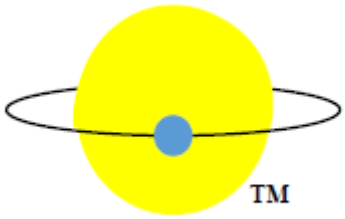
Guide pratique pour l'observation des exoplanètes

Révision 5.3

Septembre 2024



Par

Dennis M. Conti

dennis@astrodennis.com

www.astrodennis.com

Traduction française de ce guide
effectuée par Bernard Candela
(bernardcandela999@gmail.com)

© Copyright 2024 par Dennis M. Conti

TABLE DES MATIERES

1. Introduction 3
2. Contexte 4
3. Observation des exoplanètes 5
4. Instrumentation 6
4.1. Monture 6
4.2. Ensemble du tube optique (OTA) 8
4.3. Appareil photo d'imagerie 8
4.4. Autoguidage 9
4.5. Filtres 10
5. Préliminaires 11
5.1. Collection d'informations 11
5.2. Considérations pour sélectionner une exoplanète cible 11
5.3. Prédictions de retournement de méridien 12
6. Meilleures pratiques 12
6.1. Phase de préparation 12
6.1.1. Répertoires de fichiers 12
6.1.2. Stabilisation du système d'imagerie à la température appropriée 13
6.1.3. Génération de fichiers champs plats 13
6.1.4. Autoguidage 13
6.2. Phase d'imagerie 13
6.2.1. Choix du binning 13
6.2.2. Choix du temps d'exposition 14
6.2.3. Synchronisation temporelle 15
6.2.4. Système horaire 15
6.2.5. Capture d'images 15
6.3. Phase d'étalonnage des images 16
6.3.1. Fichiers d'étalonnage 16
6.3.2. Techniques de champs plats 16
6.3.3. Création de fichiers maîtres 18
6.3.4. Mise à jour des informations de l'en-tête FITS 18
6.4. Phase de photométrie d'ouverture et de photométrie différentielle 19
6.4.1. Photométrie d'ouverture 19
6.4.2. Photométrie différentielle 20

7. Utilisation d'AstroImageJ 20
7.1. Chargement d'images dans AIJ 21
7.2. Étalonner les images scientifiques 23
7.2.1. Spécification des Images Scientifiques et des Fichiers d'Étalonnage 25
7.2.2. Mise à jour des informations d'en-tête FITS 25
7.2.3. Commencer le Processus d'Étalonnage 28
7.2.4. Fonctionnement en Temps Réel 29
7.2.5. Options supplémentaires 29
7.3. Chargement des images d'étalonnage 29
7.4. Résolution de plaques à l'aide d'AIJ 29
7.4.1. Alternatives à Astrometry.net 30
7.4.2. Informations sur l'astrométrie 31
7.5. Effectuer une Photométrie Différentielle 31
7.5.1. Sélectionner les Paramètres d'Ouverture et d'Anneau Appropriés 31
7.5.2. Sélectionnez les Étoiles de Comparaison et Commencez la Photométrie Différentielle 34
7.5.3. Traitement des Images mal Alignées 37
7.5.4. Faire face à un Retournement au Méridien 38
7.5.5. Stocker et Récupérer plus tard les Emplacements des Étoiles Cibles et des Étoiles de Comparaison 38
7.6. Préparez-vous à l'Ajustement du Modèle 39
7.7. Conduire un Ajustement du Modèle 40
7.8. Tracé de la Courbe de Lumière 42
7.9. Écran des Ajustements des Jeux de Données 45
7.10. Enregistrement des Données du Modèle 53
7.11. Optimisation Manuelle d'un Ajustement de Modèle 53
7.12. Entrées dans des Programmes Externes 54
8. Résumé 56
REMERCIEMENTS 57
RÉFÉRENCES 57
Annexe A : 58

1. Introduction

Il s'agit d'un guide étape par étape pour l'observation des exoplanètes qui est destiné la fois au nouvel observateur d'exoplanète, ainsi que pour l'observateur d'exoplanète plus expérimenté. Pour le premier, il est souhaitable que l'utilisateur ait une certaine expérience du ciel profond ou de l'imagerie des étoiles variables. L'observateur d'exoplanète plus expérimenté peut trouver ce guide utile comme rafraîchissement sur les «meilleures pratiques», ainsi qu'un guide pratique pour l'utilisation d'AstroImageJ (AIJ) pour le traitement d'image et la modélisation des transits d'exoplanète. AIJ est un logiciel gratuit qui est un package tout-en-un pour l'étalonnage d'image, la photométrie différentielle et la modélisation d'exoplanète. AIJ est devenue la norme de facto pour l'analyse et la modélisation des exoplanètes pour les professionnels et les astronomes amateurs avancés.

Ce guide mènera l'utilisateur à travers toutes les phases d'observation des exoplanètes, de la sélection des exoplanètes cibles appropriées à la modélisation des transits d'exoplanète. Des transits d'exoplanètes réelles sont utilisés pour démontrer les techniques et les capacités d'AIJ pour la modélisation des transits d'exoplanète.

Les liens vers la dernière version de ce guide, ainsi que les fichiers d'étalonnage, les images scientifiques et le fichier de configuration de tracé AIJ qui sont utilisés dans les exemples AIJ de la section 7, se trouvent sur http://www.asastrodennis.com.

Dans diverses sections ci-dessous, des références sont faites à un guide d'utilisation d'AIJ distinct qui a été rédigé par le développeur d'AIJ et décrit plus en détails et plus d'options sur l'utilisation de l'AIJ que ce qui est couvert dans ce guide. La dernière version de ce guide de l'utilisateur AIJ et un lien vers le forum d'AIJ se trouvent sur le site Web d'AIJ: http://www.astro.louisville.edu/software/astroimagej/. Une description approfondie des caractéristiques d'AIJ se trouve dans l'article suivant : https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-3881/153/2/77/pdf.

Récemment, il y a eu un besoin accru d'observations au sol pour soutenir les enquêtes All-Sky d'exoplanètes tels que TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite) (Ricker et al., 2015). Pour de telles enquêtes, l'un des principaux objectifs des observations au sol est d'aider à distinguer les véritables transits d'exoplanète de faux positifs (par exemple, en raison d'une binaire à proximité). Par conséquent, un document compagnon de ce guide a été préparé qui décrit les méthodes et les meilleures pratiques pour détecter les faux positifs. La dernière version de cet article est disponible sur: www.astrodennis.com/falsepositivetection.pdf.

Ce guide utilisera les définitions suivantes de «exoplanète candidate» et «exoplanète confirmée», comme indiqué dans le glossaire du Guide TESS Science Writers (NASA 2018):

> **Exoplanète candidate :** un signal dans les données qui présente les caractéristiques d'une exoplanète en transit mais qui n'a pas encore été confirmée.
>
> **Exoplanète confirmée :** un signal dans les données qui présente les caractéristiques d'une exoplanète en transit et qui a été confirmée, généralement avec des données supplémentaires de sondages complémentaires ou des analyses statistiques des données existantes.

Enfin, bien que ce guide soit écrit avec les astronomes amateurs à l'esprit, les meilleures pratiques et méthodes décrites ici sont également applicables aux astronomes professionnels ayant accès aux télescopes sous-métriques.

2. Contexte

En 1995, 51 Pegasi B a été la première exoplanète détectée autour d'une étoile de la séquence principale. À ce jour, plus de 5 700 exoplanètes ont été confirmées par Kepler, TESS et d'autres observatoires spatiaux et au sol.

Les astronomes amateurs détectent avec succès des exoplanètes depuis au moins une décennie et le font avec une précision incroyable! En outre, ils ont pu faire de telles observations avec le même équipement qu'ils utilisent pour créer des images fabuleuses du ciel profond ou des courbes de lumière des étoiles variables.

Plusieurs exemples existent d'astronomes amateurs fournissant des données précieuses à l'appui de la recherche sur les exoplanètes. En 2004, une équipe d'astronomes professionnels / amateurs a collaboré au projet XO, qui a entraîné la découverte de plusieurs exoplanètes. Le programme Kelt (Pepper et al., 2007) a utilisé un réseau mondial d'astronomes amateurs et de petits collèges, ainsi que des astronomes professionnels, pour effectuer des observations de suivi des exoplanètes candidates transitant devant des étoiles lumineuses. En 2016, un réseau d'astronomes amateurs a soutenu une étude de Hubble sur quelques 15 exoplanètes en effectuant des observations dans les longueurs d'onde optique, tandis que Hubble étudiait ces mêmes exoplanètes dans le quasi-infrarouge (Conti, 2015 et Motta, 2017). Plus récemment, les astronomes amateurs ont joué un rôle important dans le programme d'observation de suivi de TESS (TFOP). De telles observations d'astronomes amateurs ont contribué à confirmer les exoplanètes candidates, ainsi qu'à affiner les éphémérides d'exoplanètes déjà connues. Le simple fait que les astronomes amateurs peuvent modéliser avec précision les transits des exoplanètes existantes signifie qu'il est également théoriquement possible pour eux de découvrir de nouvelles exoplanètes! Par exemple, en détectant les variations du temps de transit d'une exoplanète connue (une technique appelée «variations du temps de transit» ou TTV), les astronomes amateurs peuvent aider à détecter l'existence d'une autre planète en orbite autour de l'étoile hôte.

Récemment, l'AAVSO (American Association of Variable Star Observers) a développé une base de données pour archiver les observations des astronomes amateurs d'exoplanètes confirmées pour fournir une base de référence à long terme pour le raffinement de leurs éphémérides, ainsi que pour aider à la détection des TTV (Voir https://app.aavso.org/exosite/doc). Cette base de données est également utilisée par le programme d'Observation d'Exoplanètes de la NASA (NASA, 2022) pour stocker de telles observations par des citoyens scientifiques.

