l'envoi des données, des images de la cible observée soient redemandées ou simplement vérifiées.

7 Dépouillement

La carte téléchargée sur le site de l'AAVSO comporte des étoiles de comparaison. Elles sont nécessaires pour mesurer la magnitude de l'étoile cible. Pour prendre la bonne valeur de magnitude de l'étoile de comparaison, la table photométrique qui est associée à la carte doit être utilisée.

La notice de votre logiciel vous indiquera comment extraire les données photométriques de vos propres images.

Le principe général de la méthode utilisée est celui de la photométrie différentielle : le flux de l'étoile à mesurer est comparé à celui d'une étoile de référence.

Voici quelques conseils :

- il est préférable d'utiliser des étoiles de référence de magnitudes proches de celle de la cible,

- il faut choisir une étoile de référence d'un indice de couleur « B-V » quasi identique à celui de la cible (ou « V-R » suivant les filtres utilisés),

- Attention : il faut vérifier avec une mesure sur une étoile «test» que les magnitudes des étoiles de références soient stables dans le temps !

Dans le cas où le logiciel d'acquisition n'intègre pas un module de photométrie, il est possible de trouver facilement plusieurs logiciels gratuits sur internet qui rempliront cette fonction. Pour ne citer que les plus connus, il existe Muniwin et AstroImageJ. Je conseille de se référer à leurs notices respectives pour en tirer le meilleur profit.

8 Envoi des données

Le format des données varie suivant l'organisme à qui elles sont envoyées. Je ne peux que conseiller de se référer au site internet de celui-ci. Le logiciel doit pouvoir réaliser une importation des données soit au format texte, soit au format d'un des organismes.

Dans la majorité des cas, il suffit d'envoyer un fichier comprenant la date d'observation en jour julien, la magnitude de l'étoile cible ainsi que celles des étoiles de comparaison.

En revanche, il est inutile d'envoyer vos propres instants de minima car ceux-ci seront calculés par la personne qui reçoit les données, afin d'avoir des résultats comparables entre les différents auteurs.

Il ne faut surtout pas garder jalousement les données. Au

contraire, il est très important de les diffuser même si les résultats peuvent sembler erronés. Si des erreurs sont constatées, le référent les signale et il faut recommencer soit l'acquisition, soit le dépouillement soit les deux. Je ne peux que conseiller de les envoyer à la commission des binaires à éclipses de l'AAVSO [8].

9 Conclusion

Vous avez maintenant tous les outils en main pour obtenir vos premières courbes de lumière. Ce domaine de l'astronomie est à la fois accessible aux amateurs et scientifiquement utile. Il est plus accessible que la détection des exoplanètes, basée sur les mêmes techniques, mais mettant en jeu des différences de magnitudes beaucoup plus faibles.

Chaque mesure est utile et permet de progresser dans la mise en œuvre des outils et des méthodes présentés ici et plus largement dans la connaissance des binaires à éclipses.

Bons ciels et bonnes observations !

10 Ressources

Sites internet :

- AAVSO - section des binaires à éclipses : <https://www.aavso.org/aavso-eclipsing-binary-section>

- Commission des Etoiles Doubles - SAF : <https://ced.saf-astronomie.fr/>

GEOS – Groupement Européen d'Observations Stellaires : <http://rr-lyr.irap.omp.eu/>

Logiciels:

- Muniwin : <http://c-munipack.sourceforge.net/>

- AstroimageJ : <https://www.astro.louisville.edu/software/astroimagej/>

- Stellarium : <https://stellarium.org/fr/>

- C2A : <http://astrosurf.com/c2a/>

- Guide 9 : <https://www.projectpluto.com/>

Livres :

Voici quelques titres qui ne traitent que de façon partielle des binaires à éclipses mais qui vous seront d'une aide précieuse :

- Astronomie et Astrophysique (5ème édition) – Agnès ACKER – Ed Dunod (2019)

- Étoiles et matières interstellaires -Collectif James LEQUEUX – Ed Ellipses (2008)

- Ce que disent les étoiles – Danielle BRIOT et Noël ROBICHON – Ed Belin (2013)

Mes publications (extrait) :

Double Star Astrometry – How to measure the minima of Eclipsing Binaries – some tips - Collectif WEISE GENET WALLEN – Ed Collins Foundation Press (2015)

Observing and measuring visual double stars How to measure the minima of Eclipsing Binaries – an amateurs's experiences– Collectif R.W. ARGILE Ed Springer (2012)

Références

[1] Article « L'OBSERVATION DES ÉTOILES DE TYPES BINAIRES À ÉCLIPSES - ASPECTS THÉORIQUES » - Revue Etoiles Doubles n°1 Décembre 2020 - <https://etoiledoubles.org/revue/ED-2020-01/ED-2020-01-Corp.pdf>

[2] Logiciel Ephémérides - Site de David Motl - <http://www.motl.cz/dmotl/predpovedi>

[3] Logiciel EBMIN20 - Site de Bob Nelson - <http://members.shaw.ca/bob.nelson/software1.htm>

[4] Site de prévision de minima de J.M. Kreiner - <http://www.as.up.krakow.pl/ephem>

[5] Site Eclipsing Binary Ephemeris Generator - <http://www.rollinghillsobs.org/perl/calceBephem.pl>

[6] Association étatsunienne des observateurs d'étoiles variables - AAVSO - <https://app.aavso.org/vsp/>

[7] Logiciel NetTime - <https://www.timesynctool.com/>

[8] Commission des binaires à éclipses de l'AAVSO - <https://www.aavso.org/aavso-eclipsing-binary-section>



Laurent CORP

J'habite à Rodez et je pratique l'astronomie depuis l'âge de 13 ans. Voir les sondes Viking se posant sur la planète Mars fut une "révélation". Je pratique l'observation des étoiles variables depuis de nombreuses années et suis membre de l'AAVSO (commission "Binaires à Eclipses") ainsi que d'autres groupes tel que le GEOS ou la commission des étoiles doubles de la SAF. J'envoie mes mesures à diverses associations, instituts ou professionnels avec qui je collabore et j'ai écrit quelques chapitres dans des livres ou revues spécialisés



Résumé

Cet article s'inscrit dans la continuité de celui traitant de l'interférométrie des tavelures paru dans le premier numéro de la revue [1]. Il traite des aspects pratiques liés à la mise en œuvre de cette technique à la mesure des étoiles doubles, tant du point de vue de l'instrumentation que de celui du traitement des données à l'aide des logiciels REDUC et SPECKLETOOLBOX.

Abstract

This article is a continuation of the one dealing with speckle interferometry that appeared in the first issue of the journal [1]. It deals with the practical aspects related to the application of this technique to the measurement of binary stars, both from an instrumentation point of view and that of data reduction, using the REDUC and SPECKLETOOLBOX softwares.

Keywords : techniques: speckle interferometry, binaries: visual



1 Introduction

Dans un article récent de la revue [1], B. Trégon a exposé les bases théoriques de la mesure d'étoiles doubles par la méthode dite d'interférométrie des tavelures (*speckle interferometry*). On a vu notamment comment cette technique permet, dans une très large mesure, de s'affranchir des effets destructeurs de la turbulence atmosphérique et de recouvrer le pouvoir séparateur d'instruments autrement limités par le seeing. Dans ce second article, nous nous attachons à décrire la mise en œuvre pratique de cette méthode, tant du point de vue de l'acquisition des données que du traitement de ces données. En dépit de la complexité apparente de la méthode, la disponibilité de dispositifs d'acquisition très performants et de logiciels dédiés, a contribué à rendre cette mise en œuvre relativement simple.¹

La vocation de cet article est avant tout de constituer un *vade-mecum* à l'usage de l'observateur désireux d'exploiter la méthode. Il est donc délibérément rédigé sous la forme d'une liste de conseils et de recommandations traitant d'aspects très pratiques tirés de l'expérience acquise par l'auteur.

L'article est divisé en deux grandes parties.

La première partie traite des aspects liés à l'acquisition des données (instrumentation, acquisition des images, calibration, choix des cibles). Un certain nombre de points abordés dans cette première section ne sont pas spécifiques de l'approche par interférométrie des tavelures et s'appliquent à des approches plus classiques, en particulier à celle opérant par sélection, décalage et addition d'images (*lucky imaging*). Il nous a paru

¹ Pas plus compliquée, en tous cas, que certaines méthodes utilisées par nombre d'amateurs en imagerie planétaire ou de ciel profond.

toutefois utile de les rappeler. Les aspects plus spécifiquement liés à la méthode détaillée ici seront explicitement indiqués.

La seconde partie décrit le traitement proprement dit – on parle habituellement de « réduction » – de ces données, c'est à dire du processus extrayant des séquences d'images acquises les grandeurs astrométriques (séparation ρ et angle de position θ) qui constituent le but final du travail de mesure. Cette seconde section consiste essentiellement en une présentation rapide des deux principaux logiciels utilisables pour la réduction des données dans ce contexte: REDUC d'une part, SPECKLETOOLBOX d'autre part.

2 Acquisition

2.1 Instrument

Le principal facteur est ici le diamètre instrumental D , qui conditionne, comme on le sait, le pouvoir séparateur² et donc *in fine* la séparation minimale des couples mesurables. Avec les techniques décrites ici, un instrument de 300 mm permet de mesurer de manière fiable des couples séparés d'un peu plus de 0,4 arcsec et jusqu'à la magnitude 12. Un 400 mm donne accès à la tranche 0,3-0,4 arcsec, particulièrement intéressante car on y trouve de nombreux couples peu voire pas mesurés depuis leur découverte.

Concernant la formule optique, elle importe relativement peu. Les lunettes présentent un léger avantage sur les télescopes en

² Suivant [2] on définira le pouvoir séparateur d'un objectif de diamètre D par la formule : $PS_{arcsec} = 120/D_{mm}$. On rappelle que cette définition ne vaut que pour des couples dont les deux composantes ont la même magnitude.

raison de leur absence d'obstruction centrale qui facilite, jusqu'à un certain point, la mesure de couples serrés présentant un fort écart de magnitude entre les composantes³. L'inconvénient, bien entendu, est que – si l'on excepte les grandes lunettes mises à disposition des amateurs dans certains observatoires comme ceux de Lille ou Nice – le diamètre est ici limité. Dans le domaine des télescopes, les instruments pour lesquels le miroir secondaire est supporté par une lame de fermeture et non par une « araignée » (Schmidt-Cassegrain ou Maksutov Cassegrain) présentent, tout autre inconvénient mis à part, un léger avantage : l'absence de diffraction due à ladite araignée peut faciliter, dans certains cas, la détection de compagnons très faibles.

2.2 Monture

Une monture équatoriale motorisée est indispensable. Il faut pouvoir pointer facilement une étoile à partir de ses coordonnées RA/Dec et, une fois pointée, assurer un suivi de quelques dizaines de secondes.

Les temps d'exposition étant très faibles (de l'ordre de la dizaine de ms comme on le verra), on pourrait penser que la mise en station n'est pas critique, une éventuelle dérive étant de toute façon compensée lors du traitement (soit par recalage, soit intrinsèquement par l'algorithme d'autocorrélation). Il n'en est rien. Une mise en station défectueuse génère en effet un phénomène de rotation de champ lors d'un changement de coordonnées. Cette rotation de champ est incompatible avec les procédures de calibration décrites au paragraphe 2.6, ou alors il faudrait réaliser la calibration sur un couple ou une étoile suffisamment proche de la cible mesurée de telle sorte que l'amplitude de la rotation de champ reste inférieure à la précision requise en θ . Avec la méthode des couples étalons, c'est tout simplement impossible, ceux-ci se trouvant parfois très loin sur le ciel des cibles visées; avec la méthode des traînées d'étoiles, cela obligerait à trouver une étoile assez brillante à proximité de chaque cible et, surtout, à faire une calibration par cible, ce qui est en pratique trop contraignant.

Un logiciel de pointage automatique est quasiment indispensable. Il faudra veiller à ce que ce logiciel dispose d'une version récente du catalogue WDS, sauf à se lancer dans de pénibles résolutions de synonymes⁴ ou d'avoir à entrer manuellement des coordonnées. Le logiciel WdsPick⁵, développé par l'auteur, dispose pour cela d'une fonctionnalité intéressante : la possibilité d'envoyer des ordres de pointage directement au logiciel Cartes du Ciel⁶ afin d'initier un pointage par un simple « clic » sur le nom du couple choisi.

Enfin, disposer d'un observatoire à poste fixe, même si ce n'est pas strictement indispensable, simplifie considérablement le travail : la mise en station peut être faite une fois pour toutes et le confort apporté est un atout non négligeable (les séances de mesures peuvent durer plusieurs heures et la fatigue vient vite...).

2.3 Camera

La caméra est un élément clé de l'instrumentation. La taille du capteur n'est ici pas critique car le champ couvert sera toujours très faible (quelques dizaines de secondes d'arc au maximum).

Deux caractéristiques sont essentielles en revanche :

3 Dans le cas où le compagnon se trouve placé sur le premier anneau de diffraction, on a intérêt à ce que ce premier anneau soit le plus faible possible.

4 Du style STF1283=WDS 08499+1450=HD75355=...

5 <http://astrosurf.com/legalet/AstroFR/WdsPick.html>, [13]

6 <https://www.ap-i.net/skychart>

- la taille des pixels, qui va déterminer, *in fine*, et en fonction de la distance focale résultante, l'échantillonnage (en arcsec/pixel) des images
- la sensibilité, qui va conditionner la capacité à observer le motif de tavelure d'une part⁷ et la magnitude limite d'autre part.

Ces deux objectifs – « figer la turbulence » et augmenter la magnitude limite – sont évidemment contradictoires. Jusqu'à récemment, seuls les capteurs de type EM-CCD⁸ étaient à même de résoudre ce dilemme (sauf à limiter de manière drastique la magnitude des couples observés). La disponibilité, à partir des années 2015-2016, et à des prix très abordables, de capteurs CMOS très sensibles et à faible bruit (le capteur IMX290 produit par Sony notamment) a radicalement changé la donne en mettant la technique d'interférométrie des tavelures à la portée de tous les amateurs.

Le logiciel d'acquisition utilisé pour contrôler la caméra n'est pas critique. Il est souhaitable toutefois qu'il permette, outre les réglages classiques de gain et de temps d'exposition, le fenêtrage (*cropping*), afin de réduire la taille des fichiers générés⁹, et la datation précise des images d'une séquence (en particulier si la technique de calibration par mesure de dérive décrite au paragraphe 2.6 doit être utilisée).

La sauvegarde des séquences au format .SER est préférable.

L'auteur utilise personnellement le logiciel Genika¹⁰ qui, outre une très bonne ergonomie, offre par ailleurs la possibilité d'ajouter les modules personnalisés (plug-ins) de traitement à la volée des images¹¹.

2.4 Train optique

Par train optique on entend l'ensemble des éléments placés entre le télescope proprement dit (ou la lunette) et la caméra. Ce train comprend en général au moins deux éléments :

- un élément amplificateur
 - un filtre et/ou un correcteur de dispersion atmosphérique
- L'élément amplificateur sert à obtenir une longueur focale donnant un facteur d'échantillonnage suffisant sur le capteur. Ce facteur d'échantillonnage, qui définit la dimension angulaire « vue » par chaque pixel du capteur, exprimé en secondes d'arc par pixel (arcsec/pixel), est donné par la formule :

$$E = 206.P/F$$

où P est la taille d'un pixel en micron et F la focale en mm.

Il est rare en pratique qu'utiliser la longueur focale native de l'instrument, c'est à dire placer la caméra directement au foyer, donne un échantillonnage satisfaisant. Avec un télescope de 280 mm de diamètre ouvert à F/10 et un capteur possédant des pixels de 2,9 μm (comme l'IMX290 cité plus haut par exemple), la formule ci-dessus donne par exemple un échantillonnage E de 0,21 arcsec/pixel, soit la moitié du pouvoir séparateur¹². C'est théoriquement suffisant en vertu du théorème bien connu de Shannon-Nyquist. En pratique, c'est insuffisant

7 Comme expliqué dans [1], ce motif n'apparaît que lorsque le temps d'exposition est inférieur au temps de cohérence lié au seeing.

8 Electron-multiplying CCD.

9 Il y a peu d'intérêt à sauvegarder une séquence d'images de 1024 par 1024 pixels sur lesquelles la cible n'occupe qu'une zone de 50x50 pixels...

10 <https://airylab.com/genika-astro>

11 L'auteur a d'ailleurs développé un tel plug-in dédié au calcul en temps réel de l'autocorrélation des images, LiveSpeckle : <http://astrosurf.com/legalet/Astro/LiveSpeckle.html>

12 Pouvoir séparateur qui vaut ici $120/280=0,42$ arcsec

Instrument (diamètre/ focale native en mm)	Camera (taille pixel)	Dispositif amplificateur	Focale résultante	E (arcsec/pixel)	référence
L 500 / 7500	Raptor Merlin EM-CCD (10 µm)	Barlow	18,3 m	0,11	[3]
N 600 / 2135	Raptor Merlin EM-CCD (10 µm)	Projection oculaire	24 m	0,084	[3]
SCT 280 / 2800	Raptor Kite EM-CCD (10 µm)	Powermate 5x	11 m	0,13	[4]
SCT 280 / 2800	Raptor Kite EM-CCD (10 µm)	Projection oculaire	17 m	0,11	[5]
SCT 280 / 2800	ASI 290MM (2,9 µm)	Barlow	6,2 m	0,095	[6,7,8,9,10]
RC 500 / 4000	ASI 290MM (2,9 µm)	Barlow	8,4 m	0,07	[11]
RC 500 / 4000	Raptor Kite EM-CCD (10 µm)	Projection oculaire	27,4 m	0,074	[11]
CC 620 / 9000	ASI 290MM (2,9 µm)	Aucun	9 m	0,064	[11]

Table 1 - Exemples de configurations expérimentales utilisées par l'auteur (L=lunette, N=Newton, SCT=Schmidt-Cassegrain, CC=classical Cassegrain, RC=Ritchey-Chrétien)

pour les méthodes de traitement qui nous intéressent ici, qui s'accommodent mieux d'un échantillonnage égal au quart voire au cinquième du pouvoir séparateur.

Dans ce contexte, l'utilisation d'un élément amplificateur permet de réduire le facteur d'échantillonnage en augmentant la longueur focale résultante de l'instrument. En fonction du facteur d'amplification souhaité, plusieurs types d'éléments sont envisageables :

- lentille de Barlow (2x, 3x)
- amplificateur télécentrique, type Powermate¹³
- oculaire utilisé en projection.

A titre d'exemple, la table 1 liste les valeurs d'échantillonnage utilisées par l'auteur avec différentes configurations expérimentales.

Notons au passage qu'avec de tels facteurs d'échantillonnage le champ couvert par le capteur est en général très petit (quelques dizaines de secondes d'arc typiquement). Même avec une monture parfaitement mise en station, il est donc rare que l'étoile cible soit sur le capteur après pointage. Il est dès lors quasiment indispensable de disposer

- soit d'une deuxième caméra avec un champ plus étendu et calée par rapport au capteur d'acquisition, permettant d'affiner le centrage
- soit d'un dispositif de type miroir basculant (*flip mirror*) permettant d'affiner le pointage à l'aide d'un oculaire réticulé.

La finesse de l'échantillonnage requis fait par ailleurs que les effets dus à la dispersion atmosphérique ne peuvent pas, en général, être négligés. On rappelle que cette dispersion est la conséquence de l'effet de « prisme » que joue l'atmosphère et qui conduit à « étaler » dans le sens vertical l'image d'une étoile, les grandes longueurs d'onde (rouge) étant moins réfractées

que les courtes (bleu). L'effet est d'autant plus marqué que la hauteur de l'astre est faible.

A titre d'illustration, la figure 1a donne un exemple d'image d'étoile double réalisée avec un télescope de 280mm de diamètre et un échantillonnage de 0,055 arcsec/pixel sans correction de la dispersion atmosphérique. Le couple en question, STF1670, a ici été imagé alors qu'il était à 38° de hauteur. Cette image a été obtenue avec le logiciel Reduc par sélection, recalage et addition des 50 meilleures images de la séquence. Comme on le voit, à cette hauteur la dispersion atmosphérique déforme considérablement l'image.

La figure 1b donne l'aspect de l'autocorrélogramme calculé¹⁴ sur la séquence correspondante. Si l'on reconnaît bien les deux pics caractéristiques, la forme de ces pics rend plus imprécise

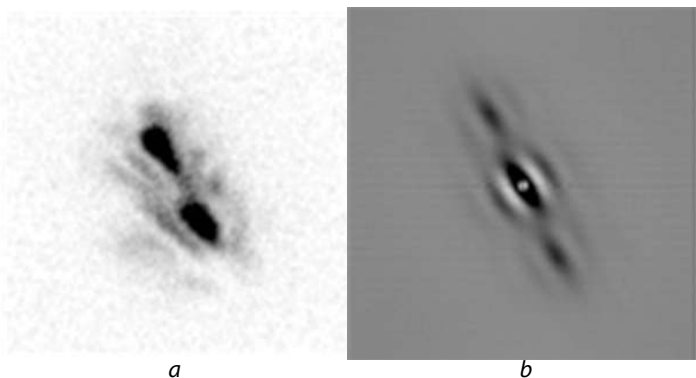


Figure 1 – Effet de la dispersion atmosphérique, 1er exemple

¹³ Ce dispositif présente l'avantage de donner un facteur d'amplification ne dépendant pas de la longueur du chemin optique le séparant de la caméra.

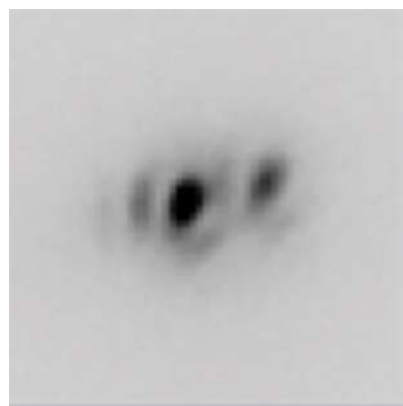


Figure 2 – Effet de la dispersion atmosphérique, 2ème exemple

la détermination de leur centre photométrique, et donc nuit à la précision de la mesure. Par ailleurs, l'étalement de la lumière tend à « noyer » les composantes les plus faibles et limite donc la magnitude limite atteignable par la méthode.

La figure 2 montre l'effet de la dispersion atmosphérique sur un couple situé cette fois à 55° de hauteur (STF2583), imagé avec la même instrumentation. Comme on le voit, il est encore sensible.

Il y a essentiellement deux manières de corriger l'effet de la dispersion atmosphérique.

La première consiste à utiliser un filtre passe-bande, c.à.d. à ne sélectionner qu'une fraction du spectre afin de limiter l'amplitude de la dispersion. On peut par exemple utiliser un des trois filtres R, G ou B d'un jeu de filtres photométriques. Facile à mettre en œuvre, cette solution présente toutefois un inconvénient. Sauf à utiliser une très faible largeur de bande, et donc à limiter fortement le flux lumineux – et conséquemment, la magnitude limite – la dispersion à l'intérieur d'une bande elle-

¹⁴ Toujours avec Reduc.

même n'est pas négligeable. Les calculs montrent par exemple¹⁵ que, dans le visible (400-800 nm) et pour une bande de largeur 90 nm la dispersion intra-bande excède 0,4 arcsec – soit le pouvoir séparateur d'un instrument de 300 mm – quelle que soit la bande choisie dès que la hauteur de l'astre est inférieure à 35°.

