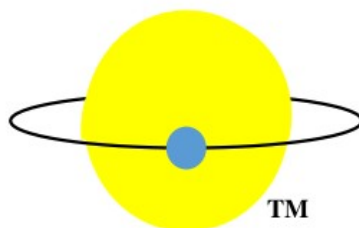


Guide pratique d'observation d'exoplanète

Revision 2.2
December 2016



by

Dennis M. Conti

(traduction française Robert MORELLI Juillet 2017)

dennis@astrodennis.com
www.astrodennis.com

Table des matières

I. Introduction.....	3
II. Historique.....	3
III. Observation des exoplanètes.....	4
IV. Les bonnes pratiques.....	5
V. Phase de Préparation.....	6
A. Collecte des informations.....	6
B. Considérations sur la sélection d'une exoplanète cible.....	6
C. Prédictions de retournement au méridien.....	7
D. Choix du temps d'exposition.....	7
E. Répertoires fichiers.....	7
F. Stabilisation du système d'imagerie à la bonne température.....	7
G. Génération de Flat.....	8
H. Autoguidage.....	8
VI. Phase de capture des images.....	8
VII. Phase de Calibration, Photométrie, Traçage, et Modélisation.....	9
A. Calibration des images brutes (Science Images).....	9
B. Construire la pile d'images.....	12
C. Réaliser une photométrie différentielle.....	15
2. Préparez vous et commencez la photométrie différentielle.....	16
3. Traiter des images mal alignées ou un retournement au méridien.....	18
.....	19
D. Préparation de l'ajustement du modèle.....	20
E. Confectionner le modèle.....	21
G. Traçage de la courbe de lumière.....	22
H. Sauvegarde des données du modèle.....	30
I. Optimisation du modèle.....	31
VIII. Données pour programme externe.....	32
IX. Résumé.....	33
Remerciements.....	33
Appendix A:.....	34
Observation Worksheet.....	34

I.Introduction

Ceci est un guide pas à pas pour l'observation d'exoplanètes à la fois pour le débutant et pour l'observateur expérimenté. Pour le premier, il est souhaitable d'avoir une expérience en ciel profond ou d'imagerie d'étoiles variables. Pour le second pourra trouver ce guide très utile comme un rappel sur les bonnes pratiques, et comme un guide pour l'utilisation d'AstroImageJ (AIJ) pour le traitement des images et la modélisation de transit d'exoplanètes. AIJ est un logiciel libre qui est un intégré pour la calibration des images, la photométrie différentielle et la modélisation d'exoplanètes.

Ce guide vous conduira à travers toutes les phases de l'observation d'exoplanètes, à la sélection de cibles adéquates pour modéliser les transits. Les transits d'exoplanètes connus sont utilisés pour démontrer les techniques et les capacités d'AIJ dans la modélisation de transit exoplanétaire.

Liens pour la dernière version de ce guide et le matériel qui l'accompagne <http://astrodennis.com>.

Lien vers la dernière version d'AIJ, son guide utilisateur et son forum: <http://www.astro.louisville.edu/software/astroimagej/>.

II. Historique

En 1995, Pegase b a été la première exoplanète détectée autour d'une étoile de la séquence principale.. A ce jour, plus de 3 200 exoplanètes ont été confirmées par le satellite Kepler ou des observations au sol.

Les astronomes amateurs ont détecté avec succès des exoplanètes depuis au moins une dizaine d'année et avec une précision incroyable ! De plus, ils ont été capables de faire de telles observations avec le même équipement qu'ils emploient pour créer les fabuleuses images du ciel profond ou les courbes de lumières d'étoiles variables.

De nombreux exemples existent d'astronomes amateurs qui fournissent des données importantes dans la recherche d'exoplanètes. En 2004, une équipe d'astronomes amateurs et professionnels ont collaboré au projet XO, qui a débouché sur la découverte de plusieurs exoplanètes. Le programme KELT (Kilodegree Extremely Little Telescope) utilise un réseau mondial d'astronomes amateurs et de collègues, avec des astronomes professionnels, pour conduire le suivi d'observations d'exoplanètes candidates en transit devant des étoiles brillantes.

Un réseau d'amateurs est actuellement en train d'appuyer la surveillance par Hubble de quelques 15 exoplanètes, par observations dans le visible, Hubble observant dans le proche infra-rouge. Ces observations d'astronomes amateurs aident à affiner les éphémérides d'exoplanètes confirmées. Le simple fait que des astronomes amateurs peuvent modéliser avec précision des transits d'exoplanètes confirmées, veut dire qu'il leur est possible théoriquement d'en découvrir ! Par exemple, en détectant des variations pendant la durée du transit (TTV transit time variation) d'un exoplanète confirmée, ils pourront détecter l'existence d'une autre exoplanète orbitant autour de l'étoile hôte.

La formalisation de bonnes pratique pour la détection d'exoplanètes par les astronomes amateurs a commencé en 2007 avec la publication de Bruce Gary "Observation d'exoplanètes pour amateurs". Au même moment Gary commença l'archivage d'observations d'exoplanètes d'autres amateurs. Cette archive, l'Archive d'Exoplanètes Amateurs (AXA), a été ensuite transférée vers le projet ETD (Exoplanet Transit Database), une archive en ligne sponsorisée par la société astronomique tchèque (<http://var2.astro.cz/ETD/contribution.php>).

III. Observation des exoplanètes

Le concept de base de l'observation d'exoplanètes implique une série d'images du champ entourant l'étoile hôte, avant, pendant et après le transit prévu de cette planète.

Les transits durent typiquement de 2 à 4 heures. Cependant il est souhaitable que la session d'imagerie commence 1 heure avant et finisse 1 heure après le transit. Donc la session peut durer de 4 à 6 heures.

Une technique appelée photométrie différentielle est utilisée pour déterminer les changements de brillance, de flux lumineux, de l'étoile hôte qui est susceptible d'indiquer qu'on est en présence d'un transit planétaire. Cette technique compare les différences relatives entre l'étoile hôte et une ou plusieurs étoiles de comparaison (en assumant que ce ne sont pas des étoiles variables) pendant la session d'imagerie. Puisque les différences de brillance de l'étoile hôte et des étoiles de comparaison (comps) sont également influencées par des facteurs communs (passage de nuages, lumière lunaire, pollution lumineuse,...), un changement dans ces différences serait alors une mesure d'un transit planétaire.

Afin de déterminer ces différences de brillance entre l'étoile hôte et les comps, l'utilisateur doit d'abord définir une "ouverture" et un "anneau" placés sur l'étoile hôte et les comps (voir figure 1). La brillance de la zone annulaire (mesure du fond du ciel) est ensuite soustraite de la brillance de la zone d'ouverture pour obtenir la valeur correcte de la brillance de chaque étoile. En même temps, chaque comp est comparé aux autres comps de manière à établir que l'on n'est pas en présence d'une étoile variable.

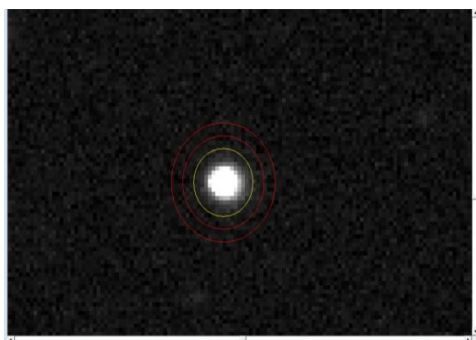


Figure 1. Ouverture (vert) et anneau (rouge)

Les points de données qui représentent les variations relatives de brillance de l'étoile hôte sont ensuite utilisés pour modéliser le transit exoplanétaire. Un modèle plus ajusté est alors créé à partir de ces points. Ce modèle ajusté résulte de l'estimation de paramètres clés de l'exoplanète et de son transit. Ces paramètres comprennent:

1. Le carré du rapport du rayon de l'exoplanète (R_p) à celui de son étoile (R^*),
2. le rapport de demi grand axe orbital de l'exoplanète (a) à R^* ,
3. Le point central de transit T_c et la durée du transit,
4. L'inclinaison de l'orbite de l'exoplanète par rapport à la ligne de visée de l'observateur.

Aussi, en connaissant le rayon R^* de l'étoile hôte, l'observateur peut réellement estimer le rayon de l'exoplanète, aussi bien que son demi grand axe.

IV. Les bonnes pratiques

Ce qui suit, sont plusieurs bonnes pratiques pour capturer un transit exoplanétaire qui devrait résulter dans une meilleure qualité des données collectées:

1. Echelle de l'image (en arc-secondes par pixel): L'échelle de l'image du système, en tenant compte du binning de la camera CCD, devrait être tel que le FWHM (Full Width at Half Maximum) de l'étoile hôte recouvre 3 pixels ou plus. Contrairement à l'imagerie du ciel profond où l'imageur est intéressé par des étoiles ponctuelles, l'observateur d'exoplanètes est plus intéressé par la collecte précise d'information sur le flux lumineux de l'étoile hôte et des comps. Si à cause du système d'imagerie, il n'est pas possible d'atteindre ce but, alors il est conseillé de défocaliser l'image de façon à ce que l'étoile couvre 3 pixels ou plus. La défocalisation accroît aussi les chances de trouver des étoiles de comparaisons convenables.

Une fonction d'étalement ponctuelle (PSF, Point Spread Function) résultant d'une défocalisation de 10-20 pixels est acceptable, sauf si le fond du ciel est important. Cependant on devrait porter attention à ce que la défocalisation pourrait un recouvrement de l'étoile hôte ou de l'une des comps.

2. Sélection des étoiles de comparaisons: Les étoiles comps utilisées devrait être aussi proche que possible en magnitude de l'étoile hôte. Idéalement l'ensemble des étoiles comps devrait être un mix d'étoiles dont la brillance est 0,5-1,5 fois celle de l'étoile hôte, ce qui se traduit par une magnitude 0,75 plus élevée à 0,44 moins élevée que l'étoile hôte. Aussi, parce que les transits complets auront lieu à différentes altitudes, la brillance des étoiles de différents type croîtra (décroîtra) selon que la masse d'air (AIRMASS) croîtra/décroîtra. C'est pourquoi il est préférable de choisir des étoiles comps d'un même type stellaire. Toutefois, comme AIJ est capable de corriger les effets de masse d'air, choisir des étoiles comps de brillance similaire à celle de l'étoile hôte est plus important que choisir des étoiles d'un même type stellaire. Par dessus tout, les étoiles comps ne devront pas inclure des étoiles variables. Une bonne source d'information à ce sujet est AAVSO's Variable Star Plotter utility (see <https://www.aavso.org/apps/vsp/>).

3. Flat: Quelque soit la méthode utilisé pour crée les images flat (panneau électroluminescent, crépuscule, dôme,...) le résultat devrait être un champ de lumière uniforme. C'est spécialement vrai dans le cas d'une monture équatoriale dont le retournement au méridien peut entraîner un déplacement de la cible sur le capteur CCD. (Note: le terme étoile cible dans ce guide veut dire étoile hôte de l'exoplanète). La section VI fournit la marche à suivre sur comment créer des images flat.

4. Autoguidage: Parce qu'il presque impossible de réaliser un flat qui corrige parfaitement pixel par pixel un système d'imagerie, il est impératif que l'observateur minimise les mouvements de l'hôte et des comps sur le capteur CCD. Ceci est réalisé en s'assurant d'un alignement polaire parfait et d'une erreur périodique minimale. Plus important encore, l'autoguidage est nécessaire pour assurer le meilleur suivi possible du champ imagé pendant toute la durée de capture.

5. Utilisation de filtre: Si les résultats participent à une collaboration amateurs/professionnels, un filtre photométrique spécifique sera très probablement requis.

6. Synchronisation temporelle: L'observateur devrait disposer de logiciel qui synchronise fréquemment l'horloge de l'ordinateur avec le serveur temporelle internet de l'observatoire de l'U.S Naval. Dimension 4 en est un exemple pour le système Windows (voir <http://www.thinkman.com/dimension4/>). La période de mise à jour devrait être d'au moins toutes les 2 heures.

7. Système temporelle: Comme il existe plusieurs systèmes temporels, l'observateur d'exoplanète devrait porter attention à celui utilisé pour les prédictions de transits, qui sera inscrit dans l'en-tête de l'image FITS et utilisé pour la modélisation de la courbe de lumière, etc. Les plus communément utilisés sont les suivants:

- a. Julian Date/Universal Coordinated Time (JD_UTC),
- b. Heliocentric Julian Date/Universal Coordinated Time (HJD_UTC),
- c. Barycentric Julian Date/Barycentric Dynamical Time (BJD_TDB).

En cas de collaboration amateur/professionnels, le système BJD_TDB devra être utilisé.

Ce guide est organisé selon les étapes chronologiques qu'un observateur d'exoplanètes devra suivre:

1. Phase de préparation
2. Phase de Capture d'Image
3. Calibration, Photométrie, phase de traçage et de modélisation.

V. Phase de Préparation

A. Collecte des informations

L'appendice A décrit une feuille Excel destinée à l'enregistrement de certaines informations critiques durant chaque phase et fournir une source d'information pour AJJ. Si aucun changement n'est fait concernant les instruments d'observations ou la localisation, les points 12-23 de l'appendice A peuvent servir pour plusieurs sessions d'observation. La dernière version de la feuille Excel peut être chargée depuis <http://www.astrodennis.com>. Les données décrites dans l'appendice A sont utilisées comme exemple dans ce guide, à savoir la modélisation d'un transit complet de l'exoplanète WASP-12b

B. Considérations sur la sélection d'une exoplanète cible

Les sources de prédictions d'exoplanètes pour une période donnée en un lieu d'observation donné sont les suivantes:

- NASA Exoplanet Archive: <http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/cgi-in/TransitView/nph-visibletbls?dataset=transits>
- Exoplanet Transit Database (ETD) Website: <http://var2.astro.cz/ETD/predictions.php>
- Extrasolar Planet Transit Finder: <http://jefflcoughlin.com/transit.html>.

