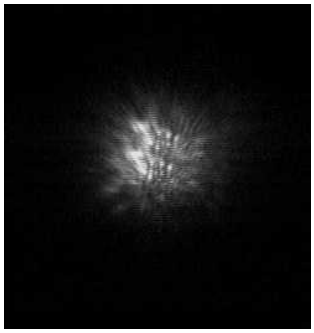
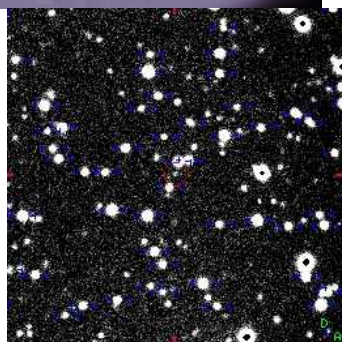
Mission Speckles Pic II
Novembre 2008





Interférométrie des tavelures sur étoiles doubles
Astrométrie sur TNO (Varuna)

Missionnaires : Martine CASTETS, Bernard TREGON

Partie 1 : Interférométrie des tavelures (Nuits 1 & 3)

Lors de notre précédente mission (http://www.astrosur f.com/t60/ missions/ compte_rendu_ mission_Speckles _pic_I_MCA. pdf), nous avons montré qu'il était possible, avec une manip simple, d'utiliser la méthode de l'interférométrie des tavelures (Speckle interferometry) pour étudier des étoiles doubles serrées. Quand nous parlons d'étoiles doubles serrées, il faut rappeler que la séparation théorique donnée par un télescope dépend dans un premier temps de la diffraction par l'ouverture circulaire du télescope, et dans un deuxième temps par la qualité de la turbulence.

La turbulence agissant de manière complètement aléatoire, la somme des poses individuelles d'une séquence vidéo ne permet pas par simple « Shift and add » de remonter aux informations de position du couple considéré avec une précision importante (de l'ordre de quelque dizaines de milli arc secondes (mas). La méthode employée lors de notre mission précédente (somme des cross corrélations de chaque images sur une séquence de 600 à 1800 images), permet d'extraire du bruit atmosphérique la donnée de séparation et d'angle au nord d'un couple d'étoiles serrées.

L'objet de notre mission était donc d'effectuer un certain nombre de mesures sur une liste d'étoiles de séparation inférieure à 2''5 et ayant un différentiel de magnitude inférieur à 3. Nous avons procédé à l'acquisition des séquences vidéos à l'aide des éléments que nous avions montés là haut lors de la première mission (bague allonge Meade, bague monture C pour la Watec 902H2, et bague adaptation sur le nouveau porte oculaire récemment mis en place sur le T60

La caméra est suivie d'un numériseur Pinnacle Dazzle video recorder, du même type que celui utilisé pour la manip d'occultation d'étoiles au T60.

Les vidéos acquises sont des AVI enregistrés sous Virtualdub en mode Raw. La cadence est de 25 ips, le temps de pose annoncé par le datasheet de la caméra est de 20ms.

Pour donner un peu en avance le rendement de la mission, le pointage, avec un peu d'habitude, prend moins de 5 minutes par étoiles, et l'acquisition environ 2 minutes. La moisson totale d'étoile (44 étoiles au total de cette mission) s'est faite dans le temps record d'une nuit et demi environ. Compte tenu de la météo plutôt défavorable que nous avons eu en deuxième partie de mission, nous avons tapé dans le mille.

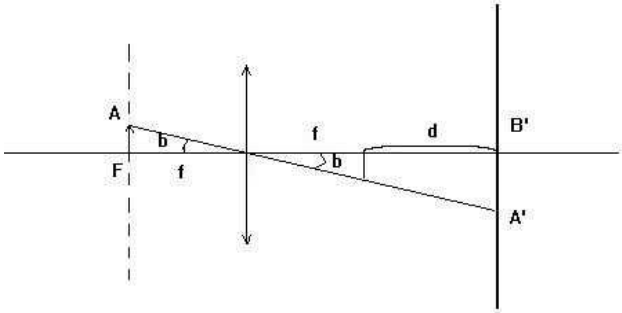
Pour ce qui est du choix des cibles, quelques discussions et recherches sur Internet m'ont convaincu de m'attaquer, pour commencer, à une liste bien connue des duplicistes, la liste « Morlet-Durand » établie en Avril 2002 par la SAF (Société Astronomique de France) contenant 387 étoiles de référence :
(http://saf.etoilesdoubles.free.fr/documents/387_DOUBLES.pdf), extraites du Washington Double star catalogue. Patrick Lailly, que nous avons cité dans notre compte rendu précédent, en a extrait une liste secondaire pouvant servir de base à une manip d'interferométrie des tavelures (commencée au Télescope Jean Marc Salomon de Planète Science :
http://pagesperso-orange.fr/patrick.lailly/astro/tavelures/manips/select_double.html)
Nous nous sommes basés sur cette extraction pour commencer notre programme d'observation d'étoiles doubles.

Les étoiles de la liste que nous n'avons pas put imager sont celle dont l'ascension droite les rendait inaccessibles à l'observation à cette période.

On peut donc estimer que le rendement moyen à l'observation est d'environ 30 étoiles par nuit, à raison d'environ 7 minutes par étoiles.

La phase de calibration :

Premier gros problème, l'étalonnage des mesures. Le calcul de l'échantillonnage découle du schéma optique d'un système à tirage oculaire classique suivant :



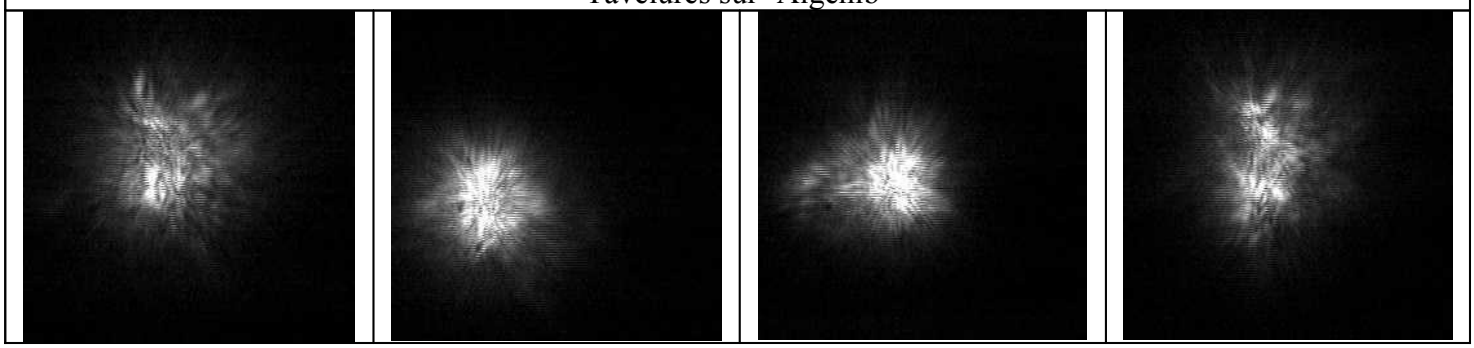
En appelant FA la taille de l'image de l'objet observé au foyer du miroir primaire, nous pouvons écrire FA=F.tg(alpha) avec alpha l'angle sous lequel est vu l'objet. Cet angle étant petit, on considère tg(alpha)=alpha. Il vient alors pour l'échantillonnage la relation suivante :

en secondes par pixels (alpha exprimé en secondes).

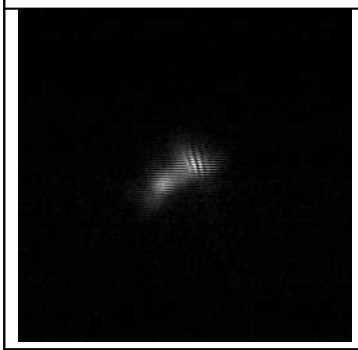
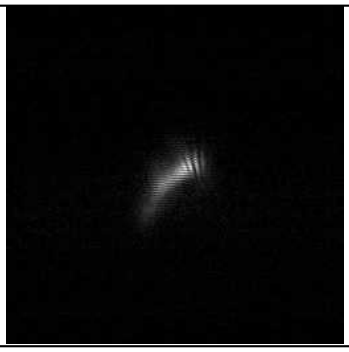
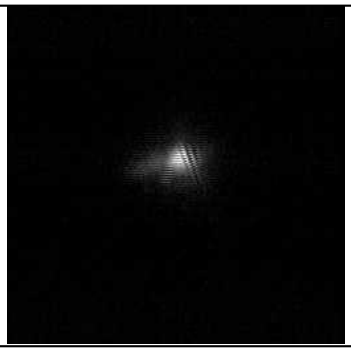
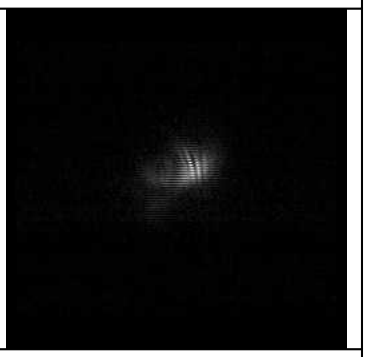
Avec F la focale de l'objectif connue à +/-5mm, f celle de l'oculaire, d le tirage (connu à +/-0.5mm) et l la taille du pixel.
L'échantillonnage théorique est alors voisin de **0.086''/pixels**. Mais nous devons aller plus loin pour définir une valeur précise.

Nous avons essayé d'utiliser la technique du masque de Fizeau (nous l'avions envisagé lors de la première mission). Le masque présent au T60, utilisé à l'origine pour la mise au point précise, dispose de 3 trous (masque de Hartmann). Nous en avons obturé un et utilisé les 2 autres, en notant leurs caractéristiques (écartement B=285mm, et taille des ouvertures S=160mm). L'étoile utilisée pour faire le test était Gamma Pégase (BSC39 'Algenib', Alpha = 00h13m14.200s | delta = +15°11'01.00" le 17/11/2008 à 21h30. Hauteur = 61°17', Airmass =1.13).
Nous en avons d'ailleurs profité pour vérifier la présence des tavelures avant l'apposition du masque :

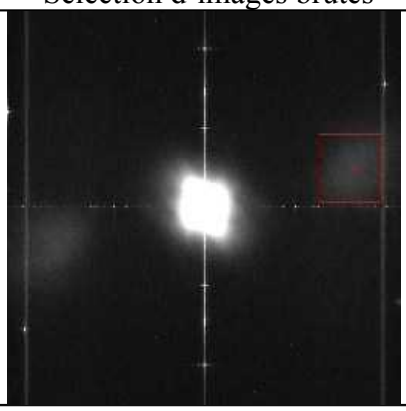
Tavelures sur 'Algenib'



Essai d'étalonnage par masque de Fizeau

Sélection d'images brutes



Somme des Transformées de Fourier et Extraction de la périodicité des franges

Les franges d'interférences sont bien présentes sur la séquence vidéo.
L'extraction de la périodicité des franges s'est faite par recherche du maximum de la FFT dans la fenêtre correspondant au pic de franges.