La seconde solution consiste à utiliser un dispositif correcteur de dispersion atmosphérique (*Atmospheric Dispersion Corrector*, ADC en abrégé). Un tel dispositif est constitué d'une paire de prismes (dits de Risley) dont la position et l'orientation relative sont réglables et qui permettent de moduler la direction et l'intensité de la correction. On en trouve désormais à des prix très abordables dans le commerce, comme ceux commercialisés par les sociétés PIERROASTRO et ZWO¹⁶.

En pratique, et afin de gagner du temps lors de l'acquisition, le plus simple est de se constituer, une fois pour toutes (par expérimentation sur une collection d'étoiles bien choisies), une table de correction donnant le réglage de l'ADC pour chaque hauteur entre 10 et 90°. Il suffira alors, pour une cible donnée, de lire sa hauteur (les logiciels de pointage la donnent systématiquement) et de consulter la table pour déterminer le réglage de l'ADC à utiliser. Le logiciel WdsPick, déjà cité, permet d'ailleurs de faciliter cette tâche en fournissant automatiquement, à partir d'une version de la table stockée dans un fichier, le réglage de l'ADC pour chaque cible sélectionnée.

La figure 3 illustre le train optique complet utilisé par l'auteur pour la mesure de couples avec un C11 et une caméra ASI 290MM. On y trouve, de gauche à droite

- le dispositif de mise au point (crayford)
- le miroir basculant (avec oculaire réticulé pour le pointage fin)
- la roue à filtre (facultative ici)
- la barlow (insérée ici dans une bague au format T2)
- le correcteur de dispersion atmosphérique (avec les deux leviers pour le réglage)

- une bague allonge (pour ajuster le tirage de la barlow et donc la longueur focale)
- la caméra.

2.5 Acquisition des séquences

On aura intérêt à travailler avec une fenêtre d'intérêt (*Region of Interest*, ROI) pas trop grande afin de limiter la taille des fichiers d'acquisition (et le temps de calcul au traitement). Une taille de 256x256 à 512x512 est en général acceptable. Le post-traitement commencera systématiquement, comme on le verra, par une phase de recentrage-redimensionnement.

Concernant le temps d'exposition, et comme précisé dans [1], il doit être inférieur au temps de cohérence de l'agitation atmosphérique si l'on veut capturer le motif de tavelures. En pratique, et sauf seeing exceptionnel et/ou cibles de très forte magnitude, il est rare de dépasser quelques dizaines de ms.

Concernant le gain, tout dépend de la caméra bien sûr. On peut le pousser à des valeurs assez élevées car les techniques de réduction à base de corrélation sont assez robustes vis à vis du bruit (à moins qu'il ne soit fixe, comme pour le FPN¹⁷ de certains capteurs CMOS). Avec les dernières caméras CMOS à très faible bruit de lecture, comme l'ASI 290MM, monter le gain au-delà de 400 ne semble toutefois pas nécessaire¹⁸.

Il est recommandé de procéder à une série d'acquisitions pour corriger les biais de la caméra avec l'objectif obstrué (ou, plus simplement, *flip mirror* basculé) avec le temps de pose et le gain utilisés pour les cibles. Compte-tenu des temps de pose utilisés, le signal thermique est négligeable. L'image obtenue servira donc essentiellement à retirer les pixels chauds fixes et le signal électronique de la caméra.

Compte-tenu des champs exploités, et sauf cas d'un capteur très sale, un *flat* n'est pas nécessaire.

Dans la mesure du possible on essaiera de garder les réglages constants pendant toute la séance (afin de pouvoir utiliser les mêmes images de calibration en particulier).

Pour chaque cible, on fera N acquisitions successives de n



Figure 3 – Train optique utilisé par l'auteur derrière un Celestron C11 ($E=0,093$ arcsec/pixel)

¹⁵ Voir notamment <http://www.astrosurf.com/prostjp/Dispersion.html>

¹⁶ A noter que ces modèles n'utilisent qu'une seule paire de prismes, ce qui induit un petit inconvénient : la correction s'accompagne d'une translation de l'image dans le plan focal. Des modèles à deux paires de prismes, qui ne présentent pas cet inconvénient existent aussi, mais à des prix beaucoup plus élevés. L'ADC intégré à l'instrument Pisco2 qu'utilisait R. Gili sur la lunette de 76 cm de Nice était un modèle à deux prismes, entièrement automatisé de surcroît [12].

¹⁷ Fixed Pattern Noise, qui provoque un tramage sur les images.

¹⁸ Avec cette caméra, des compagnons de magnitude 13 ont été détectés et mesurés avec des poses de 50 ms et un gain de 400 sur un C11 avec un échantillonnage de 0,09"/pixel.

images chacune¹⁹. Ceci permettra d'estimer la précision interne des mesures (en calculant l'écart-type des mesures calculé sur les N mesures). Dans notre cas, on a observé que le couple N=4 et n=1000 constituait un bon compromis entre le temps passé à l'acquisition sur chaque cible, le temps de traitement et la précision des mesures.

Si l'on souhaite traiter en utilisant une déconvolution (cf paragraphe 3.3), on fera aussi, pour chaque cible, et avec les mêmes paramètres caméra, une acquisition sur une étoile de référence. Cette étoile de référence doit se situer dans le voisinage immédiat du couple visé et si possible présenter un type spectral similaire²⁰.

En résumé, et typiquement, pour chaque couple cible, on prend N+1 films :

- N films de n images du couple
- 1 film de n images d'une étoile simple voisine.

Bien entendu, on aura intérêt à nommer judicieusement les fichiers générés afin de s'y retrouver plus tard (ex: a2345_1.ser, a2345_2.ser, a2345_3.ser, a2345_4.ser, a2345_ref_hd123567.ser). Avec WdsPick, la fonction de « log » permet aussi de garder un historique des acquisitions ainsi que les réglages utilisés.

En comptant le pointage, une séquence complète sur une cible prend typiquement entre 5 et 10 minutes. On peut donc en enchaîner, avec un peu d'entraînement, une dizaine par heure.

2.6 Calibration

Par calibration on entend la détermination de l'orientation Δ (en degrés) du capteur par rapport au ciel d'une part et de l'échelle de l'image sur le capteur E (en arcsec/pixel) d'autre part. Ces deux paramètres sont évidemment indispensables : sans eux les acquisitions sont inutilisables et leur précision influence de manière cruciale celle des mesures finales.

Il y a essentiellement deux manières de les déterminer.

La première technique consiste à utiliser des couples dits étalons, dont l'angle de position (PA, θ) et la séparation (SEP, ρ) sont connus et « fixes »²¹. Une liste de tels couples a été établie par P. Mauroy, F. Mauroy et G. Morlet et longtemps diffusée par la SAF. Cette liste a été récemment mise à jour en tenant compte des données DR2 produites par la mission GAIA²². En pratique, on effectue en cours de séance des acquisitions sur un ou plusieurs de ces couples étalons. On en fait en général au moins deux : une en début de séance et une en fin de séance (afin de s'assurer que la caméra n'ait pas bougé en cours de séance). Mais rien n'empêche d'en faire plus. Faire N mesures sur un même couple permet par ailleurs de quantifier l'erreur de mesure sur l'étalonnage qui impacte l'erreur finale de mesure. Cette technique est facile à mettre en œuvre. Les corrections apportées à la liste de la SAF à partir des données DR2 répondent par ailleurs en grande partie aux objections soulevées jusque-là sur la précision et la "fixité" des données associées aux étalons. Elle suppose néanmoins qu'au moins un couple étalon soit visible et pointable lors de la séance, ceci pouvant s'avérer problématique car la distribution de ces couples sur le ciel est loin d'être homogène.

La seconde technique repose sur le chronométrage des dérives stellaires. Elle consiste à enregistrer la "traînée" laissée

par une étoile lorsque l'entraînement de la monture est stoppé. L'angle de ladite traînée par rapport à l'horizontale (axe x du capteur) donne alors directement la calibration en angle de position. Le logiciel Reduc, décrit au paragraphe 3.1 implémente cette fonctionnalité²³. L'échantillonnage (en arcsec/pixel) peut lui se déduire de la vitesse de dérive (déplacement en pixels par seconde), dès lors que la déclinaison de l'étoile est connue. Pour cela, il faut évidemment que les images du film soient datées assez précisément (à la ms typiquement²⁴). Le logiciel Genika²⁵, utilisé par l'auteur, fournit cette possibilité. Le logiciel SpeckleToolBox, décrit au paragraphe 3.2, est alors capable d'exploiter cette information pour déduire, à partir d'un ensemble de fichiers FITS datés, les deux paramètres de calibration (angle de la caméra et échantillonnage).

En pratique, on choisit une étoile entre 0 et 20° de déclinaison, on place cette étoile en bord de champ, on coupe l'entraînement, on lance l'acquisition et on l'arrête lorsque l'étoile arrive au bord opposé. On prendra garde toutefois à

- prendre une étoile suffisamment brillante pour avoir un bon rapport signal/bruit
- ajuster le temps de pose pour ne pas saturer l'étoile²⁶ tout en le gardant suffisamment élevé pour que la différence inter-images soit grande vis à vis de la précision de la datation; typiquement, un temps de pose de 10 à 20 ms donne de bon résultats
- ajuster la taille de la fenêtre de manière à capter au moins une centaine d'images par film; en pratique, on utilise une fenêtre rectangulaire de taille Lxl avec $L \gg l$.

Comme pour l'autre technique, il est recommandé de faire N traînées (avec N supérieur ou égal à 4) sur la même étoile, afin d'estimer la précision, et deux séries de traînées (en début et fin de séance).

2.7 Choix des cibles

La sélection des couples à observer se fait sur la base des possibilités de l'instrumentation d'une part et de l'intérêt de la mesure d'autre part.

L'instrumentation définit en particulier la séparation minimale et la magnitude limite atteignables. Pour la séparation, et comme indiqué plus haut, la limite « théorique » est donnée par la formule :

$$\rho_{\min} (\text{arcsec}) = 120/D$$

où D est le diamètre instrumental en mm.

Cette valeur est en fait optimiste : le couple sera effectivement vu double (allongé) mais la mesure sera en général trop imprécise. L'expérience montre que la valeur 140/D est plus réaliste en termes de mesure²⁷. Mais attention, ceci ne vaut que pour les couples pour lesquels la différence de magnitude entre les deux composantes (Δm) n'est pas trop grande (inférieure à 2, typiquement). Au-delà de $\Delta m=2$, l'expérience montre que la séparation minimale atteignable augmente.

Si les techniques de réduction par autocorrélation réussissent bien à contrer les effets de la turbulence, il ne faut pas négliger que cette dernière dégrade toujours la magnitude limite.

¹⁹ On peut aussi faire un seul film de Nxn images et le découper par la suite.

²⁰ De telle sorte que les aberrations dues au ciel et à l'instrument soient identiques dans les deux cas.

²¹ Ou plus précisément dont le mouvement orbital peut être considéré comme négligeable sur plusieurs dizaines d'années.

²² https://ced.saf-astronomie.fr/documents/Etalons_Gaia_DR2-Phillippe%20LAURENT.xlsx

²³ La procédure est décrite ici : <http://www.astrosurf.com/hfosaf/reduc/tutoriel.htm#drift>

²⁴ La datation n'a pas à être précise dans l'absolu, seule compte la précision relative d'une image à l'autre

²⁵ <https://airylab.com/genika-astro>

²⁶ Ce qui pourrait fausser le calcul de sa position au traitement.

²⁷ Au sens mesure fiable et reproductible.

Dit autrement, lors d'une nuit médiocre on pourra toujours mesurer de manière fiable des couples serrés suffisamment brillants mais il faudra en général faire une croix sur les couples les plus faibles (la perte en magnitude effective mesurable peut atteindre 1 ou 2). Ici aussi, l'expérimentation permettra de trancher de manière plus rapide et plus sûre que des calculs faisant intervenir des coefficients plus ou moins maîtrisés.

La position du couple au moment de l'observation est aussi un critère important. On cherche en effet en général à observer le plus près possible du méridien afin de maximiser la hauteur (et donc de limiter à la fois le niveau de turbulence et de dispersion atmosphérique²⁸). Attention aux instruments sur monture équatoriale allemande car un retournement (« flip ») au méridien est à éviter absolument (perte possible de la collimation, du calibrage de l'ADC, etc.); en pratique, on travaille en général dans le fuseau précédent d'1h le méridien. Ne pas oublier que, même avec de l'entraînement et de la méthode il est rare de pouvoir mesurer plus de 10 couples par heure et donc que ce fuseau va rapidement dépasser le méridien. Concernant la hauteur/déclinaison minimale, elle dépend de la présence ou non d'un ADC ou d'un filtre passe-bande. En pratique, et même avec un ADC, il est rare de pouvoir mesurer un couple situé à moins de 30° de hauteur. La configuration de l'observatoire ou la monture elle-même peuvent aussi limiter la déclinaison maximale.

Ces considérations ont par exemple, et à titre purement indicatif, conduit l'auteur à adopter les limites suivantes pour l'instrumentation décrite dans [6] (Celestron C11, ASI 290MM) :

- hauteur de la cible entre 30 et 70°
- magnitudes des composantes ≤ 13
- écart ΔM en magnitude des deux composantes $\leq 2,5$
- séparation $p \geq 0,45$ arcsec

Le deuxième critère qui doit guider le choix des cibles est celui de l'intérêt de la mesure. S'il est normal – et même souhaitable – de se « faire la main » sur des couples bien connus, il va de soi que la mesure de couples à grande séparation²⁹ et/ou largement observés présente, scientifiquement parlant, peu d'intérêt. Les premiers parce que les périodes associées à ces couples (quelques centaines ou milliers d'années) font que la probabilité d'observer un mouvement orbital depuis la dernière mesure est faible³⁰. Les seconds, parce que les orbites associées sont déjà bien connues³¹ et donc que l'ajout de points de mesures n'est pas vraiment nécessaire.

L'intérêt des mesures étant, rappelons-le, le calcul des orbites, les mesures devraient cibler en priorité des couples pour lesquels ces orbites sont mal connues. C'est le cas en particulier de couples catalogués comme orbitaux mais pour lesquels les orbites calculées sont sujettes à caution à cause du faible nombre de points de mesure. Ce peut être aussi le cas de couples peu écartés mais pour lesquels on ne dispose à ce jour d'aucune orbite en raison du faible nombre d'observations. Dans les deux cas, on a intérêt à cibler des couples peu observés ou pas

observés depuis longtemps³². Signalons que les données DR2 issues de la mission Gaia, permettent d'estimer la probabilité qu'un couple soit bien un système physique [9][16] en se fondant notamment sur les distances et mouvements propres de chacune des composantes³³. Cette information permet de restreindre encore plus la sélection aux couples « utiles ».

Par ailleurs, il est fondamental de mesurer régulièrement quelques couples possédant des orbites bien établies (grade 1 ou 2). Les mesures obtenues permettent en effet d'estimer la précision du protocole de mesure (par calcul des « O-C », c.à.d de la différence entre les résultats obtenus et ceux prévus par les éphémérides).

Le travail de sélection décrit ci-dessus peut se faire à l'avance, avec des outils comme WdsTool³⁴, StelleDoppie³⁵ ou GDS³⁶ (attention à vérifier que la version du WDS utilisée par ces outils ne soit pas trop ancienne, notamment pour les couples les plus serrés, à mouvement orbital rapide donc). Il peut être utile, ceci dit, de disposer d'un outil permettant de modifier ou d'affiner la sélection « sur le terrain » afin d'adapter le programme aux conditions d'observations effectives (seeing, position par rapport au méridien,...), comme le logiciel WdsPick, déjà cité.

3 Traitement

La mise en œuvre des méthodes décrites dans [1] sur les séquences d'images acquises suivant les principes décrits ci-dessus peut bien sûr se faire « à la main », en utilisant les outils classiques de traitement d'images (qui se réduisent ici, *in fine*, au calcul de transformées de Fourier directes et inverses, comme expliqué dans [14]. Mais on a tout intérêt à utiliser des outils dédiés. Il y en a essentiellement deux accessibles aux amateurs : REDUC et SPECKLETOOLBOX.

3.1 REDUC

Depuis la version 4.0, le logiciel Reduc³⁷, développé par F. Losse dispose en effet d'un module de calcul de l'autocorrélation et de l'intercorrélacion sur une séquence d'images.

L'utilisation de ces modules est très bien décrite dans le tutoriel distribué avec le logiciel³⁸. On se contente donc de donner ici les grandes lignes de la mise en œuvre de la méthode et les résultats obtenus sur un panel de couples représentatifs.

Reduc opérant préférentiellement sur des séquences d'images ou des cubes au format FITS la première chose à faire est la conversion du fichier d'acquisition à ce format. De nombreux outils existent pour cela. L'auteur utilise le convertisseur fourni avec le logiciel Genika. Si possible, on choisira le format « FITS cube », pour lequel les n images de la séquence sont stockées dans un fichier unique.

Le calcul de l'auto et de l'intercorrélacion requiert que les images de la séquence soient carrées et que leur dimension soit

28 Si on utilise un correcteur de dispersion atmosphérique (ADC), observer près du méridien évite par ailleurs d'avoir à retoucher l'orientation dudit correcteur lors de la séance.

29 Typiquement supérieure à la dizaine de secondes d'arc.

30 Une exception notable est celle des couples qui s'avèrent ne pas correspondre à un système physique mais dont la binarité résulte d'un simple effet de perspective sur le ciel (couples dits « optiques »). Les mesures de tels « couples » peuvent en effet mettre en évidence, sur des périodes de temps plus faibles, des trajectoires incompatibles avec un mouvement orbital.

31 Orbitales de grade 1 ou 2 dans le 6ème Catalogue d'Orbites (<http://www.astro.gsu.edu/wds/orb6.html>)

32 La définition de "longtemps" dépend évidemment de la période (et donc de la séparation potentiellement); en pratique, il est rare qu'un couple au-dessus de la seconde d'arc montre un mouvement sensible en moins d'une dizaine d'années. Le WDS (<http://www.astro.gsu.edu/wds>) donne la date de la dernière observation et le nombre total de mesures (attention à bien utiliser une version à jour).

33 A condition que les composantes soient séparées de plus de 0,5 arcsec.

34 <http://wdstool.com>

35 <https://www.stelledoppie.it>

36 Le logiciel GDS, écrit par D. Rowe (drowesmi@aol.com) permet de sélectionner des couples potentiels dans le catalogue Gaia DR2. Son usage est décrit notamment dans [9]

37 <http://www.astrosurf.com/hfosaf/fr/tdownload.htm#reduc>

38 <http://www.astrosurf.com/hfosaf/reduc/tutoriel.htm#speckle>

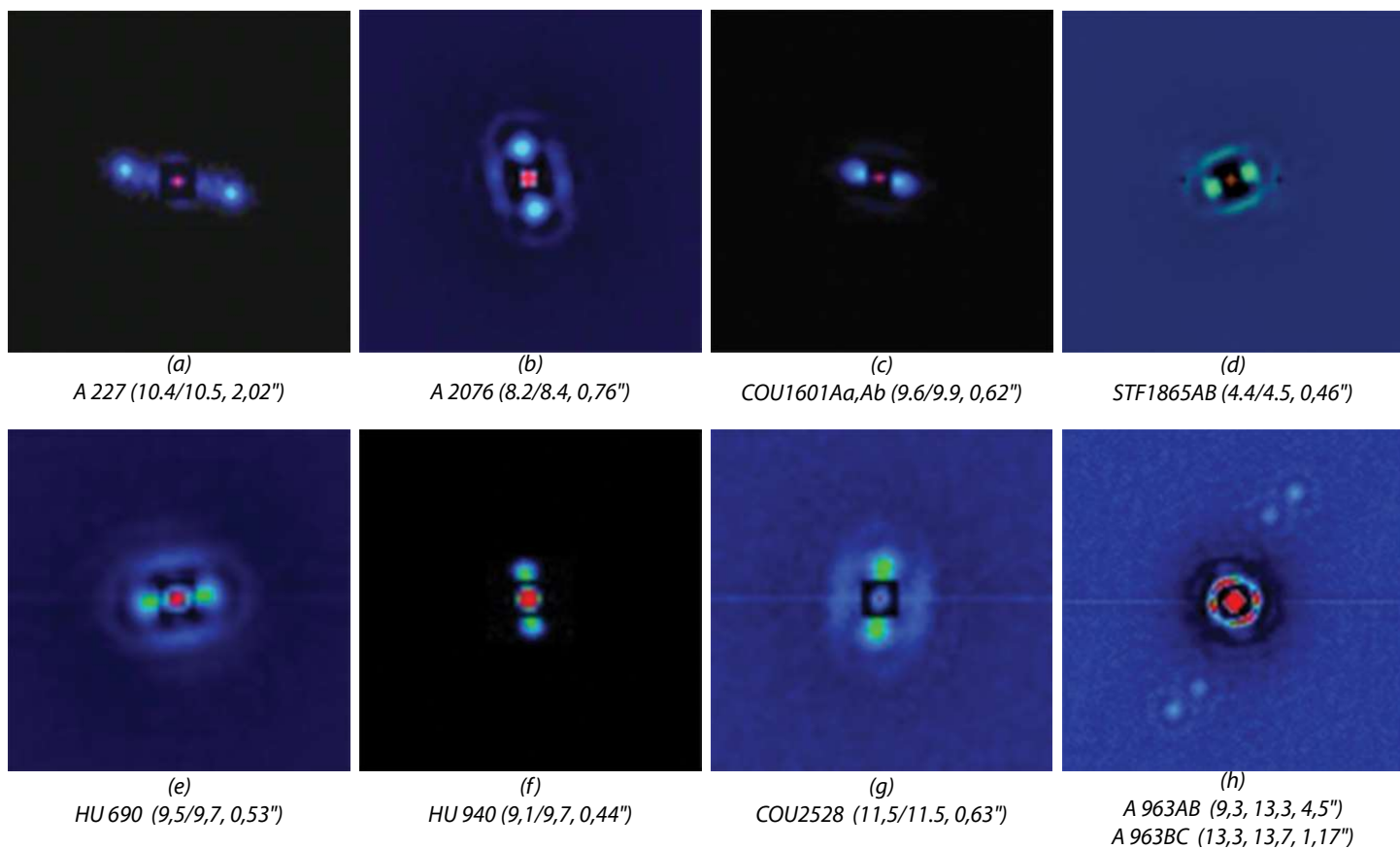
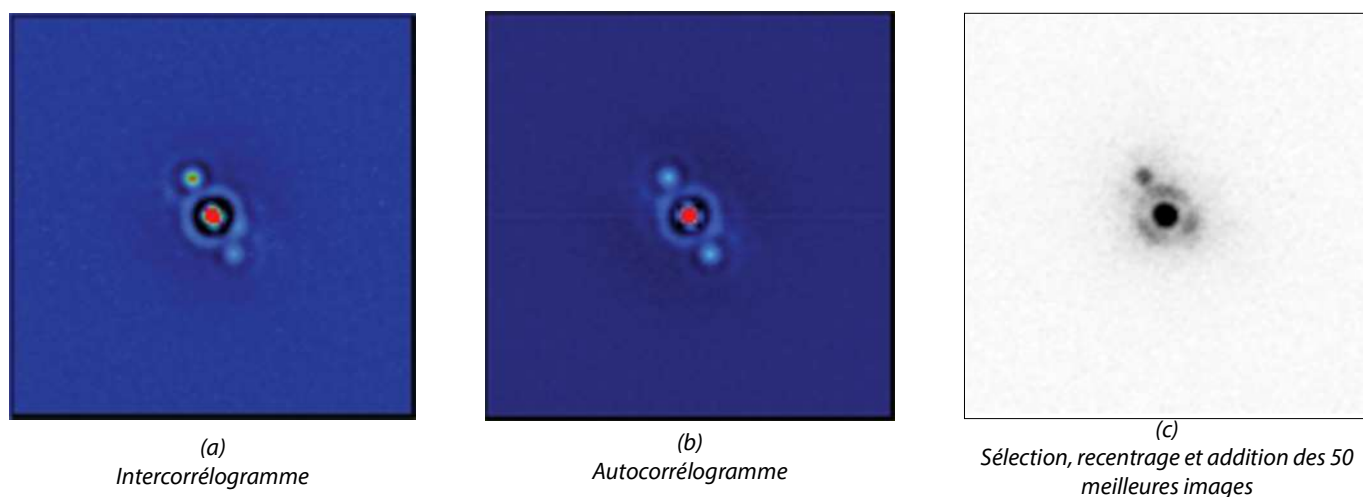


Figure 4 – Exemples d'autocorrélogrammes calculés avec Reduc



**Figure 5 - Images du couple A 1804 obtenues avec Reduc selon trois méthodes
Les composantes de magnitudes 9,2 et 10,4 sont séparées de 1,3 arcsec**

une puissance de deux³⁹. Si ce n'est pas le cas, Reduc demandera de redimensionner la séquence et l'effectuera à la volée. La taille à choisir (64x64, 128x128 ou 256x256 typiquement) dépend de l'échantillonnage et de la séparation du couple. On a intérêt à choisir la plus petite valeur possible : les calculs seront plus rapides et les corrélogrammes plus contrastés.