Si l'observateur sélectionne sa propre cible (par exemple, une cible non spécifiée faisant partie d'une campagne de recherche particulière), alors les critères de sélection ci-après devront être pris en considération :

1. Heure de début de transit - comme la session doit démarre 1 heure avant le début du transit, cela peut éliminer des cibles potentielles.
2. Durée du transit – avec certains transits plus long que d'autres, l'observateur voudra choisir une candidate dont le temps total de session (qui inclut 1 heures après la fin du transit) lui conviendra.
3. Magnitude de l'étoile hôte et profondeur de transit – les étoiles hôtes peuvent être rangé en 5 magnitude de 8.0 à plus de 13.0. La profondeur de transit peut aller de centièmes à des millièmes de magnitude. L'observateur pourrait cependant vouloir choisir une cible avec une profondeur plus grande en pourcentage.

C. Prédictions de retournement au méridien

Avec une monture équatoriale, l'observateur devrait prédire approximativement quand se produira le retournement au méridien pendant la session d'imagerie. Cette prédiction est habituellement effectuée à l'aide du logiciel de navigation de l'observateur et est utile pour que l'observateur puisse être disponible pendant le basculement du méridien afin d'effectuer les ajustements nécessaires pour repositionner le champ de vision du système d'imagerie aussi rapidement que possible.

D. Choix du temps d'exposition

De nos jours, les capteurs CCD typiquement ont une capacité d'accumulation de photons, au-delà de laquelle il sature et les photons ne seront plus enregistrés. Aussi, il est critique que la cible et les comps ne saturent jamais. Il est important que le temps d'exposition soit choisi de manière qu'on atteigne un bon SNR (rapport signal/bruit), sans atteindre la saturation. De plus si la cible est prévu de monter vers le méridien local et que donc sa lumière aura moins en moins de masse d'air à traverser, on pourra alors atteindre le seuil de saturation. Il faudra en tenir compte pour le choix du temps d'exposition. Noter que la défocalisation pourrait apporter une solution dans cette situation.

Afin de choisir un temps d'exposition adéquat, une série d'images tests devront être prises avec des temps d'exposition croissants. Le SNR pour l'étoile cible, ainsi que son ADU, pourront être mesurés pour chaque image. La section VII.C décrit comment AIJ peut être utilisé pour déterminer le SNR d'une étoile. Un temps d'exposition qui maximise le SNR et évite d'atteindre la saturation est l'objectif à viser.

E. Répertoires fichiers

Sur l'ordinateur qui héberge le logiciel de capture, on devra initialiser les répertoires suivants:

AIJ Analysis, Bias, Darks, Flats, Test Images, and Science Images.

Note: Le terme Science Images fait référence aux images brutes du champ contenant l'étoile hôte. Dans d'autres logiciels elles sont nommées Lights. Le sous-répertoire AIJ Analysis contiendra les mesures et les modèles ajustés d'AIJ. Si l'utilisateur désire utiliser d'autres noms de sous-répertoires, veuillez à en tenir compte dans les exemples qui vont suivre.

F. Stabilisation du système d'imagerie à la bonne température

Le système d'imagerie devrait être mis en place suffisamment à l'avance pour atteindre la température désirée, notamment s'il est refroidi.

G. Génération de Flat

Quelque soit la méthode utilisée, les flats devront être fait avant ou après chaque session en utilisant la même chaîne d'imagerie employée pour la session de Science Images, sans avoir été déplacée ou bougée.

H. Autoguidage

L'autoguidage devrait être employé pendant la phase de capture d'images, sauf si la monture est d'une telle précision qu'elle peut maintenir le guidage à quelques pixels près pendant toute la session. La valeur réelle de "quelques" dépend du FWHM de l'étoile hôte.

Voir le paragraphe 4 dans la section IV Les bonnes pratiques ci-dessus, pourquoi l'autoguidage est important. Le mécanisme d'autoguidage devra être calibré, si ce n'est pas déjà fait ou si le logiciel d'autoguidage ne corrige pas automatiquement les variations en déclinaison. Si besoin, la calibration devra aussi être effectuée pour le système d'optique adaptative.

VI. Phase de capture des images

L'observateur utilisera son logiciel préféré de capture pour les images de Science Images dans le sous-répertoire idoine. Un retournement au méridien interviendra peut-être durant cette phase. L'observateur devra:

- Suspendre la capture d'image
- Arrêter l'autoguidage
- Effectuer le retournement au méridien
- Repositionner l'étoile cible dans le champ de la camera
- Reprendre l'autoguidage
- Reprendre la capture d'images

Avant ou après la capture des images brutes, l'utilisateur pourra aussi capturer une série de dark, de flat et de bias pour la calibration. La règle est de capturer un nombre impair (pas moins que 17) d'images pour chaque type. Les règles pour le temps d'exposition de ces images de calibration sont les suivantes:


1. Dark: temps d'exposition égal à celui des images brutes et à la même température.
2. Flat : le temps d'exposition dépend de la technique utilisée, mais typiquement 2 secondes ou moins. Toutefois, ce temps peut être augmenté pour les caméras avec obturateurs automatique afin de ne pas capturer obturateur fermé. En règle générale, on crée un flat de façon à ce que l'histogramme remplisse la moitié de la plage dynamique du capteur CCD.
3. Bias : un bias est un dark avec un temps d'exposition de 0 secondes.

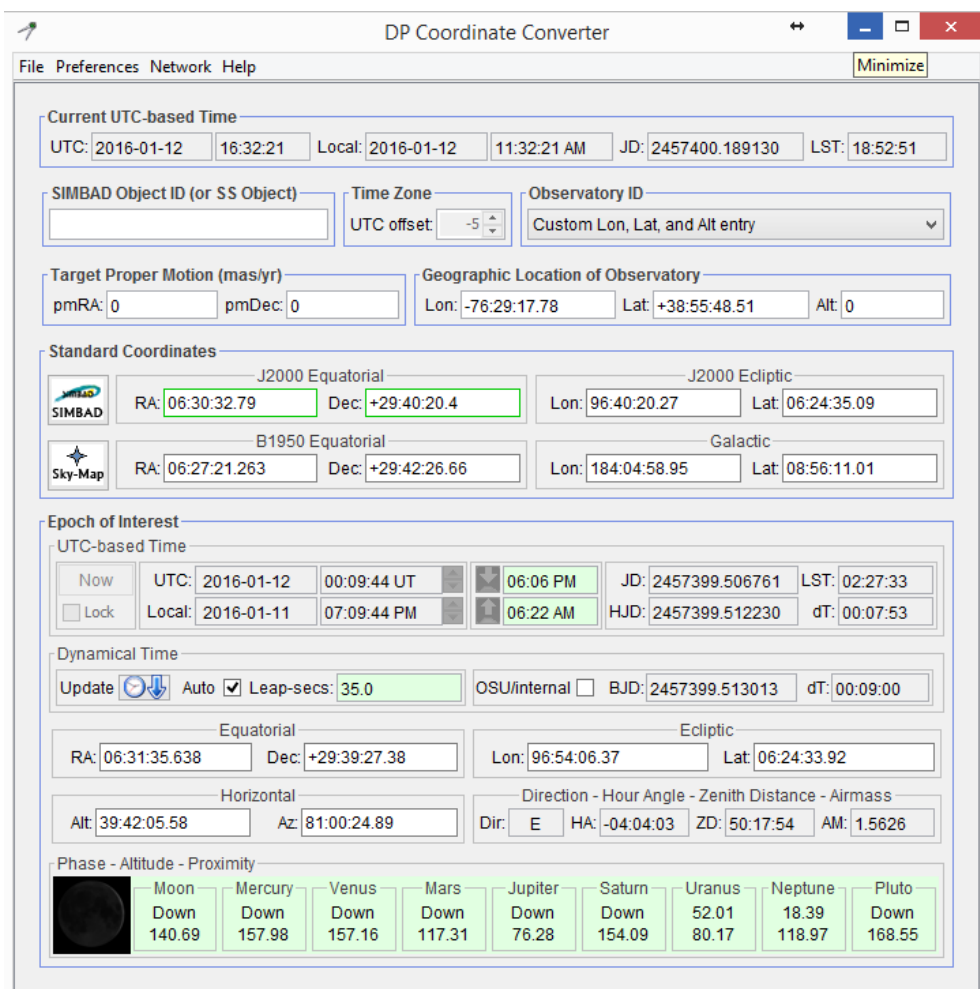
VII. Phase de Calibration, Photométrie, Traçage, et Modélisation

Le reste de ce guide assume l'utilisation de AIJ pour le traitement des images brutes et l'établissement de la modélisation du transit exoplanétaire. AIJ est donc déjà installé et le manuel

utilisateur a été lu. Les données du transit de l'exoplanète seront utilisées dans les exemples dans le reste de ce guide

A. Calibration des images brutes (Science Images)

Le traitement des données (TD) par AIJ peut d'abord être utilisé pour calibrer les images brutes prises pendant la session de capture. Note: Avant de procéder, il est hautement recommandé de lire la section 6 (TD interface utilisateur) du guide utilisateur d'AIJ. Un développement plus approfondi de ces fonctions est disponible dans les papiers suivants: <http://arxiv.org/abs/1601.02622>. Les fonctions TD sont initialisées en cliquant sur l'icône de la barre de menu d'AIJ. La figure 2 ci-dessous est un exemple de l'un des deux écrans qui  apparaissent.



Phase - Altitude - Proximity	Moon	Mercury	Venus	Mars	Jupiter	Saturn	Uranus	Neptune	Pluto
Down	Down	Down	Down	Down	Down	Down	52.01	18.39	Down
140.69	157.98	157.16	117.31	76.28	154.09	80.17	118.97	168.55	

Figure 2. Ecran de conversion des coordonnées

La situation géographique du lieu d'observation (Lon, Lat, Alt), ainsi que les coordonnées équatoriales J2000 de l'étoile hôte seront renseignées dans cet écran. Ainsi, l'exemple ci-dessus montre les coordonnées RA et DEC de WASP-12.

La figure 3 est un exemple du second écran.

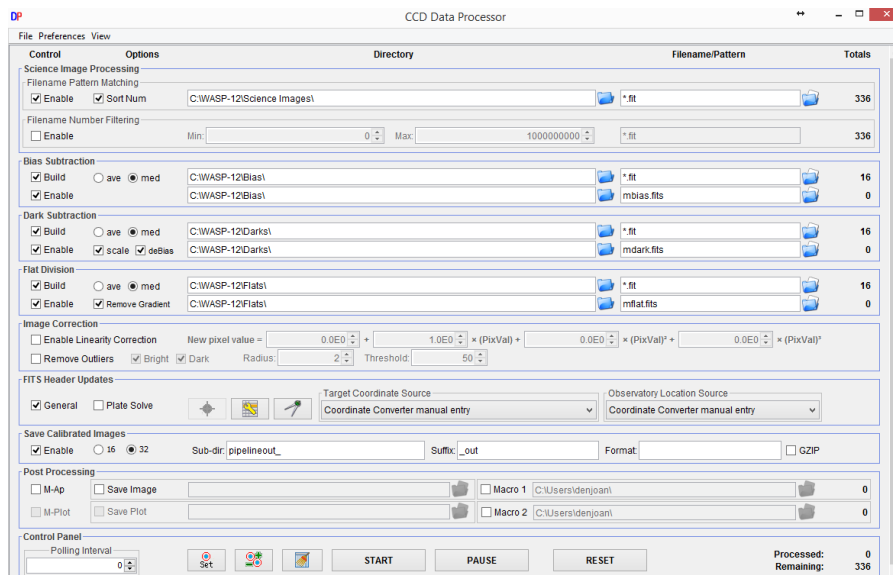


Figure 3. Ecran données CCD

Le but de l'écran des données CCD est de calibrer les images brutes avec le bias, la dark et le flat préalablement capturés. Il existe plusieurs façons cependant de créer un bias maître, un dark maître et un flat maître. Par exemple, les fichiers maîtres peuvent être créés de façon séparée dans cet écran et ensuite être utilisés pour le calibrage. De plus, l'utilisateur peut employer d'autres programmes pour réaliser la calibration et simplement utiliser AIJ pour mettre à jour les en-têtes FITS des fichiers calibrés. Ce processus est décrit ci-après. Dans l'exemple décrit dans la figure 3, AIJ utilise une seule passe pour tout accomplir: les fichiers maîtres sont créés à partir des fichiers bias, dark et flat puis utilisés pour calibrer les 336 images brutes. Finalement les en-têtes FITS des fichiers calibrés résultants sont mis à jour. Les fichiers dark originaux ont un temps d'exposition de 45 secondes, les fichiers flat de 3 secondes.

Note: Il est primordial que l'option "Remove Outliers" (section Image Correction) ne soit PAS sélectionnée lorsque une photométrie différentielle est mis en œuvre et que le Polling Interval dans le Panel Control (bas de l'écran) soit à 0. De même, à moins que l'option "Enable Linearity Correction" ne soit mise en œuvre (voir Section 6.3.2.5 du guide d'AIJ), elle devrait être inactive.

AIJ est aussi capable d'opérer en "temps réel" si l'option "Polling Interval" est différent de 0. Dans ce cas, au taux spécifié, AIJ contrôlera automatiquement le répertoire des images brutes pour détecter les nouvelles images dont le nom de fichier correspond au nom générique et aux numéros spécifiés sur l'écran *CCD Data Processor*. AIJ les calibrera alors, procédera à une photométrie différentielle et éventuellement mettra à jour la courbe de lumière (voir les cases à cocher sous *Post Processing* sur l'écran *Data Processor* pour sélectionner les options nécessaires).

AIJ possède deux méthodes pour obtenir des informations essentielles tel que AIRMASS, temps BJD_TDB, etc, qui seront utiles pendant la phase de photométrie, de traçage et de modélisation. La première méthode est de mettre à jour le fichier des mesures qui est créé après qu'une photométrie différentielle ait été appliquée aux images calibrées. Cette méthode est décrite dans la section D ci-après. Cette méthode toutefois, ne met pas à jour les en-tête FITS des images calibrées, aussi à chaque nouvelle photométrie différentielle, la mise à jour des en-têtes devra être appliquée. Vous noterez que certains soft de capture inclut AIRMASS dans l'en-tête fichier et très probablement pas BJD_TDB.