La formalisation des techniques de «meilleures pratiques» pour la détection des exoplanètes par les astronomes amateurs a commencé en 2007 avec la publication par Bruce Gary de «*Exoplanet Observing for Amateurs*». Dans le même temps, Gary a commencé un effort pour archiver les observations d'exoplanètes d'autres astronomes amateurs. Cette archive, l'Amateur Exoplanète Archive (AXA), a ensuite été transférée au projet de Exoplanète Transit Database (ETD), une archive en ligne parrainée par la Czech Astronomical Society (http://var2.astro.cz/etd/contribution.php) .

Avec les derniers télescopes spatiaux tels que TESS et JWST (Télescope spatial James Webb) (NASA, 2017), la nécessité d'une participation des astronomes amateurs à la recherche d'exoplanètes ne fera qu'augmenter.

Afin de contribuer à la science des exoplanètes, les observations des astronomes amateurs exigent une approche beaucoup plus rigoureuse que celle requise pour des efforts d'astronomes amateurs plus typiques, tels que le ciel profond ou l'imagerie planétaire. Ce guide décrit les meilleures pratiques qui ont évolué à ce jour pour mener une telle recherche de qualité d'observation des exoplanètes.

La section 3 fournira un aperçu de l'observation des exoplanètes. La section 4 discutera de certaines des considérations impliquées dans la sélection de l'équipement pour l'observation des exoplanètes. La section 5 examinera les mesures préliminaires à prendre avant l'observation elle-même. La section 6 examinera ensuite les meilleures pratiques impliquées dans une observation d'exoplanète. La section 7 présentera une description détaillée de l'utilisation d'AIJ dans la réduction de l'image d'une exoplanète et la modélisation des transits. Enfin, la section 8 décrira divers scénarios de faux positifs et des méthodes de détection.

3. Observation des exoplanètes

Le concept de base de l'observation des exoplanètes implique de prendre une série d'images du champ entourant l'étoile hôte d'une exoplanète avant, pendant et après les périodes prévues du transit d'une exoplanète devant le disque de son étoile hôte.

Étant donné que la méthode de transit est la technique dominante utilisée par les astronomes amateurs pour effectuer des observations d'exoplanète, ce guide se concentrera sur les techniques d'observation et de modélisation liées à cette méthode. La méthode de transit a été très utile, en particulier pour détecter les «Jupiters chaudes», à savoir les grandes planètes dont les orbites sont proches de leurs étoiles hôtes et où la planète passe directement devant l'étoile du point de vue d'un observateur situé sur Terre. Avec des missions telles que TESS, la méthode de transit est même utilisée pour détecter les planètes de la taille de la Terre et des Super-Terres autour des étoiles froides et brillantes. La méthode de transit repose sur la mesure du flux de l'étoile hôte suspectée (ici également appelée «l'étoile cible»), ainsi que le flux d'une ou plusieurs «étoiles de comparaison» qui sont toutes dans le même champ de vision .

Les transits d'exoplanète durent généralement 2 à 4 heures. Cependant, la conduite d'une observation d'exoplanète implique également de commencer la séance d'imagerie au moins 30 minutes (idéalement 60 minutes) avant le début prévu du transit («pré-ingression») et se poursuivant pendant au moins 30 minutes (idéalement 60 minutes) après les transits attendus («post-égression»). Ces temps «pré-ingression» et «post-égression» sont utilisés pour aider à établir une ligne de base hors transit (OOT). Ainsi, il n'est pas rare qu'une session d'observation d'exoplanète dure 6 heures.

Une technique appelée photométrie différentielle est utilisée pour déterminer les changements de luminosité (flux) de l'étoile hôte de l'exoplanète qui pourraient indiquer un transit d'exoplanète. Cette technique compare la différence relative entre l'étoile hôte et une ou plusieurs étoiles de comparaison (supposées non variables) ou «comp» pendant la session d'imagerie. Étant donné que la différence de luminosité de l'étoile hôte et des étoiles de comparaison sont également influencées par des facteurs communs tels que des nuages minces, la lueur de la lune, la pollution lumineuse, etc., un changement

dans cette différence serait une mesure des effets de la baisse de luminosité de l'étoile hôte due au transit d'une exoplanète devant elle.

Les points de données qui représentent le changement relatif de luminosité de l'étoile sont ensuite utilisés pour modéliser le transit de l'exoplanète. Un modèle de transit « du meilleur ajustement » est ensuite créé à partir de ces points de données. Ce meilleur ajustement donne des estimations de paramètres clés concernant l'exoplanète et son transit. Ces paramètres comprennent :

1. Le carré du rapport entre le rayon de l'exoplanète (R_p) et celui de son étoile hôte ($R*$),
2. Le rapport entre le demi-rayon orbital majeur de l'exoplanète (a) et $R*$,
3. Le point central 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.

Ainsi, en connaissant le rayon $R*$ de l'étoile hôte de l'exoplanète, l'observateur d'exoplanètes peut alors réellement estimer le rayon de l'exoplanète, ainsi que le rayon du demi-grand axe de son orbite.

Cette estimation du rayon d'une exoplanète candidate peut également être un facteur important pour détecter l'un des scénarios de faux positifs, par exemple, si le corps en transit est plus susceptible d'être une étoile secondaire éclipsant une autre étoile plutôt qu'une planète éclipsant son étoile hôte.

4. Instrumentation

Le coût est certainement un facteur à prendre en compte lors du choix du complément d'équipement à utiliser pour l'observation des exoplanètes. Et comme prévu, une précision plus élevée exige un équipement plus coûteux. Ainsi, le choix de l'équipement (et donc la précision associée à cet équipement) est principalement déterminé par des facteurs économiques. Cependant, les astronomes amateurs disposant d'un équipement modeste de l'ordre de celui généralement utilisé pour l'imagerie du ciel profond ont contribué de manière significative à la science des exoplanètes.

Comme on le verra, un thème récurrent dans ce guide est le désir de minimiser le mouvement du champ d'étoiles devant la caméra d'imagerie au cours d'une session d'observation de plusieurs heures.

Ce qui suit décrit les caractéristiques de l'équipement qui affectent le plus la précision d'observation des exoplanètes et aident à réduire les effets des systématiques.

4.1. Monture

Les trois types de montures les plus populaires sont les montures équatoriales allemandes (GEM), les montures à fourche et les montures alt-az (altitude-azimut). Avec les montures alt-az, des corrections continues doivent être effectuées sur trois (3) axes pour maintenir une étoile relativement dans la même position tout au long de la session d'observation. Ces corrections doivent être effectuées en élévation, en azimut et en angle de position. De toute évidence, cela signifie que la précision associée à l'une de ces trois corrections d'axe affectera la capacité globale de l'observateur à minimiser le mouvement des étoiles. Les corrections d'angle de position, par exemple, sont normalement effectuées par un dé rotateur, et la taille du pas incrémental du dé rotateur, ainsi que la cadence de ces corrections, affecteront la précision avec laquelle la chaîne d'images peut pivoter relativement vers la même position de pixel tout au long de la session d'observation.

Les montures GEM sont des montures économiques populaires pour l'imagerie du ciel profond et planétaire. Cependant, les montures GEM nécessitent généralement un retournement au méridien lorsque l'étoile cible passe devant le méridien. Bien que certaines montures GEM puissent continuer à suivre pendant un certain temps après le méridien, les observations qui nécessitent un suivi plus long nécessiteront finalement un retournement du méridien. Un retournement du méridien entraîne trois facteurs susceptibles d'affecter la précision : (1) des points de données précieux sont perdus pendant le temps nécessaire au retournement du méridien ; (2) sans rotation de la chaîne d'imagerie, les étoiles cibles et de comparaison tomberont sur la partie du détecteur de la caméra d'imagerie qui est diagonalement opposée à celle où elles se trouvaient avant le retournement ; et (3) si un guidage hors axe est utilisé, il peut ne pas être possible de trouver une étoile guide appropriée. L'implication de (2) est que le flux d'étoiles augmenterait ou diminuerait artificiellement en raison de leur atterrissage sur une partie d'un donut de poussière qui n'a pas été entièrement corrigé par le champ plat. Même si la chaîne d'images était tournée, il serait pratiquement impossible d'obtenir les étoiles cibles et de comparaison à peu près aux mêmes emplacements de pixels qu'avant le basculement. Il convient de noter que des logiciels tels que AIJ peuvent aider à compenser les effets d'un basculement de méridien, en particulier s'il se produit à mi-transit.

Bien que les montures à fourche soient donc les montures les plus adaptées pour l'observation des exoplanètes en raison de leur capacité à suivre en continu une étoile cible pendant une longue durée sans devoir être interrompues pour effectuer un basculement de méridien, les montures GEM ont été utilisées par les astronomes amateurs et professionnels pour faire des observations d'exoplanètes de haute précision.

Quel que soit le type de monture utilisé, la précision du suivi est également fonction de toute erreur périodique dans les engrenages de la monture. La correction périodique des erreurs (PEC) et l'autoguidage aideront à atténuer ces erreurs périodiques. Il convient de noter que certaines montures actuelles peuvent fonctionner pendant plusieurs minutes avec des erreurs minimes ; cela bien sûr entraine un coût plus élevé.

Les meilleures pratiques associées au fonctionnement de la monture elle-même comprennent :

1. Un alignement de la monture polaire aussi précis que possible (par exemple, à quelques secondes d'arc près du pôle céleste) ;
2. Un équilibre de la monture pour aider à réduire les erreurs en ascension droite ;
3. Dans le cas d'une monture GEM, une réduction du jeu en ascension droite en gardant toujours la monture « lourde vers l'est » – cela aidera à résoudre toute plaque qui pourrait être nécessaire après un retournement du méridien afin de revenir sur la cible ;
4. La minimisation du jeu de déclinaison, ce qui permet de meilleures corrections de la déclinaison pendant l'autoguidage ;
5. La minimisation des erreurs périodiques en vérifiant la présence de grains dans la vis sans fin ou dans la couronne, ainsi qu'en utilisant le PEC pour aider à corriger les erreurs restantes.