Ensuite, tout est très simple : le menu *Interferometry* de Reduc permet de calculer en un seul clic l'auto ou l'intercorrélation de la séquence. En fait, Reduc génère, dans les deux cas, dix corrélogrammes⁴⁰. Le premier correspond au corrélogramme non filtré. Sur l'image correspondante, les pics d'auto (resp. inter) corrélation sont noyés dans un nuage – appelé « halo de seeing » dû au bruit – et difficilement mesurables. Les corrélogrammes suivants donnent le résultat du traitement du corrélogramme « brut » par une collection de filtres opérant par soustraction d'une moyenne locale calculée sur une fenêtre de taille croissante. Le but de l'opération est de mieux faire ressortir les pics afin de faciliter la mesure. Le choix de la bonne version dépend essentiellement de la nature des images (taille, séparation et niveau de bruit).

La figure 4 donne quelques exemples d'autocorrélogrammes calculés avec Reduc⁴¹. Le nom du couple, la magnitude des composantes et la séparation sont indiqués sur chaque image. Pour les images de la première rangée (a,b,c,d), les acquisitions ont été faites avec un télescope Schmidt-Cassegrain de 280 mm de diamètre et une caméra EM-CCD Raptor Kite, avec un échantillonnage de 0,13 arcsec/pixel. Pour la seconde rangée (e,f,g,h), la caméra est une ASI 290MM et l'échantillonnage est de 0,093 arcsec/pixel. Le traitement a été effectué avec la version 5.0 de Reduc, sur des séquences de 1000 images de taille 128x128 après soustraction des biais (*bias subtraction*). Les corrélogrammes sont affichés en fausses couleurs pour plus de lisibilité.

La mesure s'effectue essentiellement de la même manière qu'avec une image obtenue par sélection-recadrage-addition : on clique sur le pic central puis sur l'un des pics secondaires. Reduc donne alors directement la valeur de la séparation et de l'angle de position du couple, une fois que les valeurs de calibration, échantillonnage et angle de la caméra ont été entrées, bien sûr⁴².

La technique de mesure par calcul de l'autocorrélation présente toutefois un inconvénient bien connu : elle conduit à une ambiguïté de 180° sur la valeur de l'angle de position θ , les deux pics secondaires étant parfaitement symétriques.

Dans certains cas, cette ambiguïté peut être résolue en faisant appel à l'historique des mesures antérieures ou par une image directe (extraite de la séquence ou obtenue par sélection-recalage-addition). Dans le cas contraire, la solution consiste à calculer non pas l'autocorrélation mais l'intercorrélation sur les images de la séquence. Pour cela, il faut sélectionner dans le menu *Interferometry* de Reduc l'item *Cross-Correlation*. Le déroulement des opérations est strictement le même qu'avec l'autocorrélation, la seule différence étant que les pics du corrélogramme présentent ici une intensité différente et que la mesure s'effectue systématiquement sur le pic le plus brillant, qui

correspond donc à la « bonne » valeur de l'angle de position⁴³.

La figure 5-a donne un exemple d'intercorrélogramme calculé avec Reduc. Le couple concerné est A 1804, dont les composantes, de magnitudes 9,2 et 10,4 sont séparées de 1,3 arcsec. Les figures 5-b et 5-c donnent respectivement, et pour comparaison, l'autocorrélogramme calculé sur la même séquence et une image directe, obtenue par sélection, recentrage et addition des 50 meilleures images de la séquence.

3.2 SpeckleToolBox

Le logiciel SpeckleToolBox⁴⁴ (STB) a été conçu dès le début pour la mise en œuvre des techniques de réduction par autocorrélation. Son principal intérêt est par ailleurs de proposer un mode de réduction par calcul du bispectre, une variante de l'autocorrélation qui autorise la reconstruction complète de l'image du couple mesuré (ce qui permet d'une part d'éliminer l'ambiguïté de quadrant inhérente à la mesure par autocorrélation et d'autre part d'estimer la différence en magnitude des deux composantes⁴⁵). La description de cette technique et de sa mise en œuvre dans STB fera l'objet d'un prochain article.

L'utilisation du logiciel SpeckleToolBox est très similaire à celle décrite pour Reduc : chargement des images (« cube FITS » forcément ici), calcul de l'autocorrélogramme⁴⁶, et mesure de l'angle de position et de la séparation sur l'autocorrélogramme. Comme avec Reduc, deux outils de post-traitement des autocorrélogrammes sont fournis afin de faciliter la mesure : l'un utilisant un filtre gaussien paramétrable, l'autre la déconvolution par une étoile de référence (cf paragraphe suivant). Un mode d'emploi détaillé du logiciel est donné dans [15].

La figure 6 donne quelques exemples d'autocorrélogrammes calculés avec SpeckleToolBox⁴⁷. Les images de la rangée supérieure (a, b, c) ont été réalisées avec un télescope Schmidt-Cassegrain de 280 mm de diamètre et une caméra ASI 290MM (échantillonnage : 0,093 arcsec/pixel). Celle de la rangée inférieure (d, e, f) avec un télescope Cassegrain de 620 mm de diamètre et la même caméra (échantillonnage : 0,064 arcsec/pixel [11]). Le cercle magenta sur les images représente la position du centroïde calculée par le logiciel.

3.3 Déconvolution

Dans un certain nombre de cas, le corrélogramme, même filtré, reste difficile à mesurer car les pics restent noyés dans le bruit ou les artefacts.

Les techniques dites de déconvolution visent à pallier ce problème. Pour cela, l'idée consiste à déconvoluer⁴⁸ chaque image du couple par celle d'une étoile simple – dite de référence – que l'on considère identique à celle de la composante principale. Cette façon de faire revient, idéalement, à retirer du corrélogramme la contribution due d'une part à la composante

39 Ceci parce les calculs reposent sur l'algorithme de transformée de Fourier rapide (FFT).

40 Nommés AC0_xxx à AC9_xxx (resp. CC0_xxx à CC9_xxx).

41 D'autres exemples de corrélogrammes calculés avec Reduc sont donnés dans [4], [5], [6] et [7].

42 Reduc propose même un mode de mesure dit « Interferometry Fast Measurement » dans lequel il suffit de cliquer sur un des pics secondaires.

43 En fait, c'est le pic le moins brillant, dans l'algorithme d'intercorrélation, qui donne la bonne valeur de l'angle de position. Reduc inverse en interne les deux positions afin de rendre le processus plus intuitif.

44 Développé par D. Rowe (drowesmi@aol.com) et disponible auprès de ce dernier sur demande.

45 Ce que ni les méthodes fondées sur le calcul de l'autocorrélation, ni celles fondées sur celui de l'intercorrélation ne permettent.

46 Le calcul de l'intercorrélation n'est pas supporté. Il est avantageusement remplacé par celui du bispectre.

47 D'autres exemples de corrélogrammes calculés avec SpeckleToolbox sont donnés dans [8] et [11].

48 D'où le nom de la méthode. En pratique, il est rare que l'on procède par déconvolution proprement dit. Il est en effet plus simple de travailler dans le domaine fréquentiel, en divisant simplement le spectre de puissance du couple cible par celui de l'étoile de référence.

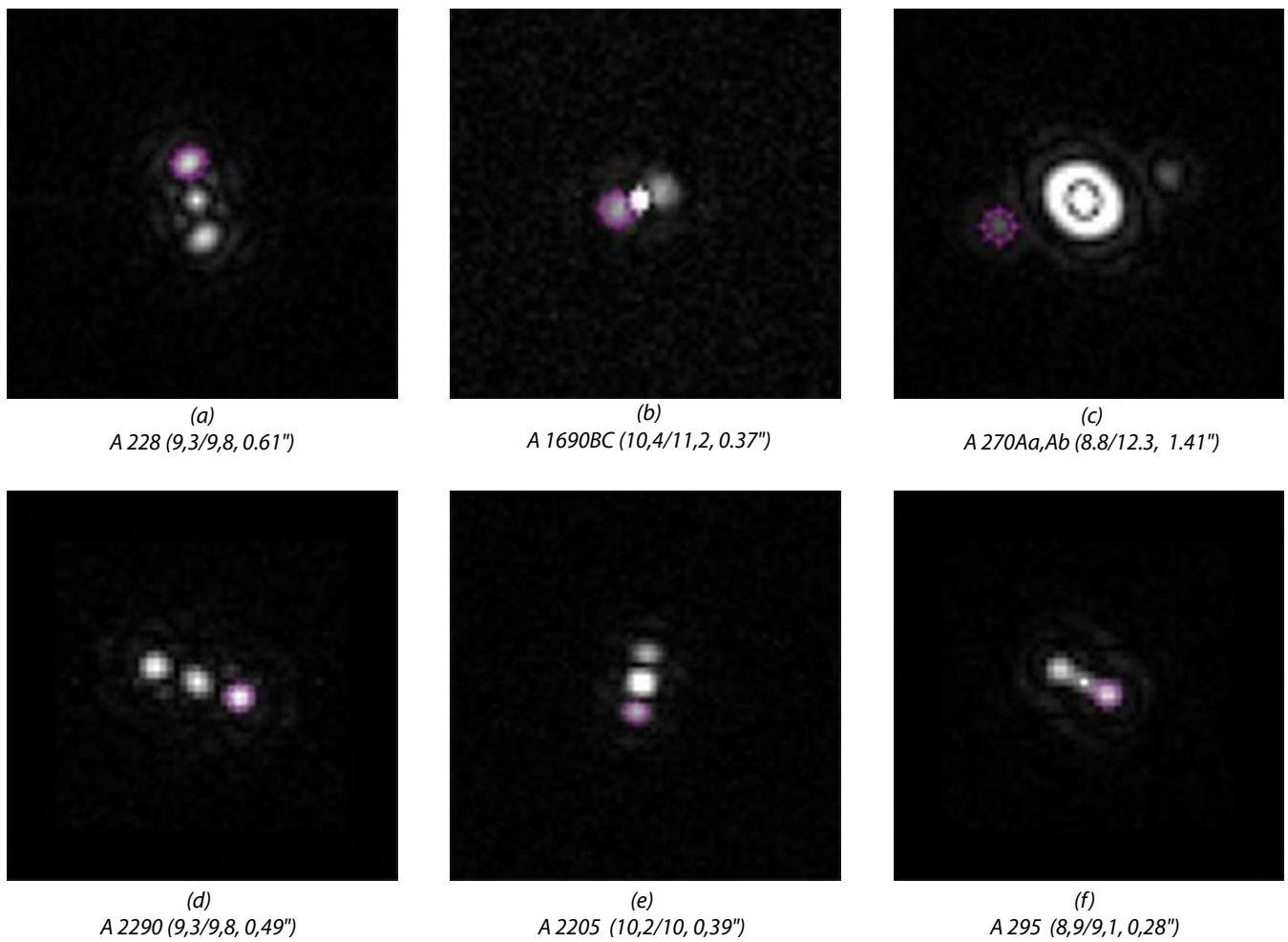


Figure 6 – Exemples d'autocorrélogrammes calculés avec SpeckleToolBox

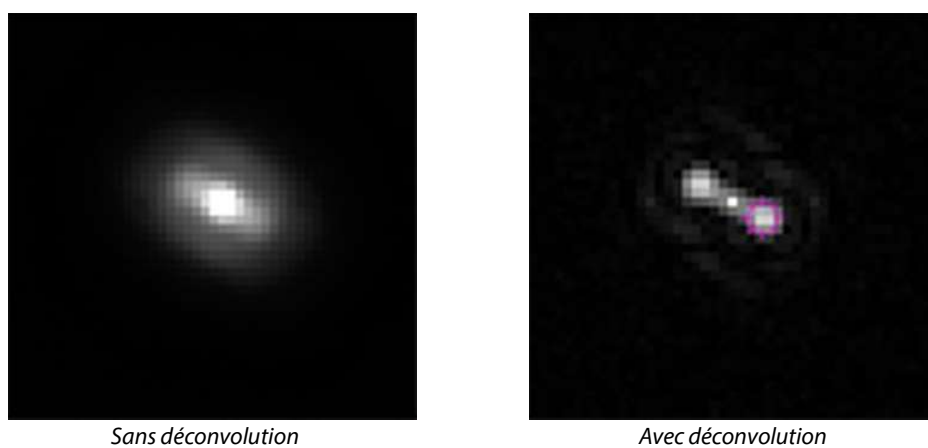


Figure 7 – Exemple de déconvolution d'un autocorrélogramme (A 295)

principale et d'autre part aux aberrations instrumentales. La principale difficulté consiste dans le choix de l'étoile de référence, dont les caractéristiques (magnitude, type spectral) doivent être aussi proches que possible de celle de la composante principale du couple cible, afin de constituer une « réplique » fidèle de cette dernière. L'étoile de référence doit aussi être choisie dans la proximité immédiate du couple cible et son acquisition se faire peu de temps après (ou avant) afin que les paramètres instrumentaux et de seeing puissent être considérés comme identiques.

La figure 7 illustre les bénéfices de cette technique, ici mise en œuvre avec le logiciel SpeckleToolBox⁴⁹. Le couple concerné est A 295, dont les composantes, de magnitudes 8,9 et 9,1 étaient séparées de 0,27 arcsec à la date de la mesure (2017). L'acquisition a été faite avec un télescope Ritchey-Chrétien de 50 cm d'ouverture [11] et une caméra EM-CCD Raptor Kite (échantillonnage : 0,074 arcsec/pixel). L'image de gauche donne le résultat du traitement par autocorrélation sur une séquence de 1000 images, avec post-filtrage par masque gaussien. Comme on le voit, malgré le filtrage, les pics sont noyés dans un halo de seeing et, surtout, touchent le pic central, ce qui rend la mesure très imprécise. L'image de droite montre le résultat du calcul de l'autocorrélation après déconvolution par une étoile de référence (BD 247037 ici). Le halo a quasiment disparu et les deux pics sont désormais bien séparés, ce qui permet au logiciel de positionner le centroïde de mesure précisément.

Un peu plus délicate à mettre en œuvre, la déconvolution par une étoile de référence, lorsque cette étoile de référence est bien choisie, améliore sensiblement la qualité des corrélogrammes et donc la précision des mesures. Elle permet par ailleurs de se passer de l'étape de post-filtrage *ad-hoc* et donc autorise une procédure de mesure plus indépendante de l'opérateur.

3.4 Flot de traitement

La figure 8 résume le flot de traitement complet permettant d'obtenir une mesure à partir d'un ensemble de séquences d'acquisition de la cible, d'une séquence d'acquisition des biais de la caméra et, le cas échéant, d'une étoile de référence.

4 Conclusion

Dans le cadre de la mesure d'étoiles doubles, l'interférométrie des tavelures constitue un outil très puissant. La disponibilité de logiciels très bien conçus et disponibles gratuitement d'une part et de caméras très sensibles à faible coût d'autre part la rend accessible au plus grand nombre, sans requérir de connaissances théoriques approfondies en traitement du signal ou à des investissements conséquents.

Pour des instruments limités par le seeing dans les conditions habituelles (de diamètre égal ou supérieur à 300 mm typiquement), cette technique permet de recouvrir le pouvoir séparateur de l'instrument et d'exploiter la quasi-totalité des nuits claires.

Mais elle reste applicable même avec des instruments de plus faible diamètre et, plus généralement, lorsque les cibles ne présentent pas un motif de tavelures marqué⁵⁰. Il ne s'agit plus alors d'interférométrie des tavelures à proprement parler mais plutôt de corrélation au niveau pixel⁵¹. Elle donne alors des résultats identiques à ceux obtenus avec les méthodes classiques de *lucky imaging*, mais avec un avantage pratique non négligeable : elle ne requiert pas d'étape de tri-sélection des images, forcément guidée par l'opérateur, ce qui rend sa mise en œuvre beaucoup plus systématique. Pour les couples serrés, la mesure sur les pics de corrélation est aussi plus fiable que par ajustement de surface (en particulier pour les corrélogrammes déconvolués par une étoile de référence).

Il n'y a donc aucune raison de ne pas l'utiliser.

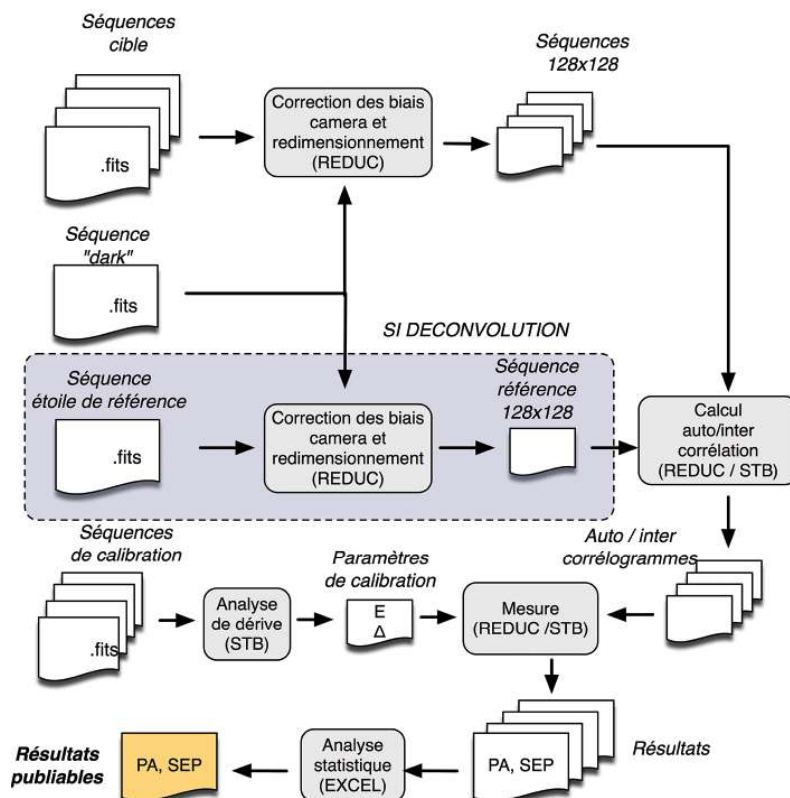


Figure 8 – Flot de traitement complet

49 La déconvolution est aussi possible avec Reduc. La procédure est décrite ici : <http://www.astrosurf.com/hfosaf/reduc/tutoriel.htm#speckle> (paragraphe Déconvolution).

50 On rappelle que le nombre moyen de tavelures dans une image est égal à $(D/R_0)^2$, où D est le diamètre de l'instrument et R₀ le diamètre de Fried.

51 Pixel autocorrelation dans la terminologie anglo-saxonne.

Remerciements

L'auteur tient à remercier tout particulièrement Florent Losse et David Rowe pour avoir développé respectivement les logiciels Reduc et SpeckleToolBox et pour les nombreuses discussions enrichissantes qui ont accompagné la mise en œuvre de ces logiciels. L'auteur remercie aussi la Société Astronomique de France, l'association T60 et l'association AstroQueyras qui ont permis, dans le cadre de missions à Nice, au Pic du Midi ou à Saint-Véran, d'expérimenter les techniques et méthodes décrites ici sur des instruments de 50 à 60 cm de diamètre.

Cet article est dédié à la mémoire de René Gili (†2018).

Bibliographie

- [1] B. Trégon. Initiation à l'interférométrie des tavelures – 1ère partie. Revue francophone des observateurs d'étoiles doubles, n°01, Décembre 2020.
- [2] A. Danjon, A. Couder. Lunettes et télescopes. A. Blanchard ed. 1999.
- [3] J. Sérot, B. Trégon, F. Grase. Mesures d'étoiles doubles à la lunette de 50 cm de Nice et au télescope de 60 cm du Pic du Midi. Observations & Travaux, 78 (2011), pp 16-19 .
- [4] J. Sérot. Measurements of double stars using a 280 mm reflector and an EM-CCD : 2014-2015 report. Journal of Double Star Observations, 11 (1s), Sep 2105.
- [5] J. Sérot. Speckle Interferometry of close visual binaries with a 280 mm reflector and an EM-CCD. Journal of Double Star Observations, 12 (5), Jul 2016.
- [6] J. Sérot. Measurements of close visual binaries with a 280 mm reflector and the ASI 290MM camera. Journal of Double Star Observations, 13 (2), Apr 2017.
- [7] J. Sérot. Measurements of 208 Aitken Visual Binary Stars with a 280 mm Reflector. Journal of Double Star Observations, 13 (3), Jul 2017.
- [8] J. Sérot. Measurements of Aitken Visual Binary Stars: 2017 Report. Journal of Double Star Observations, 14 (3), Jul 2018.
- [9] J. Sérot. Measurements of 121 New Visual Binary Stars Suggested by the Gaia Data Release 2. Journal of Double Star Observations, 15 (2), Apr 2019.
- [10] J. Sérot. Measurements of Visual Binary Stars: 2018 Report. Journal of Double Star Observations, 15 (3), Jul 2019.
- [11] J. Sérot, J.E. Communal. Measurements of Close Visual Binary Stars at the Observatory of Saint-Véran. Journal of Double Star Observations, 14 (3), Jul 2018.
- [12] R. Gili, J.L. Prieur, J.P. Rivet, F. Vakili, L. Koechlin, D. Bonneau. PISCO2: the new speckle camera of the Nice 76-cm refractor. ArXiv 1405.683, 2014.
- [13] J. Sérot. User's Guide to WdsPick. Journal of Double Star Observations, 12 (6), Oct 2016.
- [14] J. Sérot. Petit précis de traitement du signal à l'usage des duplicistes opérant par interférométrie des tavelures. Observations & Travaux, 80 (2013).
- [15] R. Harshaw, D.Rowe, R.Genet. The Speckle Toolbox: A Powerful Data Reduction Tool for CCD Astrometry. Journal of Double Star Observations, 13 (1), 2017.
- [16] R. Harshaw. Gaia DR2 and the Washington Double Star Catalog: A Tale of Two Databases. Journal of Double Star Observations, 14 (4), 2018.