Par la méthode du masque de Fizeau, un problème fondamental se pose : la formule du tirage oculaire définie ci-dessous implique une parfaite connaissance de la longueur d'onde (Formule déduite de la page http://btregon.club.fr/seeingrecup.htm) :

$$k = \frac{N}{n} = \frac{N}{\frac{\lambda}{B} \cdot \frac{F}{l} \cdot (\frac{d}{f} - 1)}$$

avec N la taille de l'image de la FFT, B l'écartement des trous, F la focale de l'objectif, f celle de l'oculaire, d le tirage et l la taille du pixel. Nous pouvons faire une estimation du maximum de sensibilité spectrale du capteur, mais la précision reste insuffisante pour avoir une mesure fiable de l'échantillonnage (il suffit de constater la dispersion des points correspondants à la périodicité des franges). Le terme en lambda/B introduit une imprécision due au fait que la mesure présentée ici n'est pas spectralement filtrée. Malgré tout nous avons une mesure dont l'ordre de grandeur est cohérent si la longueur d'onde du maximum de sensibilité de la caméra est voisine de 0.61 microns :

Largeur frange mesure sur la FFT (Pixel)	Lambda (microns)	B(mm)
5.145	6.10E-01	0.285
	Taille angulaire de la frange (")	Echantillonnage (pixels/frange)
	0.4415	0.0858

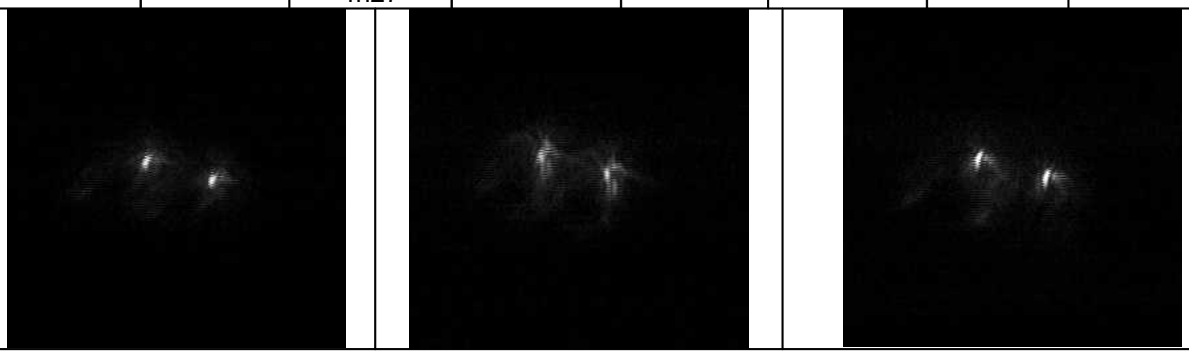
Mieux vaut donc en rester à une procédure de calibration plus « classique pour » pour mesurer les couples considérés.

Nous avons choisi comme couple étalon, STF958 pour établir la calibration en rho et en théta. Conformément aux préconisations du livre de Paul Couteau, nous avons utilisé une étoile qui au moment de l'observation se trouvait le plus haut possible, afin d'éviter la perturbation induite par la réfraction atmosphérique. La caméra ayant été immobilisée pendant toute la durée des acquisitions (2 nuits), l'étoile de calibration été imagée à la fin de la première nuit.

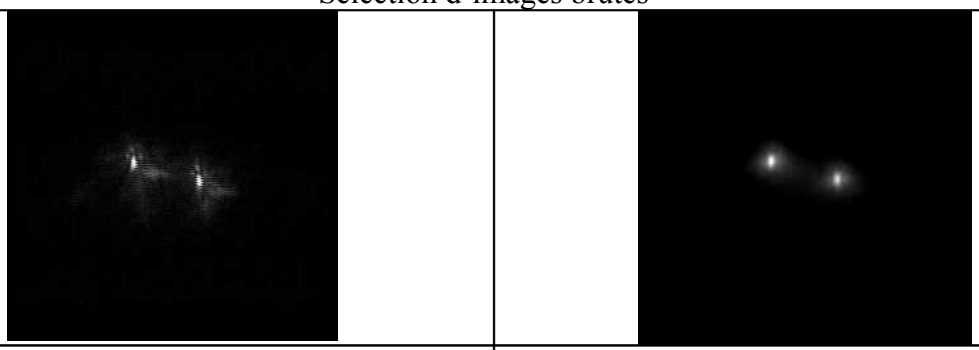
Les calculs de la valeur de la hauteur et de la couche d'air traversée (airmass) ont été établis à l'aide du logiciel Prism V6 :

Etalonnage par mesure directe

WDS NOM usuel	Const	Date	Date normalisée	Airmass	Hauteur	Asc.dr. 2000 (h min)	Dcl. 2000 (° min)
STF958AB	Lyn	18/11/2008 4h27	2008.888	1.02888	+76°22'35"	06 48 13	+55 42 12.9



Sélection d'images brutes

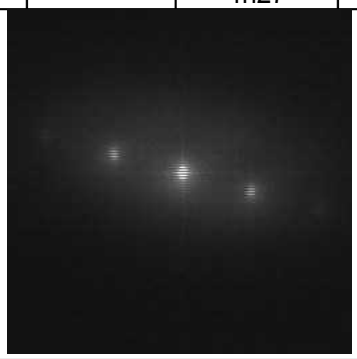


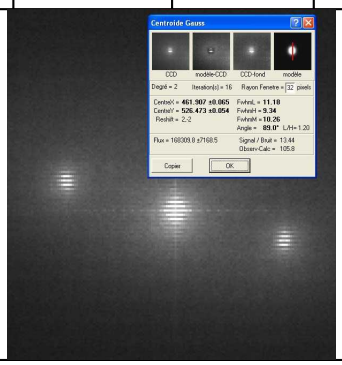
Meilleure image de la séquence obtenue par « Best of » sous Iris		Somme de 600 images par « décalage et addition » (méthode « shift and add »)	
Rho = 52.639	Beta = -15.511	Rho = 52.658	Beta = -15.258
(Pixels)	(°)	(Pixels)	(°)
Mesure image Seule		Mesure shift & add 600 im	

La position des centroïdes des étoiles est obtenue par l'algorithme de recherche par la méthode d'ajustement d'une gaussienne 2D sur l'étoile (Prism V6). Dans la suite de ce document, c'est cette méthode qui a été principalement utilisée. Toutefois, dans certains cas d'images de speckles ou l'algorithme ne convergeait pas, la détermination de position s'est faite à l'aide de la routine de calcul du barycentre des pixels dans une fenêtre ajustée au pic de corrélation considéré.

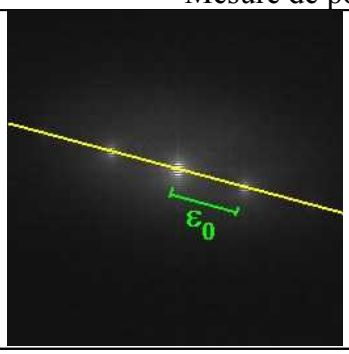
L'angle Béta n'est pas l'angle de position du couple, mais l'angle du couple à l'axe x de la caméra.

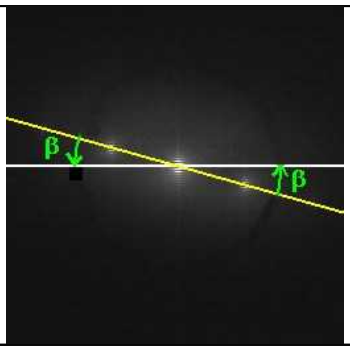
Etalonnage par « cross-corrélation » 600 images							
WDS NOM usuel	Const	Date	Date normalisée	Airmass	Hauteur	Asc.dr. 2000 (h min)	Dcl. 2000 (° min)
STF958AB	Lyn	18/11/2008 4h27	2008.888	1.02888	+76°22'35"	06 48 13	+55 42 12.9





Mesure de position des pics de cross corrélation





Calibration en rho et Béta	
Rho = 52.867	Beta = -15.205
(Pixels)	(°)

Pour établir les valeurs de références de epsilon et de théta, nous avons maintenant besoins des mesures officielles récentes de notre étoile étalon.
Nous avons utilisé pour cela le **"Fourth Catalog of Interferometric Measurements of Binary Stars"** (http://ad.usno.navy.mil/wds/int4.html), dont nous avons extrait les données relatives a l'étoile STF958 :

06482+5542 STF 958 A has variable proper motion. B is a spectroscopic binary.							
064812.23+554216.0 ADS 5436	STF 958AB	HD 48767+66 HIP 32609		06482+5542 note			
1991.25	256.9	.	4.635				
1991.7	76.9	.	4.634				
1998.205	257	.	4.19				
2002.961	256.3	.	4.55				

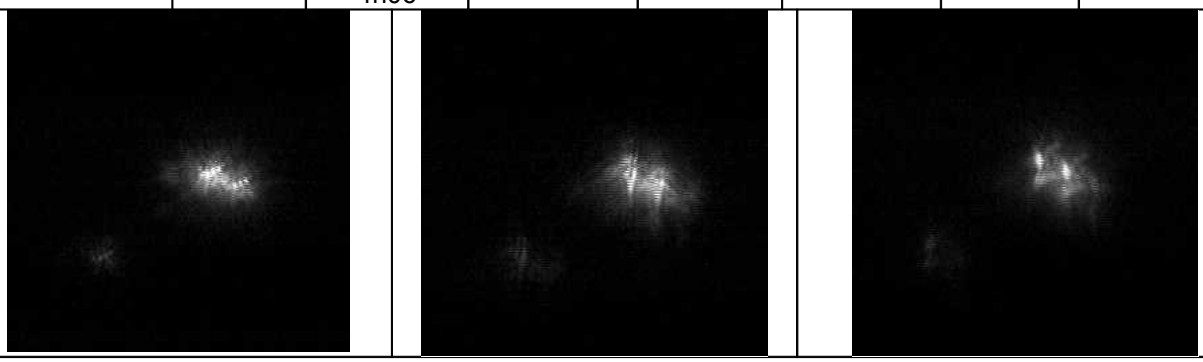
La dernière mesure disponible sur ce catalogue est donc relativement ancienne puisqu'elle date de fin 2002. Nous avons donc comme indication Rho = 4.55 et Théta = 256.3. A en croire les informations relatives à l'angle thêta, issu du wds ce dernier est stable depuis plusieurs années. Nous considéreront la valeur **256.3°** comme référence. La magnitude respective des 2 composantes nous pose un problème quand à la position du nord sur l'image. En effet, la mesure de thêta se fait dans le sens direct (aussi appelé trigonométrique ou encore inverse des aiguilles d'une montre) en partant de l'axe au nord. Dans le cas qui nous intéresse, nous avons 2 solutions pour orienter nos clichés à 180° près.