La seconde méthode, qui prend place pendant la phase de calibration, est d'inclure cette informations directement dans l'en-tête FITS des images calibrées. Ainsi, au moment où les images calibrées sont corrigées avec le bias, dark et flat, leur en-tête FITS sont aussi mis à jour. C'est la meilleur des deux méthodes, car plusieurs modélisations peuvent être faites avec différents


paramètres de photométrie, sans avoir à mettre à jour le fichier de mesures à chaque fois avec les informations AIRMASS et BJD_TDB.

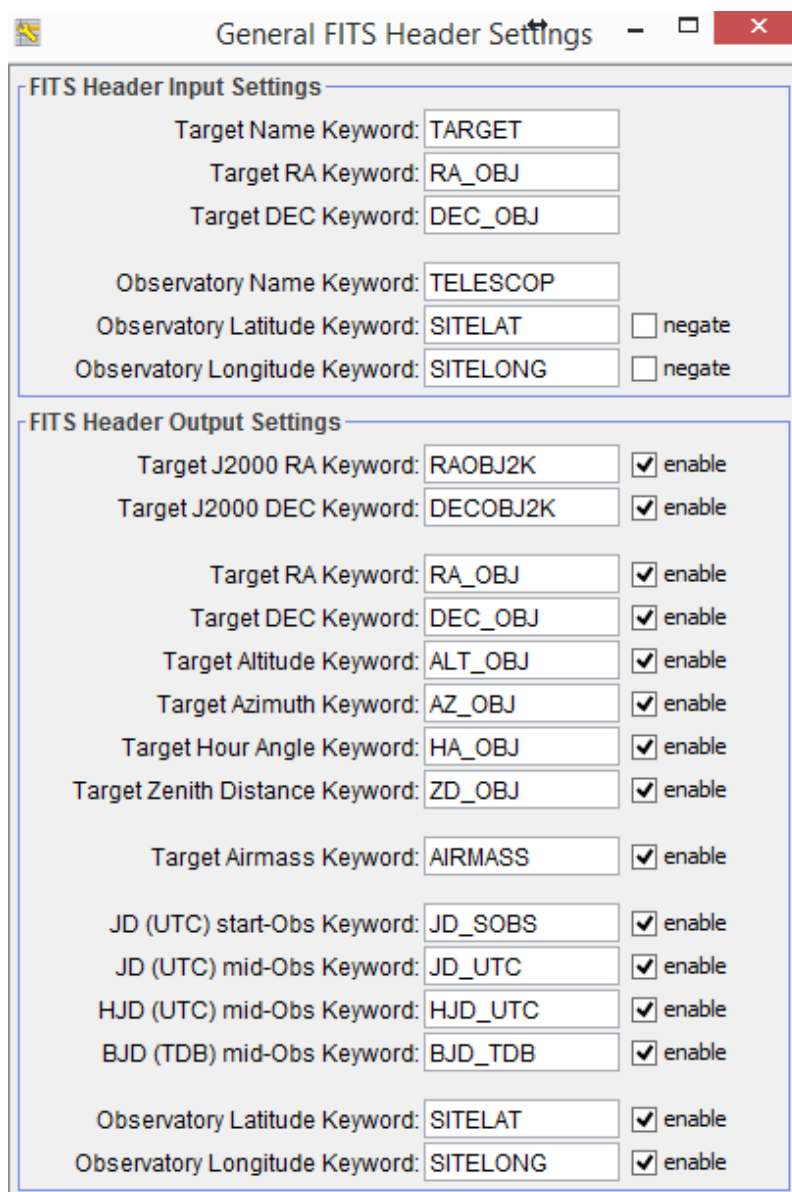
Pour appliquer la seconde méthode, l'option General dans la section *FITS header Updates* doit être coché. L'écran *DP Coordinate Converter* ensuite apparaît, comme dans la figure 2.

Les champs suivants seront remplis, s'ils ne le sont pas déjà, où s'ils ne sont pas inclus dans l'en-tête FITS des images brutes:

1. *Lon, Lat, Alt* dans la section *Geographic Location of Observation*;
2. Les valeurs en RA et DEC de la cible dans la section J2000 Equatorial.

Ensuite, il est important que les images brutes aient l'information de date/heure de début de session et le temps d'exposition. Les sections 6.3.2.6.1 et 6.3.2.6.2 du guide utilisateru d'AIJ décrivent les mots clés reconnus qu'AIJ peut utiliser pour recueillir ces informations.

Une fois que les informations concernant l'observatoire et la cible sont renseignées et qu'il est confirmé que les en-têtes FITS contiennent bien les informations de date/heure et de temps d'exposition, on peut alors cliquer sur l'icône  dans l'écran *Data Processor*. L'écran *General FITS Header Settings* apparaît (figure 4)..



FITS Header Input Settings	
Target Name Keyword:	TARGET
Target RA Keyword:	RA_OBJ
Target DEC Keyword:	DEC_OBJ
Observatory Name Keyword:	TELESCOP
Observatory Latitude Keyword:	SITELAT <input type="checkbox"/> negate
Observatory Longitude Keyword:	SITELONG <input type="checkbox"/> negate

FITS Header Output Settings	
Target J2000 RA Keyword:	RAOBJ2K <input checked="" type="checkbox"/> enable
Target J2000 DEC Keyword:	DECOBJ2K <input checked="" type="checkbox"/> enable
Target RA Keyword:	RA_OBJ <input checked="" type="checkbox"/> enable
Target DEC Keyword:	DEC_OBJ <input checked="" type="checkbox"/> enable
Target Altitude Keyword:	ALT_OBJ <input checked="" type="checkbox"/> enable
Target Azimuth Keyword:	AZ_OBJ <input checked="" type="checkbox"/> enable
Target Hour Angle Keyword:	HA_OBJ <input checked="" type="checkbox"/> enable
Target Zenith Distance Keyword:	ZD_OBJ <input checked="" type="checkbox"/> enable
Target Airmass Keyword:	AIRMASS <input checked="" type="checkbox"/> enable
JD (UTC) start-Obs Keyword:	JD_SOBS <input checked="" type="checkbox"/> enable
JD (UTC) mid-Obs Keyword:	JD.UTC <input checked="" type="checkbox"/> enable
HJD (UTC) mid-Obs Keyword:	HJD.UTC <input checked="" type="checkbox"/> enable
BJD (TDB) mid-Obs Keyword:	BJD.TDB <input checked="" type="checkbox"/> enable
Observatory Latitude Keyword:	SITELAT <input checked="" type="checkbox"/> enable
Observatory Longitude Keyword:	SITELONG <input checked="" type="checkbox"/> enable

Figure 4. Ecran General FITS Header Settings

La portion *FITS Header Output Settings* de l'écran, indique quelles infos seront ajoutées aux images calibrées (celle qui sont cochées Enable). Note: Il est suggéré que tous les mots clés soient Enable.

Finalement, bien que non fait dans cet exemple, les coordonnées WCS pour chaque étoile dans chaque image peuvent être obtenues en sélectionnant l'option *Plate Solve* dans l'écran *Data Processor*.

En utilisant l'exemple ci-dessus, lorsqu'on clique sur le bouton *START*, la routine DP réalisera automatiquement les étapes suivantes:

1. Créer un Bias Maître (mbias.fits) à partir des 16 images bias.
2. Créer un Dark Maître (mdark.fits) à partir des 16 images dark. Corrigez ce Dark Maître avec la Bias Maître.
3. Créer le Flat Maître (mflat.fits) à partir des 16 images flat de la manière suivante:
 1. Calcule d'abord un facteur d'échelle qui représente le rapport des temps d'exposition des flat et des dark. Dans notre exemple $3/45=0,00667$;
 2. Effectue la correction bias à l'aide du Bias maître;
 3. Effectue la correction dark à l'aide du Dark maître, en tenant compte du facteur d'échelle;
 4. retire les gradients;
 5. Normalise les flat calibrés.
4. Les en-têtes FITS des images calibrées sont mis à jour.
5. Calibrez chaque image brute à l'aide du Bias Maître, du Dark Maître, du Flat Maître. Un *Image Display* est visible pour chaque image lors de sa calibration.
6. Les images brutes calibrées sont stockées dans le sous-répertoire nommé "*pipelineout*" et auront comme suffixe "_out".

La Section 6 du guide utilisateur d'AIJ fournit les autres options de cet écran.

B. Construire la pile d'images

L'étape suivante consiste à réaliser une photométrie différentielle sur les images calibrées. Ceci est accompli en chargeant d'abord celles-ci dans la pile (*stack*) d'AIJ. Chaque image de la pile s'appelle un "*slice*" (une tranche). La pile est un ensemble d'images sur lesquelles on peut appliquer diverses fonctionnalités d'AIJ. La séquence suivante montre comment effectuer une photométrie différentielle.

Chargez les images brutes calibrées dans la pile: Depuis la barre d'outils d'AIJ sélectionnez *File* → *Import* → *Image Sequence*. Sélectionnez UN fichier dans le sous-répertoire contenant les images brutes calibrées. Un écran similaire à celui de la figure 5 apparaît.

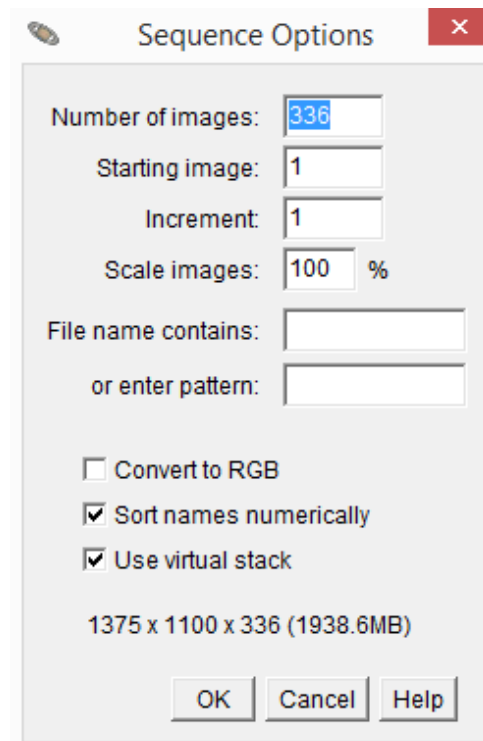


Figure 5. Sequence Options Screen

Si le PC sur lequel on exécute AIJ a suffisamment de mémoire pour contenir toutes les images dans la pile, on peut décocher "*Use virtual stack*" sur l'écran *Sequence Options*. AIJ y gagnera en rapidité. Avec les options cochées comme dans la figure 5, à l'exception possible de *Use virtual stack*, cliquez sur OK.

Ceci crée la pile AIJ des images brutes calibrées. Le *Image Display* (figure 6) montre alors la première image de la pile.

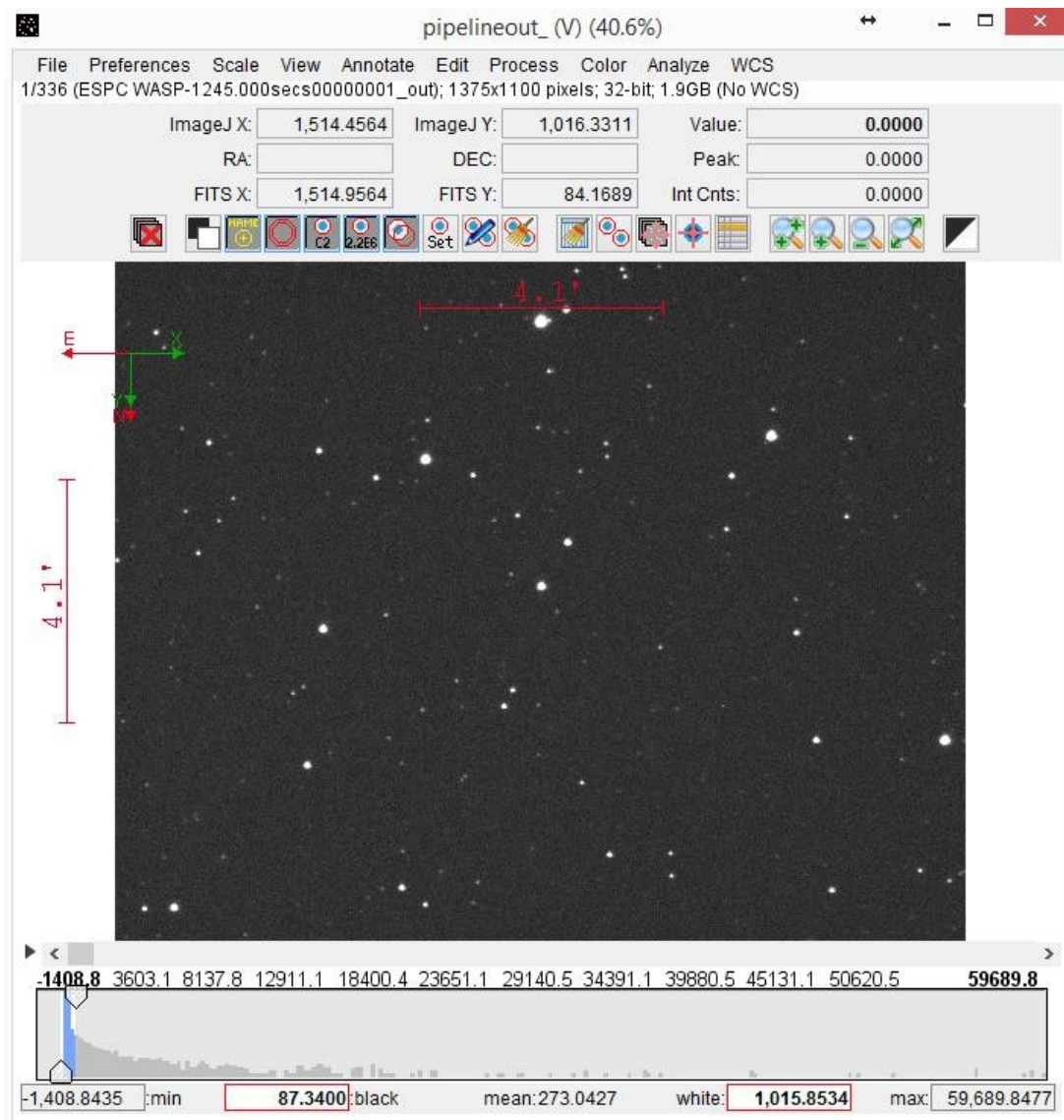



Figure 6. Image Display Screen

Afin d'être sûr que les indicateurs FOV sont corrects pour les axes horizontaux et verticaux sur l'écran *Image Display*, les bonnes échelles en pixel en X et Y devraient être renseignées. Ceci devrait être fait si aucune coordonnées WCS n'a été trouvée en utilisant soit l'option *Plate Solve* ou l'une des options *WCS* → *Palte Solve* sur l'écran *Image Display*. Les bonnes valeurs en pixels sont renseignées en sélectionnant en haut de l'écran *Image Display*, "*WCS* → *Set pixel scale for images without WCS*....".