Jocelyn Sérot

Jocelyn Sérot est Professeur à l'Université Clermont-Auvergne, où il enseigne l'informatique et la conception de systèmes numériques. Astronome amateur de longue date, il s'intéresse à l'observation et la mesure d'étoiles doubles depuis une quinzaine d'années. Il est l'auteur de plus de 2000 mesures, toutes intégrées au WDS et le découvreur de 118 couples (STJ 1 - STJ 118). Il a aussi développé plusieurs logiciels dédiés à l'observation et la mesure d'étoiles doubles, comme WdsPick ou LiveSpeckle.

MESURES D'ÉTOILES DOUBLES VISUELLES À L'OBSERVATOIRE ANTARÈS

Double Stars Measurements at Antarès Observatory

Bernard Candela

E-mail: b-candela@wanadoo.fr



Résumé

Cet article présente le résultat de 954 mesures d'étoiles doubles réalisées entre Décembre 2016 et Mai 2017 à l'observatoire Antarès à La Seyne-sur-Mer avec un télescope MEADE de 250 mm de diamètre et deux caméras CCD.

Abstract

This article presents the results of 954 double star measurements made between December 2016 and May 2017 at the Antarès observatory located at La Seyne-sur-Mer (France) with a MEADE 10" telescope and two CCD cameras.

Keywords: astrometry, stars, binaries: visual, CCD



L'observatoire Antarès

L'observatoire Antarès (fig. 1) est situé à La Seyne-sur-Mer, en France, sur les bords de la mer Méditerranée. Il est installé à 50m d'altitude et ses coordonnées géographiques sont :

- Longitude : 5° 52' 22" Est
- Latitude : +43° 05' 58" Nord

L'observatoire a été construit en 1964 et il a depuis participé à de nombreuses activités scientifiques. Il a notamment produit un millier de mesures astrométriques d'astéroïdes entre les années 1975 et 1985 ainsi qu'en 2017 et a contribué à des travaux sur les occultations d'étoiles par la Lune en coordination avec l'IOTA (International Occultation Timing Association). Pour ses travaux sur les astéroïdes et les corps mineurs du système solaire, il est enregistré sous le code UAI 509 auprès du Minor Planet Center [1].

Instrumentation

Les résultats présentés ici ont été obtenus à l'aide d'un Télescope MEADE LX200 de 250 mm de diamètre installé à poste fixe sous une des coupoles de l'observatoire.

C'est un modèle datant des années 1990 fonctionnant toujours après 30 années de service. Comme tous les premiers modèles de la marque, il souffre d'un décalage latéral lorsque l'on manipule la molette de mise au point, ce qui présente l'inconvénient de perdre la collimation réalisée précédemment.

Deux caméras et plusieurs configurations optiques ont été utilisées.

La première caméra est une Starlight Xpress de type SVM9, elle est équipée du capteur CCD Sony ICX423AL de 8.72 x 6.5 mm et possède des pixels de 11.6 x 11.2 μm . Les données du constructeur le créditent d'un maximum d'efficacité quantique



Figure 1 : l'observatoire Antarès à La Seyne-sur-Mer

de 60% à 520 nanomètres (fig. 2). Elle a été utilisée avec trois configurations optiques différentes, soit au foyer primaire ($F=2500\text{mm}$) pour les couples très écartés, soit avec une lentille de Barlow 2x ($F=5000\text{mm}$) ou avec une lentille de Barlow 3x ($F=7500\text{mm}$) pour les couples serrés de 3" à 5".

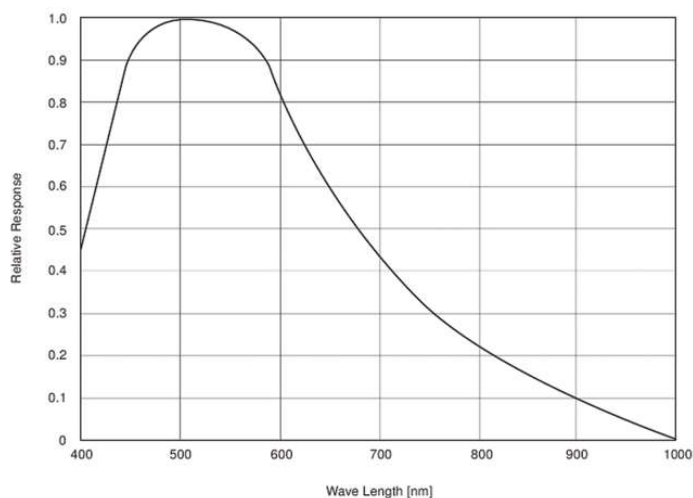


Figure 2 : Courbe de réponse relative du capteur ICX423AL (source Sony)

La deuxième caméra est une ASI178MM produite par la société ZWO et de technologie plus récente. Elle est équipée d'un capteur CMOS Sony IMX178 de 3096 x 2080 pixels de 2.4 μm de côté et offre un rendement quantique maximum de l'ordre de 80% à 490 nanomètres (fig. 3). Elle a également été utilisée au foyer primaire pour les couples largement séparés ou bien avec une lentille de Barlow 2x. Dans cette dernière configuration, les acquisitions ont été faites en binning 4x4 car à cette époque, avec la version de Reduc dont je disposais, la taille de la fenêtre de mesure ne pouvait dépasser 50 pixels rendant la mesure des étoiles en binning 1x1 compliquée. Je n'ai donc pas pris beaucoup de clichés avec cette configuration. Les versions plus récentes de Reduc autorisent des fenêtres beaucoup plus grandes et il sera possible à l'avenir de mesurer sans problème des clichés pris en binning 1x1 et de profiter de la meilleure résolution offerte par les pixels de petite dimension de cette caméra. Des essais ont été réalisés avec une Barlow 3x, soit une distance focale résultante de 7 500 mm, pour profiter de la taille des pixels. Cependant le champ utile étant plus réduit, il est plus difficile de maintenir le parallélisme de l'axe du télescope avec celui de la lunette guide.

La technique demande à être améliorée pour pouvoir atteindre des couples écartés de 2".

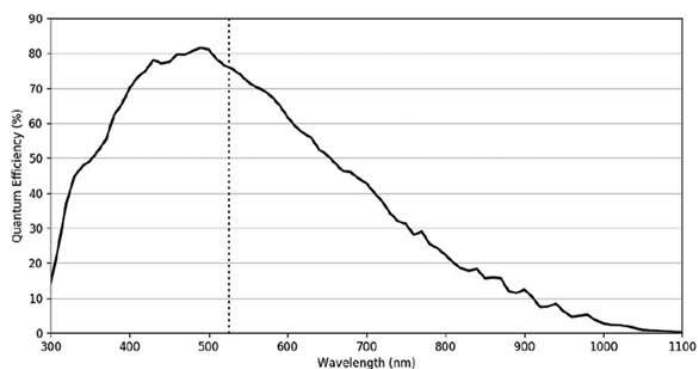


Figure 3 : Courbe de réponse de la caméra ASI178MM (source ZWO)

Acquisitions, traitement et étalonnage

Les mesures ont été effectuées de décembre 2016 à mai 2017. Les séquences d'acquisition comprennent de 30 à 300 images selon l'écartement des composantes. Les acquisitions sont corrigées du biais électronique et du signal thermique à l'aide d'images de calibration prises chaque soir après stabilisation de la température de la caméra (fig. 4).

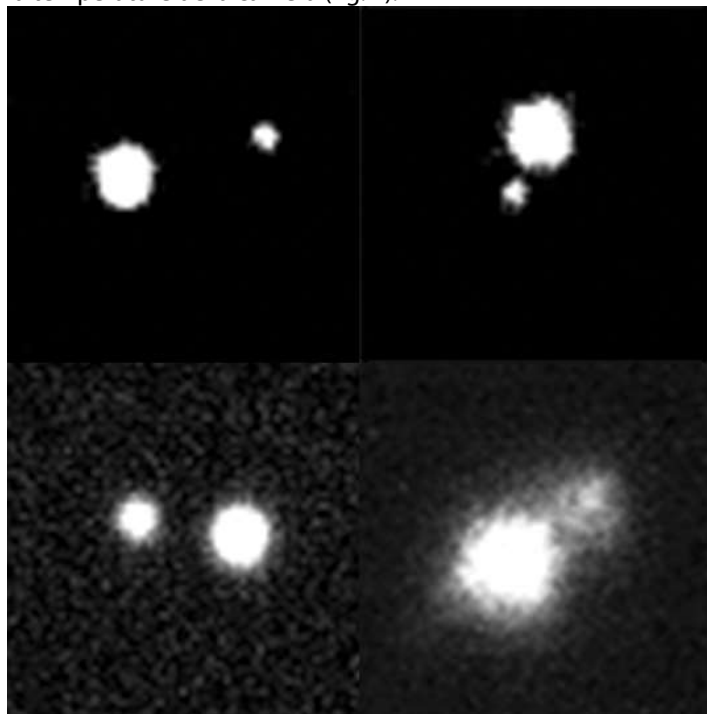


Figure 4 : Exemples d'acquisition, de gauche à droite et de bas en haut, STF1852 ($\theta=266^\circ5$, $\rho=24''86$), STF1930 ($\theta=35^\circ9$, $\rho=11''68$), STF2169 ($\theta=111^\circ3$, $\rho=15''46$) et STF1318 ($\theta=228^\circ2$ et $\rho=2''56$) imagé avec une distance focale de 7500 mm

Le télescope et les caméras sont utilisés pour les autres activités de l'observatoire avec des configurations variables, il est donc nécessaire de réétalonner systématiquement l'installation lors de chaque séance de mesures d'étoiles doubles.

L'étalonnage de l'orientation du capteur est effectuée préférentiellement par l'acquisition de filés d'étoiles réalisés avec l'entraînement horaire arrêté (fig. 5). On obtient de 3 à 10 traînées sur lesquelles on applique la technique d'étalonnage par filé d'étoiles du logiciel Reduc [2], puis on fait la moyenne de ces valeurs.

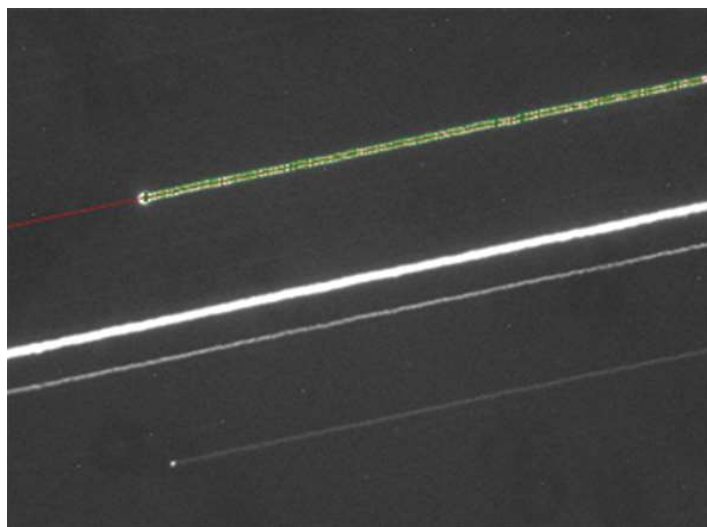


Figure 5 : Exemple d'étalonnage sur filé d'étoiles avec la procédure Trail Analysis de Reduc. Les points utilisés pour le calcul apparaissent en vert et la ligne résultante en rouge. Sur ce cliché, 4 filés sont mesurés et la moyenne de ces quatre filés est utilisée pour calculer Δ qui correspond à la différence entre l'axe vertical du capteur et le Nord réel.

L'échantillonnage est déterminé en faisant la moyenne des mesures de séparation de plusieurs couples étalons tirés de la liste publiée par la Commission des étoiles doubles de la SAF [3].

Chaque couple étalon est d'abord mesuré individuellement sur plusieurs images. La procédure est répétée sur plusieurs étalons.

Les moyennes de Δ (orientation du capteur par rapport au nord) et E (échantillonnage) sur l'ensemble des étalons sont retenues comme valeurs finales d'étalonnage pour la nuit.

Les tables la et lb montrent un exemple de la procédure appliquée avec 4 étalons pour la nuit du 18/02/2017.

Résultats et table de mesures

Les résultats sont présentés dans la table II qui se décompose de la manière suivante :

Colonne 1 : identification dans le WDS [4]

Colonne 2 : nom du système

Colonne 3 : composantes mesurées

Colonne 4 : époque julienne

Colonne 5 : angle de position en degrés

Colonne 6 : séparation en secondes

Colonne 7 : nombre de nuits

Conclusion

Malgré les difficultés liées au partage de l'instrument et les nécessaires changements de configuration induits, ces premières expériences prouvent que le T250 est bien adapté à la mesure des couples stellaires.

Nous prévoyons de faire évoluer plusieurs éléments pour les futures campagnes d'observation de façon à observer des couples plus serrés et plus intéressants d'un point de vue astrophysique.

La caméra Starlight ne sera plus utilisée et sera remplacée par la caméra ASI178MM.

La technique de prise de vue évoluera également. Nous prendrons des séquences comprises de 500 à 1000 images pour profiter de meilleures performances avec le logiciel Reduc.

Le prétraitement comprendra la prise de darks (signal thermique), d'offsets (biais électronique) et de flats (plage de lumière uniforme) afin de pouvoir obtenir en plus des mesures de position, des mesures de photométrie différentielle dans les bandes B, V et R, la caméra ASI178MM possédant une roue à filtres motorisée et les filtres correspondants.

Remerciements

Je tiens à remercier tout particulièrement Florent LOSSE qui m'a permis de mener à bien les réductions et cet article. Son magnifique logiciel REDUC, dont on découvre la puissance au fur et à mesure qu'on l'utilise, est un régal à utiliser. Le résultat est stimulant même si le travail de réduction est nécessairement long si on veut être rigoureux pour atteindre la meilleure précision possible.

Références

[1] Codes observatoires du Minor Planet Center:

<https://www.minorplanetcenter.net/iau/lists/ObsCodesF.html>

[2] Losse, F., Reduc, logiciel de réduction

<http://www.astrosurf.com/hfosaf>

[3] Liste d'étoiles doubles étalons, Florence et Pascal Mauroy(†) et Guy Morlet, 2007, O & T, 67, 17.

<https://ced.saf-astronomie.fr/>, rubrique Outils

[4] Mason, D.B., Wycoff G.L., Hartkopf, W.I. Washington Double Stars Catalog, USNO, 2015

<https://www.usno.navy.mil/USNO/astrometry/optical-IR-prod/wds/WDS>

Table la - Etalonnage nuit du 18/02/2017

Etalon	θ ref (°)	ρ ref (")	Δ (°)	E (")	Méthode	Cliché
STF 222	35.9	16.69	7.58	0.23977	Surface	Compositage auto (30)
			7.77	0.24262	Surface	STF 222-29
			7.74	0.23862	Surface	STF 222-3
			7.82	0.23906	Surface	STF 222-7
			7.90	0.23908	Surface	STF 222-18
			7.81	0.23967	Surface	STF 222-4
			7.66	0.23693	Surface	STF 222-30
			8.07	0.23896	Surface	STF 222-24
Moyenne			7.79	0.23934		

Table la - Exemple de procédure d'étalonnage. Mesure d'un couple étalon sur plusieurs images, l'opération est répétée sur les 4 étalons choisis pour cette séance.

Table lb - Etalonnage nuit du 18/02/2017

Etalon	θ ref (°)	ρ ref (")	Δ (°)	E (")
STF 222	35.9	16.69	7.79	0.23934
STF 292	211.57	23.05	7.76	0.23940
STF 297	278.83	15.81	7.64	0.23842
STF 485	304.75	17.94	7.92	0.23823
Moyenne			7.78	0.23885

Table lb - Exemple de procédure d'étalonnage. Obtention des valeurs finales d'étalonnage à partir de la moyenne des étalons de la nuit.

Table II - Mesures						
Index WDS	Système	Composantes	Epoque J	Thêta (°)	Rhô (")	Nuits
00004+0830	BU 732	AB	2016.995	151.5	5.80	1
00004+0830	BU 732	AB	2017.008	152.7	5.97	1
00005+6713	HJ 1924		2016.997	224.7	8.03	1
00008+3647	ES 221		2016.970	233.4	15.61	1
00011+6336	MLB 240		2016.997	41.5	5.81	1
00017+6309	MLB 241	AB	2016.997	276.3	7.28	1
00027+5958	ARG 47		2016.997	292.6	9.73	1
00043+4235	HJ 1932	AB	2016.995	306.6	7.20	1
00046+4723	ES 1293		2016.995	183.5	5.99	1
00049+4939	ES 864		2016.995	166.6	9.03	1
00057+1750	STF3061		2016.995	149.3	8.04	1
00057+4549	STT 547	AB	2016.995	188.1	5.92	1
00065+0155	HJ 1000	AB	2016.995	203.8	7.24	1
00073+3741	ES 1935		2016.995	134.7	9.01	1
00076+4009	STF3064	AB	2016.956	8.6	25.70	1
00076+4009	STF3064	AB	2016.970	8.8	25.81	1
00089+3713	STF 1		2016.995	284.8	10.24	1
00089+3713	STF 1		2017.005	288.0	9.89	1
00092+4443	HJ 1001		2016.956	77.2	15.71	1
00093+5324	ES 928	AB	2016.997	17.5	8.11	1
00096+4758	ES 1126		2016.995	319.1	6.32	1
00099+0827	STF 4		2016.995	277.1	5.18	1
00099+0827	STF 4		2017.008	276.4	5.19	1
00107+7221	HJ 1940		2016.997	138.7	7.23	1
00112+4419	ES 1406	AB	2016.995	331.1	9.76	1
00115+2949	MLB 441	AB	2016.956	358.6	13.94	1
00115+2949	MLB 441	AC	2016.956	346.4	50.77	1
00115+2949	MLB 441	BC	2016.956	342.2	36.93	1
00115+2949	MLB 441	CD	2016.956	138.5	6.12	1
00116+5945	BU 254	AB	2016.997	237.0	7.32	1
00116+5945	BU 254	AC	2016.997	240.3	36.44	1
00133+4636	ES 1194		2016.995	292.5	5.14	1
00138+3612	BU 1341	AB	2016.970	319.3	20.74	1
00138+3612	BU 1341	AC	2016.970	228.2	181.84	1
00140+4401	BRT 64		2017.005	131.9	4.83	1
00142+4612	ES 1195		2017.005	14.8	6.72	1
00152+2722	J 868		2017.005	231.1	6.31	1
00152+7801	STF 11		2016.997	192.4	8.09	1
00160+4835	HJ 1009	AB	2016.956	28.1	16.25	1
00160+4835	HJ 1009	AC	2016.956	138.0	36.52	1
00164+4336	HJ 1947	AB	2016.997	76.0	8.33	1
00165+2918	STF 17	AB	2016.956	29.6	26.95	1
00165+2918	STF 17	AB	2016.970	29.5	27.05	1
00167+5439	STF 16		2016.997	37.1	5.66	1
00169+4427	ES 1481		2016.997	57.2	7.07	1
00174+3550	WEI 1		2017.005	287.3	5.26	1
00181+5118	ES 749		2016.997	145.9	9.09	1
00184+4401	GRB 34	AB	2016.956	65.6	34.32	1
00184+4930	ES 41		2016.997	218.3	6.68	1
00185+2608	STF 24		2017.005	248.6	4.90	1
00186+3559	ES 2579		2016.956	94.1	14.81	1
00187+2545	HJ 1015	AB	2017.008	289.0	5.45	1
00191+6513	MLB 243		2016.997	312.8	5.00	1
00192+4330	ES 1484	AB	2016.956	42.8	32.26	1
00200+1419	CHE 5	AB	2017.008	205.0	6.51	1

Table II - Mesures						
Index WDS	Système	Composantes	Epoque J	Thêta (°)	Rhô (")	Nuits
00200+1419	CHE 5	AC	2017.008	100.4	46.11	1
00205+4911	ES 1197		2016.997	108.6	6.18	1
00209+4050	ES 1602		2017.008	81.9	7.02	1
00212+4850	ES 1198		2016.997	181.0	9.33	1
00220+4213	HJ 1021		2017.008	245.6	6.16	1
00229+5420	ES 42		2016.997	207.1	7.06	1
00229+6214	ABH 3	AE	2017.129	192.0	57.57	1
00229+6214	ES 115	AB	2017.129	84.0	9.39	1
00229+6214	ES 115	AC	2017.129	55.4	22.54	1
00229+6214	ES 115	AD	2017.129	81.6	43.15	1
00229+6214	FYM 155	AF	2017.129	147.2	25.37	1
00231+6018	FOX 105		2017.129	153.1	7.01	1
00232+5146	HJ 1022		2017.129	42.6	6.51	1
00239+2930	STF 28	AB	2016.962	223.9	33.12	1
00239+2930	STF 28	AB	2016.970	224.1	33.37	1
00258+3852	ES 222		2017.008	152.9	6.29	1
00271+6112	FOX 108		2017.129	26.6	7.55	1
00303+4409	HJ 1978		2017.129	221.9	5.24	1
00310+5539	ES 116		2017.008	257.7	7.36	1
00318+3658	STT 13	AB	2017.129	131.5	6.79	1
00318+3658	STT 13	AC	2017.129	164.6	30.65	1
00318+3658	STT 13	AD	2017.129	173.9	42.45	1
00318+3658	STT 13	CD	2017.129	195.5	13.07	1
00324+4455	HJ 1029		2016.962	288.6	15.02	1
00336+4509	A 912	AB	2016.962	201.9	15.19	1
00351+3910	STF 41	AB	2016.962	187.9	15.73	1
00351+3910	STF 41	AB	2016.992	188.6	15.67	1
00352+3650	STF 40	AB	2016.962	311.4	11.72	1
00352+3650	STF 40	AB	2016.992	312.1	11.41	1
00360+2959	STF 42	AB	2016.970	21.1	6.07	1
00360+2959	STF 42	AC	2016.970	288.3	36.80	1
00369+3343	H 517	AB	2016.951	174.7	36.91	1
00369+3343	H 517	AC	2016.951	355.6	55.21	1
00378+2443	J 923		2016.962	264.7	23.25	1
00384+4059	STF 44		2016.962	274.6	12.97	1
00403+2403	BU 1348	AC	2016.962	233.2	47.01	1
00403+2403	BU 1348	AC	2016.970	233.3	47.16	1
00403+2403	STF 47	AB	2016.962	205.6	16.52	1
00403+2403	STF 47	AB	2016.970	205.1	16.66	1
00403+2403	STF 47	AB	2016.970	206.8	16.65	1
00444+3332	STF 54		2016.970	188.9	18.66	1
00464+3057	STFA 1	AB	2016.951	46.4	47.61	1
00464+3057	STFA 1	AB	2016.956	46.3	47.55	1
00464+3057	STFA 1	AB	2016.970	46.4	47.68	1
00503+3548	STF 62		2016.956	304.0	11.67	1
00503+3548	STF 62		2016.970	303.3	11.86	1
00546+3910	STF 72		2016.956	173.2	23.55	1
00546+3910	STF 72		2016.970	173.2	23.57	1
01133+4426	HJ 2027	AB	2016.956	160.5	18.44	1
01144-0755	STFA 3	AB	2016.951	330.4	48.86	1
01170+3828	STF 104		2016.962	323.4	13.74	1
01170+3828	STF 104		2016.970	322.7	13.71	1
01178+4901	STF 102	AB,C	2016.970	223.4	10.24	1
01178+4901	STF 102	AB,D	2016.970	58.2	23.57	1
01189+3958	STT 29		2016.962	265.3	20.33	1