La levée d'ambiguïté se fait par l'utilisation d'une deuxième mesure sur une étoile multiple (nous avons ici utilisé la mesure de STF948), dont nous présentons ci-dessous les mesures officielles du **"Fourth Catalog of Interferometric Measurements of Binary » :**

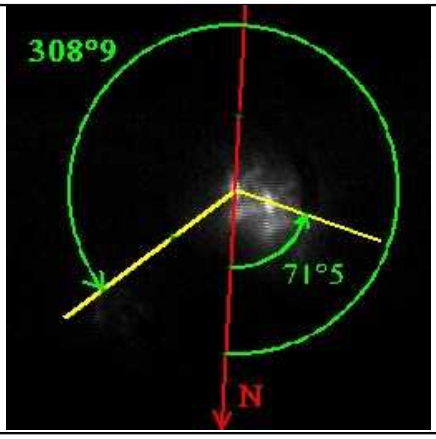
06462+5927 STF 948 12 Lyn. A premature orbit has been computed.			
Star C (mag. 7.4, 8") is physical.			
2006.106	71.4	.	1.78
064614.15+592630.1 ADS 5400		STF 948AC	
2005.222	308.9	.	8.71
2006.106	308.9	.	8.66

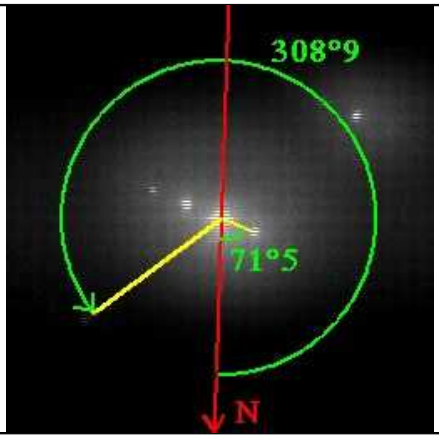
Deuxième étalonnage par mesure directe et cross corrélation

WDS NOM usuel	Const	Date	Date normalisée	Airmass	Hauteur	Asc.dr. 2000	Dcl. 2000 (° min)
STF948AB-C	Lyn	18/11/2008 4h06	2008.888	1.04333	+73°24'55"	06 46 14	+59 26 30



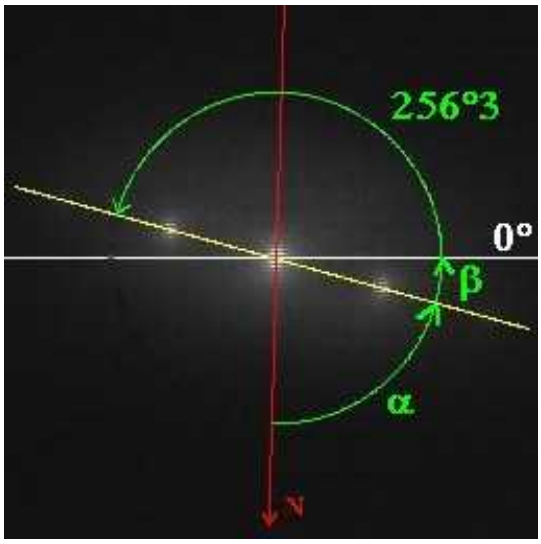
Sélection d'images brutes





Meilleure image de la séquence obtenue par « Best of » sous Iris		Cross corrélation sur une séquence de 600 images	
Rho (AB) = 21.796	Beta (AB) = -22°27	Rho (AB) = 21.869	Beta (AB) = -22.160
Rho (AC) = 101.899	Beta (AC) = 37.842	Rho (AC) = 101.538	Beta (AC) = 36.993
(Pixels)	(°)	(Pixels)	(°)
Mesure image Seule		Mesure cross corrélation 600 im	

Nous savons donc maintenant que l'axe nord est situé vers le bas, ce qui nous permet d'établir la relation algébrique de mesure des angles :



La mesure de l'angle de position se faisant par rapport à l'horizontale à l'aide de la relation :

avec Xc et Yc les coordonnées du centre de l'image

Nous en déduisons la mesure de l'angle entre l'horizontale et l'axe Nord :

Pour l'Intercorrélation

Pour la mesure directe sur addition recentrée

Pour la mesure directe sur image brute

Avec bêta l'angle à l'horizontale, thêta l'angle de position de l'étoile se déduit de la relation algébrique :

Le terme en +/- 180° est issu du choix de l'étoile d'origine. Nous avons pris comme valeur étalon l'intermédiaire entre la mesure directe et la mesure par corrélation :

$$\delta = 91{,}66°$$

Pour la mesure de l'écartement, la cohérence des mesures entre STF948AB et STF948AC et STF958AB est problématique. En effet, la mesure de STF958 en 2002 donne une valeur de 4''55 ce qui nous donne un échantillonnage de 0.0864''/pixels par mesure directe (image brute et shift and add), et de 0.0860''/pixels par cross corrélation. Si nous appliquons ce résultat à STF948AB et AC, nous obtenons unes séparation pour AB de 1''872 et pour AC de 8''753. Si nous comparons ce résultat aux mesures du **"Fourth Catalog of Interferometric Measurements of Binary »**, la séparation des composantes AB et AC semble surévalué dans les 2 cas, surtout pour ce qui est de la valeur de la séparation de STF948AC. La séparation de ce couple, sur une quinzaine d'année (1991-2006), varie autour d'une valeur moyenne de 8.678'' avec un écart type de 0.038. Nous sommes donc entre 2 et 3 fois l'écart type au dessus la valeur de l'ensemble des mesures récentes faites sur ce couple. La situation est identique sur STF948AB. Nous avons donc considéré l'écartement pour la calibration non pas de STF958AB (vu l'ancienneté de la mesure), mais bien celui de STF948AC, qui de plus au vue de son écartement plus important, nous donne une précision meilleure pour la mesure de notre échantillonnage.

Nous obtenons donc comme valeur de l'échantillonnage :

$$\Delta\varepsilon = 0.0855 \text{ ''/pixels}$$

Cette valeur nous amène à considérer l'ordre de grandeur de l'erreur sur la mesure comme voisine de +/-20mas à 2 sigma.

Les résultats :

Tous les résultats détaillés sont disponibles à l'adresse :
http://btregon.club.fr/tavelures/compte_rendu_mission_Speckles_pic_II_annexe_complete.zip

Venons en maintenant au rapport des mesures proprement dit. Le tableau suivant récapitule à la fois les mesures directes (lorsque ces dernières se sont avérées possibles) et les mesures effectuées sur les pics de la cross corrélation :

Les colonnes Airmass et hauteur correspondent respectivement à l'épaisseur de couche d'air et a la hauteur de l'astre, calculés au moment de l'acquisition de la vidéo, à l'aide du logiciel Prism. Les magnitudes sont extraites du WDS.

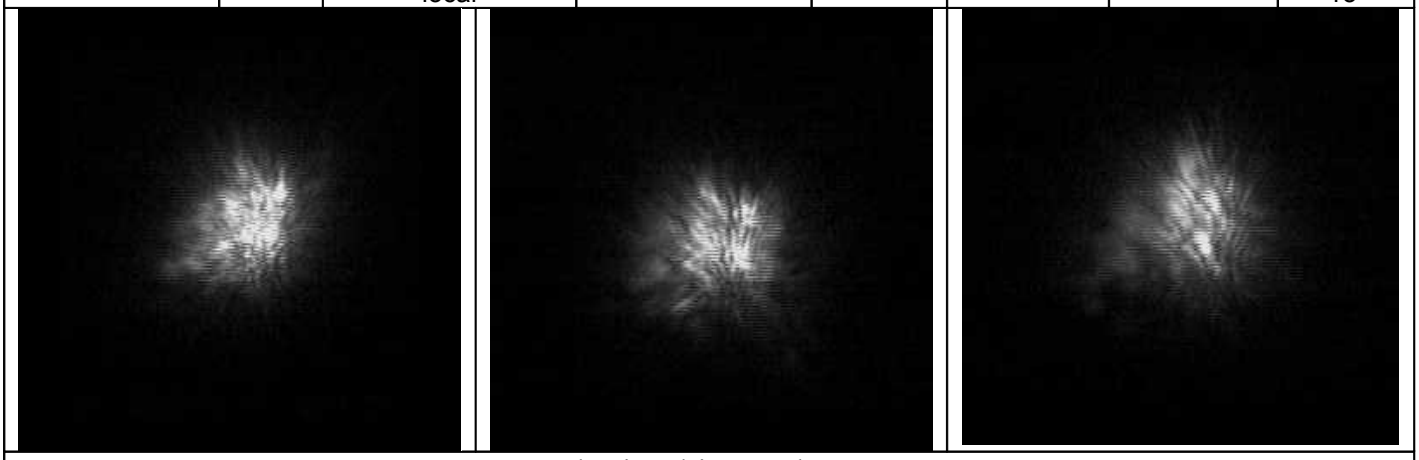
WDS NOM usuel	Const	Airmass	Hauteur	Magnit. (WDS)	Mesure directe		Cross-correlation	
Couples privilégiés					**Epsilon (")**	**Moyenne Théta**	**Epsilon (")**	**Moyenne Théta**
STF 202	Psc	1.4784	+42°29'18"	4,1 5,2			1.83	265.78
STF 333	Ari	1.0999	+65°21'25"	5,2 5,6	1.36	207.48	1.40	208.61
DA 5	Ori	1.42626	+44°26'52"	3,6 4,9			1.76	76.02
STF 795	Ori	1.24778	+53°12'54"	6,0 6,0	1.04	218.98	1.06	219.00
STF 948AB	Lyn	1.0432	+73°25'46"	5,4 6,0	1.86	69.39	1.87	69.50
STF 948AC	Lyn	1.0432	+73°25'46"	5,4 6,0	8.71	309.50	8.68	308.65
STF 1291	Cnc	1.0645	+69°55'35"	6,1 6,4	1.47	309.44	1.47	312.30
STF 1333	Lyn	1.0545	+71°27'39"	6,6 6,7	1.81	54.10	1.88	50.05
STF 1523	UMa	1.3100	+49°42'01"	4,3 4,8			1.58	216.63
Couples difficiles								
STF 228		1.0086	+82°30'16"	6,6 7,1	0.86	289.67	0.83	293.28
STT 20	Psc	1.1472	+60°36'38"	6,2 6,9			0.57	187.21
STT38BC	And	1.0000	+89°18'11"	5,5 6,3			0.17	183.12
STT38A-BC	And	1.0000	+89°18'11"	5,5 6,3			9.43	63.02
BU 4	Psc	1.2219	+54°52'25	7,4 8,0	0.51	-10.56	0.50	118.18
STF 511	Cam	1.0618	+70°19'17	7,5 7,9	0.48	-25.89	0.51	80.55
BU 720	Peg	1.0837	+67°17'56	6,0 6,0			0.54	100.45