Le curseur en dessous l'image permet de se déplacer à travers toutes les images en vue d'en trouver à éliminer à cause de défaut patent, comme un passage de nuages, un guidage insuffisant ou autre. Si les images montrent un degré de mauvais alignement croissant, voir le paragraphe 3 ci-dessous.

Les images à rejeter peuvent être effacées à l'aide l'icône . Ou par le menu *Edit* → *Stack* → *Delete*.

C. Réaliser une photométrie différentielle

1. Sélectionnez les paramètres d'ouvertures et d'anneaux adéquats.

La première étape est de définir le rayon d'ouverture et les rayons internes et externes de l'anneau. Ceci se fait comme suit:

L'icône  l'écran *Image Display* est sélectionnée causant l'ouverture de l'écran de paramétrage de la photométrie.

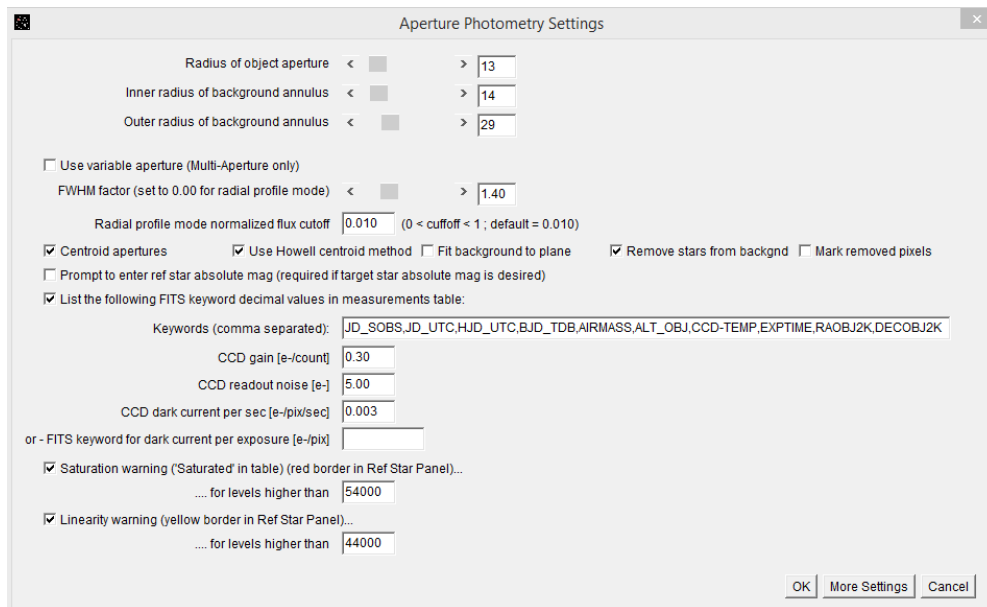


Figure 7. Ecran Aperture Photometry Settings


Le rayon initial d'ouverture et de ceux de l'anneau peuvent être paramétrés en utilisant l'une des trois méthodes suivantes:


Méthode 1. Les rayons peuvent être déterminés en utilisant l'écran Seeing Profile associé avec l'étoile cible. Cet écran apparaît lorsque l'étoile cible est ALT-cliquée. Le rayon de la source et les valeurs de début/fin du fond du ciel peuvent être utilisées pour déterminer le rayon d'ouverture initial et les rayons interne et externe de l'anneau.

Méthode 2. Le rayon initial peut aussi être déterminé selon le process suivant:

1. Le rayon initial de la source (r_1) devrait être d'au moins 2 fois le nombre de pixel du FWHM.
2. Le rayon interne de l'anneau (r_2) devrait être choisi de façon à ce que celui-ci et le rayon externe crée un anneau qui exclut toutes étoiles. Notez que AIJ tentera de toute les façons automatiquement d'ignorer les pixels des étoiles dans la région annulaire.
3. Le rayon externe de l'anneau devrait être égal à $(4 \cdot r_1 + r_2)^2$. Ceci devrait conduire à avoir un anneau comprenant 4 fois le nombre de pixels de la source.

Méthode 3. Finalement, les paramètres des rayons source/anneau peuvent être déterminés en utilisant ceux qui maximise le SNR de l'étoile cible. AIJ peut être utilisé pour déterminer le SNR de l'étoile cible comme suit:

1. Cliquez sur l'icône de paramétrage de la photométrie  dans l'écran *Image Display*. Réglez les rayons d'ouverture et de l'anneau et cliquez sur OK.

2. Cliquez sur l'icône de Photométrie simple (*Single Photometry*)  dans le menu AIJ. Placez les cercles concentriques résultants sur l'étoile cible dans l'écran *Image Display* et cliquez gauche.
3. Ceci produira une nouvelle table de mesure qui devrait inclure la mesure du SNR dans la colonne *Source_SNR*. Chaque modification ultérieure des paramètres d'ouverture et des sélections de photométrie à ouverture unique ajoutera une nouvelle ligne à cette table.


Note: Chaque ligne nouvellement créée dans la table Mesures devrait alors être supprimée avant que la table des Mesures ne soit utilisée pour la modélisation du transit. Cela se fait en mettant en surbrillance la (les) ligne(s) à supprimer dans la table Mesures, puis en sélectionnant *Edit -> Cut* dans la barre de menus de la table Mesures.

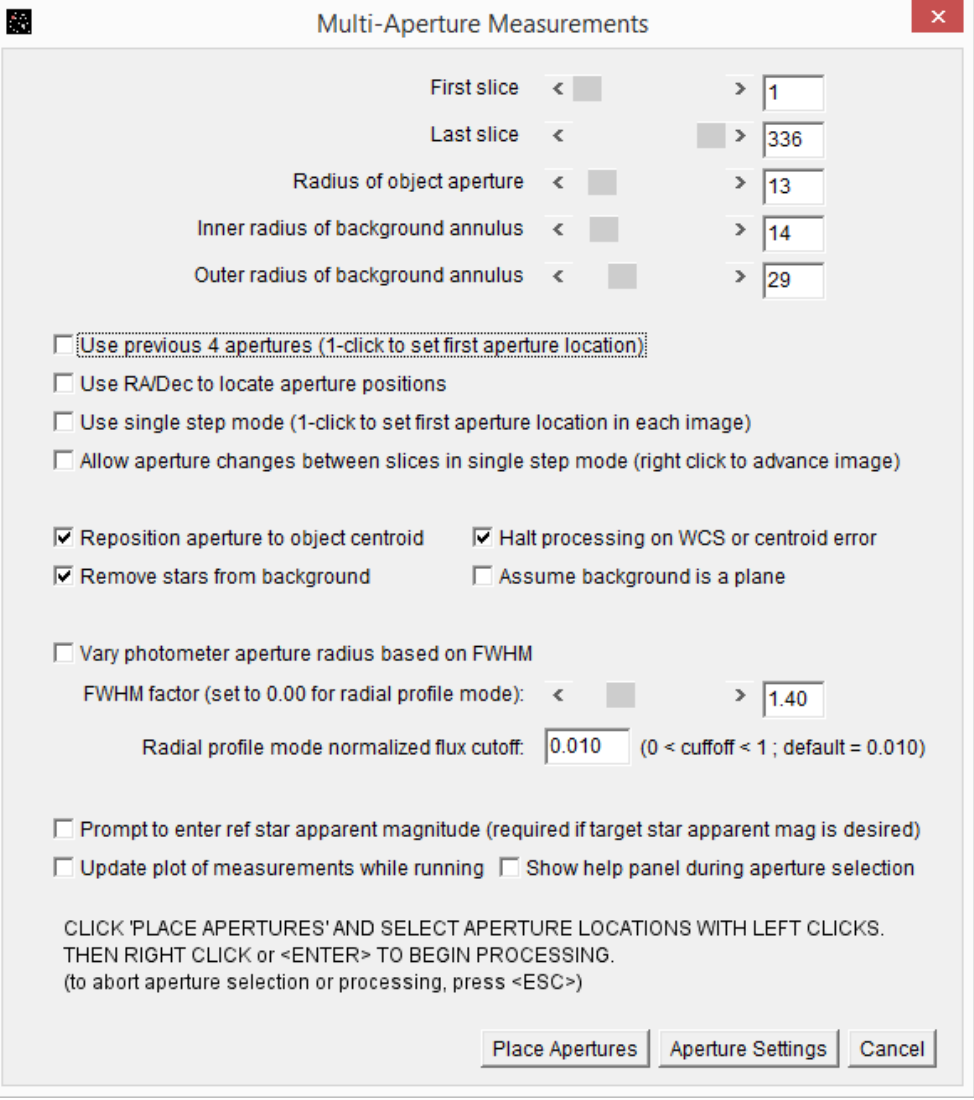
Les réglages finaux des rayons d'ouverture et d'annulaire devraient être ceux qui minimisent le carré de la racine (RMS) des résidus de la courbe de lumière créée lors de l'ajustement du modèle. Le RMS est une mesure de la façon dont le modèle «correspond» aux données observées. Cela implique que plusieurs exécutions de l'ajustement du modèle, comme décrit dans la section E ci-dessous, doivent être réalisés avec des valeurs différentes pour les réglages de l'ouverture et des rayons annulaires.

2. Préparez vous et commencez la photométrie différentielle

En parcourant les images dans la pile, il se peut qu'elles soient progressivement décalées l'une de l'autre et ne soient donc pas toutes alignées. Le paragraphe 3 ci-dessous montre comment traiter différents degrés de désalignement, ainsi qu'un retournement au méridien.

Sur l'écran de paramétrage de la photométrie (figure 7), l'utilisateur devrait saisir une liste de mots-clés séparés par une virgule pour toutes les valeurs des en-têtes FITS qu'il voudrait extraire et ajoutez à la table des mesures. Plus, les valeurs appropriés de gain de la caméra CCD, du bruit de lecture et du courant de dark. Finalement, les paramètres adéquats d'alerte de saturation et de linéarité devraient aussi être renseignés. Toutes les autres cases à cocher peuvent être conservées comme sur la figure 7. Cliquez sur OK.

Ensuite sélectionnez l'icône  dans la barre de menu de l'écran *Image Display* pour faire apparaître l'écran de Mesures multi-photométrie (figure 8). Les valeurs pour l'intervalle d' images, rayon d'ouverture, rayon anneau interne, rayon anneau externe sont automatiquement remplies. Si les images ont été résolues astrométriquement, alors "*Use RA/DEC to locate aperture positions*" devrait être coché (voir l'alternative 2 au paragraphe 3 ci-dessous). Toutes les autres cases à cocher peuvent être conservées comme sur la figure 8.



Multi-Aperture Measurements

First slice < > 1

Last slice < > 336

Radius of object aperture < > 13

Inner radius of background annulus < > 14

Outer radius of background annulus < > 29

☐ Use previous 4 apertures (1-click to set first aperture location)

☐ Use RA/Dec to locate aperture positions

☐ Use single step mode (1-click to set first aperture location in each image)

☐ Allow aperture changes between slices in single step mode (right click to advance image)

☒ Reposition aperture to object centroid ☒ Halt processing on WCS or centroid error

☒ Remove stars from background ☐ Assume background is a plane

☐ Vary photometer aperture radius based on FWHM

FWHM factor (set to 0.00 for radial profile mode): < > 1.40

Radial profile mode normalized flux cutoff: 0.010 (0 < cutoff < 1 ; default = 0.010)

☐ Prompt to enter ref star apparent magnitude (required if target star apparent mag is desired)

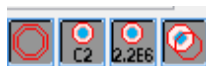
☐ Update plot of measurements while running ☐ Show help panel during aperture selection

CLICK 'PLACE APERTURES' AND SELECT APERTURE LOCATIONS WITH LEFT CLICKS.
THEN RIGHT CLICK or <ENTER> TO BEGIN PROCESSING.
(to abort aperture selection or processing, press <ESC>)

Place Apertures Aperture Settings Cancel

Figure 8. Multi-Aperture Measurements

L'utilisateur devrait aussi avoir les icônes suivantes disponibles dans la barre de menu de l'écran *Image Display*:



Ces sélections permettent d'afficher les anneaux d'ouverture / anneau avec les noms de cible et des comps et les comptages d'intensité associés, et aide à positionner automatiquement les anneaux d'ouverture / annulaire sur le centre de l'étoile.