Table II - Mesures						
Index WDS	Système	Composantes	Epoque J	Thêta (°)	Rhô (")	Nuits
01198+5029	ES 449		2016.962	214.7	11.38	1
01207+4620	STF 112	AB	2016.962	337.0	19.08	1
01207+4620	STF 112	AB	2016.970	336.7	19.06	1
01321+1657	STF 132	DF	2016.995	288.5	5.20	1
01328+3551	STF 133	AD	2016.970	184.8	23.20	1
01340+4559	ARG 5		2016.995	320.2	10.17	1
01342+4800	STF 134		2016.970	354.3	11.27	1
01344+1253	AG 21		2016.995	98.3	7.63	1
01348+2935	BRT 5	AB	2016.995	213.1	5.82	1
01363+0419	BU 869		2016.995	198.3	5.68	1
01368+4007	MLB 6		2016.995	54.5	6.59	1
01393+3901	HJ 1087		2016.962	74.7	13.34	1
01397+4602	EGB 1		2016.995	145.5	5.71	1
01431+3917	MLB 8		2016.995	98.8	6.47	1
01431+4238	ROE 65		2016.995	120.5	8.86	1
01450+4342	STF 154		2016.995	125.0	5.15	1
01459+4535	ES 1361	AB	2016.962	3.7	18.02	1
01467+3856	STF 157	AC	2016.970	116.1	12.39	1
01467+3856	STF 157	AD	2016.970	281.4	55.92	1
01474+1722	STF 159		2016.962	294.5	31.14	1
01480+5153	ES 869		2016.995	230.1	8.55	1
01483+4600	ES 1305		2016.995	275.2	6.83	1
01486+1618	BU 510	AC	2016.956	326.8	53.67	1
01492+3404	STF 164		2016.995	94.8	9.78	1
01493+4058	ES 158		2016.995	46.7	7.17	1
01496+4618	BU 1365	AB	2016.970	359.2	14.85	1
01501+1421	STF 173		2016.962	205.3	23.02	1
01510+2107	STF 175	AB	2016.956	359.9	28.60	1
01510+2107	STF 175	AB	2016.962	359.7	28.32	1
01517+4549	ARG 51		2016.962	171.6	15.93	1
01524+4125	MLB 9		2016.995	319.0	6.03	1
01526+3127	HJ 645		2016.995	105.5	7.80	1
01535+1918	STF 180	AB	2016.995	0.2	7.56	1
01542+1910	L 1		2016.995	57.3	5.80	1
01547+3812	STF 181	AB	2016.962	125.4	27.27	1
01547+3812	STF 181	AD	2016.962	281.3	27.18	1
01551+2847	STF 183	AB,C	2016.995	160.8	5.65	1
01562+3602	AG 25		2016.995	69.7	5.35	1
01562+3715	BU 1368	AC	2016.992	79.9	17.90	1
01567+3505	ES 2144		2016.995	143.1	6.35	1
01568+1505	AG 27		2016.962	266.2	15.46	1
01570+4324	ES 1499		2016.995	299.0	6.39	1
01577+3646	ES 162		2016.962	208.0	12.10	1
01579+2336	H 512	AB	2016.951	47.6	37.32	1
01579+2336	H 512	AB	2016.962	47.9	37.34	1
01579+2336	H 512	AC	2016.951	76.2	190.11	1
01579+2336	H 512	AC	2016.962	76.2	190.41	1
01579+2336	H 512	AD	2016.951	84.9	271.39	1
01579+2336	H 512	AD	2016.962	84.9	272.34	1
01581+4123	S 404	AB	2016.962	84.4	29.57	1
01586+5545	ES 949	AB	2016.995	262.3	5.60	1
01594+5036	AG 302		2016.995	2.9	14.68	1
01596+2100	STF 196	BC	2016.962	154.1	21.19	1
01596+5036	ES 454		2016.995	210.4	8.63	1
01596+5117	ES 1059	AB	2016.995	210.1	7.77	1

Table II - Mesures						
Index WDS	Système	Composantes	Epoque J	Thêta (°)	Rhô (")	Nuits
02005+4525	ES 1362		2016.995	292.9	9.17	1
02023+1924	STF 203		2016.962	329.7	14.82	1
02024+1923	BU 1369		2016.956	129.7	62.46	1
02029+1122	STF 206		2016.962	134.1	31.45	1
02057+3657	STF 210		2016.962	244.2	17.59	1
02091+4048	STF 215		2016.962	59.6	20.03	1
02109+3902	STF 222		2016.962	35.3	16.77	1
02113+4407	ES 2590		2016.962	128.1	39.06	1
02128-0224	STF 231	AB	2016.951	233.8	16.80	1
02157+1046	STF 237	AB	2016.962	237.0	14.60	2
02157+1046	STF 237	AC	2016.962	275.2	72.33	2
02172+3729	STF 238	AC	2016.962	355.6	11.09	1
02186+4017	STF 245	AB	2016.962	296.2	11.29	1
02210+3855	ES 2591		2016.962	84.6	7.85	1
02216+2338	STF 254		2016.962	15.6	12.09	1
02238+4920	STF 256	AB	2016.962	197.0	21.28	1
02238+4920	STF 256	AC	2016.962	45.3	35.70	1
02254+4804	STF 259		2016.962	19.2	13.39	1
02291+2252	FOX9043	AD	2017.011	265.1	47.68	1
02291+2252	HU 603	AB	2017.011	231.3	6.10	1
02291+2252	HU 603	AC	2017.011	275.1	81.22	1
02305+2514	STF 271	AB	2016.951	182.3	13.13	1
02305+2514	STF 271	AB	2016.992	184.4	12.95	2
02305+2514	STF 271	AC	2016.951	29.8	114.69	1
02307+2013	J 588		2017.011	151.9	5.10	1
02309+2130	AG 40		2017.011	245.9	5.72	1
02315+0106	STF 274	AB	2016.951	220.1	13.71	1
02315+3727	BU 304		2016.962	285.1	24.94	1
02315+4327	J 928		2017.011	257.0	6.10	1
02315+4329	J 929		2017.011	348.6	5.99	1
02318+3807	ES 2593		2016.962	327.0	23.36	1
02343+4017	AG 42		2017.011	142.9	6.44	1
02356+3719	STF 279	AB	2016.992	70.5	17.86	1
02367+4603	HJ 2147		2017.011	177.9	8.81	1
02370+2439	STFA 5	AB	2016.951	274.6	38.08	1
02391+2854	KU 77	AB	2016.962	174.4	35.65	1
02405+4535	ES 1308	AB	2017.011	275.7	6.83	1
02407+2704	STF 289		2016.962	0.2	28.15	1
02407+2704	STF 289		2016.992	0.5	28.34	1
02428+3709	STF 294		2017.011	100.9	7.26	1
02473+3835	ES 2083	AC	2017.011	280.9	30.49	1
02476+2941	BU 307		2016.992	316.2	16.00	1
02493+1728	STF 311	AC	2016.992	110.9	24.94	1
02535+1219	AG 57		2016.962	346.3	17.61	1
03009+5221	STF 331		2016.951	84.8	12.12	1
03018+1051	STF 338		2016.962	201.7	19.97	2
03066+2038	STF 350		2016.956	118.0	16.50	1
03066+2038	STF 350		2016.962	119.4	16.40	1
03081+2435	STF 354		2016.956	51.7	35.63	1
03112+2225	H 5117	AB	2016.962	321.3	33.43	1
03143+2257	STF 366	AB	2016.956	34.3	41.51	1
03143+2257	STF 366	AB	2016.962	34.4	41.07	1
03193+4559	STF 372	AB	2017.011	292.1	7.71	1
03193+4559	STF 372	AC	2017.011	76.6	52.92	1
03203+1944	STF 376		2017.011	251.4	7.16	1

Table II - Mesures						
Index WDS	Système	Composantes	Epoque J	Thêta (°)	Rhô (")	Nuits
03206+1911	STF 377	AC	2016.956	222.5	24.27	1
03207+4641	BU 1294		2017.011	239.5	7.52	1
03213+4743	ES 464		2017.011	65.1	6.92	1
03229+2949	STF 379		2016.962	100.6	10.45	1
03242+1733	STF 383		2017.132	122.1	5.46	1
03343+6348	MLB 190		2017.129	96.7	6.00	1
03355+5354	ES 622		2017.129	33.4	4.82	1
03392+2757	STF 424		2016.995	313.2	10.03	1
03406+2846	STF 427	AB	2016.995	205.8	7.14	1
03411+6039	ARG 57		2017.129	316.5	6.03	1
03423+3716	AG 70	AB	2016.995	25.9	6.79	1
03423+3716	AG 70	AC	2016.995	345.2	35.05	1
03428+3016	AG 72		2016.995	282.6	6.19	1
03449+5119	ES 876		2016.995	67.0	3.98	1
03455+6606	AG 71		2017.129	242.7	7.92	1
03459+5025	ES 465		2016.995	265.4	10.13	1
03467+4241	FOX 134		2016.995	109.1	5.91	1
03470+4126	STF 443	AB	2016.995	55.8	6.77	1
03500+2351	STT 64	AC	2017.132	235.1	10.14	1
03514+1417	HJ 3248		2017.132	27.9	6.65	1
03516+0020	STF 463		2017.126	186.4	9.95	1
03529+1423	WZ 8		2017.126	104.1	8.87	1
03573+4153	STF 469		2017.011	146.3	9.12	1
03583+2757	ARG 58		2017.011	14.3	6.37	1
03598+1133	STF 478	AB	2017.011	138.2	9.67	1
03598+1133	STF 478	AB	2017.132	138.4	9.66	1
04009+2312	STF 479	AB	2017.011	127.9	7.35	1
04009+2312	STF 479	AB	2017.132	127.9	7.52	1
04009+2312	STF 479	AC	2017.011	242.7	58.64	1
04009+2312	STF 479	AC	2017.132	241.7	56.40	1
04244+3419	STF 533	AB	2016.951	60.6	20.03	1
04431+3356	HJ 348		2016.962	285.2	30.56	1
04477+3446	HJ 349		2016.962	88.5	10.45	1
04511+4458	STF 599	AB	2016.962	335.9	10.33	1
04588+4408	STF 613	AB	2016.962	98.5	11.51	1
04588+4408	STF 613	AC	2016.962	50.1	21.40	1
05008+3913	STF 621	AB	2016.962	131.7	10.01	1
05091+4907	STT 96		2017.156	104.9	20.73	1
05110+3917	STF 646	AB	2016.962	76.6	15.71	1
05154+3241	STF 653	AB	2017.156	10.8	8.89	1
05154+3241	STF 653	AC	2016.951	223.3	14.57	1
05154+3241	STF 653	AC	2017.156	224.5	14.39	1
05159+3425	ES 170	AB	2016.962	11.6	23.73	1
05172+3747	HJ 3271		2017.156	350.3	11.63	1
05178+4720	ES 574	AB	2016.962	68.1	34.47	1
05252+3451	STF 698	AB	2016.951	347.7	31.69	1
05413+2929	STF 764		2016.951	14.9	26.27	1
05413+2929	STF 764		2017.241	14.2	25.97	1
06001+1742	J 959		2017.140	264.7	4.89	1
06011+2320	H 448	AB	2016.970	259.4	31.70	1
06011+2320	H 448	BC	2016.970	209.7	5.72	1
06017+1437	J 681		2017.140	40.1	3.54	1
06034+2738	STF 830	AB	2016.995	262.3	11.43	1
06034+2738	STF 830	AB	2017.156	262.8	11.46	1
06034+2738	STF 830	AC	2016.995	188.1	25.41	1

Table II - Mesures						
Index WDS	Système	Composantes	Epoque J	Thêta (°)	Rhô (")	Nuits
06034+2738	STF 830	AC	2017.156	188.8	25.51	1
06034+2738	STF 830	BC	2017.156	162.8	24.74	1
06041+2316	BU 1405	AC	2017.156	24.6	105.68	1
06049+1014	J 312		2017.140	159.5	4.36	1
06049+1054	J 311		2017.140	90.2	4.51	1
06058+1652	J 1049		2017.140	120.1	2.87	1
06078+0020	J 338		2017.140	230.9	5.67	1
06093+2426	STT 134	AB	2016.970	189.0	31.22	1
06094+2420	BRT 140		2017.140	152.9	3.92	1
06098+4632	BRT 92		2017.140	105.3	4.30	1
06107+2829	BRT 12		2017.140	36.3	5.60	1
06111+6759	STF 831	AB	2016.970	77.1	11.84	1
06115+5702	ARG 13		2016.970	274.5	21.41	1
06126+1710	J 968		2017.140	174.3	4.71	1
06134+0556	J 969		2017.140	301.1	4.48	1
06153+1304	J 391		2017.140	170.3	4.44	1
06156+3609	STF 872	AB	2016.951	216.0	11.64	1
06156+3609	STF 872	AC	2016.951	284.9	196.74	1
06162+2051	J 1054		2017.140	141.6	2.99	1
06167+3852	GCB 18	AC	2017.140	321.4	6.08	1
06167+3852	J 591	AB	2017.140	200.4	4.80	1
06176+2016	HJ 2306		2017.140	34.2	4.10	1
06182+1557	A 2448	AB	2017.140	278.1	5.89	1
06182+1557	A 2448	AC	2017.140	223.3	6.91	1
06183+6212	STF 866	AB	2016.973	194.7	19.04	1
06183+6212	STF 866	AC	2016.973	267.5	80.04	1
06187+3752	J 593		2017.140	195.5	4.52	1
06198+1741	J 973	AB	2016.970	324.2	25.13	1
06199+2501	STF 889	AB	2016.970	243.9	21.88	1
06199+2501	STF 889	AB	2017.156	244.6	21.36	1
06199+2501	WAL 43	AC	2017.156	322.5	39.64	1
06208+0849	J 409	AB	2017.153	134.2	4.90	1
06208+0849	J 409	AC	2017.153	139.4	24.00	1
06212+2108	S 513	AB	2016.970	258.0	59.74	1
06212+2108	S 513	AC	2016.970	250.4	47.41	1
06212+2108	S 513	AE	2016.970	285.0	83.82	1
06215+6224	STF 878	AB	2016.970	342.4	36.74	1
06215+6224	STF 878	AB	2016.973	342.8	37.99	1
06215+6224	STF 878	AC	2016.970	63.7	121.23	1
06215+6224	STF 878	AC	2016.973	62.7	122.18	1
06219+5459	ES 2617		2017.153	27.1	9.14	1
06221+5922	STF 881	AC	2017.167	97.9	27.00	2
06221+5922	STF 881	AD	2017.167	357.7	99.41	1
06224+2640	STF 897	AB	2016.970	349.0	17.99	1
06224+2640	STF 897	AB	2017.156	348.8	18.06	1
06234+1432	A 2720	AC	2017.153	28.5	65.79	1
06234+1432	J 1254	CD	2017.153	325.0	5.16	1
06239+6455	STF 882	AC	2016.973	25.9	121.44	1
06243+6006	STF 887		2017.167	210.4	7.70	1
06263+1904	BU 1409		2017.156	222.8	90.57	1
06268+5825	S 514	AB	2017.153	140.2	32.62	1
06268+5825	S 514	AC	2017.153	271.8	95.54	1
06278+2047	SHJ 70	AB	2016.970	202.4	25.20	1
06279+1542	STF 913		2017.156	49.3	31.14	1
06284+0834	AG 114		2017.153	1.5	4.88	1

Table II - Mesures						
Index WDS	Système	Composantes	Epoque J	Thêta (°)	Rhô (")	Nuits
06290+2013	STTA 77	AB	2017.156	329.7	112.78	1
06304+2233	HO 514	AB	2017.153	124.0	20.60	1
06304+2233	HO 514	AC	2017.153	40.7	39.16	1
06323+1747	STF 924	AB	2016.951	211.0	19.80	1
06323+1747	STF 924	AB	2016.970	210.3	20.06	1
06323+1747	STF 924	AB	2017.156	211.2	19.85	1
06327+2053	HJ 2320		2017.126	323.4	9.54	1
06342+5639	STF 916	AB	2017.167	254.0	9.41	1
06342+5639	STF 916	AC	2017.167	339.4	56.52	1
06378+2311	STF 943	AB	2017.156	134.9	31.53	1
06383+2427	HO 625	AB	2017.126	195.5	10.07	1
06383+2427	HO 625	AC	2017.126	352.3	50.55	1
06383+6444	STF 922	AB	2016.973	138.1	9.50	1
06383+6444	STF 922	AC	2016.973	8.7	25.46	1
06404+1925	STF 947		2017.156	174.5	18.68	1
06439+2508	S 533		2017.153	94.7	109.86	1
06442+5756	BAR 5	A,BC	2017.126	200.6	84.16	1
06454+2440	STT 155		2016.995	260.2	15.28	1
06462+3418	ES 176	AB	2016.995	71.5	10.51	1
06462+3418	ES 176	AC	2016.995	101.2	12.15	1
06482+2642	STF 962		2017.156	242.4	25.91	1
06482+5542	STF 958	AB	2017.167	77.3	4.46	1
06496+5302	STF 960		2017.126	68.4	21.77	1
06496+5302	STF 960		2017.167	68.7	21.64	1
06514+1840	STF 976	AB	2017.156	118.6	36.04	1
06529+5241	STF 968	AB	2017.126	289.0	20.78	1
06529+5241	STF 968	AB	2017.167	289.2	20.68	1
06529+5241	STF 968	BC	2017.126	51.7	11.37	1
06529+5241	STF 968	BC	2017.167	52.0	11.17	1
06534+5131	STT 158	AB	2017.126	305.0	16.65	1
06534+5131	STT 158	AC	2017.126	64.8	52.88	1
06549+2134	STT 161		2016.995	169.8	21.53	1
06562+3428	STF 983	AB	2016.995	34.5	10.34	1
06562+3428	STF 983	AB	2017.156	36.3	10.61	1
06562+3428	STF 983	AC	2016.995	194.6	23.06	1
06562+3428	STF 983	AC	2017.156	194.8	22.81	1
06570+2457	STF 991	AB	2017.156	164.2	3.75	1
06570+2457	STF 991	AC	2017.156	202.1	133.96	1
06570+2457	STF 991	CD	2017.156	359.8	13.16	1
06580+3924	AG 126		2017.241	75.8	4.10	1
06592+1843	BU 899	AC	2017.132	176.0	24.18	1
06592+1843	BU 899	AD	2017.132	46.0	41.78	1
07002+2745	HJ 406		2016.995	192.4	11.48	1
07023+1030	J 21		2017.241	275.9	3.17	1
07041+2034	SHJ 77	AB	2017.153	84.8	87.28	1
07041+2034	SHJ 77	AC	2017.153	346.9	101.45	1
07041+2034	SHJ 77	AD	2017.153	354.7	67.01	1
07041+7514	STF 973	AB	2017.153	31.9	12.80	1
07042+4957	ES 900		2017.126	52.6	10.14	1
07042+5626	STF1002	AB,C	2017.156	317.9	30.08	1
07049+2807	STF1012		2016.995	167.2	12.84	1
07049+2807	STF1012		2017.156	168.0	12.76	1
07057+5245	STF1009	AB	2017.167	148.0	4.36	1
07057+5245	STF1009	AC	2017.167	132.8	179.39	1
07057+5245	STF1009	BC	2017.167	132.4	175.65	1

Table II - Mesures						
Index WDS	Système	Composantes	Epoque J	Thêta (°)	Rhô (")	Nuits
07063+6251	STF1005		2016.973	91.9	29.88	1
07069+6233	STF1006	AB	2016.970	74.5	28.82	1
07069+6233	STF1006	AB	2016.973	74.1	28.82	1
07072+1650	STF1017		2016.995	254.4	13.01	1
07072+1650	STF1017		2017.156	254.2	12.85	1
07077+3514	HJ 411		2016.995	47.8	11.44	1
07084+1556	STT 165	AB	2017.153	6.1	15.93	1
07085+2459	STF1023		2017.156	106.0	24.04	1
07119+5730	STF1020		2017.126	283.9	13.15	1
07119+5730	STF1020		2017.156	284.5	13.37	1
07128+2121	STT 168	AB	2016.995	64.5	27.51	1
07128+2121	STT 168	AC	2016.995	109.7	54.02	1
07128+5548	STF1025	AB	2017.126	129.1	26.99	1
07128+5548	STF1025	AB	2017.156	129.3	26.91	1
07138+1746	STF1041		2017.156	266.8	25.70	1
07139+2957	HO 31		2016.995	10.2	11.33	1
07139+4830	STF1032	AC	2017.156	319.4	131.08	1
07143+1546	STF1047	A,BC	2016.995	29.6	24.06	1
07143+1546	STF1047	A,BC	2017.156	30.2	24.13	1
07147+2453	HO 343		2016.995	280.4	30.52	1
07148+5233	STF1033	AC	2017.156	273.4	79.30	1
07164+4738	STF1044		2017.156	169.8	13.02	1
07168+2432	STF1053		2016.995	315.1	13.98	1
07168+2432	STF1053		2017.156	315.6	13.71	1
07181+3457	STF1054	AB	2016.995	291.6	18.76	1
07181+3457	STF1054	AB	2017.156	291.7	18.54	1
07181+3457	STF1054	AC	2016.995	273.8	97.01	1
07181+3457	STF1054	AC	2017.156	274.4	96.83	1
07187+6331	STF1039	AB	2017.153	210.2	3.32	1
07187+6331	STF1039	AC	2017.153	312.7	129.80	1
07198+1322	STF1068	AB	2017.241	348.7	3.99	1
07199+5455	STF1050	AB	2017.126	20.4	19.43	1
07202+5605	HJ 2366	AB	2017.126	337.2	15.93	1
07202+5605	HJ 2366	AD	2017.126	20.4	31.73	1
07202+5605	HJ 2366	BC	2017.126	179.1	6.64	1
07205+6832	STF1038	AB	2016.973	99.5	11.92	1
07219+2027	BU 1413	AB	2016.995	187.7	13.51	1
07223+5009	STF1065		2017.126	254.9	14.95	1
07223+5009	STF1065		2017.156	254.7	14.86	1
07229+5517	STF1062	AB	2017.126	315.5	14.55	1
07229+5517	STF1062	AB	2017.167	315.6	14.73	1
07229+5517	STF1062	AD	2017.167	4.3	213.73	1
07230+4500	STF1071	AB	2016.995	31.2	20.97	1
07230+4500	STF1071	AB	2017.156	31.4	20.67	1
07241+2127	STF1081	AC	2017.156	62.9	107.01	1
07264+6929	STF1059	AB	2016.973	308.4	26.36	1
07265+1831	STF1090	AB	2016.995	98.0	60.83	1
07265+1831	STF1090	AB	2017.156	98.3	60.72	1
07265+1831	STF1090	AC	2016.995	79.1	49.84	1
07265+1831	STF1090	AC	2017.156	79.6	48.96	1
07265+1831	STF1090	BC	2016.995	328.1	21.45	1
07265+1831	STF1090	BC	2017.156	327.9	20.93	1
07266+7305	STF1051	AC	2016.973	83.5	32.76	1
07289+4811	BU 758	AB,C	2017.132	93.5	16.41	1
07295+3448	STT 172		2016.995	251.2	15.14	1