WDS NOM usuel	Const	Airmass	Hauteur	Magnit. (WDS)	Mesure directe		Cross-correlation	
Couples délaissés					**Epsilon (")**	**Moyenne Théta**	**Epsilon (")**	**Moyenne Théta**
AC 1	And	1.0469	+72°45'29	7,3 8,3	1.57	216.39	1.84	288.14
STF 59	Cas	1.0895	+66°34'41	7,2 8,1	2.26	112.62	2.26	147.90
STF 113A-BC	Cet	1.5455	+40°14'10	6,5 7,0	1.57	35.75	1.65	19.05
STF113 BC	Cet	1.5455	+40°14'10	6,5 7,0			<0.16	
STF 138	Psc	1.3169	+49°20'48''	7,5 7,6	1.77	58.97	1.71	57.14
STF 147	Cet	1.9197	+31°16'48''	6,2 7,3			0.25	191.45
STF 162 AA	Per	1.0529	+71°43'53	6,5 7,2			<0.16	
STF 162 AB	Per	1.0529	+71°43'53	6,5 7,2	1.90	199.15	1.91	199.36
STF 162 AC	Per	1.0529	+71°43'53	6,5 7,2	20.10	179.51	20.42	178.01
STF 186	Cet	1.4952	+41°53'59''	6,8 6,8	0.78	68.03	0.80	65.35
STF 269	Tri	1.1017	+65°09'28''	7,6 9,0	0.51	21.07	1.64	344.70
STF 285	Tri	1.0848	+67°09'31''	7,5 8,1	1.65	162.23	1.71	162.17
HU 544	Per	1.0377	+74°28'20''	6,7 8,2	1.57	100.01	1.60	102.24
STF 400	Cam	1.0635	+70°04'33''	6,8 8,0	1.50	267.81	1.56	266.74
STF 425	Per	1.0442	+73°14'58''	7,5 7,6	1.95	61.84	1.93	62.02
STF 521	Per	1.0208	+78°23'55''	7,4 9,2	2.00	257.10	1.98	258.73
STF 644	Aur	1.0052	+84°06'42''	6,8 7,0	1.58	223.31	1.63	221.42
STF 652	Ori	1.3945	+45°44'42''	6,3 7,4			1.64	180.03
STF 734	Ori	1.4409	+43°52'27''	6,7 8,2	1.51	11.16	1.65	357.30
STF 3050	And	1.0298	+76°08'53''	6,5 6,7	2.17	335.95	2.25	335.36
Couples liste supplémentaires								
STF 2878	Peg	1.3484	+47°48'24''	6,9			1.44	120.05
STF 2909	Aqr	1.5162	+41°11'02''	4,3	2.03	168.17	2.08	169.82
STF 2950	Cep	1.0876	+66°49'05''	6,0			1.25	279.53
STT 12	Cas	1.0321	+75°39'16''	5,5			0.28	208.25
STT 515	And	1.0121	+81°01'46''	4,5			0.51	121.14
STF 346	Ari	1.0689	+69°16'39''	6,2	0.405	249.811	0.404	242.48
HDS473	Per	1.0314	+75°48'18''	3,03			<0.16	
HU304	Tau	1.3015	+50°08'46''	5,8			0.28	13.14

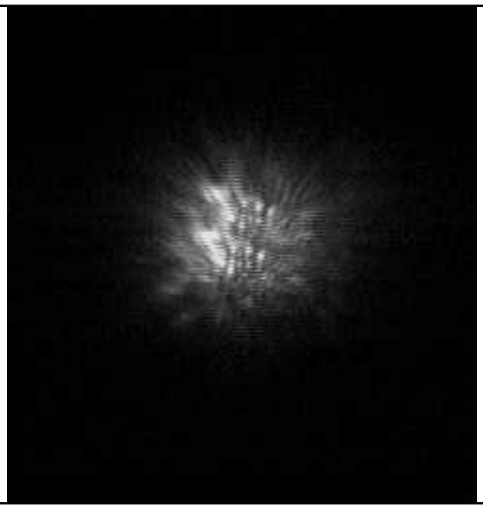
Discussion sur les mesures :

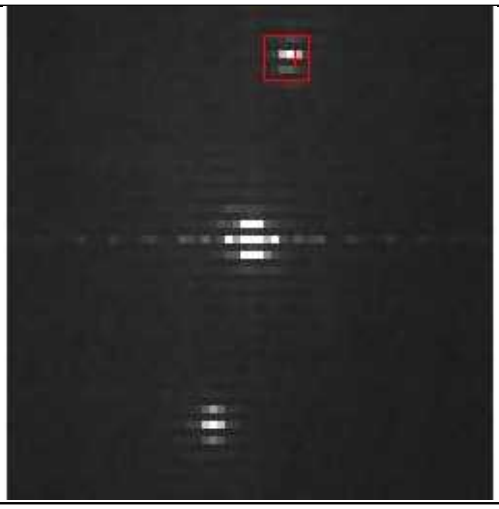
Nous allons présenter ici 3 mesures complètes. Chaque vidéo acquise a fait l'objet d'un certain nombre d'opérations : Dans un premier temps, la vidéo à été convertie à l'aide du logiciel Iris en images format Fits susceptibles d'être utilisées. Une sélection par « bestof » à été opérée afin d'extraire les meilleures images de la séquence. Puis nous avons utilisé sur l'ensemble de la séquence, le générateur de script (fichier exel) que nous avons cité dans le premier compte rendu. Ce fichier permet de générer un script de calcul de la somme des intercorrelation entre l'image et son carré (cross-correlation), exécutable sous Iris (ce fichier est disponible sur demande en m'envoyant un mail à l'adresse (btregon@club-internet.fr).
Le résultat de ce calcul sert de base à la lecture des paramètres de position de l'étoile double.
Nous présentons ici l'analyse faite sur STF2909AB, que nous avions déjà étudié lors de la mission précédente

WDS NOM usuel	Const	Date	Date normalisée	Airmass	Hauteur	Asc.dr. 2000 (h min)	Dcl. 2000 (° min)
STF2909AB	Aqr	19/11/2008 03h34 local	2008.888	1.5162	+41°11'02"	22 28 49	- 00 01 13



Sélection d'images brutes





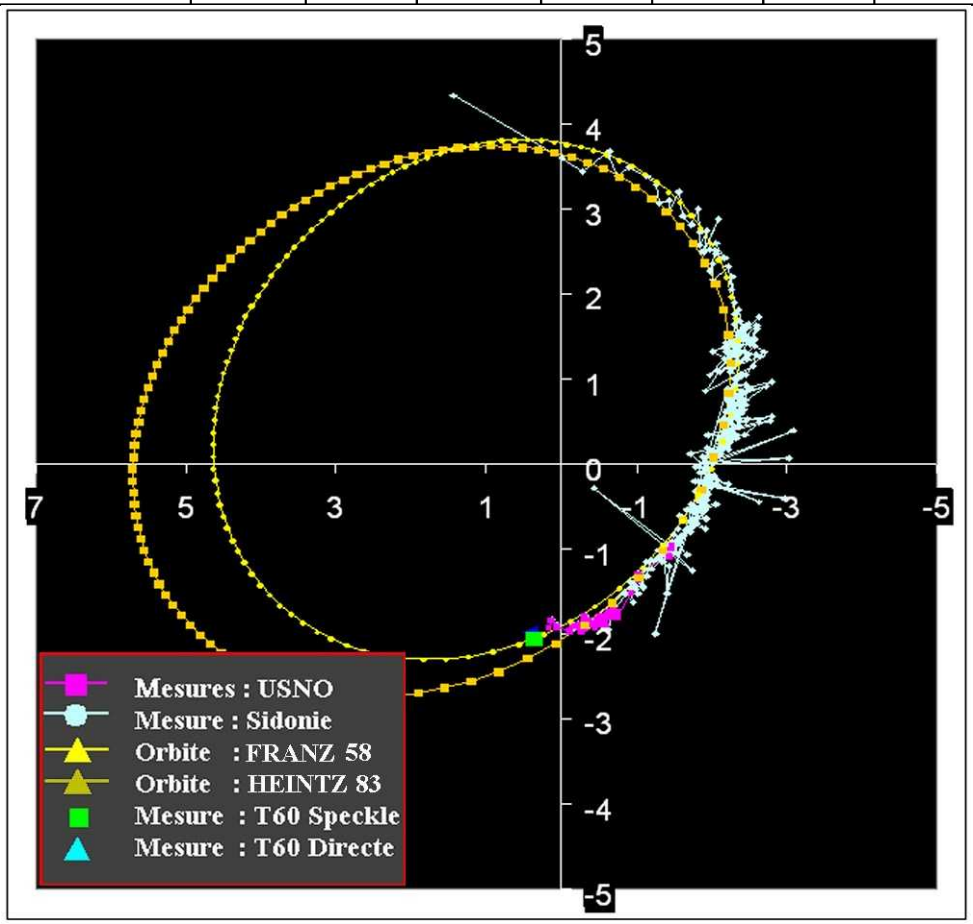
Meilleure image de la séquence obtenue par « Best of » sous Iris		Cross corrélation sur une séquence de 600 images (agrandissement)	
Rho = 2.025	Theta = 168.171	Rho = 2.077	Thêta = 169.819
(''')	(°)	(''')	(°)
Mesure image Seule		Mesure cross corrélation 600 im	

L'extraction de Rho et Théta se fait d'abord par mesure directe (quand cela est possible), sur la meilleure image de la séquence. On extrait bêta et par les paramètres de calibration vus plus haut, on remonte à l'écartement et l'angle de position. Nous verrons plus loin que la présence des speckles rend parfois cette opération impossible. Dans un deuxième temps, on procède à l'analyse de l'image de cross corrélation en mesurant la position des 2 pics (correspondant au maximum de cohérence du couple dans la séquence vidéo, nous verrons cela plus bas). Une fois mesurés les 2 pics, nous faisons la moyenne des écartements et des angles de positions. Afin de comparer la validité des nos mesures avec la littérature, nous avons ensuite procédé sur chaque couple au récapitulatif suivant :
Récupération des mesures disponibles sur le couple via différentes sources (USNO, Observatoire de Nice « Sidonie http://sidonie.obs-nice.fr/scripts/SidonieAccueilF.asp.»)

- Récupération des paramètres d'orbites officiellement publiés (même source)
- Simulation et ajout sur le même graphe des mesures obtenues

L'ensemble des simulations ont été réalisées à l'aide du fichier Exel de calcul des orbites, disponible sur le site de A. et S. Rondi : (http://www.astrosurf.com/rondi/t60/crabe-tambour/speckle.htm)
Les éléments orbitaux utilisés sont les éléments dynamiques et les éléments de Campbell. :

Auteur	P	n	T	a	e	i	o	w
FRANZ 1958	600	0.6	1972.75	4.013	0.45	137	124.37	253.62
HEINTZ 1983	760	0.4737	1968	4.507	0.5	135.87	124.64	63.42



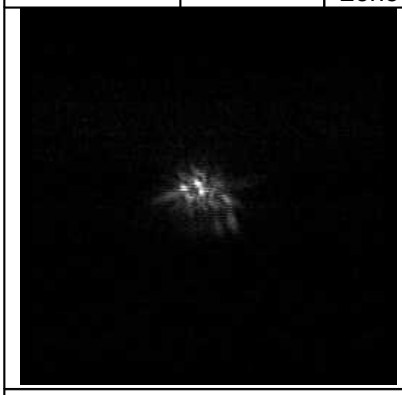
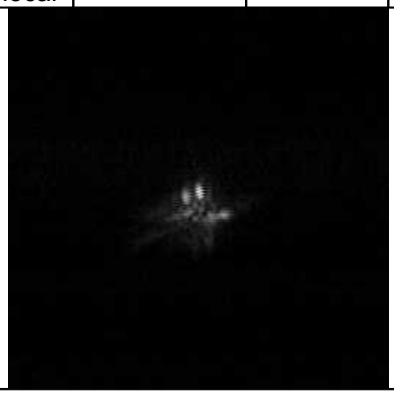
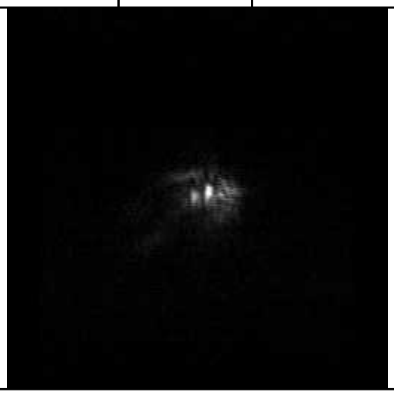
Nord en haut

STF 2909 AB

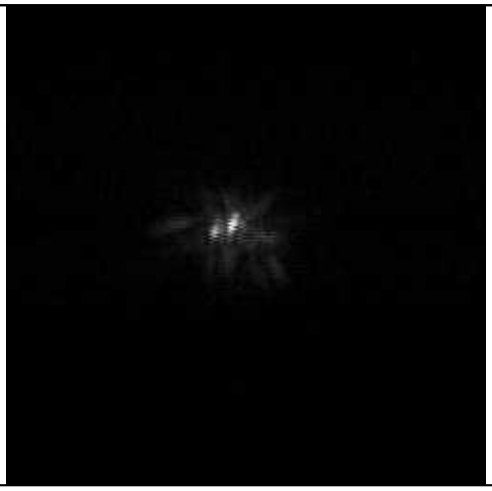
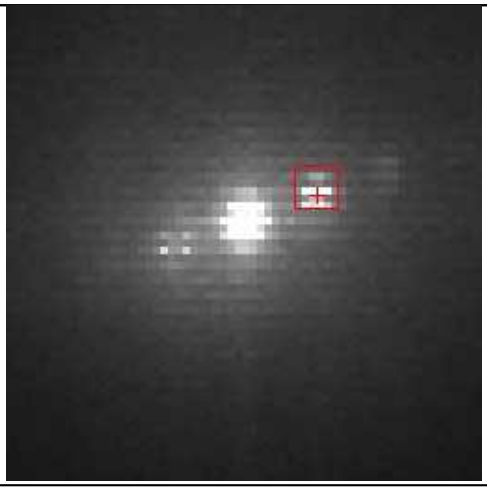
Tous les couples étudiés ont fait l'objet de ce traitement. Seulement 18 étoiles sur les 44 disposent d'une orbite déterminée.