L'utilisateur sélectionne ensuite *Place Apertures*, positionne et clique les cercles concentriques flottants sur l'étoile cible et les comps. L'écran *Image Display* devrait apparaître similaire à la figure 9

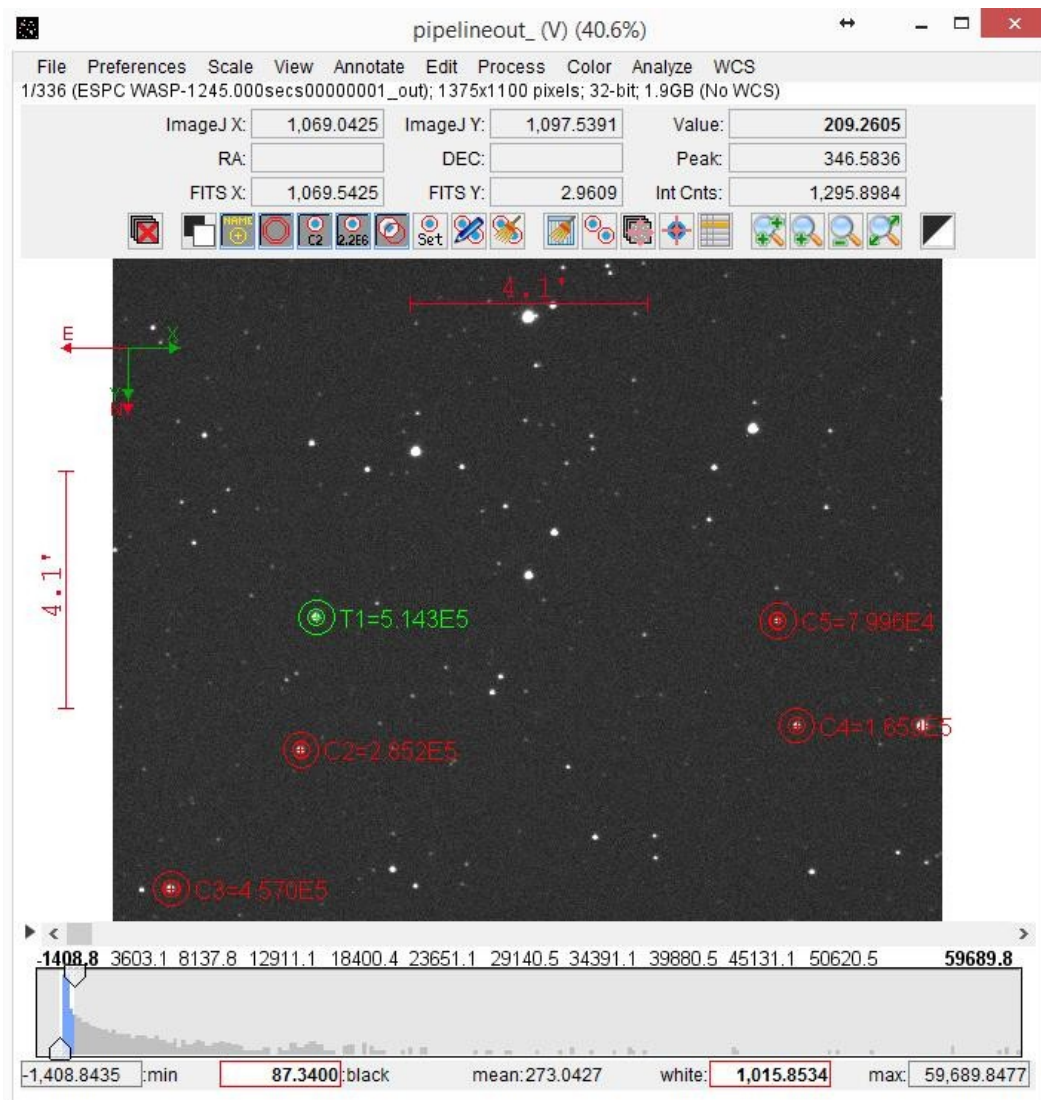



Figure 9. Sample Image with Aperture/Annulus Applied to Target and Comp Stars

Ensuite par *Enter* sur le clavier, le processus de photométrie différentielle va commencer. Une table de mesures sera construite, chaque ligne représentant les mesures d'une image de la pile. Les labels dans la table de mesures identifient le type de données de la colonne. Certains de ces labels correspondent aux identifiants communs des en-têtes FITS et d'autres sont les mots-clés spécifiés dans l'écran de paramétrage de la photométrie (figure 7).

A ce stade, la table de mesures devrait être sauvegardée dans le répertoire AIJ Analysis par *File* → *Save As* dans le menu de la table de mesures.

3. Traiter des images mal alignées ou un retournement au méridien

Un décalage dans l'orientation d'une image et donc un mauvais alignement peut être causé par un guidage insuffisant. Si le décalage n'est pas trop important, la fonction d'AIJ, *Align Stack* pourra être utilisée pour aligner les images dans la pile active. Sélectionnez l'icône  *Align stack using apertures*, sur l'écran *Image Display* et saisissez un réglage d'ouverture assez grand et les réglages correspondants pour l'anneau. Les images de la pile sont alors alignées à l'aide de cette fonction et stockées dans un nouveau répertoire "aligned". Ces images seront celles utilisées pour la photométrie différentielle.


1. Si le retournement au méridien survient pendant la session d'imagerie, alors les images devront être pivotées de 180° par rapport à l'orientation affichée dans la figure 9. ainsi, pour

les images prises après le retournement, les anneaux d'ouverture/annulaire ne devraient pas tomber sur la bonne position pour l'étoile cible et les comps. Note: Même si la caméra CCD elle-même était pivotée immédiatement après le retournement et avant de reprendre l'imagerie, il est improbable que l'étoile cible et les comps se retrouvent au bon endroit sur le capteur.


Aussi, dans le cas d'une rotation d'image due à un retournement au méridien ou en cas de décalage sévère, les cercles ouverture/anneaux doivent être repositionnés sur l'étoile cible et les comps. AIJ offre deux façons de faire ceci.

Alternative 1.

Des passes complémentaires sur différentes zones de l'image sont effectuées pour replacer les cercles d'ouvertures/anneaux sur ces images où un tel décalage sur la position de l'étoile cible et des comps est constaté. Une façon de le faire est de savoir si les images étaient sur le côté Est avant que le retournement ne se produise, quelles images étaient du côté ouest après le basculement, puis d'exécuter plusieurs cycles de photométrie différentielle et combiner leurs table de Mesures respectives.

D'abord effacer les ouvertures et les annotations de l'écran *Image Display* en sélectionnant l'icône  dans la barre de menu. A l'aide du curseur, détermine l'intervalle d'images sur lequel la photométrie différentielle doit s'appliquer. Le numéro d'image est visible en haut de l'écran à gauche du nom de fichier de celle-ci.

S'il en existe, les lignes correspondantes dans la table de mesures doivent être effacées. Pour le faire, sélectionnez les lignes à effacer (clic sur la première ligne et shift-clic sur la dernière). Puis depuis la barre de menu faire *Edit* → *Cut*.

Ensuite, sélectionnez l'icône  pour rappeler l'écran de *Multi-photométrie*. (Note: Si un process de photométrie différentielle précédent a été effectué, il peut être nécessaire de désélectionner "*Use previous ...apertures*"). L'intervalle de nombre d'images de la pile à traiter doit être saisi. Le bouton *Place Apertures* est ensuite sélectionné.

Finalement, les ouvertures/anneaux doivent être placés sur l'écran *Image Display* sur la même cible et les mêmes comps, dans le même ordre que pour la photométrie différentielle initiale.

Notez que les tables de mesures sont mises à jour avec un nouvel ensemble de lignes de cette photométrie différentielle.

Alternative 2.

Cette seconde alternative pour traiter des décalages d'images implique les étapes suivantes:

D'abord, résolvez astrométriquement chaque image. Ceci détermine le WCS (World Coordinate System) les coordonnées RA et DEC pour chaque étoile de chaque image de la pile. Ceci est réalisé en sélectionnant depuis le menu l'écran *Image Display* "*WCS → Plate solve using Astrometry.net (with options)*". Un écran similaire à celui de la figure 10 apparaît.


Figure 10. Astrometry Settings

L'utilisateur devra d'abord saisir sa clé d'utilisateur Astronomy.net (obtenu en s'enregistrant sur astrometry.net). Ensuite, les valeurs corrects de *Pixel Scale* doivent être renseignées, aussi bien que les coordonnées RA et DEC du centre de l'image. Sélectionnez *START*, et la résolution astrométrique commence.

Après sa réalisation, l'utilisateur peut effectuer une photométrie différentielle comme auparavant, sauf que dans l'écran *Multi-Apertures Measurements*, la case "*Use RA/Dec to locate aperture positions*" doit être décochée. De plus, le premier et le dernier numéro image doivent englober la totalité des images – aussi bien celles avant le retournement au méridien que les suivantes. Lorsque le bouton *Place Aperture* est sélectionné sur cet écran, l'utilisateur devrait alors placer les cercles ouvertures/anneaux sur l'étoile cible et les comps, comme précédemment, et appuyer sur *ENTER* sur le clavier. Toutes les images de la pile vont être maintenant analysées.

Notez que la résolution astrométrique peut prendre un certain temps selon le nombre d'images de la pile, auquel cas l'alternative 1 serait préférable.

D. Préparation de l'ajustement du modèle

L'icône  *Multi-Plot Main* dans la barre d'outils de AIJ doit être sélectionnée. Lorsque c'est fait, les quatre fenêtres suivantes s'affichent:

Multi-plot Main

Multi-plot Reference Star Settings

Multi-plot Y-data

Data Set 2 Fit Settings.

La première étape est de mettre à jour les valeurs dans les colonnes *AIRMASS*, *HJD_UTC* et *BJD_TDB* dans la table de mesures si cela n'a pas été fait durant la phase de calibration (voir la section A ci-dessus). Ceci est réalisé comme suit:

Depuis le menu *Multi-Plot Main*, sélectionnez "Table → Add new astronomical data columns to table". Les deux écrans suivants apparaissent: "MP Coordinate Converter" et "Add astronomical data to table" (voir figure 11).

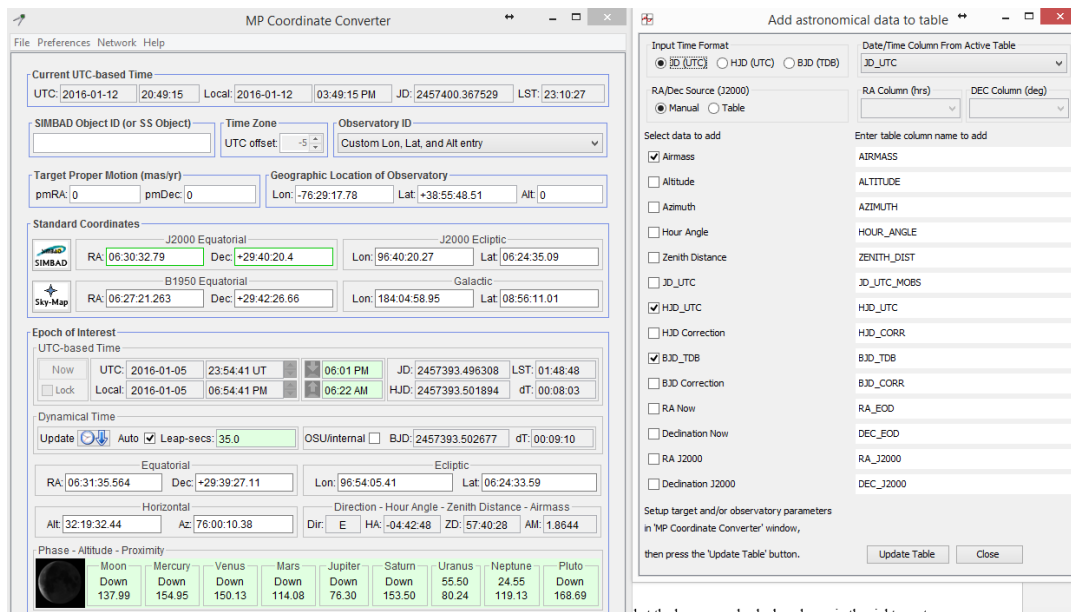



Figure 11. Screens for Correcting AIRMASS and Time Standard Values

Sur l'écran *MP Coordinate Converter*, vérifiez que les valeurs sont correctes pour *Geographic Location of Observatory* et *J2000 Equatorial Coordinate* pour l'étoile cible. Sur l'écran "Add astronomical data to table", vérifiez que les cases sont cochées comme ci-dessus dans la partie droite de l'écran de la figure 11 et ensuite sélectionnez *Update Table*. Appuyez sur OK si la boîte de dialogue "Over-write existing data?" apparaît. Les colonnes AIRMASS, HJD_UTC, BJD_TDB de la table de mesures seront mis à jour.

E. Confectionner le modèle

Sur l'écran *Multi-Plot Main*, renseignez les champs *Title* et *Subtitle* (voir Figure 12). Dans le panneau *Fit and Normalize Region Selection*, les saisies sont faites pour les cases *Left* et *Right* qui représentent l'heure de début/fin du transit respectivement (en date/heure Julien, la partie fractionnaire). En haut à droite de l'écran *Multi-Plot Main*, l'icône Copy  est sélectionnée. Ceci positionne les marqueurs prévisionnels d'entrée et de sortie prédits aux endroits appropriés sur l'écran *Plot of Measurements*. Ces marqueurs prédits ne doivent pas être modifiés, pour qu'ils puissent servir de comparaisons. Cependant, les marqueurs *Fit* et *Normalize* doivent être positionnés sur les points d'entrée et de sortie apparents, comme indiqué sur l'écran *Plot of Measurements* (Figure 18). En outre, les champs *Left Trim* et *Right Trim* peuvent être utilisés pour éliminer une quantité de données de pré-entrée et de sortie après la sortie du modèle. Cela pourrait se faire, par exemple, s'il y avait une **systématique** au début ou à la fin de la séance d'observation.

Ensuite, dans le panneau *X-Axis Scaling*, cochez le bouton *Auto X-range* et cliquez sur l'icône .