Table II - Mesures						
Index WDS	Système	Composantes	Epoque J	Thêta (°)	Rhô (")	Nuits
07300+4958	STF1091		2017.156	321.8	30.49	1
07304+3647	ES 2626		2016.995	300.6	13.91	1
07313+1619	STF1106		2016.995	32.9	10.72	1
07313+1619	STF1106		2017.167	34.4	10.60	1
07319+5009	STF1096		2017.156	326.1	29.08	1
07328+2253	STF1108		2016.995	179.1	11.95	1
07328+2253	STF1108		2017.167	178.7	11.57	1
07346+3153	STF1110	AB	2017.241	53.9	5.09	1
07348+5933	STF1098		2017.156	290.1	27.15	1
07350+2416	HJ 425	BC	2017.167	46.0	8.50	1
07350+2416	STF1113	AB	2017.167	180.3	91.67	1
07366+3342	ES 419	AB	2016.995	42.5	59.42	1
07367+3523	STF1117	AB	2016.995	227.4	11.67	1
07367+3523	STF1117	AB	2017.167	227.5	11.58	1
07374+3852	STF1118	AC	2017.167	17.9	23.40	1
07385+3503	BU 200	AB	2017.153	193.0	104.67	1
07385+3503	BU 200	AC	2017.153	101.2	156.39	1
07396+5647	HJ 2399		2017.126	66.3	12.00	1
07410+2148	STF1124	AB	2017.126	325.9	19.29	1
07410+2148	STF1124	AB	2017.167	326.2	19.34	1
07410+2148	VAS 14	AC	2017.126	347.1	78.31	1
07410+2148	VAS 14	AD	2017.126	305.2	106.26	1
07410+2148	VAS 14	AE	2017.126	37.6	125.94	1
07417+1803	SLE 446	AD	2017.167	335.0	31.99	1
07417+1803	STF1129	AC	2017.167	64.3	21.75	1
07430+5843	HJ 2405		2017.126	323.5	54.79	1
07443+4522	ES 2627	AB	2017.126	279.0	11.20	1
07459+6509	STF1122		2016.970	186.2	15.08	1
07459+6509	STF1122		2016.973	185.7	15.52	1
07463+1701	HO 347	AB	2017.011	283.0	16.68	1
07470+6403	STF1127	AC	2016.973	178.1	11.63	1
07475+3325	STF1135	AB	2017.153	215.1	19.43	1
07475+3325	STF1135	AB	2017.167	215.1	19.04	1
07485+5905	STT 180		2017.126	204.4	19.00	1
07486+2308	BU 1062	AB,D	2017.156	24.4	66.94	1
07492+3706	STF1139		2017.167	34.3	17.20	1
07519+2215	AG 144	AB	2017.126	339.3	11.58	1
07545+2610	STF1155	AB	2017.167	343.4	16.75	1
07555+2910	ES 422		2017.126	182.6	15.15	1
07565+2152	STF1158	AB	2017.167	333.2	7.30	1
07565+2152	STF1158	AC	2017.167	246.3	20.86	1
07565+2152	STF1158	AD	2017.167	306.9	63.09	1
07586+1628	STF1167		2017.011	228.9	11.78	1
07586+1628	STF1167		2017.167	229.1	12.09	1
08010+3653	HJ 3305		2017.140	228.4	4.63	1
08014+1657	STF1173	AB	2017.011	50.5	10.49	1
08014+1657	STF1173	AB	2017.126	50.2	10.53	1
08038+1240	OL 60		2017.140	110.0	3.61	1
08047+0532	J 1001		2017.140	162.7	3.24	1
08056+2732	STF1177		2017.255	351.2	3.13	1
08057+6823	STF1164		2016.973	19.7	55.30	1
08060+7147	STF1159		2016.973	94.2	35.09	1
08064+4159	STF1176		2017.126	29.9	22.78	1
08064+4159	STF1176		2017.167	30.3	22.62	1
08067+3354	STF1180	AB	2017.167	257.5	23.67	1

Table II - Mesures						
Index WDS	Système	Composantes	Epoque J	Thêta (°)	Rhô (")	Nuits
08068+3303	AG 147		2017.126	141.7	11.78	1
08094+3021	STF1188		2017.126	201.8	16.34	1
08094+3021	STF1188		2017.167	201.5	16.35	1
08094+3752	STF1184	AB	2017.167	341.4	26.91	1
08094+3752	STF1184	AC	2017.167	209.6	21.61	1
08122+1739	STF1196	AB,C	2017.167	65.5	5.78	1
08122+1739	STF1196	AB,D	2017.167	106.5	275.92	1
08147+2710	STF1203		2017.167	242.5	18.86	1
08159+3829	STF1204		2017.126	103.9	11.53	1
08159+3829	STF1204		2017.167	103.7	11.12	1
08159+5047	STF1199		2017.167	5.9	23.87	1
08165+7930	STF1169	AB	2016.970	14.8	20.86	1
08165+7930	STF1169	AB	2017.134	15.4	20.52	1
08167+4053	ES 593	AB	2017.126	343.5	20.42	1
08167+4053	ES 593	AC	2017.126	334.0	17.89	1
08167+4053	ES 593	BC	2017.126	210.8	4.75	1
08183+3859	STF1211	AC	2017.167	14.5	51.94	1
08183+3859	STF1211	AD	2017.167	133.7	123.20	1
08242+3737	ES 1732		2017.126	81.8	18.42	1
08243+4457	STF1217		2017.126	242.4	29.23	1
08243+4457	STF1217		2017.167	242.3	29.04	1
08253+2421	STF1220		2017.126	215.2	29.13	1
08253+2421	STF1220		2017.167	215.2	29.02	1
08263+3733	STF1222		2017.126	48.9	9.97	1
08263+3733	STF1222		2017.167	50.2	9.88	1
08274+2309	STF1227		2017.126	163.6	24.91	1
08274+2309	STF1227		2017.167	163.5	24.89	1
08281+3332	STT 193		2017.126	297.5	13.68	1
08284+1651	STF1230		2017.167	186.1	33.84	1
08299+3123	STF1231		2017.167	211.7	24.53	1
08314+3156	STF1236		2017.167	110.3	38.30	1
08319+3309	STF1238		2017.167	320.5	29.35	1
08321+2514	HO 649	AB	2016.995	285.7	47.32	1
08325+3729	STF1239		2017.126	286.3	13.73	1
08325+3729	STF1239		2017.167	290.9	12.62	1
08331+5521	STF1234	AB	2017.153	64.7	24.84	1
08331+5521	STF1234	AB	2017.167	65.1	24.71	1
08332+3326	STF1240	AB	2017.126	80.3	28.81	1
08332+3326	STF1240	AB	2017.167	79.9	28.80	1
08332+3326	STF1240	AC	2017.126	241.8	51.90	1
08332+3326	STF1240	AC	2017.167	242.0	51.33	1
08377+1946	STF1249		2017.167	40.3	24.90	1
08399+1933	BU 584	DC	2017.132	88.7	99.61	1
08399+1933	S 571	AC	2017.132	157.3	45.08	1
08399+1933	S 571	AD	2017.132	240.9	90.09	1
08404+1940	S 572	CD	2016.995	91.3	72.58	1
08404+1940	SMR 30	AE	2017.167	156.3	15.52	1
08404+1940	STF1254	AB	2016.995	54.3	20.20	1
08404+1940	STF1254	AB	2017.167	54.4	20.50	1
08404+1940	STF1254	AC	2016.995	342.0	63.47	1
08404+1940	STF1254	AD	2016.995	43.4	82.54	1
08407+3508	HJ 793		2017.126	251.7	11.06	1
08444+3029	HJ 455		2017.153	344.8	10.82	1
08445+2827	STF1266		2017.167	64.6	23.28	1
08462+1915	STF1269	AB	2017.167	308.9	11.41	1

Table II - Mesures						
Index WDS	Système	Composantes	Epoque J	Thêta (°)	Rhô (")	Nuits
08467+2846	STF1268		2017.126	307.5	30.63	1
08467+2846	STF1268		2017.167	307.7	30.47	1
08483+3436	STF1272		2017.126	343.0	20.38	1
08483+3436	STF1272		2017.167	342.9	20.26	1
08499+1450	STF1283		2016.995	122.2	16.49	1
08508+3418	AG 156		2017.126	250.1	10.81	1
08514+2053	STF1285		2017.153	338.4	25.88	1
08573+3254	STF1294	AB	2017.153	340.4	15.51	1
09014+3215	STF1298	AB	2017.167	137.3	4.43	1
09014+3215	STF1298	AC	2017.167	318.6	186.75	1
09019+2612	STF1301		2017.126	355.2	9.99	1
09019+2612	STF1301		2017.153	360.0	9.93	1
09124+3621	ES 296	AB	2017.153	175.7	20.51	1
09129+2420	BRT 155	AB	2017.255	269.6	4.33	1
09134+4220	STF1320		2017.126	216.8	11.98	1
09134+4220	STF1320		2017.153	216.5	12.12	1
09136+2627	STF1323		2017.153	211.1	21.72	1
09136+4659	STF1318		2017.241	228.2	2.56	1
09140+2611	STF1324		2017.153	348.7	11.46	1
09144+1608	STF1325		2017.153	77.0	16.94	1
09155+2755	STF1327	AC	2017.153	15.7	27.81	1
09162+2324	STT 198		2017.132	114.6	14.75	1
09175+7949	STF1305	AC	2017.134	91.3	67.17	1
09188+3648	STF1334	BC	2017.167	217.0	78.93	1
09210+3811	STF1338	AB,C	2017.167	166.2	143.22	1
09213+3426	STF1342	BC	2017.167	312.6	16.64	1
09213+3426	STT 571	AB	2017.153	42.4	222.65	1
09214+8123	STF1304		2017.134	322.0	24.22	1
09235+3908	STF1344		2017.241	102.9	3.83	1
09238+3825	AG 164		2017.241	18.7	4.61	1
09320+2003	HJ 466	AC	2017.132	296.5	34.73	1
09320+2003	STF1364	AB	2017.132	155.4	16.40	1
09320+2003	STF1364	AB	2017.167	155.1	16.17	1
09333+2822	HN 29		2017.132	263.3	27.57	1
09354+3958	STF1369	AB	2017.156	149.3	25.06	1
09365+2820	ES 428		2017.126	202.8	13.56	1
09425+4058	STT 205		2017.153	201.7	12.00	1
09450+4314	STF1376	AB	2017.255	309.0	5.15	1
09490+3405	STF1382	AB	2017.132	94.2	33.66	1
09490+3405	STF1382	AB	2017.156	94.1	33.66	1
09490+3405	STF1382	AC	2017.132	265.1	28.97	1
09490+3405	STF1382	AC	2017.156	264.2	28.86	1
09499+1620	STF1384		2017.126	182.5	11.90	1
09499+1620	STF1384		2017.167	182.7	11.64	1
09505+2603	AG 340		2017.255	310.0	4.20	1
09508+3138	STF1383	AB	2017.156	227.3	22.75	1
09524+2834	STF1388		2017.167	122.1	33.35	1
09532+3048	SEI 517		2017.126	348.5	29.76	1
09570+1946	STF1399		2017.126	175.5	30.65	1
09570+1946	STF1399		2017.132	175.6	30.66	1
09570+1946	STF1399		2017.156	175.3	30.71	1
09572+4554	STF1394		2017.255	249.6	4.15	1
10052+3539	ES 2108		2017.145	227.5	4.45	1
10059+3935	STF1405		2017.132	252.0	22.01	1
10059+3935	STF1405		2017.156	251.6	22.18	1

Table II - Mesures						
Index WDS	Système	Composantes	Epoque J	Thêta (°)	Rhô (")	Nuits
10082+2648	ES 431	AB	2017.132	351.7	37.40	1
10082+2648	ES 431	AC	2017.132	353.4	41.20	1
10082+2648	ES 431	BC	2017.132	11.4	5.64	1
10092+3222	STF1411		2017.156	309.6	31.67	1
10100+1623	A 2367	AB	2017.132	85.3	61.33	1
10170+1007	STF1419		2017.255	224.7	3.82	1
10181+2731	STF1421		2017.255	328.3	4.16	1
10200+1950	STF1424	AB	2017.255	127.5	4.49	1
10270+2941	STF1432		2017.156	121.3	28.62	1
10319+3223	HJ 482	AB	2017.153	246.4	58.42	1
10320+2202	STF1442		2017.153	156.2	13.21	1
10320+2202	STF1442		2017.156	156.3	13.28	1
10344+2136	STF1448	AC	2017.156	259.6	10.98	1
10351+3508	BU 1427	AB	2017.156	211.7	30.08	1
10351+3508	STF1449	AC	2017.156	284.2	41.44	1
10395+3142	STF1458		2017.156	216.8	18.05	1
10566+1739	STF1490		2017.156	101.5	17.43	1
10576+3039	STF1492		2017.153	166.0	21.77	1
10576+3039	STF1492		2017.156	165.6	21.68	1
10579+8544	STF1455	A,BC	2016.970	249.0	34.11	1
10579+8544	STF1455	A,BC	2017.134	250.0	33.33	1
10598+5854	STF1495		2017.351	36.2	33.83	1
11017+8211	STF1480		2017.134	330.9	23.13	1
11098+6320	H 4106	AB	2017.351	133.7	20.07	1
11152+7329	STF1516	AB	2017.351	103.4	67.77	1
11152+7329	STT 539	AC	2017.351	328.5	6.50	1
11182+1638	A 2379	A,BC	2017.153	47.1	27.87	1
11207+2253	STF1531		2017.156	166.8	23.50	1
11326+2419	STF1549		2017.153	112.8	12.79	1
11326+2419	STF1549		2017.156	113.1	12.80	1
11347+1648	STF1552	AB	2017.156	209.3	2.81	1
11347+1648	STF1552	AC	2017.156	234.9	62.98	1
11347+1648	STF1552	BC	2017.156	236.3	59.96	1
11396+1900	STF1565		2017.153	304.0	21.81	1
11396+1900	STF1565		2017.156	304.4	21.65	1
11442+2513	STT 239		2017.153	31.6	36.44	1
11560+2159	STF1582		2017.153	75.2	11.99	1
11560+2159	STF1582		2017.156	75.3	12.21	1
12002+8700	STF1583		2017.255	282.7	11.29	1
12071+6905	STF1602	AB	2017.351	179.6	20.72	1
12116+3605	STF1607	AB	2017.153	27.4	27.06	1
12116+3605	STF1607	AB	2017.156	27.3	27.04	1
12116+3605	STF1607	AC	2017.156	354.8	37.13	1
12116+3605	STF1607	BC	2017.156	309.7	20.44	1
12117+5050	STF1609	AB	2017.153	203.7	11.25	1
12117+5050	STF1609	AB	2017.156	204.1	11.22	1
12119+3846	STF1610		2017.156	330.7	29.57	1
12131+6704	STF1614		2017.351	190.7	18.55	1
12161+4040	STF1622		2017.153	259.8	11.69	1
12161+4040	STF1622		2017.156	259.0	11.89	1
12162+8008	STF1625	AB	2017.134	218.3	14.14	1
12202+3754	STF1632		2017.153	192.7	10.01	1
12202+3754	STF1632		2017.156	192.2	10.06	1
12246+3744	STF1641	AB	2017.153	21.1	16.93	1
12246+3744	STF1641	AB	2017.156	22.0	16.73	1

Table II - Mesures						
Index WDS	Système	Composantes	Epoque J	Thêta (°)	Rhô (")	Nuits
12281+4448	STF1645	AB	2017.153	156.3	9.80	1
12281+4448	STF1645	AB	2017.156	157.6	10.31	1
12336+3837	STF1656		2017.156	205.3	26.84	1
12358+5635	STF1662		2017.351	242.0	19.23	1
12399+7425	HJ 2619		2017.351	264.6	24.48	1
12445+3425	STF1675		2017.156	3.7	29.47	1
12528+3949	ES 1405	AB	2017.153	282.9	66.47	1
12536+3758	STF1688	AB	2017.153	343.4	14.27	1
12536+3758	STF1688	AB	2017.156	343.9	14.07	1
12550+4236	ES 2644	AB	2017.153	75.3	39.71	1
12550+5810	STF1691	AB	2017.351	274.7	18.54	1
12560+3819	STF1692	AB	2017.367	228.4	19.01	1
12560+3819	STF1692	AB	2017.384	227.5	19.33	1
12560+3819	STF1692	AB	2017.384	228.1	19.23	1
12567+4537	STT 257	AB	2017.153	352.7	12.96	1
12571+4223	STF1697		2017.156	217.3	28.27	1
12585+3817	STF1702	AB	2017.156	82.0	36.12	1
13126+5827	STF1732	AB	2017.351	127.3	25.74	1
13225+3032	STF1739		2017.156	124.9	14.83	1
13239+5456	STF1744	AB	2017.255	152.5	14.43	1
13278+4746	STF1747		2017.153	344.2	15.02	1
13278+4746	STF1747		2017.156	345.0	14.95	1
13292+3104	STF1749		2017.384	352.2	21.91	1
13320+7143	STF1761		2017.167	71.9	20.09	1
13372+3005	STF1766		2017.153	67.4	20.17	1
13372+3005	STF1766		2017.384	67.2	19.95	1
13407+7651	HJ 2682	AB	2017.255	279.4	25.74	1
13407+7651	HJ 2682	AC	2017.255	316.1	43.26	1
13431+3201	STF1778	AB	2017.384	202.9	25.68	1
13496+3459	STF1786	AB	2017.153	21.7	10.84	1
13496+3459	STF1786	AB	2017.384	20.9	10.93	1
13514+3441	BU 613	BC	2017.384	73.5	44.76	1
13540+3209	KU 47	AB	2017.384	150.2	23.49	1
14064+3825	STF1803		2017.351	42.7	17.80	1
14064+3825	STF1803		2017.384	42.3	17.85	1
14065+7058	HJ 2703		2017.255	340.7	12.79	1
14088+4830	STF1806		2017.381	174.1	13.47	1
14096+7250	STF1822		2017.167	51.3	14.99	1
14135+5147	STF1821	AB	2017.255	234.6	13.78	1
14142+5915	STF1827	AB	2017.367	209.1	11.22	1
14161+5643	STF1830	EF	2017.367	312.1	10.38	1
14162+5122	STFA 26	AB	2017.255	31.6	37.63	1
14178+6919	STF1836		2017.167	108.6	21.41	1
14199+6747	STF1840	AB	2017.167	220.5	27.00	1
14199+6747	STF1840	AB	2017.255	220.2	27.21	1
14199+6747	STF1840	AB	2017.367	220.8	27.21	1
14203+0817	HJ 1252		2017.381	270.0	11.82	1
14211+6748	STF1841	AB	2017.167	263.6	34.70	1
14215+5354	STF1839		2017.367	81.3	14.41	1
14220-0805	HO 384		2017.381	52.7	35.27	1
14246+4750	STF1843	AB	2017.351	186.1	19.52	1
14246+4750	STF1843	AB	2017.367	186.6	19.66	1
14285+7303	STF1859		2017.167	233.4	19.81	1
14286+2817	STF1850		2017.351	261.0	25.43	1
14286+2817	STF1850		2017.367	261.2	25.28	1

Table II - Mesures						
Index WDS	Système	Composantes	Epoque J	Thêta (°)	Rhô (")	Nuits
14298+3147	STF1854	AB	2017.367	254.9	26.66	1
14300-0415	STF1852		2017.381	266.5	24.86	1
14324+3138	STF1855	AB	2017.351	247.2	15.60	1
14324+3138	STF1855	AB	2017.367	247.3	15.61	1
14332+7947	STF1880		2017.167	253.0	26.07	1
14367+1210	STF1861	AB	2017.367	173.2	14.17	1
14378+1454	STF1862		2017.367	125.5	14.62	1
14495+5122	STF1889	AB	2017.351	92.8	14.84	1
14495+5122	STF1889	AB	2017.367	92.9	14.92	1
14536+6946	STF1897		2017.167	318.3	35.96	1
14563+2928	STF1893		2017.351	207.5	22.58	1
14563+2928	STF1893		2017.367	207.8	22.54	1
14571+3529	HJ 243		2017.381	22.8	18.24	1
14575+4010	STF1895		2017.367	42.1	12.49	1
14584+7108	STF1906	AB	2017.167	203.1	16.91	1
14584+7108	STF1906	AC	2017.167	261.9	72.09	1
14596+5352	SHJ 191		2017.351	341.4	40.15	1
15006+4717	STT 291		2017.351	156.4	35.67	1
15010+3123	STF1901		2017.367	183.2	18.73	1
15016-0310	STF1899		2017.381	66.1	28.22	1
15052+7904	STF1933		2017.167	274.7	24.03	1
15078+6307	STF1918		2017.351	19.0	17.67	1
15078+6307	STF1918		2017.367	18.8	17.62	1
15118+6151	STF1927	AB	2017.351	353.4	16.05	1
15127+1917	STF1919		2017.351	9.7	22.96	1
15127+1917	STF1919		2017.367	10.4	22.93	1
15127+4835	ES 2648	AB	2017.367	338.9	25.88	1
15140+0651	HJ 1270		2017.381	168.6	15.92	1
15155+2233	STT 293		2017.367	344.7	10.88	1
15155+3319	STFA 27	AB	2017.367	77.7	103.63	1
15187+1026	STF1931	AB	2017.367	166.2	13.31	1
15193+0146	STF1930	AB	2017.381	35.9	11.68	1
15206+5520	HJ 2779	AB	2017.367	347.7	10.13	1
15218-0201	STF3092		2017.367	165.5	13.99	1
15227-0132	STF3093		2017.367	155.2	22.21	1
15266+5454	STF1948		2017.367	46.7	12.78	1
15280+1442	STF1945	AB	2017.381	314.6	41.42	1
15280+1442	STF1945	AC	2017.381	308.8	49.19	1
15283+2341	HO 629		2017.381	111.2	21.43	1
15289+5727	BU 945	AB	2017.381	101.1	40.23	1
15292+8027	STF1972	AB	2017.167	77.7	31.52	1
15292+8027	STF1972	AB	2017.255	78.5	31.14	1
15294+4743	BU 944	AB	2017.381	128.6	10.99	1
15294+4743	BU 944	AC	2017.381	70.3	56.07	1
15303+2739	STF1951		2017.351	292.0	17.39	1
15303+2739	STF1951		2017.367	292.7	17.38	1
15317+1405	HO 549	AB	2017.367	133.4	117.47	1
15318+4054	BU 1450	AB,C	2017.381	88.6	92.56	1
15325+8103	STF1980		2017.167	47.8	10.19	1
15325+8103	STF1980		2017.255	47.2	10.17	1
15352+7520	STF1971		2017.167	314.6	14.93	1
15387-0847	STF1962		2017.367	189.9	12.16	1
15402+1203	STT 300		2017.367	260.4	15.68	1
15476+8316	STF2002		2017.167	312.0	42.15	1
15479+7746	STF1997		2017.167	338.8	18.33	1