Nous prendrons à titre d'exemple pour illustrer la corrélation avec les mesures officielles le cas de l'étoile STF228 :

WDS NOM usuel	Const	Date	Date normalisée	Airmass	Hauteur	Asc.dr. 2000 (h min)	Dcl. 2000 (° min)
STF228	And	17/11/2008 23h58 local	2008.888	1.0086	+82°30'16"	02 14 02	+47 29 03

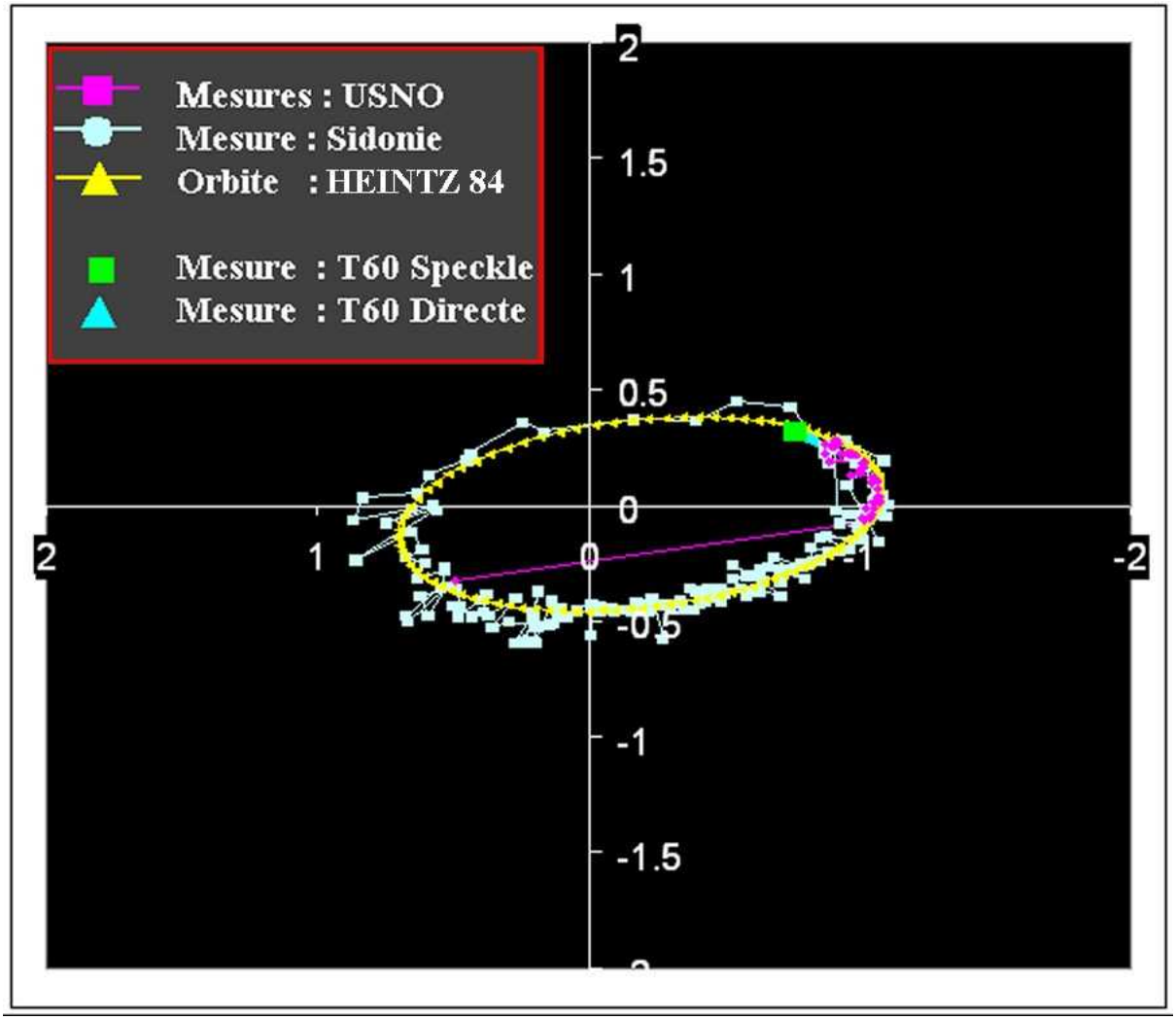
Sélection d'images brutes

Meilleure image de la séquence obtenue par « Best of » sous Iris		Cross corrélation sur une séquence de 1200 images (agrandissement)	
Rho = 0.862	Theta = 289.66	Rho = **0.828**	Thêta = **293.27**
(’’)	(°)	(’’)	(°)
Mesure image Seule		Mesure cross corrélation 600 im	

Mesure officielle la plus récente (source : Sidonie & USNO)		
Date	Théta	Rho
2004.972	286.8	0.915

Orbite disponible	P	n	T	a	e	i	o	w
Heintz 1983	143.6	2.507	1898.8	0.253	0.908	63	99.2	321.6



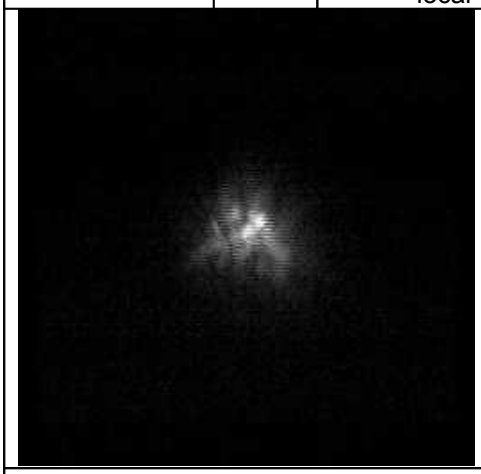
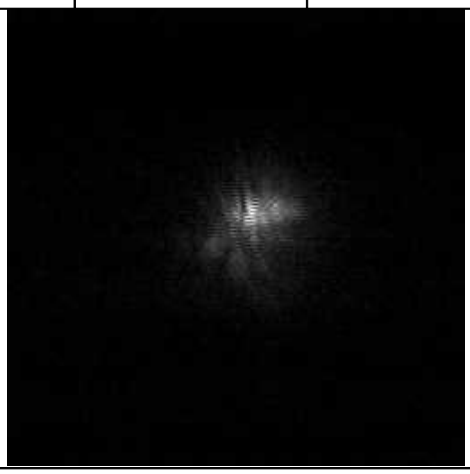
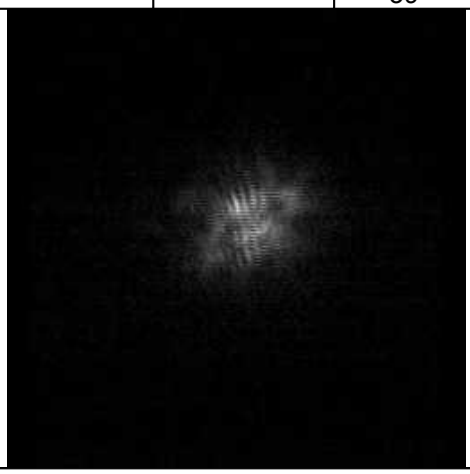
Nord en haut

STF228

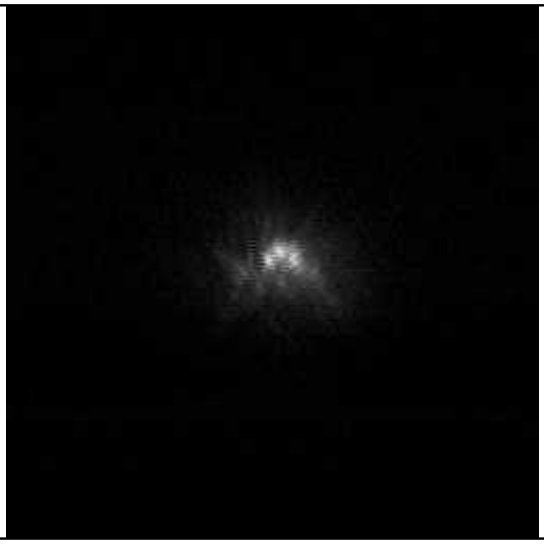
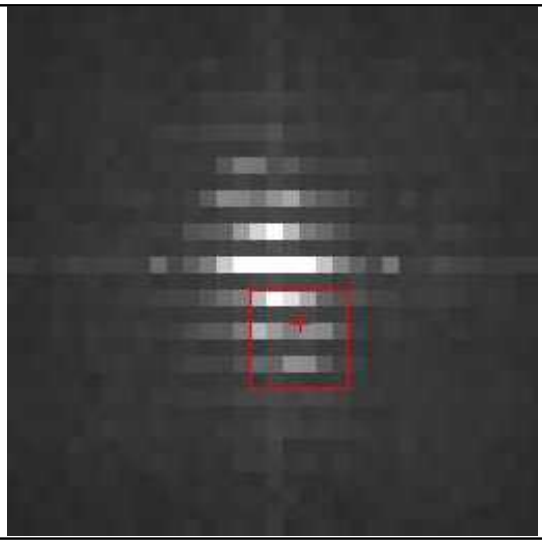
Nous pouvons voir ici que les mesures sont particulièrement bien corrélées avec la liste des mesures officielles. Un premier constat est, par contre, que les pics de cross corrélation sont souvent étalés pour les étoiles dont la séparation est inférieure à une seconde. Cet étalement peut être interprété comme une distorsion locale due à la turbulence durant le temps d'acquisition de la vidéo. Nous discuteront ce point plus loin.
Nous pouvons poursuivre avec l'analyse que l'on peut considérer comme limite, d'une étoile de séparation inférieure à 0.5''.