4.2. Ensemble du tube optique (OTA)

Les meilleures pratiques associées au choix et à l'entretien de l'ensemble de tube optique (OTA) du télescope incluent ce qui suit :

1. L'ouverture est importante, donc plus l'ouverture est grande, plus la capacité de collecter des photons dans une unité de temps donnée est grande. Ceci est particulièrement important pour les étoiles cibles plus faibles. Bien sûr, les conditions de turbulence locale pourraient, dans certains cas, être un facteur plus limitant que l'ouverture.
2. L'OTA doit être in situ pendant suffisamment de temps pour qu'il s'acclimate à la température de son environnement de fonctionnement. Cela aide à réduire toute turbulence d'air interne en raison du changement de température dans l'OTA.
3. Afin de produire une fonction de répartition ponctuelle bien formée (PSF) pour la cible et chaque étoile de comparaison, l'OTA doit être bien collimaté.
4. Pour les OTA de type Schmidt-Cassegrain, le miroir primaire doit être verrouillé, si possible, afin de réduire les effets d'un «flop du miroir».

4.3. Appareil photo d'imagerie

Une variété d'appareils photos ont été utilisées pour l'observation des transits d'exoplanète. Ceux-ci incluent des appareils photos CCD et CMOS autonomes similaires à ceux utilisés pour l'imagerie du ciel profond, ainsi que les reflex numériques. Cependant, pour mener l'observation des exoplanètes à un niveau de recherche, l'appareil photo doit être monochrome. C'est ainsi qu'il serait possible d'utiliser différents filtres photométriques standard. Comme les appareils photos DSLR sont intrinsèquement en couleur et ne se prêtent donc pas à l'utilisation des filtres, ils sont le choix d'appareil photo d'imagerie le moins souhaitable.

Les meilleures pratiques pour choisir un appareil photo d'imagerie à utiliser pour l'observation des exoplanètes dépendent de facteurs tels que:

1. Les conditions de turbulence attendues à l'emplacement de l'observateur. Ceci est défini comme la pleine largeur à mi-hauteur (FWHM) des étoiles mesurée à l'emplacement de l'observateur et exprimée en secondes d'arc.
2. La taille (c'est-à-dire le format) du détecteur de l'appareil photo. Bien qu'un format plus large permette de choisir une plus grande variété d'étoiles de comparaison, les détecteurs de petits formats ont été utilisés avec succès dans l'observation des exoplanètes au niveau de recherche.
3. Le biais, le courant d'obscurité et le bruit de lecture de l'appareil photo. Ces facteurs, cependant, sont très réduits dans les appareils photos les plus récents.

En général, la plupart des appareils photos d'imagerie monochrome modernes que l'observateur possède ou acquerra pour d'autres applications telles que l'imagerie du ciel profond devraient être satisfaisants pour l'observation des exoplanètes.

Avec les progrès récents dans les appareils photos CMOS monochromes, ils sont maintenant de plus en plus utilisés pour l'observation des exoplanètes. Cependant, leur utilisation oblige l'utilisateur à faire des choix judicieux pour les paramètres de l'appareil photo tels que le gain et le décalage. (Notez qu'un paramètre de gain particulier pour un appareil photo CMOS se traduira par un «gain du système»

correspondant, à savoir des électrons par ADU). Les conseils actuels pour ces paramètres sont les suivants:

1. Le gain doit être défini pour minimiser le bruit de lecture, mais avec pas plus d'une baisse de 50% en pleine profondeur de capacité et pas trop significatif dans la plage dynamique.
2. Le décalage doit être défini pour éviter l'écrasement des valeurs faibles dans les trames de biais.

Étant donné que ces conseils peuvent changer à mesure que plus d'expérience est acquise dans l'utilisation des caméras CMOS pour l'observation des exoplanètes, l'utilisateur est encouragé à visiter le forum de photométrie AAVSO (aavso.org) pour obtenir ou demander l'expérience des autres utilisateurs avec divers modèles CMOS.

4.4. Autoguidage

L'autoguidage est essentiel pour l'observation des exoplanètes du niveau qualité de recherche afin de minimiser la dérive des étoiles cibles et des étoiles de comparaison. La dérive due au désalignement polaire, par exemple, entraînera une rotation du champ des étoiles et donc leur mouvement dans le champ de vision. Ce mouvement sur une image non corrigée entièrement par un champ plat peut sérieusement affecter la précision de l'observation.

Les approches les plus courantes de l'autoguidage et leurs avantages et leurs inconvénients sont :

1. Utilisation d'une lunette de guide distincte - Il s'agit de la méthode la moins souhaitable en raison de problèmes de flexion qui peuvent se produire pendant la session d'observation.

2. Guidage hors axe - Bien que fréquemment utilisé par les imageurs du ciel profond pour obtenir des étoiles identiques, cette technique entraînera toujours une certaine rotation du champ de la cible et des étoiles de comparaison sur une période d'observation de plusieurs heures, même en présence d'une petite quantité de désalignement polaire. Cela est vrai même avec un mouvement sous la seconde d'arc de l'étoile guide elle-même. La quantité de rotation de champ (c'est-à-dire la dérive en ascension droite et en déclinaison sera fonction de :

    a. la distance de l'étoile guide de la cible ou des étoiles de comparaison en question;
    b. la quantité de désalignement polaire;
    c. la quantité de mouvement delta de l'étoile guide elle-même;
    d. l'angle de déclinaison lorsque l'image est prise (le désalignement polaire aura un plus grand effet, en particulier en ascension droite, lors d'imagerie à des déclinations plus élevées).

3. Guidage sur l'axe - Cette technique utilise un séparateur de faisceau dichroïque pour séparer le chemin lumineux de l'image principale en un chemin en infrarouge proche (NIR) et un chemin lumineux visible (Di Cicco, 2012). Ici, l'appareil photo de guidage voit, via le chemin infrarouge, une partie de la même image que l'appareil photo d'imagerie (selon la taille du détecteur de l'appareil photo guide). Avec cette technique, l'étoile guide est plus proche de la cible et des étoiles de comparaison, et donc les effets de tout désalignement polaire sont réduits par rapport à l'approche directrice hors axe. De plus, dans le cas des retournements méridiens avec des GEMs, la même étoile guide qui était utilisée avant le retournement peut également

être utilisée après le retournement, éliminant ainsi le besoin d'un rotateur ou de rechercher une autre étoile de guidage.

4. Guidage de l'image - Une technique relativement nouvelle en autoguidage consiste à apporter des corrections de montage entre les expositions en fonction de la quantité de décalage total de l'image scientifique elle-même. (Remarque: le terme image scientifique est utilisé dans ce guide pour se référer aux images brutes du champ de vision contenant l'étoile hôte de l'exoplanète; ces images sont également souvent appelées Lumières (par d'autres logiciels de traitement d'images.) Une variante de cela (Baudat, 2017) consiste à effectuer des corrections de monture pendant les expositions des images scientifiques.

En plus des techniques d'autoguidage ci-dessus, des dispositifs d'optique active (AO) sont également à la disposition de l'astronome amateur afin qu'une variété d'erreurs rapides d'engrenage puissent être corrigées sans provoquer de « bosses » physiques à la monture. Cette technique utilise un miroir « à bascule » ou une fenêtre optique directe qui se trouve dans le trajet optique pour maintenir une étoile guide centrée sans provoquer de « bosses » physiques à la monture.

Un logiciel d'autoguidage est disponible en option pour la plupart des logiciels d'imagerie courants. Un logiciel de guidage gratuit populaire est PHD2 (voir http://openphdguiding.org).

4.5. Filtres

Comme mentionné précédemment, il est souhaitable d'utiliser un filtre photométrique standard pour les travaux sur les exoplanètes, tels que les filtres U, V, B, Rc et Ic de Johnson-Cousins, ou les filtres u', g', r' et i' du SDSS (Sloan Digital Sky Survey). Cela est vrai pour au moins trois raisons :

1. les coefficients d'assombrissement des limbes utilisés pendant le processus de modélisation du transit sont une fonction du type de filtre (standard), ainsi que des paramètres stellaires de l'étoile cible ;
2. la distinction entre les transits dus aux binaires à éclipses et aux exoplanètes consiste à effectuer un test de chromaticité, où des filtres photométriques standard alternés sont utilisés pendant la session d'observation - la profondeur de transit de la binaire à éclipses sera alors généralement considérée comme différente pour deux filtres différents (par exemple, rouge ou bleu) ;
3. les résultats de deux observateurs différents peuvent être mieux comparés.

Bien qu'il ne s'agisse pas d'un filtre photométrique « standard », un filtre Clear Blue Blocking (CBB), parfois appelé « filtre exoplanète », peut être utilisé pour réduire les effets de la lueur du ciel.

Comme indiqué au point 2 ci-dessus, afin de distinguer le transit d'une exoplanète de celui de deux étoiles binaires à éclipses, un test de chromaticité est souvent effectué. En effet, le transit d'une exoplanète en transit ne devrait pas entraîner une profondeur de transit dépendante de la longueur d'onde, alors que le transit d'une étoile éclipsant l'autre entraîne généralement une profondeur de transit différente lorsqu'elle est observée à des longueurs d'onde différentes. Un tel test de chromaticité peut être effectué en utilisant différents filtres à différents temps de transit, ou de préférence, un tel test peut être effectué au cours d'une seule observation en utilisant des filtres alternés.

5. Préliminaires

Cette section décrit certaines des étapes préliminaires qui peuvent être effectuées plusieurs jours avant l'observation réelle de l'exoplanète et qui conduiront à une séance d'observation plus efficace.

5.1. Collection d'informations

L'annexe A est un exemple de feuille de travail Excel que l'observateur peut utiliser pour enregistrer certaines informations critiques à propos de l'observation, et fournira également une source pratique d'informations nécessaires à AIJ. Les données représentées à l'annexe A sont également utilisées comme base de l'exemple de ce guide, à savoir la modélisation d'un transit complet de l'exoplanète WASP-12B. Si aucune modification n'est apportée aux instruments ou à l'emplacement de l'observateur, les articles 12-23 en annexe A peuvent être utilisés sur plusieurs sessions d'observation

La dernière version de cette feuille de calcul peut être téléchargée sur http://www.asastrodennis.com. La feuille de calcul contient également des liens hypertextes vers des ressources Web où l'utilisateur peut obtenir certaines des informations, si disponibles, sur l'étoile cible et les paramètres d'exoplanète qui sont nécessaires en tant qu'entrée à la phase de modélisation du transit, y compris les coefficients d'assombrissement des limbes appropriés pour le filtre particulier utilisé dans l'observation.