Les cases *X-min* et *X-max* seront remplies automatiquement avec les valeurs minimales et maximales (en temps BJD_TDB dans cet exemple) de la table des mesures. Alternativement, l'utilisateur peut cliquer sur la case *Custom-X-range* et la remplir avec des valeurs différentes pour *X-min* et *X-max*. Le panneau *Y-Axis Scaling* peut être utilisé maintenant ou plus tard pour permettre aux différents points d'être dimensionnés comme sur l'écran *Plot of Measurements* (voir figure 18). Les champs *Plot Size* sont utilisés pour dimensionner l'écran *Plot Measurements* sur le moniteur de l'utilisateur.

The screenshot shows the 'Multi-plot Main' window with the following sections:

- Data (Measurements):** Includes fields for Default X-data (BJD_TDB), Y-datasets (14 sets), Detrend Vars (8), Rel. Mag. Reference (10 samples), V. Marker 1 (0.54236), Copy, and V. Marker 2 (0.662182).
- Title and Subtitle:** Radio buttons for 'None' or 'Custom'. Title: 'WASP-12b on UT2016-01-06'. Subtitle: 'Conti (V, 45 sec)'. Position sliders for Top, Middle, Bottom and Left, Center, Right.
- Legend:** Align (Left, Center, Right) and Position (Top, Middle, Bottom) sliders.
- X-Axis Label and Y-Axis Label:** Radio buttons for 'None', 'Column Label', or 'Custom Label'.
- Trim Data Samples:** Head and Tail sliders.
- X-Axis Scaling and Y-Axis Scaling:** Radio buttons for 'Auto' or 'Custom' range. X-width: 0.192988, X-max: 2457393.695665, X-min: 2457393.502677. Y-max: 1.063, Y-min: 0.79.
- Plot Size:** Height: 720, Width: 800.
- Meridian Flip:** Show checkbox, Flip Time: 0.512.
- Fit and Normalize Region Selection:** Show checkbox, Left Trim: 0.202778, Left: 0.54236, Copy, Right: 0.662182, Right Trim: 1.134.
- Other Panels:** Redraw Plot button, Y-data, Ref. Stars.

Figure 12. Ecran Multi-plot Main

Si un retournement au méridien est intervenu, ou s'il y a une interruption dans l'imagerie et que les étoiles se sont déplacées sur le capteur CCD, alors la boîte *Meridian Flip* de l'écran *Multi-Plot Main* sera utilisée pour placer une ligne au milieu de l'intervalle d'interruption où la discontinuité des données est intervenue. La case *Show* devra être cochée et une donnée saisie dans la case *Flip Time* de façon à placer le retournement au méridien à la bonne place sur l'écran *Plot of Measurements*.

G. Traçage de la courbe de lumière

Avant qu'un affichage visuel des données puisse être obtenu via l'écran *Plot of Measurements* (figure 18), l'écran *Multi-plot Y data* (figure 13) doit être paramétré. C'est le principal écran qui détermine où et comment les données seront tracées.

Data Set	New Col	Plot	Auto Scale	X-data	Input in Flag	Y-data	Auto Error	Function	Y-operand	Color	Symbol	Lines	Bin Size
1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	default	<input type="checkbox"/>	rel_flux_T1	<input type="checkbox"/>	none		blue	dot	<input type="checkbox"/>	1
2	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	default	<input type="checkbox"/>	rel_flux_T1	<input type="checkbox"/>	none		red	dot	<input type="checkbox"/>	1
3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	default	<input type="checkbox"/>	rel_flux_C2	<input type="checkbox"/>	none		black	dot	<input type="checkbox"/>	2
4	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	default	<input type="checkbox"/>	rel_flux_C3	<input type="checkbox"/>	none		dark gre...	dot	<input type="checkbox"/>	2
5	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	default	<input type="checkbox"/>	rel_flux_C4	<input type="checkbox"/>	none		purple	dot	<input type="checkbox"/>	2
6	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	default	<input type="checkbox"/>	rel_flux_T5	<input type="checkbox"/>	none		orange	dot	<input type="checkbox"/>	2
7	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	default	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>	none		green	dot	<input type="checkbox"/>	2
8	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	default	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>	none		light blue	dot	<input type="checkbox"/>	2
9	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	default	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>	none		black	dot	<input type="checkbox"/>	2
10	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	default	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>	none		teal	dot	<input type="checkbox"/>	1
11	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	default	<input type="checkbox"/>	AIRMASS	<input type="checkbox"/>	none		teal	line	<input type="checkbox"/>	1
12	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	default	<input type="checkbox"/>	tot_C_ents	<input type="checkbox"/>	none		brown	dot	<input type="checkbox"/>	1
13	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	default	<input type="checkbox"/>	SkyPixel_T1	<input type="checkbox"/>	none		yellow	dot	<input type="checkbox"/>	1
14	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	default	<input type="checkbox"/>	Width_T1	<input type="checkbox"/>	none		light blue	line	<input type="checkbox"/>	1

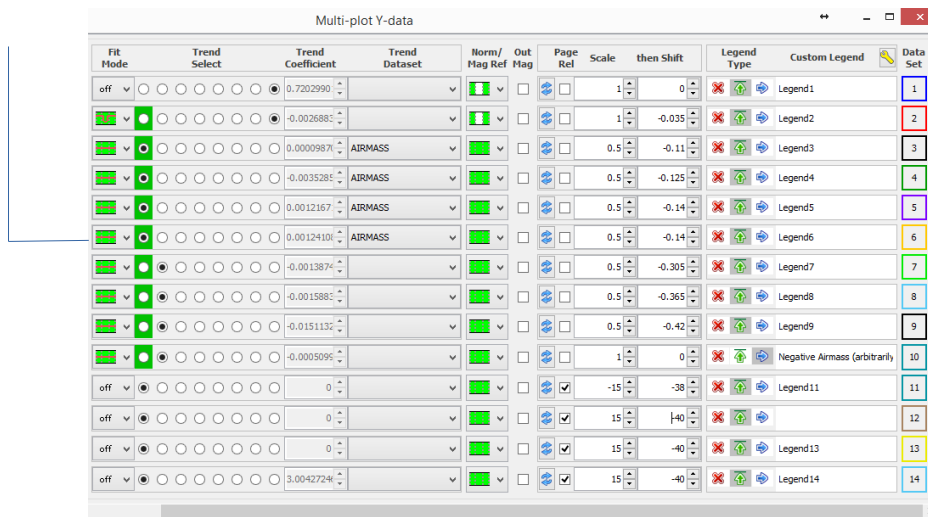


Figure 13. Multi-plot Y Screen

Ce qui suit constituent les paramètres clés et les sélections pour l'écran *Multi-Plot Y*:

La colonne *Plot* est utilisée pour sélectionner si une donnée particulière doit être tracée.

La colonne *Y-data* est utilisé pour sélectionner quel ensemble de données (à savoir quelles colonnes de la table des mesures) est associé avec quel ligne.

La colonne *Bin-Size* indique le nombre de points dans l'ensemble de données associé qui seront regroupés en un seul point. Typiquement, seul le flux relatif associé avec les comps (rel_flux_Ci) est regroupé. Notez que le regroupement est dans un but d'affichage uniquement, les données ne sont pas modifiées dans la table de mesures.

La colone *Fit Mode* est utilisée pour sélectionner le type d'ajustage qui doit être appliqué à l'ensemble de données ainsi que l'amplitude des données (indique par la zone verte) qui sera appliqué à l'ajustage. Ainsi, comme vu dans la figure 18, les points des lignes de données de variation relatif du flux en *T1* sont affichés sans ajustage; **tandis que le deuxième point est un ajustage des mêmes données utilisant un modèle de transit**. Finalement, les variations relatifs de flux de 3 comps sont ajustées avec un modèle linéaire (comme on verra plus tard, l'uns des comps, C5 a été dé sélectionnée après que l'on ait constaté des erreurs résiduelles significatives). Le pourquoi des 3 derniers tracés en mode linéaire est que il est assumé qu'il ne devrait pas y avoir de variations relatives dans la brillance des comps pendant toute la session d'imagerie, contrairement au flux relatif *T1* où il est assumé qu'il reflète un creux du à un transit exoplanétaire.

La colonne *Trend Select* sert à deux choses. D'abord, elle reflète le *Detrend* paramètres qui sont appliqués aux *Fit Mode* associés, lesquelles eux-même seront sélectionnés sur l'écran *DataSet 2 Fit* (figure 14). Les paramètres *Detrend* actifs sont indiqués en vert.

Deuxièmement, la sélection d'un paramètre de *Detrend* particulier reflètera son coefficient de tendance et le type de données de déformation associé (par exemple, AIRMASS).

La colonne *Norm/Mag Ref* indique la plage de données utilisée pour normaliser l'ensemble de données. Dans cet exemple, figure 13, le flux relatif de *T1* est normalisé d'après les données hors

transit – données à gauche du début de transit (*ingress point*) et à droite de la fin de transit (*egress point*). Ces deux derniers points sont positionnés par les valeurs des champs *Fit* et *Normalized Region Selection* sur l'écran *Multi-Plot Main* (figure 12).

Lorsque la colonne *Page Rel* est cochée, elle indique que les valeurs des colonnes *Scale* et *Shift* devraient être interprétées comme le pourcentage d'amplitude de *Y-range*. Non coché, cela veut dire que les valeurs des colonnes *Scale* et *Shift* sont des nombres absolus appliqués à *Y-range*. Les valeurs des colonnes *Scale* et *Shift*, avec celles de *Y-min* et *Y-max* dans l'écran *Multi-Plot Main*, sont utilisées pour positionner proprement les différents points sur l'écran *Plot of Measurements*. On doit noter que la ligne de données représente le flux relatif de T1 (la première ligne sur la figure 13) doit toujours avoir une valeur *Scale*=1. Ceci parce que ces données peuvent être utilisées par d'autres programmes d'ajustement et ne doit donc être dimensionné.

L'écran de configuration des jeux de données 2 (Figure 14) s'ouvre automatiquement chaque fois qu'il y a un ajustement de transit sélectionné pour un ensemble de données (dans ce cas, Ensemble de données 2) dans la colonne *Fit Mode* sur l'écran *Multi-Plot Y* (Figure 13). Les entrées utilisateurs suivantes sur l'écran *Data Set 2 Fittings* effectuées, affectent la courbe de lumière:

Period – saisir la période orbitale depuis <http://exoplanets.org/>; dans le cas de WASP-12b 1.09142245 jours.

Paramètres étoile hôte – Saisir le type spectral (Sp.T) de l'étoile hôte; uniquement pour estimer le rayon R^* de celle-ci, dont on en déduira le rayon orbital de l'exoplanète. Dans l'exemple, $R^*=1,630$ issu de <http://exoplanets.org/>.

Quad LD U1 et Quad LD U2 – sont les facteurs d'assombrissement du limbe stellaire de l'étoile hôte, associé au filtre utilisé. Ces valeurs peuvent être trouvées en utilisant l'outil de calcul du coefficient d'obscurcissement du limbe à <http://astroutils.astronomy.ohio-state.edu/exofast/limbdark.shtml>. Dans cet exemple, pour WASP-12b les coefficients sont 0.39056084 et 0.3026992. Notez qu'ils sont placés dans la colonne Prior Center et verrouillés.

La valeur de AIRMASS Prior Center doit être initialisée à 0.0 dans la plupart des cas.

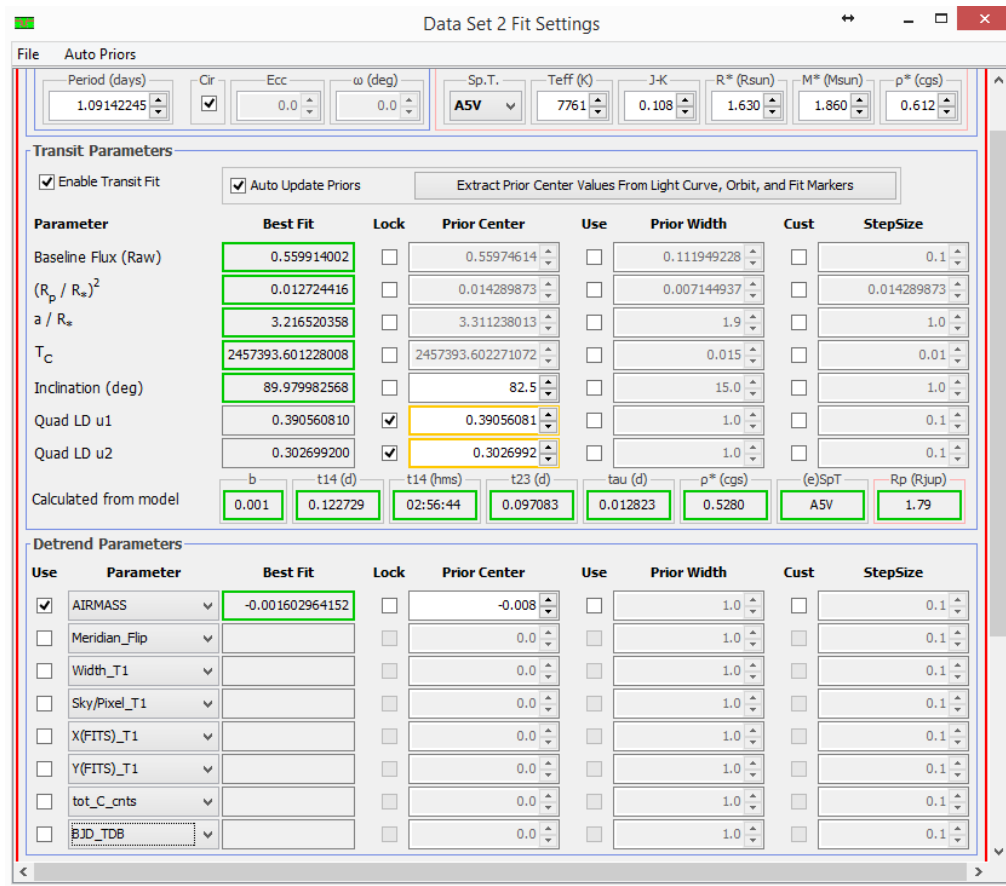


Figure 14. Ecran Data Set 2 Fit Settings

Les valeurs *Y-min* et *Y-max* sur l'écran *Multi-Plot Main* peuvent être ajustées pour afficher les portions désirées de la table des mesures sur le graphique, aussi comme mentionné précédemment, il est préférable de sélectionner *Auto-X-range* sous *X-Axis Scaling* sur l'écran *Multi-Plot Main* pour afficher la totalité des *X-values*.