Exemple d'un systèmes serré :

WDS NOM usuel	Const	Date	Date normalisée	Airmass	Hauteur	Asc.dr. 2000 (h min)	Dcl. 2000 (° min)
HU304	Tau	19/11/2008 23h47 local	2008.888	1.3015	+50°08'46''	04 23 51	+09 27 39

Sélection d'images brutes

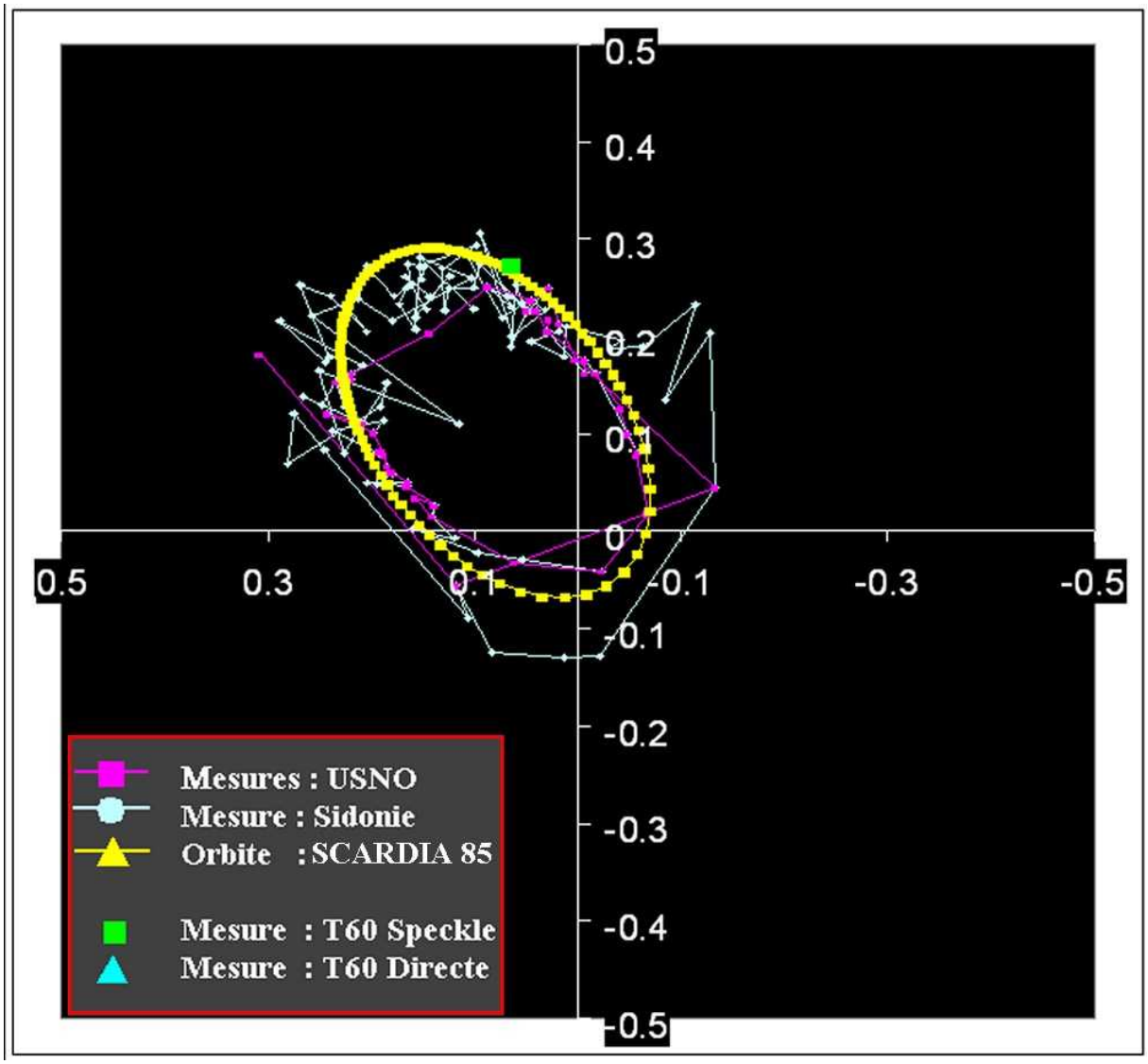



Meilleure image de la séquence obtenue par « Best of » sous Iris		Cross corrélation sur une séquence de 1200 images (agrandissement)	
Rho = S/O	Theta = S/O	Rho = **0.282**	Thêta = **13.14**
(''')	(°)	(''')	(°)
Mesure image Seule		Mesure cross corrélation 600 im	

HU304 est un cas limite, l'obtention de la position des pics de maximum de cohérence est obtenue par calcul du centre de gravité des pixels hors axe, dans une fenêtre symétrique de part et d'autre de l'origine, entourant la position estimée du pic de cohérence. L'incertitude est donc très importante sur l'angle thêta.

Mesure officielle la plus récente (source : Sidonie & USNO)		
Date	Théta	Rho
2005.103	12.6	0.232

Orbites disponibles	P	n	T	a	e	i	o	w
SCARDIA 85	54.525	6.60251	1937.402	0.2	0.6882	32.44	26.41	190.65



Nord en haut - Mesure directe non disponible

HU304

Nous voyons ici que malgré la dispersion (l'étalement) de la cross corrélation, les mesures sont en accord avec les orbites prédites, à la condition toutefois de faire une analyse correcte de la géométrie de l'étalement des pics.
Nous verrons cela plus loin.

Discussion sur la méthode d'extraction :

Plusieurs solutions dans l'analyse des pics se présentent : soit une analyse que l'on pourrait qualifier de statistique (qui consiste à considérer que la somme des corrélations nous donne accès à la position réelle du couple, via sa probabilité temporelle d'apparition dans l'image), soit une analyse purement géométrique, consistant à considérer la position du centre des pics, en analysant la dispersion (hors des intensités intrinsèque des pixels du pic de corrélation).

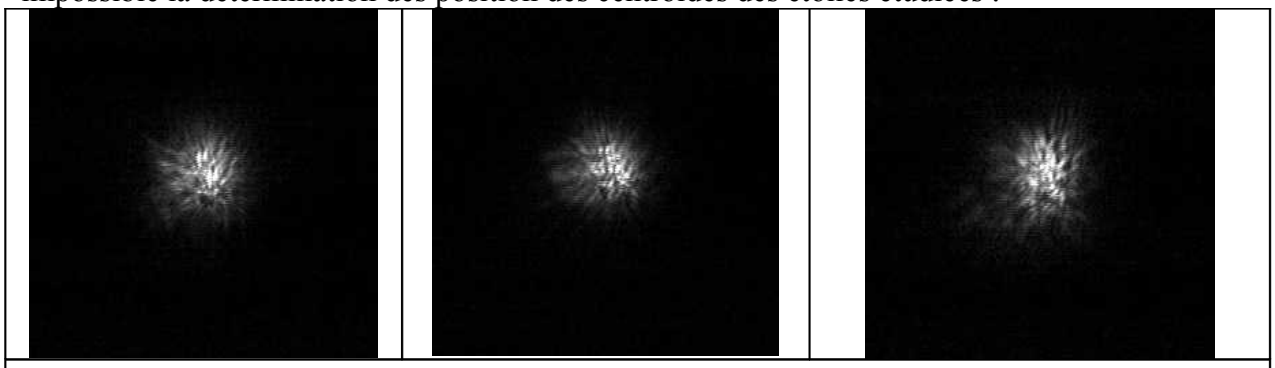
N'étant pas encore suffisamment au fait de ces techniques, j'ai intuitivement choisi d'utiliser la première analyse, à savoir la détermination de la position du pic par interpolation avec une fonction gaussienne, et si l'algorithme ne convergeait pas, via la détermination du centre de gravité du pic de corrélation.

L'étalement du pic à empêché dans certain cas (pour les étoiles très rapprochées, typiquement moins de 0.2''), d'établir une mesure sans ambiguïté. Ce fut le cas pour 4 étoiles sur les 44 observées.

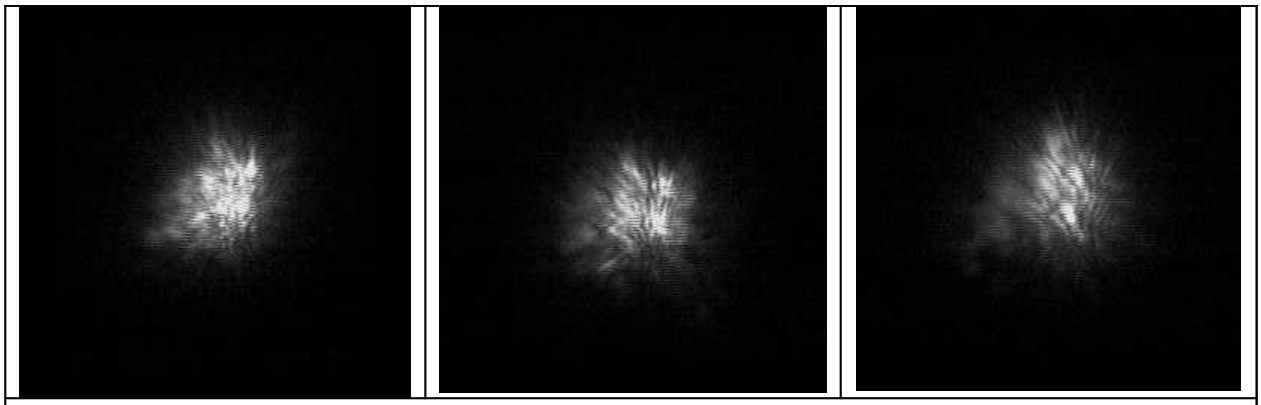
Dans les cas où le rapport signal sur bruit était insuffisant sur la mesure de la corrélation, il a été nécessaire de travailler sur un nombre plus important d'images (jusqu'à 1800, soit 3 séquences de 600 images). Ceci s'interprète à la fois comme conséquence de la limite sur la magnitude, mais plus particulièrement par une décohérence prononcée due à une forte turbulence atmosphérique locale.

Si nous faisons une comparaison brute de la méthode de lecture directe de la position, par rapport à une approche par étude de la corrélation, nous pouvons dégager un avantage certain en faveur de cette dernière méthode. En effet, la totalité des mesures a pût être effectuée par l'analyse de la corrélation, alors que les vidéo comportant un grand nombre de speckles qui n'ont put être dissociées, ont empêché la mesure directe (17 étoiles non mesurées par lecture directe).