5.2. Considérations pour sélectionner une exoplanète cible

Pour les exoplanètes confirmées, les éléments suivants sont des sources utiles pour prédire les transits d'exoplanète pour une période donnée à l'emplacement d'un observateur particulier:

Archive Exoplanète de la NASA:
http://exoplanètearchive.ipac.caltech.edu/cgi-bin/transitview/nph-visibletbls?dataset=transitsits

Site Web de Exoplanète Transit Database (ETD):
http://var2.astro.cz/etd/predictions.php.

Un chercheur de transit convivial développé par Eric Jensen du Swarthmore College peut être utilisé pour déterminer plusieurs milliers d'exoplanètes en transit, ainsi que les cibles d'intérêt Tess (TOI), qui devraient produire un transit à un emplacement spécifié par l'utilisateur sur une nuit donnée ou une gamme de nuits: https://astro.swarthmore.edu/transits/transits.cgi.

Pour des missions telles que TESS, dont l'objectif est de confirmer initialement si un transit détecté est dû à une exoplanète ou à un faux positif, l'observateur aura accès à un chercheur de transit sécurisé, similaire à celui de Swarthmore référencé ci-dessus.

Si l'observateur d'exoplanète est libre de sélectionner une cible d'exoplanète pour l'observation, les critères suivants doivent être pris en compte qui se traduiront par un résultat plus satisfaisant :

1. Depuis le début de l'heure du transit - comme il est souhaitable que la session d'imagerie commence au moins 30 minutes avant le début du transit, cela peut annuler certaines exoplanètes candidates, car cela pourrait mettre l'heure de début avant ou même pendant le crépuscule.
2. Durée du transit - Avec certaines durées de transit plus longues que d'autres, l'observateur peut vouloir choisir une candidate dont le temps total de session (compte tenu du désir d'imager 30 minutes après la fin réelle du transit) convient à l'observateur.

3. La magnitude de l'étoile hôte et la profondeur du transit - les étoiles hôtes d'exoplanètes peuvent varier en V de 8,0 à plus de 13,0, et des creux dans la magnitude de l'étoile en raison du transit de l'exoplanète peuvent aller de quelques centièmes à des millièmes de magnitude. L'observateur pourrait vouloir choisir une cible exo planétaire avec une baisse de magnitude prédite plus importante en % qu'une autre cible potentielle.

Les profondeurs de transit des exoplanètes sont souvent exprimées en milli-magnitudes (mmag), où 1 mmag = 0,001 magnitude. Ainsi, une profondeur de transit de 10 mmag équivaut à une baisse de magnitude de 0,01 ou 1 %. Des profondeurs de transit inférieures à 10 mmag ont été atteintes en utilisant des télescopes à ouverture inférieure au mètre dans des conditions de turbulence appropriées. Notez que la relation entre magnitude et flux est telle que $f1/f2 = 2.512^{(m2-m1)}$, où f1 et f2 sont les flux et m1 et m2 sont les magnitudes correspondantes. Ainsi, une baisse de magnitude de 0,01 équivaut à une variation relative de flux de 0,009. Étant donné que le flux et la magnitude à ces petites quantités sont approximativement les mêmes, les variations relatives de flux sont souvent utilisées comme substitut de la magnitude lors de la mesure et de la référence à la profondeur de transit. En fait, des enquêtes plus récentes telles celles de TESS expriment désormais les profondeurs de transit en « ppt » (parties par mille).

5.3. Prédictions de retournement de méridien

Pour les observateurs équipés de montures équatoriales allemandes, l'observateur doit prédire approximativement quand, le cas échéant, un retournement de méridien pourrait être nécessaire pendant la session d'imagerie. Cette prédiction est généralement effectuée à l'aide du logiciel de navigation de l'observateur. Ensuite, soit un logiciel de planification automatisé peut être utilisé pour effectuer le retournement de méridien, soit l'observateur doit être disponible pendant le retournement de méridien pour effectuer les ajustements nécessaires afin de repositionner le champ de vision du système d'imagerie aussi rapidement que possible.

Les observateurs équipés de montures équatoriales allemandes peuvent également être confrontés à un autre problème associé à un retournement de méridien. À savoir, s'il n'y a pas de rotation de la chaîne d'imagerie, une nouvelle étoile de guidage devra être acquise lorsque le guidage hors axe est utilisé. La section 4.4 a abordé les avantages du guidage sur axe dans cette situation.

6. Meilleures pratiques

Cette section décrit les meilleures pratiques associées à l'observation réelle des exoplanètes. Ces pratiques devraient aider l'observateur d'exoplanètes à obtenir le plus haut niveau de précision pour un ensemble d'instruments donné et des conditions d'observation données. Elles sont organisées en fonction de la phase respective du processus d'observation des exoplanètes à laquelle elles s'appliquent.

6.1. Phase de préparation

6.1.1. Répertoires de fichiers

Sur l'ordinateur qui exécute le logiciel de capture d'images de l'observateur, il est préférable de configurer initialement les sous-répertoires suivants : Analyse AIJ, Biais, Darks, Flats, Images en quarantaine et Images scientifiques. Le sous-répertoire Analyse AIJ est l'endroit où les fichiers de mesure et d'ajustement du modèle d'AIJ peuvent être stockés.

Les sous-répertoires Bias, Darks et Flats sont les emplacements où les fichiers d'étalonnage respectifs peuvent être stockés. Le sous-répertoire Images scientifiques contiendrait les images brutes contenant l'étoile cible, ainsi que les images étalonnées, et le sous-répertoire Images en quarantaine est l'emplacement où les « mauvaises » images scientifiques dues à des impacts de rayons cosmiques, de satellites, de traînées, etc. pourraient être stockées. Si l'utilisateur souhaite utiliser d'autres noms pour ces sous-répertoires, ces noms peuvent être substitués à leurs homologues respectifs dans les exemples qui suivent.

6.1.2. Stabilisation du système d'imagerie à la température appropriée

Le système d'imagerie doit être mis en place suffisamment de temps à l'avance pour qu'il atteigne le point de consigne de température souhaité, ce qui peut également nécessiter l'activation de son système de refroidissement.

6.1.3. Génération de fichiers champs plats

Que les champs plans crépusculaires soient pris ou des champs plats générés à l'aide d'un panneau électroluminescent, ils doivent (idéalement) être refaits avant ou après chaque session d'imagerie en utilisant la même chaîne d'imagerie que celle utilisée pour prendre les images scientifiques, et sans que la chaîne d'imagerie n'ait été déplacée. Voir la section 6.3.2 pour des directives sur la création de champs plats.

6.1.4. Autoguidage

L'autoguidage doit être utilisé pendant la phase d'imagerie ci-dessous, à moins que la monture de l'observateur soit d'une précision telle qu'elle puisse maintenir le guidage à quelques pixels près pendant toute la durée de l'observation du transit (où la valeur réelle de « quelques » dépend de la FWHM de l'étoile hôte). Voir la section 4.4 ci-dessus pour un aperçu des différentes techniques d'autoguidage. Le mécanisme d'autoguidage de l'observateur doit être étalonné, si ce n'est pas encore fait ou si le logiciel d'autoguidage ne corrige pas automatiquement les changements en déclinaison. Si nécessaire, l'étalonnage doit également être effectué pour tout système d'optique active (AO) utilisé.

6.2. Phase d'imagerie

6.2.1. Choix du binning

La largeur à mi-hauteur (FWHM) des étoiles dans le champ cible doit être répartie sur 3 à 5 pixels. Si l'appareil photo d'imagerie est normalement configuré pour un binning supérieur à 1 x 1, le binning peut devoir être réduit pour y parvenir. Cela aboutirait alors à une échelle d'image acceptable (parfois appelée « échelle de plaque » ou « échelle de pixel »). L'échelle de l'image est exprimée en secondes d'arc par pixel et c'est une fonction de la distance focale du télescope et de la taille du pixel de l'appareil photo d'imagerie. Par exemple, supposons que la largeur à mi-hauteur soit de 3,0 secondes d'arc et que l'échelle d'image non divisée en deux du système d'imagerie de l'observateur soit de 0,5 seconde d'arc/pixel. Cela signifie que, sans binning, la largeur à mi-hauteur serait répartie sur 6 pixels et que le binning 2 x 2 signifierait que la FWHM serait répartie sur 3 pixels, toujours dans la partie acceptable, bien qu'inférieure, de la plage.

Les étoiles doivent être mises au point avec précision, ne serait-ce que pour obtenir une mesure précise de la FWHM. Cependant, si l'étoile cible est trop brillante et risque de saturer l'appareil photo d'imagerie, il peut être nécessaire de défocaliser l'OTA. Si le fond du ciel n'est pas trop élevé, une défocalisation qui

entraîne un PSF de 10 à 20 pixels est acceptable, tant que cette défocalisation n'entraîne pas le mélange du flux d'une étoile proche avec le flux de l'étoile cible.

6.2.2. Choix du temps d'exposition

Le temps d'exposition optimal est celui qui maximise le rapport signal/bruit de l'étoile cible, sans saturer le détecteur de l'appareil photo d'imagerie. Pour une étoile cible donnée, les facteurs qui affectent le temps d'exposition optimal comprennent :

1. la taille de l'ouverture du télescope,
2. le filtre utilisé,
3. l'efficacité quantique (QE) de l'appareil photo d'imagerie,
4. si l'étoile monte jusqu'au méridien local ou a dépassé le méridien et descend, et
5. les conditions de visibilité.