Table II - Mesures						
Index WDS	Système	Composantes	Epoque J	Thêta (°)	Rhô (")	Nuits
15495+2528	STF1977	AB	2017.367	355.3	13.72	1
15513+2509	STF1981		2017.367	3.4	11.86	1
15549+3422	STT 302	AB	2017.351	50.5	27.90	1
15555+1006	STF1986		2017.367	92.8	14.68	1
15572+0324	STF1987		2017.367	321.2	10.56	1
15572+7629	STF2013		2017.167	273.7	20.51	1
15589+2147	STF1990	AB	2017.367	61.3	56.61	1
15589+2147	STF1990	AC	2017.367	59.9	58.47	1
15598+1723	STF1993	AB	2017.351	42.7	19.91	1
15598+1723	STF1993	AB	2017.367	43.1	20.26	1
16011+2808	AG 349		2017.367	227.0	11.70	1
16012+4150	STF2001	AB	2017.367	167.8	11.53	1
16037+1126	STF2003		2017.367	171.3	14.08	1
16060+1319	STF2007	AB	2017.351	321.2	38.26	1
16060+1319	STF2007	AB	2017.367	321.7	38.32	1
16076+2900	GUI 16	AC	2017.351	350.1	116.96	1
16077+2022	WEI 30		2017.367	223.6	12.34	1
16081+1703	STF2010	AB	2017.367	13.1	26.87	1
16089+2456	HO 550		2017.381	298.0	17.20	1
16090+5756	ES 2651		2017.381	140.7	12.17	1
16105+4748	STT 307		2017.351	201.5	17.78	1
16105+4748	STT 307		2017.367	201.2	17.64	1
16118+4222	STF2024		2017.367	43.0	22.19	1
16139+4736	ES 1088	AB	2017.351	315.1	33.06	1
16139+4736	ES 1088	BC	2017.351	196.6	9.53	1
16167+2909	SHJ 223	CE	2017.367	234.9	13.70	1
16168+0118	A 2180	A,BC	2017.367	97.1	47.72	1
16182-0216	STF2033		2017.367	174.1	10.63	1
16186+5120	ES 627		2017.381	287.5	11.69	1
16229+3220	H 538		2017.351	15.8	30.57	1
16263+7629	STF2077		2017.167	308.1	17.44	1
16271+4255	BU 815	AB	2017.351	326.1	25.10	1
16294+1036	STF2051		2017.367	18.4	13.84	1
16318+4536	STF2063		2017.367	198.1	17.72	1
16319+5259	A 1862	A,BC	2017.351	111.1	74.38	1
16352+4326	ES 631		2017.367	161.6	10.33	1
16352+4326	ES 631		2017.381	162.6	10.39	1
16364+3349	STF2069		2017.351	82.2	35.54	1
16364+3349	STF2069		2017.367	82.3	35.71	1
16384+7020	STF2099		2017.381	215.2	9.85	1
16387+4856	STF2082		2017.381	91.8	27.23	1
16396+2300	STF2079		2017.367	90.5	16.77	1
16409+2157	HO 553		2017.381	184.2	11.97	1
16410+8222	STF2125		2017.167	176.8	11.84	1
16410+8222	STF2125		2017.255	177.9	12.16	1
16427+1336	STF2083	AB	2017.367	333.6	12.68	1
16443-0033	STF2086		2017.367	156.6	13.92	1
16447+0220	STF2088	AB	2017.367	328.9	21.69	1
16447+0220	STF2088	AC	2017.367	352.3	16.42	1
16456+3705	ROE 49		2017.367	80.3	10.67	1
16457+3000	STF2098	AB	2017.367	145.2	14.16	1
16457+3000	STF2098	AC	2017.367	128.3	65.57	1
16472+0204	STF2096	AB	2017.367	88.3	23.51	1
16486+2123	STF2102	AB	2017.367	273.8	14.15	1
16530+4424	STT 317	AB	2017.367	200.4	25.64	1

Table II - Mesures						
Index WDS	Système	Composantes	Epoque J	Thêta (°)	Rhô (")	Nuits
16550+2544	STF2110		2017.367	91.4	15.30	1
16587+7607	STF2134		2017.167	142.9	45.93	1
17016+1457	H 4122		2017.367	237.0	19.51	1
17048+2805	STF2120	AB	2017.351	230.5	24.79	1
17048+2805	STF2120	AB	2017.367	230.9	24.68	1
17051+4658	STT 323		2017.367	79.3	11.14	1
17102+5430	STF2138	AB	2017.351	132.6	22.00	1
17102+5430	STF2138	AB	2017.367	133.2	21.93	1
17183+0931	STT 326		2017.381	223.4	18.55	1
17185+5346	ES 776	AB	2017.351	152.6	28.45	1
17244+4931	STF2167		2017.381	206.7	21.48	1
17245+3657	STT 329		2017.381	12.1	33.52	1
17262+2927	STF2165	AB	2017.381	61.3	10.39	1
17262+2927	STF2165	AC	2017.381	250.8	94.77	1
17262+2927	STF2165	CD	2017.381	180.3	52.29	1
17279+1123	STF2166		2017.381	282.1	26.96	1
17294+3243	STF2175		2017.381	8.6	13.57	1
17294+3245	STF2174		2017.381	332.6	5.39	1
17295+3456	STF2178	AB	2017.381	128.7	10.54	1
17300-0825	STF2169		2017.381	111.3	15.46	1
17328+4753	STF2189	AB	2017.381	98.8	20.89	1
17328+4753	STF2189	AC	2017.381	359.3	67.14	1
17344+1310	STF2184	AB	2017.381	64.8	22.79	1
17344+2520	HJ 1300	AB	2017.381	262.3	12.20	1
17344+2520	HJ 1300	BC	2017.381	192.3	6.29	1
17346+0935	STFA 34	AB	2017.381	190.6	42.10	1
17360+2100	STF2190	AB	2017.384	21.6	9.86	1
17398-0458	STF2191	AB	2017.384	267.4	25.95	1
17401+2914	STF2192	AB	2017.384	30.5	15.98	1
17411+2431	STF2194	AB	2017.384	6.2	16.69	1
17433+1741	STH 4		2017.384	48.7	15.29	1
17433+4345	STF2214	AB	2017.384	209.6	19.89	1
17443+1425	HJ 1303		2017.384	151.5	41.05	1
17444+4027	ES 9004		2017.384	246.7	12.97	1
17446+0235	STF2202	AB	2017.384	93.7	20.25	1
17467+2759	ES 469	AB	2017.384	265.5	46.34	1
17467+3538	STF2226		2017.384	89.2	12.53	1
17467-0113	STF2211	AB	2017.384	116.4	10.44	1
17490+0458	STF2223		2017.384	209.7	18.46	1
17500+4157	STF2237		2017.384	6.1	20.77	1
17527-0757	STF2234		2017.384	197.8	16.92	1
17530-0215	STF2235		2017.384	124.2	20.25	1
17533-0556	HO 561		2017.384	327.6	35.39	1
17545+4938	STF2251		2017.384	19.9	16.13	1
17574+3540	STF2257	AB	2017.384	153.1	23.38	1
17584+1437	STF2253	AB	2017.384	76.3	10.88	1
17590+3003	STF2259		2017.384	277.7	19.36	1
18000+2535	HJ 1310	AB	2017.384	42.1	10.45	1
18025+2619	HO 564	AD	2017.384	56.3	110.57	1
18028+0137	BU 635	AB	2017.384	302.3	68.77	1
18031+4828	STF2277	AB	2017.384	129.0	27.01	1
18039+2639	HO 426		2017.384	229.5	11.66	1
18042+1447	STF2269		2017.384	165.6	23.87	1
18046+5053	STF2279		2017.384	179.6	13.58	1
18069+4647	ES 1157	AB	2017.384	177.9	29.86	1

Table II - Mesures						
Index WDS	Système	Composantes	Epoque J	Thêta (°)	Rhô (")	Nuits
18069+4647	ES 1157	AD	2017.384	235.6	49.74	1
18078+1304	H 574		2017.384	139.8	42.71	1
18099+4824	STF2293	AB	2017.384	82.7	12.84	1
18111+3258	ES 185		2017.384	284.5	12.08	1
18130+4251	ES 473	AB	2017.384	99.2	30.30	1
18130+4251	ES 473	BC	2017.384	172.6	23.07	1
18130+4251	SLV 6	AC	2017.384	130.0	42.93	1
18162+4423	ES 1421		2017.384	344.8	11.76	1
18197+4453	ES 2665	AB	2017.384	21.2	9.93	1
18523+1432	STF2411	AB	2017.381	95.2	13.30	1
18523+1432	WAL 97	AC	2017.381	87.3	59.52	1
18523+1432	WAL 97	AD	2017.381	119.4	83.06	1
18534+0323	STF2413		2017.381	199.7	10.31	1
18562+0412	STF2417	AB	2017.381	104.6	22.20	1
23005+5447	ES 692	AB	2016.970	251.7	93.11	1
23005+5447	ES 692	BC	2016.970	157.8	4.05	1
23029+4610	HJ 1841	AB	2016.973	344.7	18.95	1
23029+4610	HJ 1841	AC	2016.973	285.3	34.94	1
23034+6027	STT 486		2016.973	275.7	34.23	1
23035+4123	HDS3286		2016.973	352.3	18.15	1
23039+6052	HJ 1845	AB	2016.973	5.8	18.30	1
23039+6052	HJ 1845	AC	2016.973	76.0	19.78	1
23039+6052	HJ 1845	AD	2016.973	318.8	9.87	1
23072+6050	BU 180	AB,C	2016.973	103.9	34.49	1
23079+3128	BU 78	AB	2016.973	53.4	18.58	1
23100+3651	S 825	AB	2016.973	319.4	68.67	1
23100+4758	STF2985	AB	2016.973	256.1	15.87	1
23107+2631	BU 852	AB	2016.973	282.7	58.33	1
23114+3813	HO 197	AB,C	2016.973	320.2	36.42	1
23114+3813	HO 197	AB,D	2016.973	278.6	56.77	1
23121+4517	BU 1528		2016.973	191.2	35.13	1
23135+6240	HJ 1860	AB	2016.973	336.7	7.72	1
23198+5715	BU 229	AB	2016.992	31.8	16.83	2
23204+5530	ES 697	AB	2016.970	344.4	67.94	1
23206+6213	BU 278	AB	2016.970	174.7	13.24	1
23206+6213	BU 278	AC	2016.970	259.4	60.70	1
23206+6213	BU 278	AD	2016.970	184.9	74.49	1
23208+6225	ES 220	AB	2016.970	85.2	36.33	1
23208+6225	ES 220	BC	2016.970	77.1	5.61	1
23248+6217	H 624	AB	2016.970	225.8	96.37	1
23248+6217	H 624	AC	2016.970	258.7	215.81	1
23248+6217	H 624	CD	2016.970	39.5	9.35	1
23266+5458	ES 1043	AB	2016.970	27.3	28.94	1
23266+5458	ES 1043	AD	2016.970	15.7	43.42	1
23300+5833	BU 1149	AI	2016.970	207.5	234.02	1
23388+6208	HJ 1896		2016.992	116.8	16.36	1
23430+4907	BU 1531		2016.970	236.0	13.02	1
23461+6028	STF3037	AC	2016.970	189.7	29.62	1
23461+6028	STF3037	AD	2016.970	233.4	52.68	1
23461+6028	STF3037	AE	2016.970	63.1	110.61	1
23461+6028	STF3037	AF	2016.970	147.2	124.08	1
23473+6313	D 27	AC	2016.992	144.1	10.56	1
23475+4918	BU 390		2016.992	228.3	14.31	1
23481+6349	BU 1152	A,BC	2016.970	138.0	73.39	1

Table II - Mesures						
Index WDS	Système	Composantes	Epoque J	Thêta (°)	Rhô (")	Nuits
23482+5754	MLB 149	AC	2016.970	167.1	13.56	1
23482+5754	MLB 149	AD	2016.970	242.2	34.58	1
23504+5137	GUI 40	AB	2016.992	164.8	21.18	1
23506+5412	ES 700	AB	2016.992	34.8	14.43	1
23527+6042	BU 1153	AB,C	2016.970	336.6	13.71	1
23527+6042	BU 1153	AB,D	2016.970	66.1	177.91	1
23528+3841	STF3043	AB,C	2016.973	249.8	16.15	1
23530+1155	STF3044		2016.973	282.7	19.26	1
23531+6042	STT 511	AB	2016.973	35.4	9.86	1
23536+5131	STTA251	AB	2016.973	208.1	50.12	1
23536+5131	STTA251	AC	2016.973	135.1	48.52	1
23536+5131	STTA251	BD	2016.973	163.6	14.46	1
23537+5453	ES 1050	AC	2016.973	311.2	40.40	1
23545+4814	ES 551	AB	2016.973	88.5	33.07	1
23545+4814	ES 551	AD	2016.973	12.7	31.41	1
23553+5144	ES 2735	AB	2016.970	100.1	12.58	1
23553+5144	ES 2735	AB	2016.973	100.3	12.99	1
23553+5144	ES 2735	AC	2016.970	236.1	16.88	1
23569+5550	BU 1224	AC	2016.970	329.0	80.30	1
23584+5123	ES 37	AC	2016.973	319.6	31.93	1



Bernard Candela

Astronome amateur depuis l'âge de 12 ans, j'ai exploré pendant 50 ans divers domaines et pu apprécier les avantages énormes de l'imagerie numérique par rapport à l'argentique. La puissance des capteurs et des logiciels de traitement permet actuellement à l'amateur d'obtenir des résultats de grande qualité. Après avoir fait durant toutes ces années de nombreux travaux d'astrométrie sur les astéroïdes, de photométrie sur les étoiles variables, j'ai fini par me cantonner dans le domaine des étoiles doubles où le dépouillement des clichés avec le logiciel REDUC est bien plus rapide et la qualité des résultats obtenus n'a rien à voir avec celle que l'on obtenait auparavant avec un micromètre à fils.

Philippe LAURENT

SAF - Commission des Étoiles Doubles
Président de l'Association Astronomie en Provence (83)
Email : apilaure_astro@yahoo.fr



Résumé

Cet article présente 324 mesures d'étoiles doubles visuelles, réalisées en 2012, 2013 et 2014 avec un télescope de 200mm. Ces mesures ont été faites par imagerie numérique grâce à une caméra CCD. Pour les couples orbitaux, les valeurs O-C (observées - calculées) d'angle et de séparation sont également présentées.

Abstract

This article presents 324 visual double star measurements, carried out in 2012, 2013 and 2014 with a 200mm telescope. These measurements were made by digital imaging using a CCD camera. For orbital couples, the O-C (observed - calculated) angle and separation values are also presented.

Keywords: binaries : visual, astrometry



1 Introduction

Cet article constitue ma seconde publication de mesures d'étoiles doubles. Elles ont été réalisées au cours des années 2012, 2013 et 2014, en banlieue lyonnaise.

Ce site fortement pollué par les lumières parasites de l'agglomération a néanmoins permis de réaliser ce travail, montrant que la mesure d'étoiles doubles par imagerie CCD peut se faire même sous un ciel de médiocre qualité.

2 Instrumentation

L'ensemble des mesures présentées dans cet article a été réalisé avec un télescope Celestron 8, d'un diamètre de 200 mm et d'une distance focale primaire de 2000 mm.

Une barlow d'un facteur multiplicateur de 2 a été ajoutée, portant la distance focale résultante aux environs de 4000 mm.

Cette configuration a été complétée par une caméra CCD ATIK 314L+, dont les pixels mesurent 4.4µm de côté. La matrice CCD compte 1620 x 1220 pixels.

Cet ensemble a permis d'envisager un échantillonnage un peu supérieur à 0,2 seconde d'arc par pixel. Cette résolution est satisfaisante, car la tache d'Airy (rayon = $1,22 \lambda/D$, soit diamètre = 0,67" avec $D = 200 \text{ mm}$ à $\lambda = 550 \text{ nm}$) se trouve couverte par environ 3 pixels.

Aucun filtre optique n'a été utilisé. La bande spectrale est celle donnée par le capteur de la caméra.

La monture équatoriale HEQ5 a permis un pointage rapide

des cibles grâce à sa fonction goto, permettant un gain de temps important.

3 Étalonnage du champ

La réduction des mesures nécessite un étalonnage soigneux du champ de la caméra CCD, en échelle angulaire comme en orientation de l'image sur le ciel.

Une liste de couples étalons est publiée sur le site de la Commission des Étoiles Doubles de la SAF [1]. Ces couples, dont la position est stable, sont répartis sur le ciel boréal. Les étalons ont été choisis proches des couples mesurés, afin de limiter l'impact sur les mesures d'angle d'une mise en station de la monture pouvant manquer de précision.

Les valeurs de séparation (ρ) et d'angle (θ) des couples étalons sont déduites des positions en ascension droite et en déclinaison relevées par Hipparcos [2] pour l'époque 1991,25. Une correction des effets de la précession a été appliquée pour ramener les valeurs d'angle à l'époque des mesures.

La table 1 présente la liste des couples étalons utilisés sur l'ensemble des sessions de mesures, avec la correction des effets de la précession sur l'angle θ calculée pour l'équinoxe 2013. Cette année 2013 est l'époque moyenne de l'ensemble des mesures, la variation sur une seule année (2012 ou 2014) étant négligeable. Certains couples montrent une correction significative allant jusqu'à 0.2 degré, justifiant la prise en compte des effets de la précession.

Table 1 : Liste des couples étalons utilisés

Référence WDS	Nom du couple	Thêta Hipparcos [°]	Rho Hipparcos ["]	Correction précession 2013 [°]	Thêta corrigé [°]
03217+0845	STF 38	144,26	16,93	0,04	144,30
02425+4016	STF 292	211,57	23,05	0,11	211,68
05413+2929	STF 764	14,29	26,01	0,15	14,44
09312+6732	STF1349	165,62	19,22	0,20	165,82
10178+7104	STF1415AB	167,38	16,63	0,17	167,55
12081+5528	STF1603AB	82,48	22,31	-0,01	82,47
15118+6151	STF1927AB	353,31	16,06	-0,20	353,11
18429+4456	STF2380	8,20	25,71	-0,18	8,02
20264+5638	STF2687	116,92	26,25	-0,19	116,73
20297+3808	STF2691	31,40	17,17	-0,13	31,27
22129+7318	STF2893	347,12	28,84	-0,20	346,92
22359+3938	STF2922AB	185,40	22,35	-0,06	185,34
23100+4758	STF2985AB	255,69	15,61	-0,04	255,65

Table 1 : Données Hipparcos sur les couples étalons utilisés et correction appliquée sur Thêta pour tenir compte des effets de la précession

Un étalonnage a été réalisé au début et en fin de chaque séance de mesures, avec deux couples différents. L'étalonnage en angle a été complété, pour les séances de mesures de 2014, par un filé d'étoile, réalisé monture arrêtée, montrant la direction du mouvement diurne (le déplacement de l'étoile est alors dirigé exactement vers l'ouest).

Cette étape d'étalonnage a permis de confirmer la résolution atteinte avec l'instrumentation mise en œuvre. La valeur précise obtenue est de 0,234 seconde d'arc par pixel. Le champ couvert par le capteur est alors de 6,318' x 4,758'.

4 Acquisition des images

Une zone réduite au voisinage du couple est sélectionnée au moment de la prise de vue, pour limiter le volume de données à transférer et permettre une cadence d'acquisition plus élevée. La figure 1 donne une image typique, pour laquelle la zone sélectionnée mesure 220 x 220 pixels. Il s'agit de l'image obtenue après recentrage et empilage des images brutes.

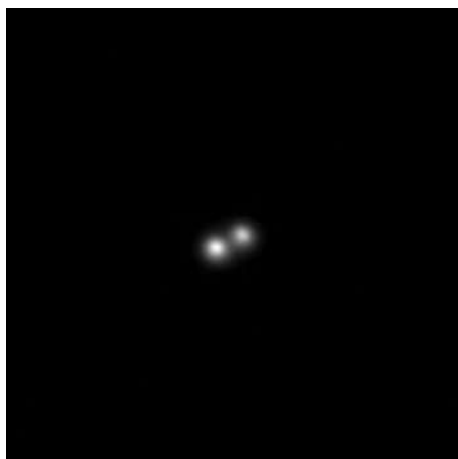


Figure 1 : STF1758 - Séparation 3.34''

Une centaine d'images sont acquises pour chaque cible afin de permettre une sélection de celles qui sont les moins affectées par la turbulence. En règle générale 50% des images acquises sont utilisées.

Les images obtenues sont au format fit.

5 Réduction des images

Le logiciel Reduc de Florent Losse [2] a été utilisé pour effectuer la réduction et fournir les valeurs de Rho et Thêta pour chaque couple.

Après étalonnage du champ grâce aux images des couples étalons, la réduction a été effectuée après décalage et empilement des meilleures images brutes obtenues. La sélection des meilleures images brutes (50% des images) a été effectuée grâce à la fonction BestOf du logiciel Reduc.

Un contrôle de cohérence des résultats a été effectué en comparant les valeurs obtenues avec les dernières mesures fournies par le Washington Double Star Catalog (WDS) [4]. Quelques couples ont été écartés de la liste à la suite de ce contrôle, car les angles et/ou les séparations obtenues s'écartaient de celles attendues. Je conserve toutefois ces résultats, pour une éventuelle seconde mesure de vérification.

6 Présentation des mesures

L'ensemble des mesures réalisées sont présentées dans la table 2.

Pour chaque mesure, les données fournies sont les suivantes :

- Référence dans le WDS,
- Nom de l'étoile double,
- Date de la mesure (époque julienne),
- Valeur d'angle Thêta en degrés,
- Valeur de séparation Rho en secondes d'arc.
- Le cas échéant, nombre de mesures moyennées.

Quelques couples ont été mesurés lors de deux nuits successives. Dans ce cas, la valeur fournie correspond à la moyenne de ces deux mesures.

7 Présentation des résidus

La table 3, quant à elle, fournit les valeurs des résidus O-C pour les 5 couples orbitaux présents dans la liste.

Les orbites des couples orbitaux ont été relevées dans le 6ème catalogue d'orbites d'étoiles doubles visuelles [5]. La référence et le grade de l'orbite sont précisés.