Nous pouvons voir sur l'exemple de STF333AB et STF2909 que les speckles rendent impossible la détermination des position des centroïdes des étoiles étudiées :

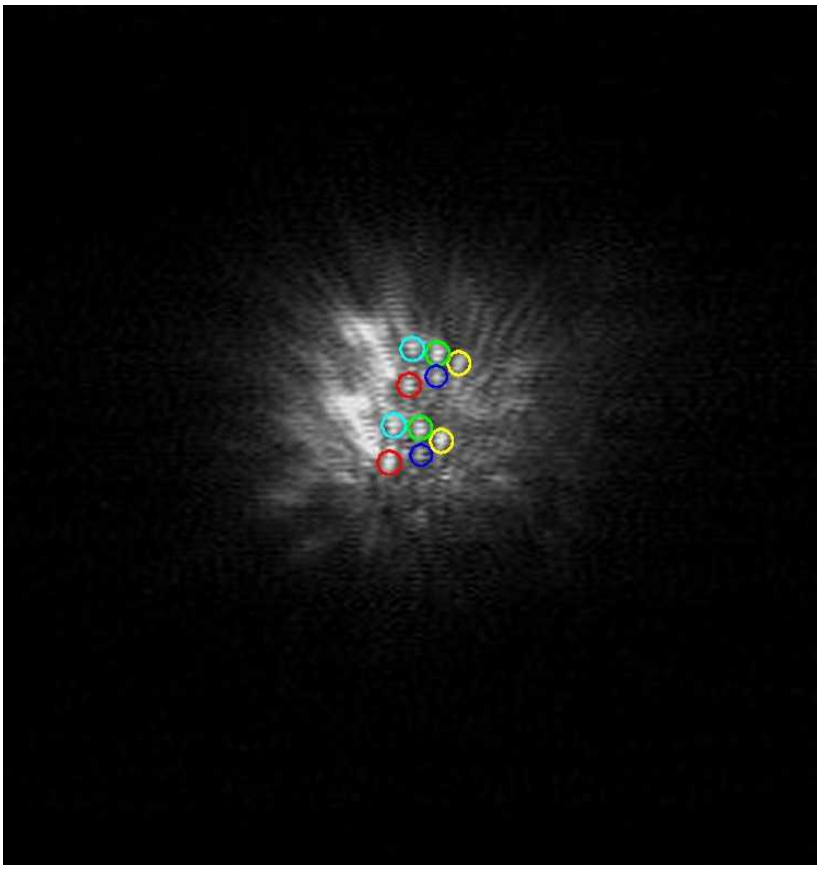


STF333AB

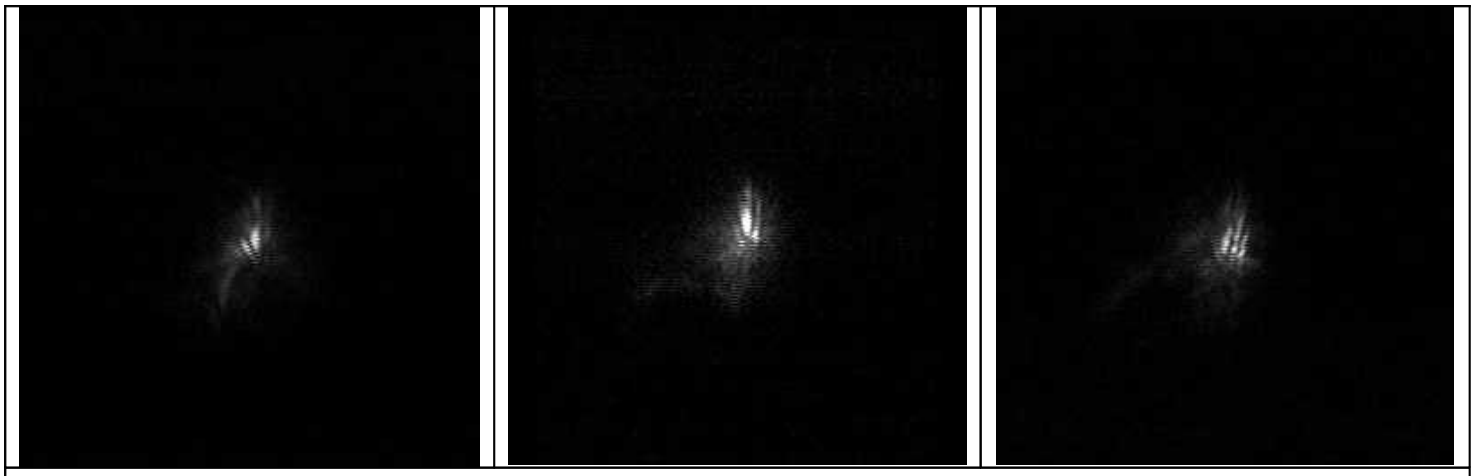


STF2909AB

La cross corrélation permet d'étudier en particulier la présence des similitudes correspondant à l'image du couple hors turbulence, reproduite un certain nombre de fois sur la même image par la distorsion de la turbulence:



Les cercles de couleurs identiques reproduisent l'image unique du couple, que la turbulence, agissant comme un système de déformation optique, reproduit en plusieurs exemplaires.
Ce phénomène induit en particulier une incertitude notable sur l'écartement, mais aussi sur les angles que l'on mesure sur un image unique. Prenons le cas de STF 652 pour laquelle la turbulence provoque un phénomène d'interférence locale, rendant impossible une analyse de position cohérente d'une image sur l'autre :



STF652

Conclusion de la partie interférométrie :

La météo au cours de cette mission nous a permis de travailler sur un total de 47 étoiles. 3 étoiles de la sélection de départ on été rejetées pour des raisons de hauteur sur l'horizon, qui après examen des positions semblaient hors des conditions de mesures définies dans le livre de Paul Couteau. Au total 44 étoiles se sont avérées vraiment exploitables. Un constat personnel sur la méthode de dépouillement actuellement utilisée : autant l'acquisition est rapide (dans une prochaine mission, avec des conditions de météo favorables, il peut être envisageable facilement de doubler voire tripler le nombre d'étoiles étudiées), autant le traitement actuel est long et fastidieux (près de 2 mois pour compléter le dépouillement).

Un autre point à approfondir, est celui de l'utilisation pour la détermination de la position du pic de maximum de corrélation, d'une procédure de type « fit gaussien ». D'autres méthodes seraient peut-être plus adaptées et plus précises pour la mesure de cette position.

Au rang des perspectives à envisager, il serait peut-être intéressant de coupler l'analyse interférométrique à une analyse spectrale, afin de compléter l'étude d'une étoile double serrée sur 3 dimensions. Je ne désespère pas avoir un jour le temps de me mettre à la spectro…..

Une question que l'on peut aussi se poser est, jusqu'a quel écartement limite peut-on descendre en utilisant cette méthode ? On peut intuitivement penser atteindre le seuil de séparation théorique du T60 (ce qui à 0.55microns de longueurs d'onde est de 0.23 secondes), mais certaines mesures semble montrer que l'ont peut descendre encore au dessous en augmentant l'échantillonnage.

Une mission ultérieure nous le dira peut être.

Partie 2 : Astrométrie sur TNO (Varuna) (Nuits 4 & 5)

La deuxième nuit ayant été marquée par la neige, il a fallu attendre la troisième nuit pour compléter le programme intérféro, et pour passer a notre deuxième sujet d'étude : l'astéroïde 20000 Varuna. Cet astéroïde appartient à la famille des TNO (Trans Neptunian Orbiter).

Le sujet de cette étude est issu d'une discussion avec Eric Frappa au cours des rencontres du ciel et de l'espace de l'AFA à la Cité de la Villette en Novembre 2008. au cours de cette discussion, Eric me parle d'une occultation d'étoile par cet astéroïde, devant intervenir au cours de la nuit du 7 décembre entre 2h06 et 2h17 TU.

Le problème de cet astéroïde est que comme la plupart des TNO, ses caractéristiques physiques (tant orbitales que constitutives) sont extrêmement mal connues. Autrement dit il s'agissait de faire des images du champs contenant l'étoiles et l'astéroïde pour affiner la trajectoire, ainsi que la position exacte de l'étoile potentiellement occultée, en profitant du champs très important du télescope et de la caméra (44'x29').

La première contrainte, est la magnitude de l'astéroïde, frôlant la magnitude 20. Obtenir l'astéroïde sur l'image, avec un temps d'exposition assez court (3minutes) pour ne pas voir le déplacement de l'astéroïde sur le T60 relevait donc d'un défit particulièrement intéressant.

L'extrait du mail suivant, que m'a adressé Eric Frappa, au cours de la deuxième nuit retrace le besoin des astronomes pour affiner la prédiction :

« J'ai déjà exposé à Bernard ce qu'on voulait, à savoir des images avec dans le même champ (20000) Varuna et UCAC2 40846256 pour faire de l'astrométrie. Il faut poser suffisamment pour voir (20000) qui est vers la magnitude 20. L'étoile est de magnitude ~14.7. »

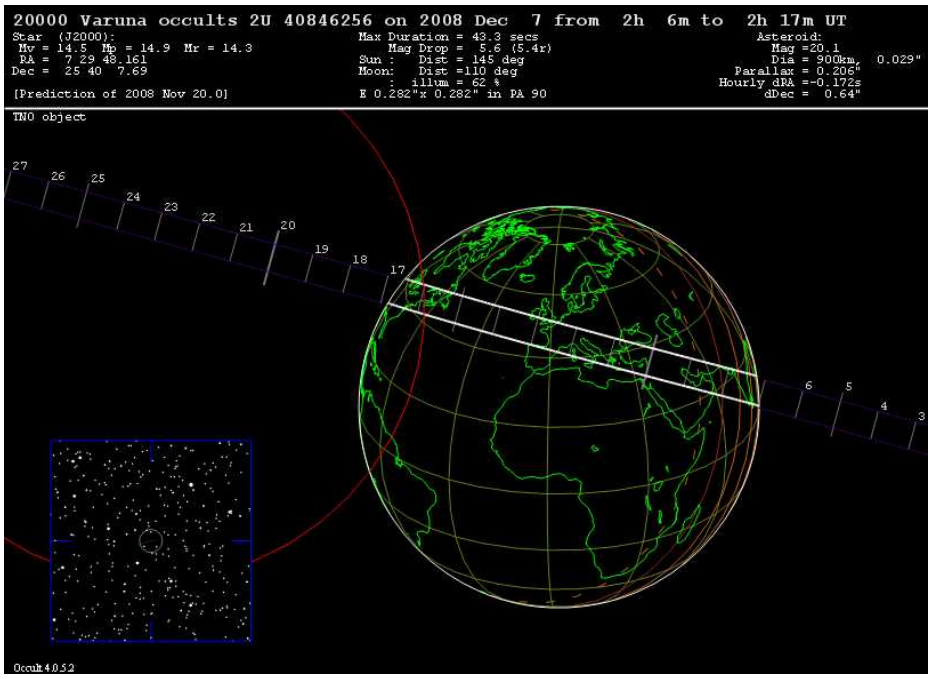
La discussion s'est alors engagée avec Raoul Behrend, astronome professionnel à l'observatoire de Genève, et qui a pris ensuite en charge le dépouillement des images que nous avons acquise. Ses directives étaient les suivantes :

« Pour le T60 et sa courbure de champ telle que je peux la voir sur les images de Denis Marchais, 15' c'est beaucoup trop. Il faudrait des images centrées sur chacune des cibles en bougeant "dans tous les sens" de 2-3' (histoire de bien mesurer la courbure du champ). C'est-à-dire au nord, au sud, à l'est et à l'ouest plus bien centré. Disons 10 images en tout par cible devraient aller. Ne pas faire les poses trop longues, pour ne saturer aucune des étoiles sur au moins 3-4 champs. Les autres champs peuvent être plus profonds. Pour Varuna: pareil. Quelques images sans saturation des étoiles (pour faire le catalogue local), puis faire les poses plus longues. A mon avis, une dizaine de poses de 3 minutes devraient aller. Filtre R pour toutes les images, et deux trois en V. »

La météo ne nous ayant pas permis d'obtenir suffisamment d'images au cours de la deuxième nuit (une seule image), il nous a fallut attendre la nuit suivante pour avoir une série exploitable. Ce sera d'ailleurs la seule, la météo ayant décidé de tourner a la tempête sur la fin de semaine.