Il est possible de voir comment l'ajustement est amélioré en appliquant différents paramètres *Detrend*. Le plus commun étant *AIRMASS*. D'autres paramètres *Detrend* peuvent aussi être choisis. Si un retournement au méridien ou un gap dans la collection de données est intervenu, déplaçant les étoiles sur le capteur CCD, alors le paramètre *Meridian_Flip* peut aussi être sélectionné (notez que si ceci est fait, la sélection de *Flip Time* et sa valeur doit se faire dans l'écran *Multi-Plot Main*). Une bonne règle de base pour savoir si un paramètre *Detrend* est effectif, c'est de voir la valeur de *bayesian Information Criterion (BIC)*. Si elle diminue de plus de 2, alors le paramètre devrait être sélectionné. Si elle diminue de moins de 2 ou augmente, le paramètre n'est pas pertinent.

Finalement, l'écran *Multi-Plot Reference Star Setting* (Figure 15) est utilisé pour désélectionner ou sélectionner quelles étoiles comp's l'utilisateur veut inclure dans le modèle ajusté. Ceci est utile s'il est déterminé après avoir visionné un flux relatif d'une étoile particulière dans l'écran *Plot of Measurements* (Figure 18) que ses points de données ne suivent pas un ajustement linéaire, c'est une indication qu'on est probablement en présence d'une étoile variable. Dans notre exemple, il a été déterminé que l'étoile comp C5 a un grand nombre d'erreurs résiduelles. Aussi elle a été désélectionnée. Lorsque celle-ci a lieu, l'identifiant de l'étoile C5 est changé en T5 à la fois sur l'écran décrit en figure 16, et sur l'écran *image Display* (voir figure 17). Sa case de sélection dans la figure 13 a été décochée, ce faisant son tracé n'apparaît plus dans la figure 18.

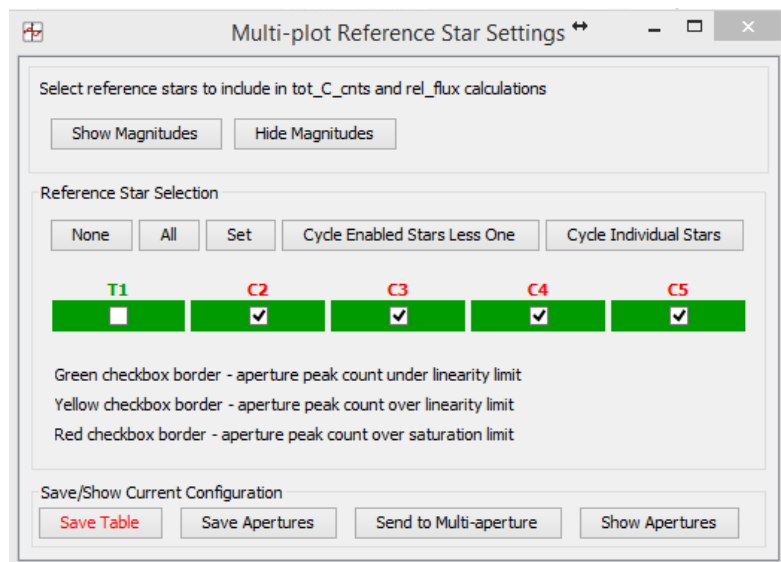


Figure 15. Ecran Multi-plot Reference Star Settings

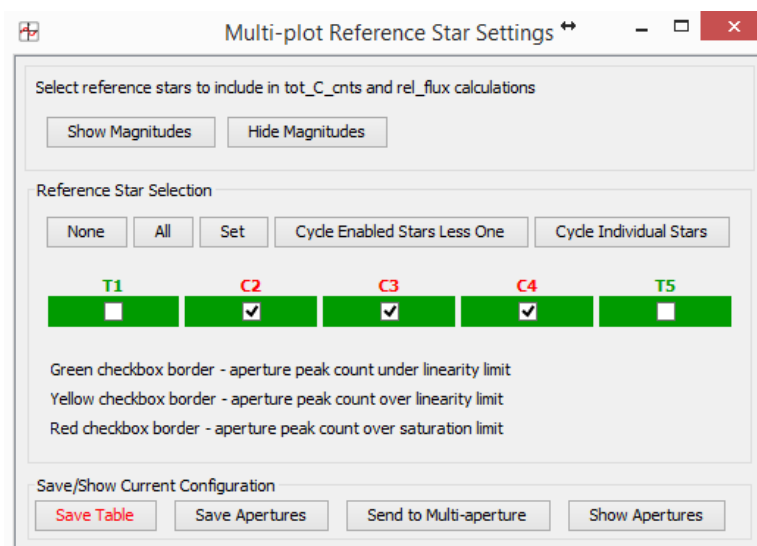


Figure 16. Ecran Multi-plot Reference Star Settings après que C5 ait été désélectionné.

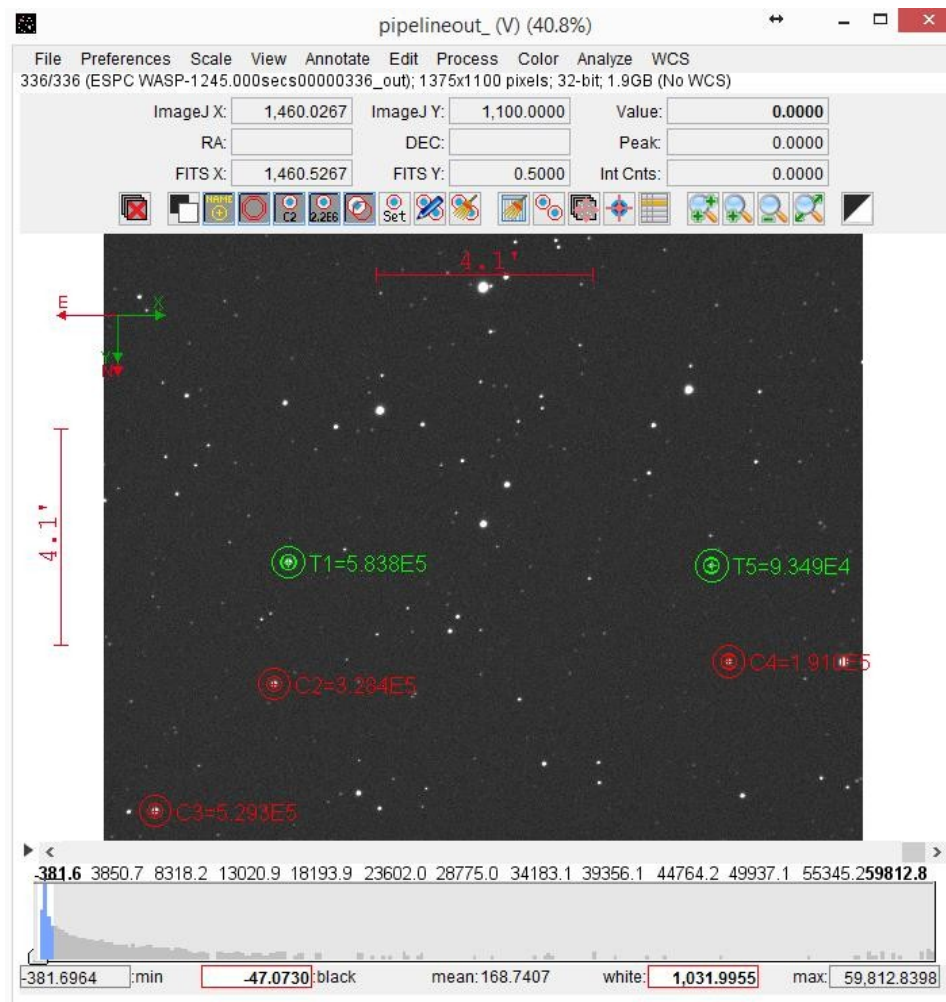


Figure 17. Ecran Images Display mis à jour montrant C5 changé en T5

Notez que les données de C5 ne sont pas incluses dans le modèle ajusté, mais elles sont toujours présentes dans la table des mesures.

Les paramètres dans les figures 12-14 et 16 produisent la courbe de lumière et autres tracés comme décrit dans la figure 18

La figure 19 est un exemple d'un modèle d'exoplanète basé sur les données collectées par l'astronome amateur Paul Benni pour Wasp-76b. Elle montre comment le paramètre *Meridian_Flip Detrend* a été utilisé pour prendre soin d'un décalage dans les points de données causé par la cible et les comps situés sur une zone différente du capteur CCD après que le retournement au méridien soit intervenu.