Les appareils photos d'imagerie actuels ont généralement une plage linéaire jusqu'à un certain point, après quoi ils deviennent non linéaires, puis, à un moment donné, ils deviennent saturés. À son point de saturation, tout photon supplémentaire frappant le pixel de la CCD ou du CMOS ne sera pas enregistré avec précision. Il est donc essentiel que les étoiles cibles et les étoiles de comparaison n'atteignent jamais la saturation et, idéalement, n'atteignent pas non plus la non-linéarité (il convient toutefois de noter que des logiciels tels que AIJ offrent une fonction permettant d'effectuer des corrections de non-linéarité). Le Guide de l'AAVSO sur la photométrie CCD/CMOS (AAVSO, 2022) décrit un processus permettant de déterminer les caractéristiques de linéarité d'un appareil photo. Il est important que le temps d'exposition soit choisi de manière à obtenir un rapport signal/bruit correct, mais pas suffisamment long pour atteindre les limites de non-linéarité ou de saturation. Si l'étoile cible est censée monter vers le méridien local et que, par conséquent, sa lumière traversera de moins en moins de masse d'air, l'une ou l'autre de ces deux situations peut se produire. Ainsi, l'observateur doit également en tenir compte lors du choix d'un temps d'exposition.

Afin de définir initialement le temps d'exposition correct, une série d'images de test doit être prise avec un temps d'exposition croissant. Le rapport signal/bruit de l'étoile cible, ainsi que ses nombres d'ADU, peuvent ensuite être mesurés pour chaque réglage d'exposition. La section 7.5.1 décrit comment AIJ peut être utilisé pour déterminer le rapport signal/bruit d'une étoile. Un réglage d'exposition qui maximise le rapport signal/bruit, mais qui ne présente pas de risque de saturation pendant la session d'imagerie, doit alors être considéré comme le temps d'exposition idéal.

La procédure des meilleures pratiques suivantes, effectuée immédiatement avant la session d'observation proprement dite, est recommandée pour déterminer le temps d'exposition optimal :

1. À la position actuelle de l'étoile cible dans le ciel, prenez des images de test à différents temps d'exposition. Tout d'abord, sélectionnez le temps d'exposition avec le SNR le plus élevé pour l'étoile cible où le nombre maximal d'ADU est inférieur à 75 % du point de saturation du détecteur de l'appareil photo d'imagerie. Remarque : cette limite de 75 % peut devoir être réduite si l'appareil photo doit atteindre la non-linéarité beaucoup plus tôt.
2. Si l'étoile monte vers le méridien local, réduisez le temps d'exposition de manière que le détecteur n'atteigne pas la saturation.
3. Si l'étoile descend du méridien local, augmentez le temps d'exposition de manière que le nombre maximal d'ADU de l'étoile cible soit égal à 75 % du point de saturation du détecteur.

Alternativement, l'observateur peut choisir une étoile proche de la position sur le méridien que l'étoile cible va traverser, où cette étoile est similaire en magnitude et en couleur à la cible. Ensuite, en utilisant le même filtre que celui qui sera utilisé lors de l'observation de l'étoile cible, un temps d'exposition peut être trouvé tel que les comptages ADU de l'étoile choisie soient inférieurs aux limites de non-linéarité et de saturation de l'appareil photo d'imagerie. Cela devrait donner une certaine confiance que l'étoile cible elle-même ne dépassera pas ces limites.

Il existe certaines situations dans lesquelles l'équipe scientifique professionnelle peut exiger une certaine cadence de prises d'images, ce qui peut se faire au détriment du temps d'exposition optimal (plus long). Cela peut être le cas lorsque des détails plus fins du motif de la courbe de lumière sont plus importants que la précision de la profondeur de la courbe de lumière elle-même. De plus, pour confirmer certains scénarios de faux positifs, il peut être nécessaire d'augmenter le temps d'exposition, et donc le SNR, des étoiles faibles proches de la cible d'origine, au détriment d'une éventuelle saturation de la cible.

6.2.3. Synchronisation temporelle

En raison de la dérive naturelle de l'horloge de l'ordinateur de capture d'images, celle-ci doit être souvent synchronisée avec le serveur de temps internet de l'US Naval Observatory. Cela peut être fait en utilisant un logiciel (gratuit) tel que Dimension 4 (voir http://www.thinkman.com/dimension4/). La période de mise à jour pour de telles synchronisations d'horloge doit être définie au moins toutes les 2 heures.

6.2.4. Système horaire

En raison de l'existence de plusieurs systèmes horaires différents, l'observateur d'exoplanètes doit savoir lequel est utilisé pour la prédiction du transit, lequel est saisi dans les en-têtes FITS de l'image, lequel est utilisé pendant le processus de modélisation de la courbe de lumière, etc. Les systèmes horaires les plus couramment utilisés sont :

a. Date julienne/Temps universel coordonné (JD_{UTC}),
b. Date julienne héliocentrique/Temps universel coordonné (HJD_{UTC}),
c. Date julienne barycentrique/Temps dynamique barycentrique (BJD_{TDB}).

Si les résultats de l'observation d'exoplanètes doivent être utilisés dans une collaboration professionnel/amateur, le système horaire BJD_{TDB} serait la norme horaire souhaitée à utiliser pendant le processus d'ajustement du modèle. Les sections 7.2.2 et 7.6 décrivent comment AIJ peut convertir l'heure des images capturées en heure BJD_{TDB}.

6.2.5. Capture d'images

Le logiciel de capture d'images normal de l'observateur est utilisé pour capturer les images scientifiques dans le sous-répertoire Science Images pendant cette phase. Si un retournement au méridien est nécessaire pendant la session d'imagerie, alors au moment où le retournement de méridien est nécessaire, l'observateur doit :

1. Abandonner le logiciel de capture d'images
2. Arrêter l'autoguidage
3. Exécuter le retournement de méridien
4. Repositionner l'étoile cible si nécessaire dans le champ de vision de l'appareil photo
5. Activer l'autoguidage
6. Activer le logiciel de capture d'images.

6.3. Phase d'étalonnage des images

6.3.1. Fichiers d'étalonnage

Avant ou après la capture des images scientifiques, l'utilisateur doit également capturer une série de fichiers d'étalonnage de poses d'obscurité, de champs plats et de biais et les stocker dans leurs sous-répertoires respectifs. Une règle empirique consiste à capturer (idéalement) un nombre impair d'images pour chacune de ces séries d'étalonnage. Un nombre impair est suggéré, car cela permet de mieux combiner une médiane qui sera utilisée ultérieurement pour créer les fichiers principaux d'obscurité, de champs plats et/ou de biais. Dans tous les cas, au moins seize (16) images doivent être capturées pour chaque type de fichier d'étalonnage.

Les directives relatives aux temps d'exposition pour chacun de ces types de fichiers d'étalonnage sont les suivantes :

1. **Fichiers d'obscurité :** le temps d'exposition doit être égal à celui des images scientifiques et doit être pris à la même température que les images scientifiques.
2. **Fichiers de champ plat :** le temps d'exposition dépend de la technique de champ plat utilisée, mais prend généralement 3 secondes ou moins. Cependant, ce temps d'exposition peut devoir être augmenté pour les appareils photo à obturateur automatique afin qu'aucun ombrage d'obturateur ne se produise. Une règle empirique consiste à créer des images de champ plat de telle sorte que l'histogramme résultant soit à mi-chemin dans la plage dynamique de l'appareil photo d'imagerie. Par exemple, pour un détecteur avec un nombre maximum d'ADU typique de 65 000, la luminosité de la source lumineuse serait définie de telle sorte que le centre de l'histogramme résultant soit à 32 000 ADU. Comme indiqué dans la section 6.3.2 ci-dessous, une attention particulière est nécessaire pour la création de fichiers plats.
3. **Fichiers de biais :** un fichier de biais est un fichier d'obscurité avec un temps d'exposition de 0 seconde.

En règle générale, des fichiers plats d'obscurité sont également créés car les champs plats eux-mêmes contiennent un courant d'obscurité qui doit être soustrait. Lorsqu'ils sont utilisés, les « plats d'obscurité » sont pris avec le même temps d'exposition que les fichiers de champs plats eux-mêmes. Cependant, comme indiqué dans la section 7.2 ci-dessous, une technique employée par AIJ qui peut mettre à l'échelle le Maître d'obscurité au même temps d'exposition que le Maître champ plat, évite la nécessité pour l'utilisateur de générer des fichiers plats d'obscurité.

6.3.2. Techniques de champs plats

Comme le mouvement des étoiles sur quelques pixels est inévitable même avec l'autoguidage et l'alignement polaire assez précis, la correction du champ plat est invoquée pour atténuer les effets des beignets de poussière et d'un vignettage. Un mauvais champ plat est l'un des principaux contributeurs aux systématiques. Par exemple, la figure 1 représente un champ plat et le mouvement potentiel d'une étoile sur un beignet de poussière à proximité. La figure 2 illustre ce qui se passerait dans le cas d'un retournement au méridien, à savoir que l'étoile basculerait à travers la diagonale du détecteur et pourrait atterrir sur un autre beignet de poussière. Si une correction du champ plat n'est pas effectuée pour l'un ou l'autre de ces deux cas, le flux de l'étoile en question changerait artificiellement.