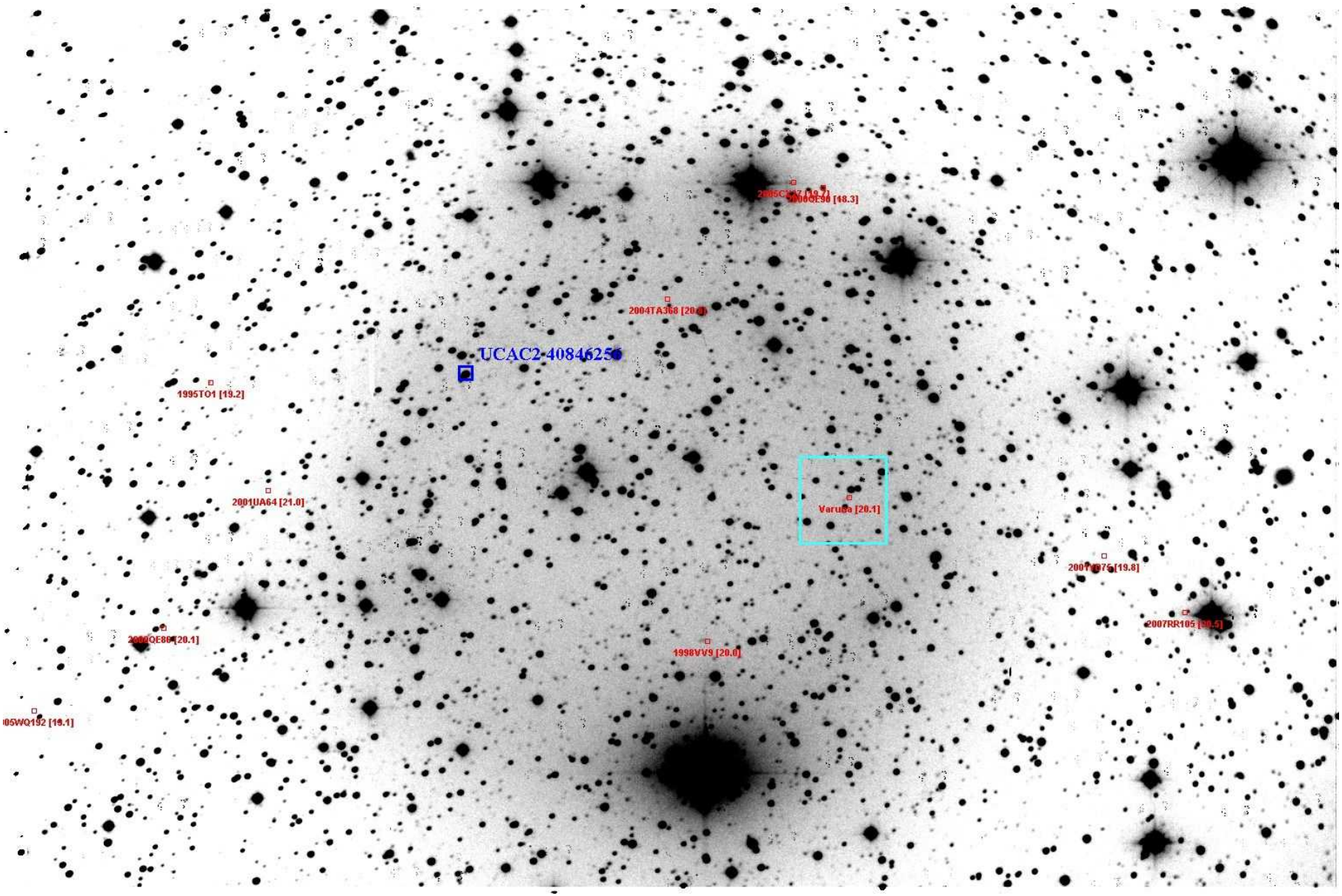
Ce fut au cours de cette deuxième nuit que nous nous sommes aperçus que ce modeste travail était inclus dans un véritable travail de recherche professionnel international comprenant des astronomes des 4 coins du monde (Suisse, Allemagne, Brésil, Australie, Italie, France).

La première prédiction établie sur une série d'image d'une qualité malheureusement médiocre a cause de la proximité de la lune et du brouillard, à tout de même permis a Dave Herald de Canberra (Australie), d'affiner la position de l'étoile et de faire une réactualisation de la prédiction en date du 20 Novembre :



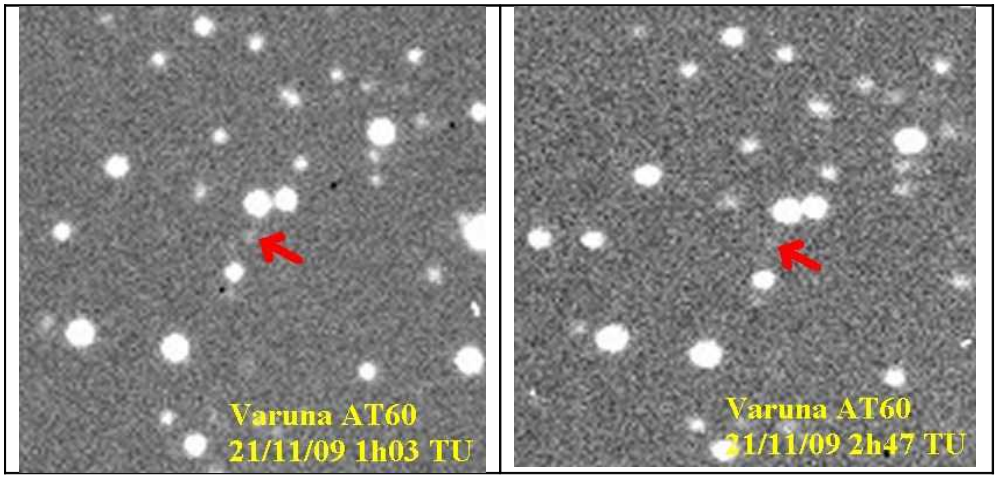
La deuxième nuit de travail sur cet objet nous à permis d'acquérir 2 séquences grand champs de l'astéroïde et de l'étoile. Pour la trajectoire de l'astéroïde, nous avons eu la chance d'avoir François Colas utilisant le T1M du pic en même temps que nous faisions les images grand champs (ce dernier en a d'ailleurs profiter pour tirer de ces images de la nuit une courbe de lumière avec une amplitude de 0.4 magnitudes).

Toutes les conditions étaient donc réunies pour obtenir des données scientifiquement exploitables :


UCAC2-40846256
1995TO1 [19.2]
2001UA64 [21.0]
2000OE80 [20.1]
1998VV9 [20.0]
Varuna [20.1]
2007RR105 [20.5]

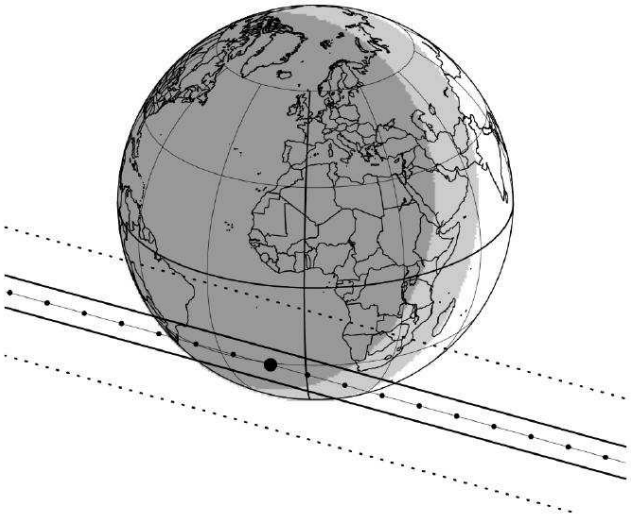
La série d'image dont nous présentons un extrait sur la page précédente a permis à Raoul Behrend d'établir le catalogue astrométrique des étoiles du champ, avec une précision suffisante pour réduire l'incertitude sur la prédiction d'occultation.

Dans un deuxième temps, et en complément de la série d'image de François Colas, la trajectoire de Varuna a pût être affinée par le déplacement de l'astéroïde sur le champ d'étoile :



Plusieurs professionnels se sont penchés sur les images du T1M et du T60 (Marcelo Assafin –Brésil-, Jan Manek,-Tchéquie- , Steve Preston –USA-, Bruno Sicardy Jean Lecacheux –France-, Raoul Behrend –Suisse-) , et des observations complémentaires (Bernard Christophe –France-, Marcello Assafin –Italie-) ont permis d'affiner la prédiction, dont nous présentons ici la résultat de Bruno Sicardy en date du 27 novembre, basé sur les extractions de Raoul Berhend :

Varuna, star pos. Raoul Behrend Offset (mas): 23.0 −185.0



d	m	year	h:m:s UT	ra___dec___J2000_candidate	C/A	P/A	vel	Delta	R*	K*	lon
07	12	2008	02 12 0.	07 29 48.1720 25 40 7.748	0.176	195.47	−20.77	42.63	14.7	14.5	3.

L'extrait du mail de Marcello Assafin le 25/11/08 à 4h15 résume à lui seul le travail effectué :

« Here it follows the astrometry made by the Rio group performed with the PRAIA package over the images kindly furnished by Francois Colas (1m) and by Bernard Tregon (T60) taken at Pic du Midi. Many thanks to Francois, Bernard and Eric Frappa! And to Raoul Behrend for the useful advices on the observations!
There were 18 useful Varuna observations from the 1m telescope. Typically 5 good UCAC2 stars were available in the 4'x5' field. Varuna magnitude was roughly 20.4 (Colas has sent a plot of the light curve of Varuna with a 0.4 magnitude variation). From the T60 (D=60cm) telescope, a good coverage of the region was possible (field of 44.5'x 29.7') including the candidate star. The astrometry of the 10 fields was successful using a polynomial of third degree in the reductions, where usually more then 250 good UCAC2 stars were present."

Autrement dit le T60 doté de sont équipement actuel est à niveau pour permettre une collaboration fructueuse entre les astronomes professionnels et les amateurs dans le domaine de l'astrométrie de précision, et ce grâce à la possibilité d'acquérir des images a grand champs.
Le résultat final à montré l'extrême difficulté de la prévision des occultations, car un décalage de quelques milliarcsecondes sur la position de l'étoile ou sur la trajectoire prévue de l'astéroïde provoque un décalage de plusieurs centaines voire milliers de kilomètres de la bande de centralité de l'occultation initialement prévue. Ce fut le cas ici, et l'observation de l'occultation s'est révélée effectivement négative pour les observateurs mobilisés le 7 décembre.
De nouvelles prédictions sur des occultations d'étoiles par des TNO seront à l'avenir nécessaire pour affiner la connaissance des ces objets encore mystérieux. En effet, leurs caractéristiques physiques sont mal connues (diamètre, atmosphère, …). Des missions ultérieures pourront peut être amener à de nouvelles collaborations sur le sujet.

Conclusion sur la partie astrométrie :

Ce fut une partie de la mission non prévue au départ, mais qui fût extrêmement gratifiante !! Martine et moi avons eu la joie et l'honneur de participer « pour de bon » à une collaboration professionnelle/amateur sur un sujet brûlant. Cela montre que ce type de contribution pourrait permettre d'entamer une collaboration officielle entre l'AT60 et la communauté des professionnels sur ce type d'évènement.

Compte rendu de mission : B. TREGON