Table 2 : Mesures

Référence WDS	Nom du couple	Epoque	Thêta [°]	Rho ["]	Nombre de Mesures
00026+6158	STI1258	2012,79	84,34	12,20	1
00033+6053	HJ 1928AB	2012,79	183,25	15,23	1
00035+6041	STI1261	2012,79	161,82	14,03	1
00040+6050	HJ 1930	2012,79	165,93	10,81	1
00113+2953	MLB 631AB	2012,75	270,92	8,40	1
00115+2949	MLB 441AB	2012,75	359,03	14,20	1
00115+2949	MLB 441BC	2012,75	342,50	36,71	1
00115+2949	MLB 441CD	2012,75	138,98	6,13	1
00129+6150	ES 1865AB	2012,79	122,28	23,51	1
00129+6150	ES 1865AD	2012,79	76,20	37,00	1
00229+6214	ABH 3AE	2012,79	192,41	57,80	1
00229+6214	ES 115AB	2012,79	84,97	9,21	1
00229+6214	ES 115AC	2012,79	56,01	22,86	1
00229+6214	ES 115AD	2012,79	81,84	44,36	1
00491+5749	STF 60AB	2012,73	322,73	13,23	1
02283+4314	HJ 2137	2012,14	133,40	27,44	1
02315+4327	J 928	2012,14	257,23	6,40	1
02315+4329	J 929	2012,14	349,99	6,09	1
02375+4232	GRV 136	2012,75	50,36	29,92	1
02412+4241	HJ 2154	2012,75	140,72	10,09	1
02420+4248	HJ 1123	2012,75	249,04	20,13	1
02422+4247	ARN 101	2012,75	334,62	33,62	1
02464+4020	COU1374	2014,83	130,62	1,72	1
02517+3854	ROE 67AB	2014,83	128,94	27,20	1
02529+3901	ROE 68	2014,83	258,16	10,29	1
02530+3955	ES 232	2014,83	195,59	2,32	1
03023+4124	WAL 20AC	2012,76	209,14	97,87	1
03023+4124	WAL 20CD	2012,76	191,15	20,70	1
03025+4137	ES 1512	2012,76	128,63	5,53	1
03298+5010	UC 48	2012,75	162,93	29,19	1
03383+4448	S 430AB	2014,83	96,06	41,10	1
03407+4601	STT 59	2014,83	355,18	2,76	1
03459+5025	ES 465	2012,75	264,43	9,77	1
03516+4947	ES 1064AB	2012,75	281,10	56,11	1
03516+4947	ES 1064BC	2012,75	40,33	5,36	1
03541+3153	STF 464AB	2012,76	207,89	13,12	1
03541+3153	STF 464AC	2012,76	286,34	32,89	1
03545+3203	LEI 6	2012,76	70,78	8,91	1
03563+5108	KU 16AB	2014,83	268,43	2,43	1
03567+4729	STF 465	2014,83	234,57	5,69	1
03572+3201	SEI 33AB	2012,76	116,51	27,00	1
03572+3201	WSI 29AC	2012,76	102,24	22,43	1
03572+3201	WSI 29BC	2012,76	342,89	7,63	1
03578+4932	KU 82	2012,75	286,83	42,11	1
03578+4932	KU 82	2014,83	286,52	42,01	1
03587+5013	SKF 392	2012,75	137,33	32,92	1
03587+5013	SKF 392	2014,83	136,96	32,79	1
03598+5054	ES 954	2014,83	353,94	3,42	2
04000+3219	HJ 339	2012,76	224,82	33,78	1
04015+4846	UC 62	2014,83	173,79	25,33	1
04027+3210	HJ 670	2012,76	47,73	10,71	1
04073+4621	COU2024	2014,83	212,44	1,24	1
04085+3252	SEI 35	2012,76	98,75	14,74	1
04087+5016	HU 211	2014,83	273,24	1,58	1
04151+4445	GRV 209	2014,83	293,49	22,44	1

Table 2 : Mesures

Référence WDS	Nom du couple	Epoque	Thêta [°]	Rho ["]	Nombre de Mesures
04158+4524	STF 512	2014,83	217,75	5,25	1
04173+4613	STTA 44	2014,83	322,77	58,31	1
04258+4633	ES 566AB	2014,83	152,90	12,12	1
04260+4515	ES 567AB	2014,83	353,59	37,05	1
04260+4515	ES 567AC	2014,83	127,60	8,13	1
04410+4840	ES 1226	2012,75	288,87	8,57	1
05167+4600	ST 3HL	2014,97	174,69	3,47	1
05425+2951	BU 14	2014,97	191,56	5,64	1
08248+6409	ARG 18	2012,46	22,37	19,78	1
08354+6616	STF1232	2012,46	351,51	31,00	1
08420+6201	STF1248	2012,46	209,09	18,19	1
10375+5639	MLB 128	2014,29	34,77	6,82	1
10411+5735	STI2252	2014,29	253,31	6,98	1
10532+4359	ES 2635AB	2013,29	35,31	9,53	1
10564+7115	HDS1562	2013,29	53,19	5,15	1
10575+5733	CBL 45	2014,29	24,67	23,48	1
11007+4244	ES 2637	2013,29	209,59	11,93	1
11037+4420	HJ 2554	2013,29	294,94	38,43	1
11055+4332	VBS 18AB	2013,29	125,14	31,98	1
11076+4329	HJ 2557	2013,29	27,66	22,74	1
11095+5740	STI2262	2014,29	115,32	12,15	1
11145+5733	STI2263	2014,29	269,32	11,17	1
11172+5653	STI2265	2014,26	250,48	8,65	1
11210+6923	HJ 2567	2014,26	242,44	15,01	1
11219+4337	HJ 2568	2013,29	246,69	23,98	1
11243+5553	STI2269	2014,26	95,89	7,74	1
11255+5841	STI 725	2014,26	20,65	17,44	1
11293+5401	MLR 680	2014,29	185,39	4,16	1
11317+5602	CBL 50	2014,29	220,73	20,44	1
11319+6237	PTT 22	2014,26	174,10	5,07	1
11325+5302	HJ 2574	2014,29	81,68	31,99	1
11329+5525	A 1593	2014,29	254,81	4,04	1
11350+5557	STI2273	2014,29	297,14	5,13	1
11353+7048	STF1551	2013,29	111,41	6,56	1
11360+5804	STI2274	2014,28	23,04	7,44	2
11366+5608	STF1553	2014,29	165,77	6,18	1
11426+5857	STI 733	2014,26	193,60	3,22	1
11450+6339	MLB1075	2014,26	61,66	9,97	1
11466+5710	STI2276	2014,26	8,55	11,44	1
11479+4541	HJ 1198	2013,29	103,51	11,85	1
11484+7114	HJ 2586	2013,29	260,60	27,02	1
11502+7051	HJ 2587	2013,29	302,50	19,91	1
11527+5647	ES 1826	2014,26	216,75	5,69	1
11546+4615	KZA 19AB	2013,29	335,76	54,57	1
11546+4615	KZA 19AC	2013,29	115,52	53,69	1
11552+7311	HJ 2590	2013,29	325,17	10,64	1
11589+6002	STI 736	2014,26	314,90	9,55	1
11598+5137	STF1587AB	2013,29	288,19	16,73	1
12001+7039	BU 795AB	2013,29	329,85	14,36	1
12001+7039	BU 795CD	2013,29	111,73	6,33	1
12001+7039	STH 2AE	2013,29	319,23	25,28	1
12001+7039	STT 242AC	2013,29	159,35	31,00	1
12007+5841	HJ 2592	2014,26	11,12	4,29	1
12023+7222	STF1588	2013,29	34,80	11,88	1
12082+6030	HJ 2598AB	2014,26	23,85	30,95	1

Table 2 : Mesures

Référence WDS	Nom du couple	Epoque	Thêta [°]	Rho ["]	Nombre de Mesures
12082+6030	VBS 19BC	2014,26	236,93	10,21	1
12096+7250	HJ 2599	2013,29	110,01	12,42	1
12332+7003	CBL 53	2013,29	27,40	26,44	1
12334+6101	STI 747	2013,29	296,20	12,05	1
12411+6831	STF1671AB	2013,29	201,50	29,15	1
12411+6831	STF1671AC	2013,29	153,61	38,65	1
12550+5810	STF1691AB	2014,29	275,02	18,66	1
13004+3856	COU1131	2014,28	244,02	3,49	1
13022+7121	WFC 133	2013,29	353,88	4,09	1
13078+4955	BEM 4	2014,28	356,56	22,14	1
13107+7046	BVD 100	2013,29	246,76	86,84	1
13152+4838	ES 732	2014,28	86,48	3,59	1
13174+5812	MLB 69	2014,29	38,46	4,00	1
13175+3649	HU 1146	2014,28	28,63	5,43	1
13178+3535	SMA 77	2014,28	73,83	3,84	1
13195+5423	STI2296	2013,29	288,19	6,80	1
13221+5122	ES 734	2014,28	165,06	6,99	1
13225+3032	STF1739	2014,28	124,66	14,87	1
13235+3534	KZA 60	2014,28	211,17	11,51	1
13257+5227	BEM 5	2014,28	215,77	9,50	1
13258+5204	MLR 705	2014,28	340,19	4,64	1
13265+4233	ES 2645	2014,28	210,98	22,23	1
13270+5807	MLB 70	2014,29	236,94	5,52	2
13292+3104	STF1749	2014,28	352,34	21,54	1
13298+5905	ES 1790	2014,29	250,47	4,97	2
13300+6021	STF1754	2014,28	14,14	24,29	1
13320+7143	STF1761	2013,29	71,20	20,33	1
13329+3249	GRV 869	2014,28	48,33	22,24	1
13329+4908	STF1758	2014,38	292,28	3,34	1
13354+5955	KR 42	2014,29	215,67	3,65	2
13377+4814	HJ 2667	2014,27	183,82	13,53	1
13394+4111	HEI 64	2014,27	297,54	3,43	1
13407+5944	HJ 2673	2014,29	173,87	49,52	1
13419+3209	TOB 131	2014,28	190,62	9,95	1
13430+4710	HJ 2675	2014,27	294,26	14,52	1
13443+6841	HJ 2685	2013,29	268,24	21,67	1
13449+5727	HJ 2679	2014,28	309,37	6,89	1
13462+4524	HJ 2680	2014,27	146,76	24,00	1
13519+3359	ES 2415	2014,27	64,07	5,48	1
13562+3507	ALI 126	2014,27	104,66	5,16	1
13569+3543	HJ 536	2014,27	323,62	10,43	1
13598+6442	BVD 105	2014,40	276,44	45,66	1
14010+4624	HJ 2697	2014,27	297,75	23,06	1
14051+4913	BEM 7	2014,27	84,51	4,60	1
14065+7058	HJ 2703	2013,29	342,78	12,49	1
14125+6735	HRS 1	2013,78	278,81	47,65	2
14139+4620	RED 24	2014,27	214,84	82,82	1
14191+5133	BEM9018	2014,27	31,20	16,23	1
14211+4942	UC 193	2014,27	316,96	9,68	1
14236+5205	BEM9019	2014,27	14,23	14,07	1
14239+6052	STE 10	2014,29	274,17	18,83	1
14274+6256	MLB 353	2014,35	99,42	3,39	2
14281+4602	BEM9003	2014,27	240,56	8,50	1
14343+6111	STI 767	2014,29	148,51	6,06	1
14433+6015	PTT 24	2014,29	352,62	4,29	1

Table 2 : Mesures

Référence WDS	Nom du couple	Epoque	Thêta [°]	Rho ["]	Nombre de Mesures
14441+6106	STF1882AB	2014,29	358,89	11,53	1
14441+6106	STF1882AC	2014,29	37,94	7,19	1
14534+6928	PRZ 12	2013,29	203,44	35,02	1
14536+6946	STF1897	2013,29	319,19	35,85	1
14585+6158	STI 779	2014,40	178,53	5,54	1
14594+8320	HJL1089	2013,29	333,21	60,08	1
15031+6117	MLR 47	2014,40	249,82	8,10	1
15094+6202	STI 781	2014,40	295,40	13,63	1
15146+5917	BVD 110	2014,39	170,78	22,85	2
15175+6246	PKO 23	2014,40	348,49	5,82	1
15192+6307	MLB 354	2014,34	112,50	2,79	2
15370+5824	MLB 71	2014,39	289,02	4,03	2
15565+5717	STF1996AB	2014,40	108,04	19,44	1
15568+5459	UC 215	2014,40	68,28	22,08	1
16051+5426	ES 743	2014,40	11,56	5,43	1
16103+5439	ES 967	2014,40	209,91	8,47	1
16160+5718	STI2335	2014,38	150,61	9,42	1
16241+5835	STI2339	2014,38	74,87	13,01	1
16276+5922	CBL 65	2014,38	321,93	12,80	1
16284+6028	UC 3175	2014,38	160,67	8,49	1
16473+5218	ES 970	2014,40	299,03	3,46	1
16489+5930	STT 316	2012,46	348,55	47,03	1
16513+5347	SWI 2	2014,40	196,41	7,06	1
16516+6133	STI 808	2014,38	166,66	5,37	1
16554+5252	BEM9022AB	2014,40	272,86	11,99	1
16554+5252	DAM 260AC	2014,40	200,04	6,35	1
16588+7106	STF2126	2012,46	134,26	22,87	1
17086+7100	TOB 136	2012,46	261,19	21,73	1
17458+5326	MLR 605BC	2012,36	44,46	10,85	1
17480+5707	MLB1077AB	2012,36	210,84	4,66	1
17480+5707	MLB1077AC	2012,36	29,77	23,09	1
17510+5709	STI2360	2012,36	231,60	9,92	1
17563+5731	ES 1744	2012,36	266,70	7,34	1
17566+5813	ES 20	2012,36	212,01	17,26	1
17571+5755	STI2363	2012,36	279,27	14,28	1
18014+6557	STF2284	2012,41	192,66	3,54	1
18029+5626	STF2278AB	2012,41	28,94	35,82	1
18029+5626	STF2278AC	2012,41	38,12	33,50	1
18099+4824	STF2293AB	2012,36	83,53	12,96	1
18133+4944	HDS2572	2012,36	69,73	14,45	1
18197+4453	ES 2665AB	2012,55	22,50	9,97	1
18259+6029	ES 2666	2012,41	269,97	45,02	1
18269+2950	HJ 1325	2012,55	310,91	6,32	1
18295+2955	STF2328AB	2012,55	71,80	3,61	1
18295+2959	KU 118	2012,55	322,98	50,42	1
18332+4200	ES 21	2012,55	107,83	7,16	1
18340+4121	ARY 14AB	2012,55	292,45	38,53	1
18340+4121	ARY 14AC	2012,55	345,53	118,77	1
18384+3603	STF2362	2012,55	186,84	4,36	1
18392+3242	SEI 567	2012,55	352,33	12,97	1
18413+3018	STF2367AB,C	2012,55	190,72	14,05	1
18421+3445	STF2372AB	2012,55	81,17	25,01	1
18429+4456	STF2380	2012,55	7,09	25,65	1
18448+4458	WEB 7	2012,55	48,29	11,26	1
18467+4303	ES 1425	2012,55	229,74	4,30	1

Table 2 : Mesures

Référence WDS	Nom du couple	Epoque	Thêta [°]	Rho ["]	Nombre de Mesures
18473+2825	HJ 1347AB	2012,55	272,76	18,52	1
18488+3319	HJ 1349AB	2012,41	92,46	29,55	1
18491+2834	J 1208	2012,55	331,25	4,59	1
19479+6113	HJ 2905	2012,41	180,00	6,81	1
19536+5943	STTA194	2012,41	354,53	67,44	1
19538+4436	SMA 109	2012,56	111,29	21,85	1
19555+6049	ES 1798	2012,41	326,98	5,50	1
19579+4423	STT 393	2012,56	231,76	16,58	1
19595+5944	ES 201AC	2012,41	94,57	29,28	1
20030+6215	STI 942	2012,41	91,89	9,49	1
20089+5719	STI2506	2012,41	284,04	13,28	1
20099+5657	ES 132AB	2012,41	83,25	5,39	1
20099+5657	ES 132AC	2012,41	63,25	32,88	1
20123+4505	ES 1268	2012,56	150,03	8,24	1
20265+5619	BU 433AB	2013,56	207,19	7,53	1
20265+5619	BU 433AC	2013,56	241,33	29,31	1
20289+5655	STI2535AB	2012,41	227,24	13,55	1
20289+5655	TOB 187AC	2012,41	131,48	26,90	1
20289+5655	TOB 187AD	2012,41	188,59	31,10	1
20300+5621	STI2537	2013,56	342,73	12,76	1
20315+5611	HJ 1540AB	2013,54	346,42	22,78	1
20315+5611	HJ 1540AC	2013,54	130,01	40,81	1
20337+5616	HJ 1545	2013,54	180,15	15,73	1
20342+5622	HJ 1546	2013,54	245,79	17,50	1
20348+4531	ES 805	2012,56	151,25	7,97	1
20351+5624	HJ 1551	2013,54	225,21	42,14	1
20352+5622	HJ 1552	2013,54	234,23	21,34	1
20365+5557	HJ 1556AC	2013,54	222,45	6,71	1
20365+5557	VBS 30AB	2013,54	142,07	4,57	1
20365+5557	VBS 30AD	2013,54	97,25	29,48	1
20423+4549	BKO 158AF	2012,56	143,85	41,47	1
20423+4549	BKO 158EF	2012,56	280,87	24,82	1
20423+4549	CTT 15BD	2012,56	178,12	86,62	1
20423+4549	CTT 15BE	2012,56	141,27	87,99	1
20423+4549	STT 411AB	2012,56	348,54	31,14	1
20423+4549	WAL 132AC	2012,56	357,16	70,53	1
20423+4549	WAL 132BC	2012,56	3,82	40,01	1
20495+5728	MLB 86	2013,56	148,57	4,58	1
20599+5714	ES 136	2013,56	159,08	4,24	1
21005+5709	STI2557	2013,56	131,05	7,93	1
21103+5512	BU 1500AB	2013,56	113,80	7,71	1
21103+5512	HJ 1622AC	2013,56	296,56	12,89	1
21185+5505	ES 2707	2013,59	348,44	10,37	1
21345+4559	HJ 1660	2012,56	260,31	6,42	1
21373+5606	STI2578	2013,59	113,88	6,27	1
22052+4403	HJ 1723AB	2012,56	194,66	20,98	1
22118+5650	ENG 83AB	2012,76	19,57	51,33	1
22125+5656	STI2640	2012,76	45,08	10,17	1
22159+5440	BU 377AQ	2012,76	258,32	59,81	1
22159+5440	BU 377AS	2012,76	334,28	55,45	1
22191+5607	ABH 164AH	2012,76	123,24	47,92	1
22191+5607	ABH 164AI	2012,76	94,92	36,48	1
22191+5607	ABH 164AK	2012,76	343,05	52,04	1
22191+5607	ABH 164AL	2012,76	352,79	62,78	1
22191+5607	ABH 164AO	2012,76	262,01	82,93	1

Table 2 : Mesures					
Référence WDS	Nom du couple	Epoque	Thêta [°]	Rho ["]	Nombre de Mesures
22191+5607	ABH 164AP	2012,76	49,96	85,44	1
22191+5607	ABH 164AS	2012,76	270,96	49,46	1
22191+5607	HJ 1751AC	2012,76	115,19	10,97	1
22191+5607	HJ 1751AD	2012,76	75,99	24,82	1
22191+5607	HJ 1751CF	2012,76	33,28	8,71	1
22191+5607	HJ 1751DF	2012,76	250,22	10,00	1
22192+5603	STI2696	2012,76	268,38	5,70	1
22192+5605	STI2697	2012,76	355,14	7,74	1
22201+5436	STI2705	2012,76	119,05	9,04	1
22215+5551	STI2718	2012,76	233,43	6,49	1
22219+5546	STI2721AB	2012,76	300,59	7,64	1
22219+5546	STI2721AC	2012,76	150,86	13,24	1
22231+5508	STI2739	2012,76	156,17	9,27	1
22238+5440	STI2745BC	2012,76	281,69	14,45	1
22241+5523	STI2750	2012,76	176,15	3,91	1
22245+4720	ES 1281	2012,56	169,70	5,68	1
22246+5436	STI2758	2012,76	102,89	6,50	1
22264+5534	HJ 1767	2012,76	212,11	12,03	1
22324+6015	HJ 1782AB	2012,76	314,60	4,45	1
22324+6015	HJ 1782AC	2012,76	89,72	57,99	1
22324+6015	HJ 1783CD	2012,76	274,56	6,26	1
22358+5815	STI2830	2012,76	306,34	12,01	1
22361+6053	MLB 97	2012,76	62,14	7,09	1
22405+5835	STI2840	2012,76	140,41	7,87	1
22420+5826	STI2844AB	2012,76	311,83	6,69	1
22424+2703	MLB 585	2012,75	113,12	6,43	1
22525+4828	HEI 87	2014,97	279,85	5,19	1
22526+4857	ES 854	2014,97	90,65	2,61	1
22557+4857	BVD 281	2014,97	298,06	15,39	1
22571+2800	WOR 12AB	2012,75	149,59	9,00	1
22571+2800	WOR 12AC	2012,75	8,12	14,14	1
22576+2820	MLB 726	2012,75	14,31	3,34	1
22581+5106	ES 1184	2014,97	245,59	1,89	1
23031+5104	TDT3860	2015,00	322,75	2,58	2
23032+5120	DBR 1	2015,00	285,52	11,06	2
23046+5122	DBR 2	2015,00	94,53	12,24	2
23049+5119	DBR 3AB	2015,00	30,91	23,00	2
23049+5119	DBR 3AC	2014,97	48,92	12,96	1
23051+5118	HJ 1846	2015,00	142,61	9,28	2
23061+5110	ES 1122AB	2015,00	260,77	2,37	2
23104+4901	STF2987	2014,97	150,52	4,18	1
23159+4900	HJ 1863	2014,97	51,47	9,57	1
23275+5039	ES 1189	2014,97	137,09	1,56	1
23483+5818	STI3041AB	2012,79	101,48	10,72	1
23483+5818	STI3041BC	2012,79	70,46	6,23	1
23491+5851	STI3043	2012,79	346,96	16,73	1
23496+6052	STI1222	2012,79	21,15	12,03	1
23522+5942	HJL1112	2012,79	281,38	109,48	1
23572+6039	ES 1768	2012,79	359,37	7,33	1

Table 2 : Couples mesurés

Table 3 : Résidus					
Référence WDS	Nom du couple	O-C Thêta	O-C Rho	Référence de l'orbite	Grade de l'orbite
00491+5749	STF 60AB	-0,43	0,03	Sca2015c	3
05167+4600	ST 3HL	0,44	-0,03	lzm2019	5
11366+5608	STF1553	-0,15	0,02	Kiy2018a	4
14051+4913	BEM 7	-1,63	0,33	Kiy2020	5
23104+4901	STF2987	0,45	0,00	lzm2019	5

Table 3 : Résidus sur les couples orbitaux

8 Conclusion

Les mesures présentées dans cet article concernent des couples qui ont été choisis en raison de leur accessibilité à mon instrumentation ainsi qu'à leur position dans une zone favorable du ciel à la date de la séance d'observation.

Beaucoup se révéleront sans doute être de simples couples optiques. Il y en aura, en revanche, pour lesquels les mesures réalisées seront utiles et contribueront ultérieurement à décrire l'orbite d'une binaire physique.

Le catalogue Gaia, publié à ce jour en version eDR3 [6], permet de disposer des parallaxes de nombreuses composantes d'étoiles doubles. La disponibilité de ces parallaxes (donc des distances des étoiles) permet désormais de construire des programmes d'observation composés de couples ayant des chances raisonnables de constituer des binaires physiques car les composantes sont situées à des distances voisines. J'utilise aujourd'hui ces informations pour mieux cibler mes programmes d'observations.

Références

- [1] Site de la Commission des Etoiles Doubles de la SAF - <https://ced.saf-astronomie.fr/> Rubrique Observations
- [2] Mission Hipparcos ESA - <https://www.cosmos.esa.int/web/hipparcos/home>
- [3] Site de F. LOSSE – Logiciel Reduc - <http://www.astrosurf.com/hfosaf/>
- [4] Site du Washington Double Star Catalog (WDS) - <http://www.astro.gsu.edu/wds/>
- [5] Sixth Catalog of Orbits of Visual Binary Stars - <http://www.astro.gsu.edu/wds/orb6.html>
- [6] Gaia early Data Release 3 (eDR3) - <https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/earlydr3>



Philippe LAURENT

Je suis astronome amateur depuis mon plus jeune âge. Membre de la Commission des étoiles doubles de la SAF depuis un peu plus de 10 ans, j'ai pu approfondir ce domaine de l'astronomie qui m'a toujours passionné et me consacrer à des travaux apportant une contribution scientifique, même modeste.