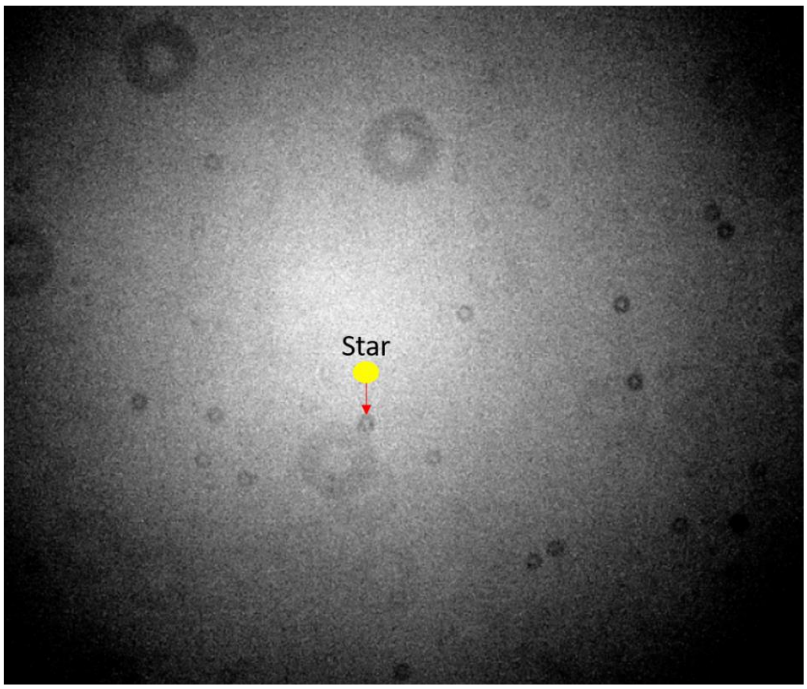


Figure 1. Mouvement d'étoile sur un champ plat non corrigé

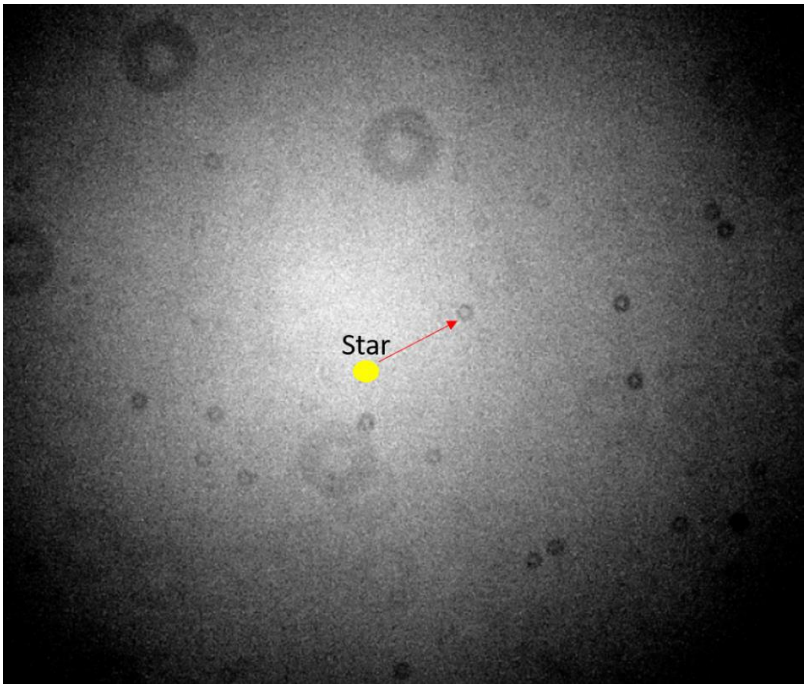


Figure 2. Mouvement d'étoile après un retournement au méridien

Les champs plats doivent idéalement être créés avant ou après chaque séance d'observation, et certainement lorsqu'il y a un changement dans la chaîne d'imagerie.

Voici les techniques courantes pour générer des champs plats à partir desquels un Maître champ plat peut ensuite être créé :

1. *Champs plats crépusculaires :* les champs plats sont pris à l'aube ou au crépuscule. En raison de la vitesse à laquelle les conditions d'éclairage du ciel changent, il est souvent difficile de prendre un bon ensemble de champs plats, surtout si cela doit être fait pour plusieurs filtres. Dans certains cas, les champs plats peuvent montrer des étoiles si le temps d'exposition est trop long. Les diffuseurs faits maison utilisant un t-shirt blanc sont un moyen populaire d'atténuer ce problème.
2. *Caissons lumineux :* des caissons lumineux faits maison ont été utilisés par certains astronomes amateurs pour créer des flats. Cependant, utiliser cette technique pour produire un champ lumineux uniforme est parfois difficile.
3. *Panneaux électroluminescents :* bien qu'ayant un certain coût, la technique présente plusieurs avantages : elle peut créer un champ lumineux uniforme relativement bon, sa luminosité peut être modifiée pour s'adapter à différents filtres et les champs plats peuvent être pris à la convenance de l'observateur.
4. *Champs plats d'observatoires* : cette technique utilisée dans les observatoires permanents consiste à pointer le télescope vers un panneau blanc éclairé sur le mur de l'observatoire. L'efficacité de cette technique varie considérablement en fonction de la nature du panneau blanc, de l'éclairage ambiant, etc.

6.3.3. Création de fichiers maîtres

L'étalonnage de l'image élimine les effets des facteurs sous-jacents suivants qui affectent la précision des mesures: biais, courant d'obscurité et beignets de poussière et vignettage. Voici les meilleures pratiques pour traiter chacun de ces facteurs:

1. Les fichiers de biais doivent être pris un moment avant ou après la session d'observation. Ceux-ci sont ensuite utilisés pour créer un fichier Maître biais, idéalement en utilisant une combinaison médiane.

2. Les fichiers d'obscurité devraient être pris idéalement à la fin de la session d'observation. La raison de les prendre à la fin de la session d'observation est de s'assurer qu'ils sont pris à la même température que les images scientifiques. Un fichier Maître d'obscurité est ensuite créé à partir d'eux, à nouveau en utilisant une combinaison médiane.

3. Les fichiers champs plats doivent être pris au début ou à la fin de la session d'observation. Étant donné que les fichiers champs plats eux-mêmes ont un courant d'obscurité et ont un temps d'exposition différent de celui des images scientifiques, ils doivent avoir leur courant d'obscurité supprimé. Comme mentionné précédemment, plutôt que de créer un Maître d'obscurité spécifiquement pour effectuer une correction d'obscurité pour les champs plats, une autre approche consiste à utiliser le même fichier Maître d'obscurité créé pour les images scientifiques, mais à l'étendre au temps d'exposition des fichiers champs plats. Des logiciels tels que AIJ ont une telle fonctionnalité de mise à l'échelle. La section 6.3.2 ci-dessus décrit les meilleures pratiques pour créer des fichiers plats.

6.3.4. Mise à jour des informations de l'en-tête FITS

Pendant la phase d'étalonnage de l'image, certains packages logiciels tels que AIJ permettent à l'utilisateur de mettre à jour les en-têtes d'adaptation dans les images scientifiques avec des informations telles que les temps BJD_{TDB} équivalents de l'observation. Si elles ne sont pas incluses dans l'en-tête FITS

par le logiciel de capture d'image, d'autres informations importantes telles que la masse d'air peuvent également être incluses. Comme on le verra plus loin, la masse d'air est l'un des paramètres de détente les plus couramment utilisés pendant le processus de modélisation des transits.

6.4. Phase de photométrie d'ouverture et de photométrie différentielle

Comme cela a été mentionné dans la section 3, la méthode de transit d'exoplanète consiste à comparer le changement relatif de la luminosité entre l'étoile cible et un ensemble d'étoiles de comparaison appropriées. Avant que cette comparaison puisse être effectuée, cependant, la luminosité de chaque étoile doit être ajustée pour tout nombre de photons en raison du ciel de fond qui pourrait affecter chaque étoile particulière. Cela se fait en utilisant une technique appelée photométrie d'ouverture. Le terme utilisé après qu'un tel ajustement ait été fait est appelé ici «Net Integrated Counts» (ou simplement « comptages intégrés » pour faire court). Une fois cet ajustement pour le ciel de fond effectué, le changement relatif des dénombrements intégrés entre l'étoile hôte et les étoiles de comparaison peut ensuite être obtenu. Ce processus est appelé photométrie différentielle. Les meilleures pratiques associées à la photométrie d'ouverture et à la photométrie différentielle sont décrites ci-dessous.

6.4.1. Photométrie d'ouverture

La photométrie d'ouverture consiste à définir à la fois l'« ouverture » d'un certain rayon autour d'une étoile, ainsi qu'un « anneau » extérieur. L'idée de l'anneau est de mesurer le fond du ciel autour de l'étoile. La figure 3 représente une ouverture de rayon 9 et un anneau commençant à 15 pixels du centroïde de l'étoile et se terminant à 23 pixels du centroïde.

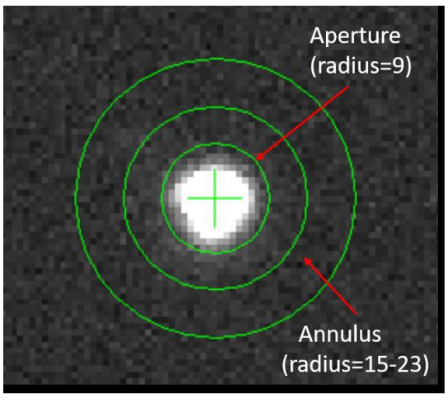


Figure 3. Ouverture et anneau

Afin de compenser la contribution du ciel de fond, les comptages ADU par pixel dans l'anneau sont utilisés pour ajuster les ADU dans l'ouverture. Certains logiciels tels que AIJ ont également la capacité de détecter et d'ajuster les étoiles faibles qui pourraient se trouver dans l'anneau et donc fausser les comptages du fond du ciel. Comme nous le verrons plus loin, les paramètres de rayons initialement définis pour l'ouverture et l'anneau peuvent être modifiés après l'ajustement d'un modèle d'exoplanète pour optimiser davantage l'ajustement.

La section 7.5.1 décrit comment AIJ peut être utilisé pour sélectionner la taille initiale de l'ouverture et de l'anneau.

6.4.2. Photométrie différentielle

La photométrie différentielle consiste à appliquer la photométrie d'ouverture sur l'étoile cible et sur plusieurs étoiles de comparaison, puis à calculer la variation des nombres intégrés de l'étoile cible par rapport aux nombres intégrés totaux des étoiles de comparaison. Voici les meilleures pratiques pour sélectionner des étoiles de comparaison appropriées :

1. Idéalement, il faut choisir au moins 8 étoiles de comparaison dont les magnitudes sont aussi proches que possible de celle de l'étoile cible, généralement à +/- 50 % des nombres intégrés de l'étoile cible. Si cela n'est pas possible, il faut alors sélectionner un ensemble d'étoiles de comparaison de telle sorte que la moyenne de leurs comptages d'ouvertures soit proche de celle de l'étoile cible. De plus, lorsqu'il tente de déterminer s'il existe des sources provoquant un faux positif, l'observateur peut être invité à tester l'occurrence d'un événement de transit pour toutes les étoiles dans un rayon spécifié de l'étoile cible.
2. Les étoiles de comparaison doivent idéalement être de type stellaire (c'est-à-dire de couleur) similaire à l'étoile cible et proches de l'étoile cible afin de minimiser les différences d'extinction atmosphérique. Cependant, si le logiciel de modélisation de transit est capable de « détendre » les effets de la masse d'air, comme c'est possible avec AIJ, alors le choix d'étoiles de comparaison de luminosité similaire à celle de l'étoile cible est plus important que le choix d'étoiles de type stellaire similaire.
3. Les étoiles de comparaison ne doivent pas être intrinsèquement variables. Cela peut être déterminé ultérieurement en visualisant la courbe de lumière de chaque étoile de comparaison comme décrit dans la section suivante, ou en utilisant les informations de l'utilitaire Variable Star Plotter (VSP) de l'AAVSO (AAVSO, 2017).