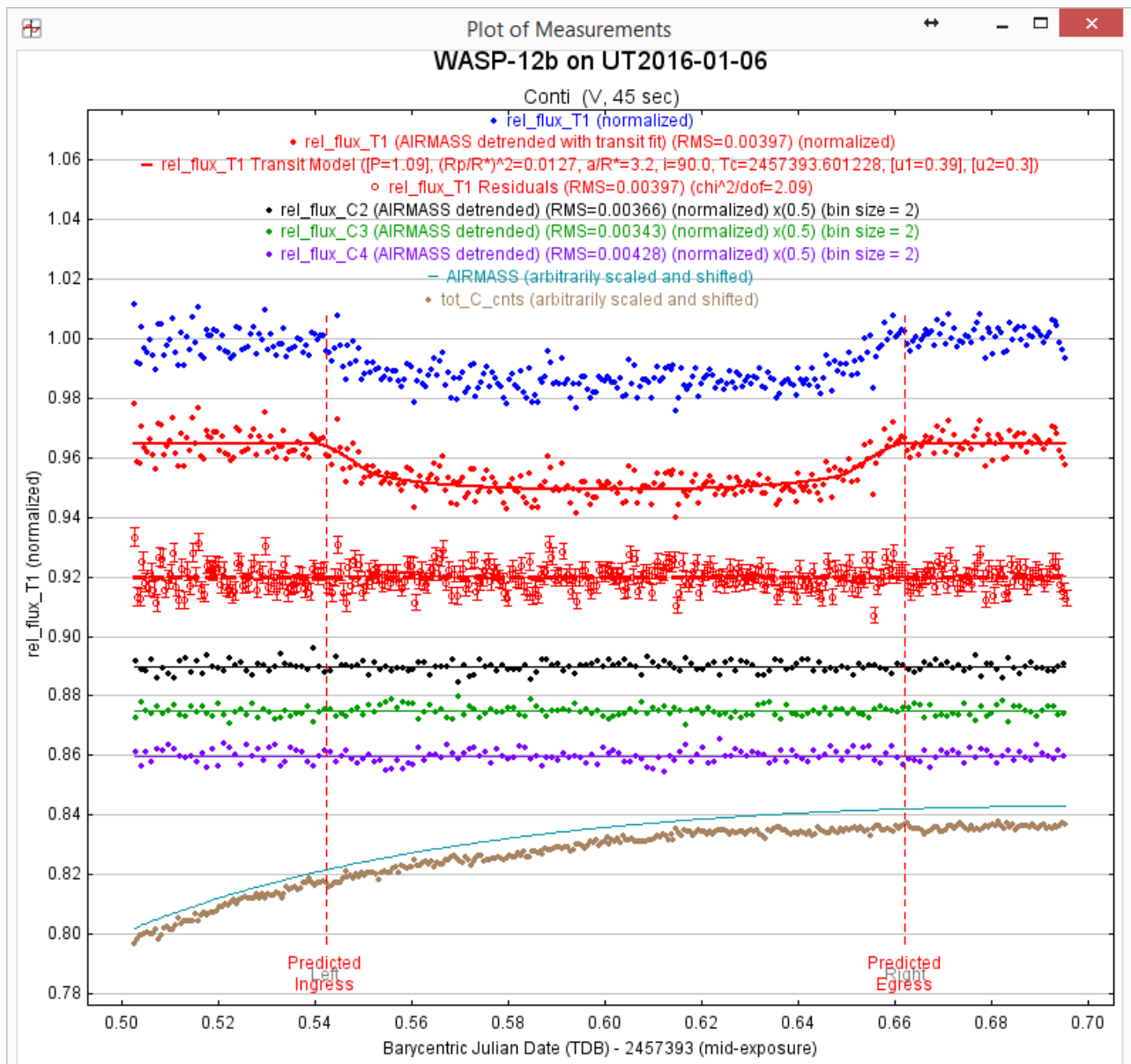


Figure 18. Plot of Measurements Screen

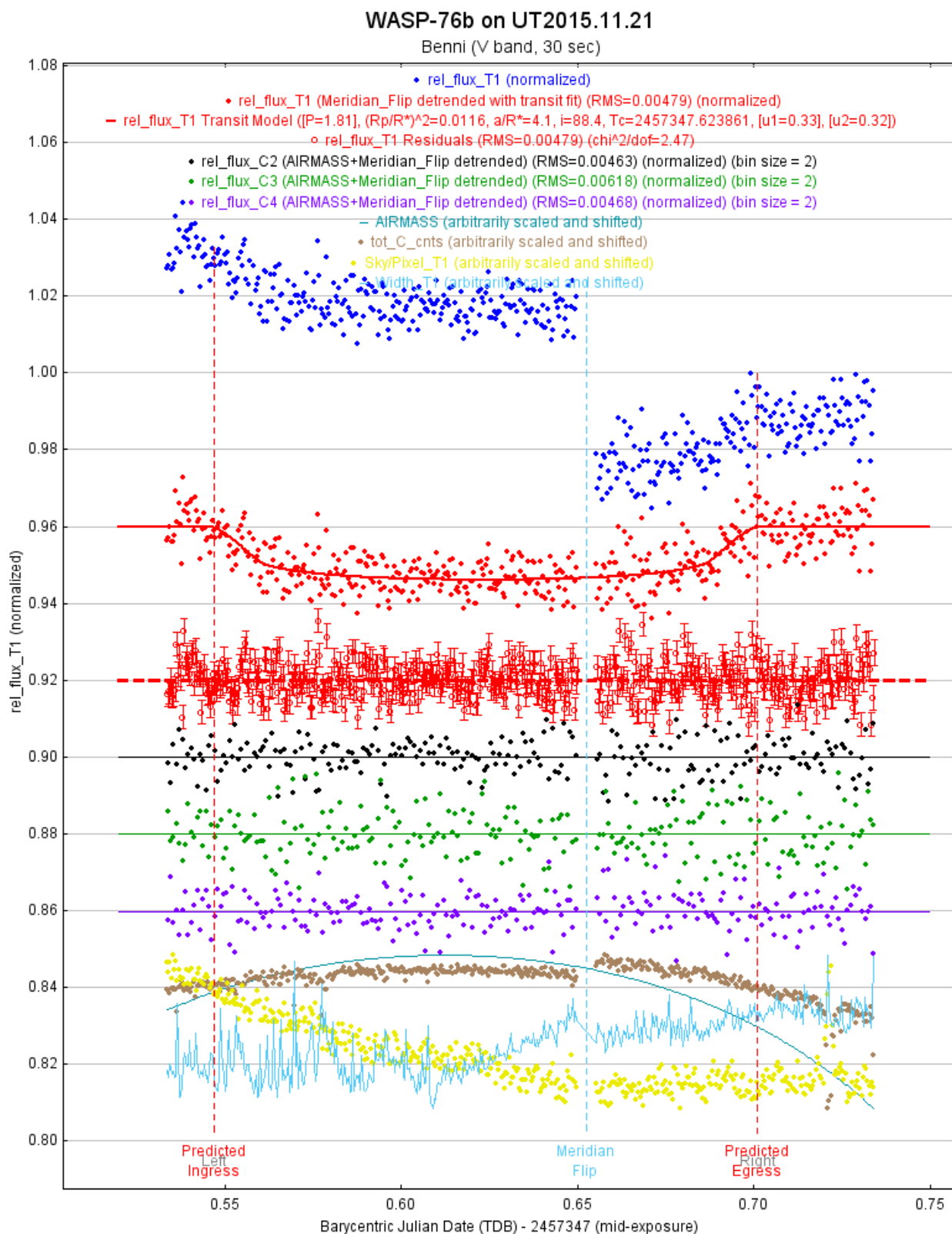


Figure 19. Exemple d'utilisation du paramètre Meridian_Flip Detrend

H. Sauvegarde des données du modèle

Puisque tous les modèles précédents et *detrending* ne changent pas la table des mesures, l'utilisateur serait avisé de sauver le status courant de celles-ci et des paramètres des autres modèles

d'ajustement par *File* → *Save amm* ou *File* → *Save all (with options)* depuis l'écran *Multi-plot Main*.

I. Optimisation du modèle

Avec les diverses données que l'observateur d'exoplanètes peut modifier qui peut affecter le modèle pour un ensemble de données, plusieurs questions se posent:

1. Quelles variables doivent être modifiées ?
2. Dans quel ordre ?
3. A quel moment le modèle est-il optimal ?

Afin de répondre à ces questions, suivez les conseils suivants. Ils ont pour objet d'optimiser un transit complet et non pas un transit partiel:

1. Etablir un premier modèle en sélectionnant les étoiles comps et les tailles d'ouvertures/anneaux suggérées plus tôt dans ce guide, avec *AIRMASS* comme seul paramètre *Detrend*. Si un retournement au méridien a été fit, alors le paramètre *Meridian_Flip* doit être activé tout au long des étapes ultérieures. Notez le RMS de la courbe de lumière (voir Figure 14).
2. Utilisez l'écran *Multi-Plot Reference Star Settings* (voir Figure 15) pour déterminer les effets sur le RMS de la suppression de différentes étoiles comps. SI le RMS décroît lorsque'une étoile comps donnée est désélectionnée, alors conservez-la, comme cela a été fait avec C5 dans l'exemple en Figure 16.
3. Avec la sélection comme ci-dessus d'étoiles comps et *AIRMASS* comme seul paramètre *Detrend* (plus *Meridian_Flip* éventuellement), changez les rayons d'ouverture/anneaux en les augmentant et ensuite et les diminuant, relancez *Multiple Aperture* (voir Section VII.C) pour chaque combinaison et ensuite déterminez les effets sur le RMS pour chacune.
4. Répétez l'étape 2 sur ces nouveaux rayons pour aboutir au meilleur RMS. En plus de la valeur RMS résultante, enregistrez la valeur BIC qui convient avec le meilleur RMS (voir figure 14).
5. Déterminez les effets des différents paramètres *Detrend*. D'abord, supprimez le paramètre *AIRMASS* et regardez si la valeur BIC augmente d'au moins 2 ou plus. Dans ce cas, gardez le paramètre *AIRMASS*. Ensuite, ajoutez les paramètres *Detrend* suivants, un à la fois et observez les changements de la valeur BIC:
 - a. *Width_T1*,
 - b. *Sky/Pixel_T1*,
 - c. *X(FITS)_T1*,
 - d. *Y(FITS)_T1*,
 - e. *tot_C_cnts*,
 - f. *time* (e.g., *BJD_TDB*),

g. CCD-TEMP.

Si la valeur de BIC décroît de plus de 2 pour chacun de ces paramètres, gardez le.

6. Si plus de deux paramètres *Detrend* sont sélectionnés selon l'étape 5, essayez d'en éliminer, une à la fois pour confirmer que la valeur de BIC augmente de 2 ou plus. Sinon désélectionnez le.
7. En utilisant les paramètres *Detrend* retenus, répétez l'étape 2 pour voir les effets sur le RMS en supprimant une ou plusieurs toiles comps.

On doit noter que parachevant toutes les étapes ci-dessus est optionnel. Cependant, si les résultats du modèle sont à fournir à une équipe scientifique, on doit transférer à celle-ci toutes les images brutes calibrées en vue de leur analyse détaillée.

VIII. Données pour programme externe

Pour certaine campagne de recherche d'exoplanète, l'observateur doit pouvoir fournir certaines données pour utilisation dans des programmes externes. L'exemple ci-dessous montre comment un fichier peut être créé pour un programme global d'ajustement qui requière pour chaque point de données: son heure BJD_TDB, le flux normalisé de l'étoile cible, l'erreur sur flux relatif normalisé de l'étoile cible et les valeurs de chaque paramètre *Detrend* utilisé dans le modèle AIJ.

Voilà comment un tel fichier:

Cliquez sur la flèche bas dans la colonne *New Col* pour le groupe de données représentant le flux relatif normalisé de l'étoile cible (dans l'exemple utilisé, ce devrait être la première ligne dans la Figure 13). Une fenêtre pop-up s'ouvre. Faites les saisies comme sur la figure 20.

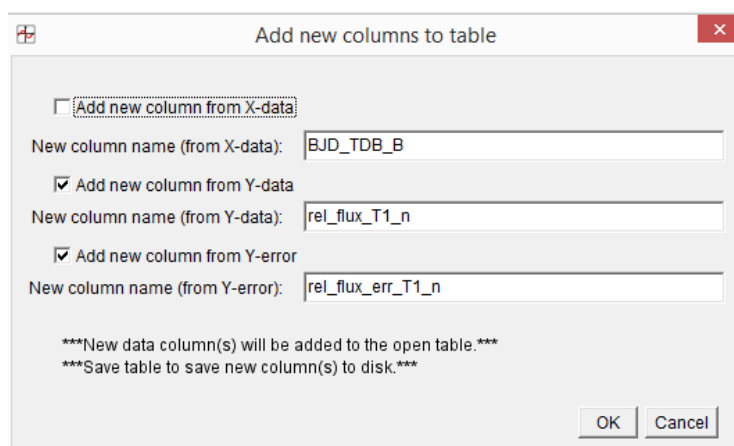


Figure 20. Ecran d'ajout de nouvelles colonnes à la table de mesures.

Lorsque OK est pressé, deux nouvelles colonnes sont ajoutées à la table des mesures. Ces nouvelles colonnes ajoutent pour chaque image le flux relatif normalisé de l'étoile cible et l'erreur de flux relatif normalisé de l'étoile cible.

Finalement, pour générer le fichier contenant ces informations faites *File → Save data subset to file ...* depuis l'écran *Multi-Plot Main*.

L'écran *Save Data Subset* apparaît (figure 21) et les saisies sont faites comme suit. Dans ce cas, la valeur *BJD_TDB*, le flux relatif normalisé de l'étoile cible, l'erreur de flux relatif normalisé de l'étoile cible, les valeurs de *AIRMASS* sont sélectionnées. *AIRMASS* est inclus parce que c'est le paramètre *Detrend* utilisé dans le modèle AIJ.

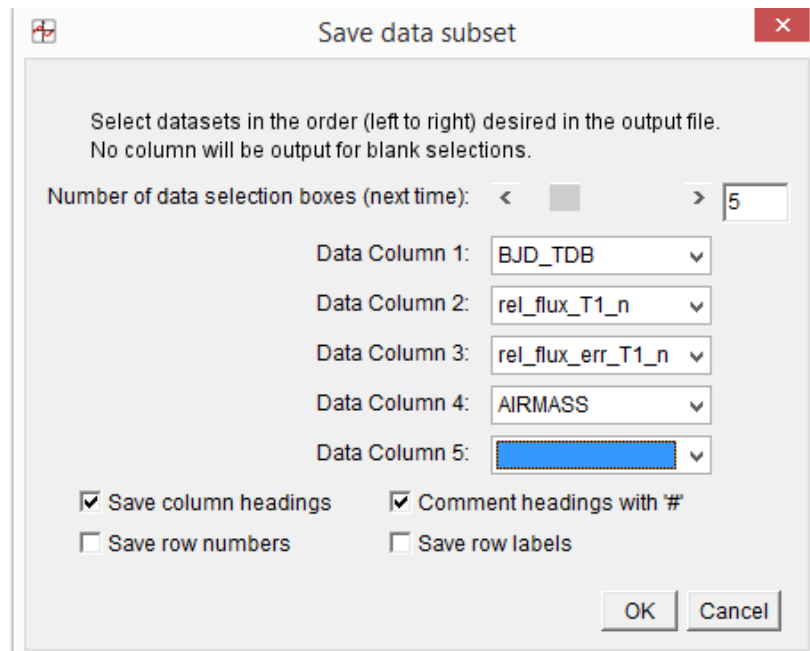


Figure 21. Ecran Save Data Subset

Lorsque OK est pressé, un fichier séparé est créé qui contient ces valeurs. Note: les valeurs pour Bin Size, Scale, Shift de l'écran *Multi-Plot Y* (voir figure 13) affecte les calculs du flux relatif de T1 dans cet exemple. Si aucune valeur n'a été changée, ré initialisez les à Bin Size=1, Scale=1, Shift=0 avant de cliquer sur la flèche de *New Col* dans l'exemple ci-dessus, sauf si de tels modifications sont intentionnelles (par exemple, si on veut regrouper des points de données).

IX. Résumé

Comme il a été dit dans l'introduction, ce guide avait pour but d'être une pratique, pas à pas de la calibration d'images, de photométrie différentielle, de tracé de courbe de lumière et de modélisation de transit exoplanétaire avec AIJ. Les utilisateurs sont encouragés à contacter l'auteur à l'adresse Email suivante pour tout suggestion de modifications sur les parties obscures et demanderaient plus d'explication.

dennis@astrodennis.com.

Remerciements

L'auteur voudrait remercier spécialement l'auteur de AIJ, Dr. Karen A. Collins, pour ses suggestions et commentaires à propos de ce guide.

Appendix A: Observation Worksheet

		Exoplanet: WASP-12b		
		Observer: Dennis Conti		
Item	Host Star/Exoplanet Information:	(click here)		
1	RA:	06:30:32.79		
2	Dec:	29:40:20.4		
3	Period (days):	1.0914		
4	R*:	1.63		
5	T _{eff} :	6300		
6	V mag:	11.7		
Suggested range of comp stars:		11.26 to 12.45 mag		
7	Link to Reference Paper (optional):	https://arxiv.org/abs/1512.00464		
8	Date of Observation (UT):	01/5-6/2016		
		BJD_TDB		
9	Predicted Ingress:	2457393.53948		
10	Predicted Egress:	2457393.66431		
	Predicted midpoint:	2457393.60190		
11	Model fit midpoint (T _c) in BJD_TDB:	2457393.60123		
		Approximate difference: 1.0 minutes		
Observing Location:				
12	Latitude:	38:55:48.51 N		
13	Longitude:	76:29:17.78 W		
14	Altitude (m):	0		
15	Aperture (mm):	280		
16	Focal length (mm):	3010		
17	Make/model of CCD Camera:	SX694M		
18	Gain (e-/ADU):	0.3		
19	Readout noise (e-):	5.0		
20	Dark current (e-/pixel/sec):	0.003		
21	Point of where CCD goes non-linear (ADUs):	45,000		
		X	Y	
22	No. of pixels (unbinned):	2750	2200	
23	Pixel size (microns -unbinned):	4.54	4.54	
24	Binning used for this observation:	2	2	
25	Exposure time (secs):	45		
26	Filter used:	V		
Limb darkening coefficients:		(click here)		
27	Quadratic LD u1:	0.39056081		
28	Quadratic LD u2:	0.3026992		
Image scale (arcsec/pixel):		0.62	0.62	
FOV (arcmin):		14.26	11.41	
29	FWHM (arcseconds):	2.68		
FWHM (pixels):		4		
Initial Settings:				
30	FWHM pixel multiplier:	3		
Aperture radius:		13		
31	Inner annulus radius:	14		
Outer annulus radius:		29		
Final Settings:				
32	Aperture radius:	13		
33	Inner annulus radius:	14		
34	Outer annulus radius:	29		
		# of Science Images:		
35	Original #:	336	Final #:	336
36	Images <u>not</u> used:			