Le résultat de la phase de photométrie différentielle sera un fichier de mesures qui contient, au minimum, pour chaque image : l'horodatage de l'image, la variation des comptages intégrés de l'étoile cible (par rapport aux étoiles de comparaison) et les erreurs associées. Selon le logiciel de photométrie différentielle, d'autres données précieuses pourraient inclure la variation des comptages intégrés de chaque étoile de comparaison par rapport aux autres étoiles de comparaison, ainsi que les erreurs associées et les changements dans les coordonnées en pixels X, Y de la cible et des étoiles de comparaison.

7. Utilisation d'AstroImageJ

Le reste de ce guide décrit l'utilisation d'AIJ pour le post-traitement d'images scientifiques et pour l'ajustement de modèles d'exoplanètes. L'utilisation d'AIJ suppose que l'utilisateur a déjà téléchargé (et installé) la dernière version d'AIJ et a lu le Guide de l'utilisateur d'AIJ, tous deux disponibles à l'adresse suivante : http://www.astro.louisville.edu/software/astroimagej/.

L'utilisateur est encouragé à vérifier régulièrement si une mise à jour du logiciel AIJ est disponible. Pour ce faire, cliquez sur Aide dans le coin supérieur droit de la barre d'outils principale d'AIJ (voir Figure 4), puis sélectionnez « Mettre à jour AstroImageJ… ». Une boîte « Mettre à niveau vers » apparaît alors. **IMPORTANT** : si une version quotidienne existe, veuillez la charger. Elle se trouve en tant que première entrée dans la boîte Mettre à niveau vers.

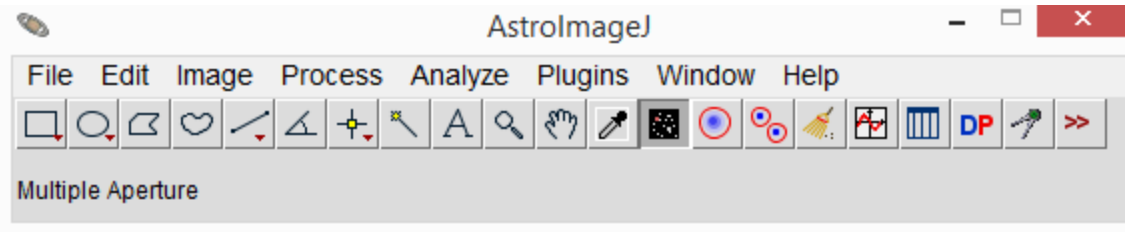


Figure 4. Barre d'outils AIJ

Les données des transits d'exoplanètes réels utilisant la version 5.3.4.02 d'AIJ seront utilisées dans les exemples tout au long du reste de ce guide. Les fichiers d'étalonnage et les images originales de l'exemple WASP-12b, ainsi que le fichier de configuration de tracé AIJ associé, sont disponibles sur http://www.astrodennis.com.

7.1. Chargement d'images dans AIJ

Une seule image ou une séquence d'images peut être chargée dans AIJ.

Pour ouvrir une seule image, sélectionnez Fichier->Ouvrir dans la barre d'outils d'AIJ (Figure 4) puis sélectionnez le fichier souhaité. L'écran d'affichage des images (voir Figure 5) apparaît alors. Un exemple d'informations utiles pouvant être obtenues à partir de l'une des images scientifiques est le contenu de son en-tête FITS. Ces informations peuvent être obtenues en sélectionnant Édition->En-tête FITS en haut de l'écran d'affichage des images. De nombreuses opérations de l'écran d'affichage des images décrites ci-dessous pour une séquence d'images peuvent également être appliquées à une seule image.

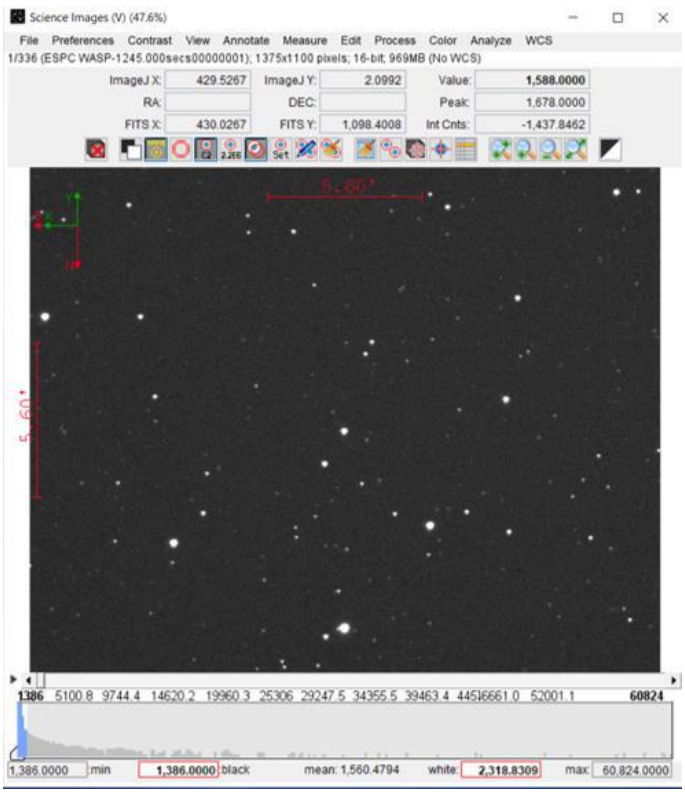


Figure 5. Écran d'affichage des images

Un ensemble d'images peut être chargé dans ce que l'on appelle une « pile » AIJ. Chaque image de la pile est appelée une « tranche ». La pile est un ensemble actif d'images auquel diverses fonctions d'AIJ peuvent être appliquées. Dans la barre d'outils AIJ, sélectionnez Fichier->Importer->Séquence d'images. Un écran similaire à celui de la Figure 6 apparaît. Sélectionnez ensuite le dossier contenant les fichiers d'image que vous souhaitez charger. Les fichiers d'image peuvent également être glissés et déposés sur la barre d'outils principale AIJ pour les charger dans une pile.

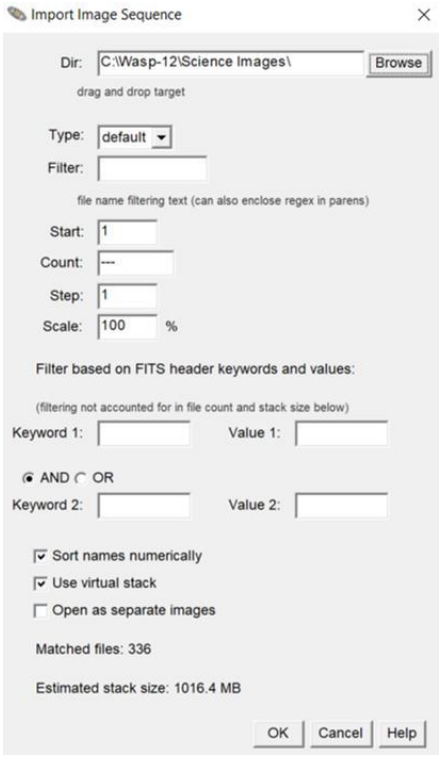


Figure 6. Écran d'importation d'une séquence d'images

Si l'ordinateur exécutant AIJ dispose de suffisamment de mémoire pour contenir toutes les images de la pile, la sélection « Utiliser la pile virtuelle » sur l'écran Importer une Séquence d'Images peut être décochée, ce qui permet à AIJ de s'exécuter plus rapidement puisque les images sont directement accessibles depuis la mémoire. Si un message de manque de mémoire apparaît dans ce cas, davantage de mémoire peut être allouée à AIJ en procédant comme suit :

1. Dans la barre d'outils principale d'AIJ, accédez à Édition->Options->Mémoire et threads…
2. Modifiez la valeur de mémoire maximale sur une valeur plus élevée.

Ensuite, le bouton OK illustré dans la Figure 6 est sélectionné. Cela crée une pile AIJ des images sélectionnées. L'affichage des images (Figure 5) montre alors la première image de la pile.

Le curseur situé sous l'image peut ensuite être utilisé pour parcourir toutes les images afin de trouver celles qui doivent être éliminées en raison d'une couverture nuageuse excessive, d'un mauvais guidage ou d'autres anomalies. Si les images présentent des degrés croissants de désalignement, reportez-vous à la section 7.5.3 pour savoir comment corriger ce problème. Les images de mauvaise qualité peuvent être supprimées en faisant apparaître cette image particulière sur l'Affichage des Images, et en sélectionnant simplement l'icône « Supprimer la tranche actuellement affichée » dans le coin supérieur gauche de l'affichage des images. Vous pouvez également sélectionner Édition->Pile->Supprimer dans la barre de

menu de l'affichage des images. Cependant, il est conseillé de déplacer ces images de mauvaise qualité de l'endroit où elles se trouvent dans le dossier des images scientifiques vers un sous-répertoire « Images en quarantaine » distinct. Cela permet à l'utilisateur de ne pas avoir à recommencer le processus d'élimination des images si la photométrie différentielle doit être refaite.

Comme le montre la figure 6, d'autres options existent pour filtrer les fichiers du dossier sélectionné qui doivent être saisis dans la pile. Par exemple, pour une observation utilisant des filtres alternés pour effectuer une vérification de chromaticité (par exemple, Bleu, Rouge, Bleu, Rouge, etc.), il existe trois façons différentes d'insérer des images pour un filtre particulier dans la pile :

1. Si le nom du filtre est intégré dans le nom de fichier, ce nom peut être placé dans l'entrée Filtre et tous les fichiers portant ce nom de filtre seront inclus dans la pile.
2. Les valeurs Début et Étape peuvent être utilisées pour sélectionner le filtre souhaité. Par exemple, Début = 1 et Étape = 2 incluraient uniquement les exécutions avec le filtre Bleu, et Début = 2, Étape = 2 incluraient uniquement les exécutions avec le filtre Rouge.
3. Si le nom du filtre (par exemple, Bleu) est associé à un mot-clé d'en-tête FITS (par exemple, FILTRE), alors une entrée de mot-clé FILTRE avec une valeur Bleu inclurait uniquement les images de fichiers dont la valeur pour FILTRE dans l'en-tête FITS était Bleu.

7.2. Étalonner les images scientifiques

La fonction Traitement des données (DP) d'AIJ peut d'abord être utilisée pour étalonner les images scientifiques prises pendant la phase d'imagerie. Remarque : avant de poursuivre cette section, il est fortement recommandé au lecteur de consulter la section 6 (Interface utilisateur DP) du Guide de l'utilisateur d'AIJ. La fonction DP est lancée en cliquant sur l'icône de la barre d'outils principale d'AIJ. La figure 7 est un exemple de l'un des deux écrans qui s'affichent alors.

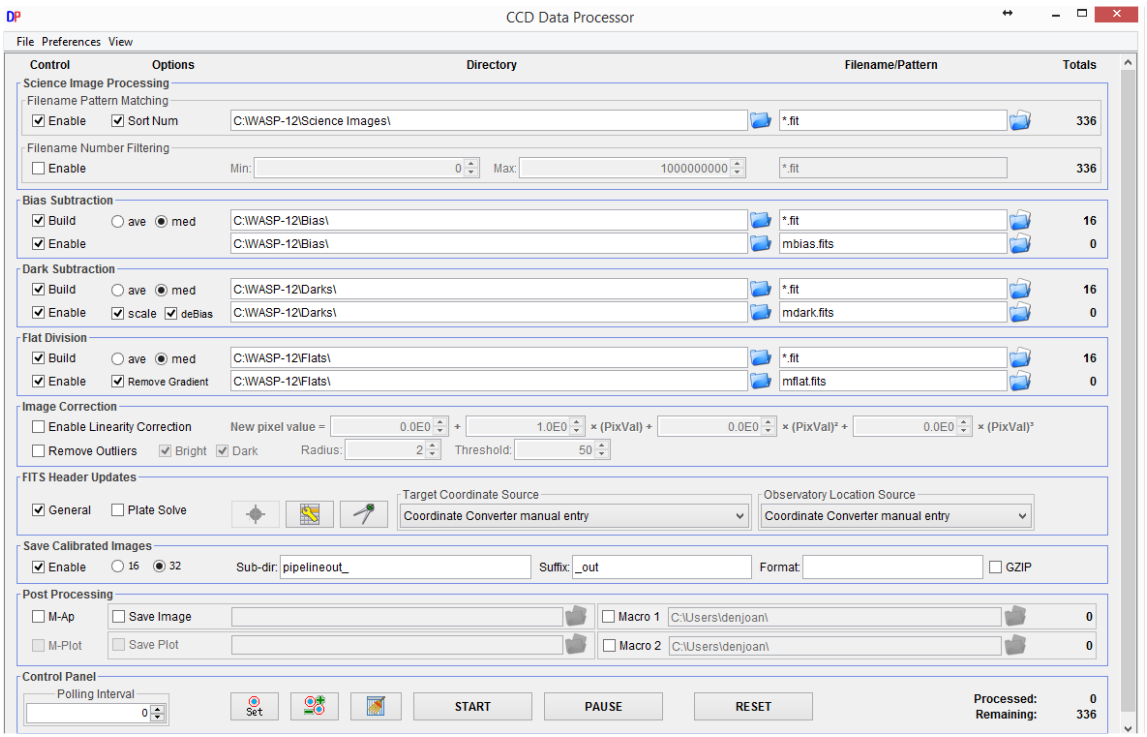


Figure 7. Écran du processeur de données CCD

Un exemple de l'autre écran qui apparaît est illustré à la figure 8, qui peut initialement couvrir l'Écran du Processeur de Données CCD.

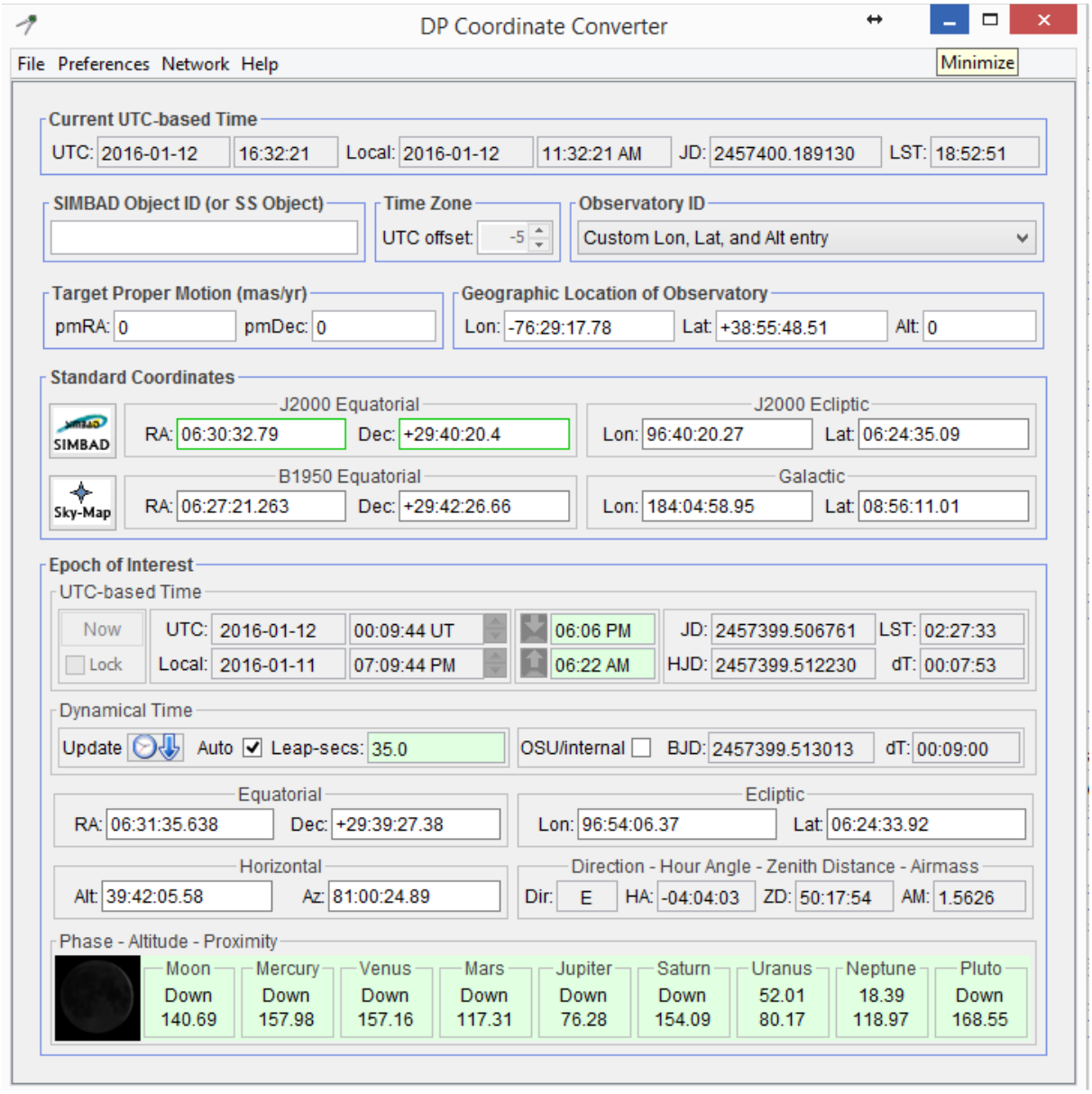


Figure 8. Écran de Conversion des Coordonnées DP

Le but de l'écran du Processeur de Données CCD est de calibrer les images scientifiques en utilisant les fichiers de biais, d'obscurité et de champs plats précédemment capturés. Il existe cependant plusieurs façons dans lesquelles les fichiers maîtres de biais, d'obscurité et de champs plats utilisés pour l'étalonnage peuvent être créés. Par exemple, les fichiers maîtres peuvent être créés dans des exécutions distinctes du Processeur de Données CCD, puis une analyse finale spécifie les fichiers maîtres utilisés. De plus, l'utilisateur peut utiliser d'autres programmes pour accomplir l'étalonnage et peut simplement décider d'utiliser AIJ pour simplement mettre à jour les en-têtes des fichiers FITS calibrés, lequel processus est décrit ci-dessous. Dans l'exemple illustré dans la figure 7 et décrit ci-dessous, AIJ utilise une session pour tout accomplir : les fichiers maîtres sont d'abord créés à partir des fichiers de biais

individuels, d'obscurité et de champs plats, ces fichiers maîtres sont ensuite utilisés pour calibrer les images scientifiques et, enfin, les en-têtes FITS des fichiers calibrés résultants sont mis à jour. Dans l'exemple ci-dessous, les images d'origine des fichiers d'obscurité et des images scientifiques avaient un temps d'exposition de 45 secondes et les fichiers de champ plat avaient un temps d'exposition de 3 secondes.

7.2.1. Spécification des Images Scientifiques et des Fichiers d'Étalonnage

La première étape dans la conduite de l'étalonnage de l'image consiste à spécifier où AIJ peut trouver les images scientifiques et les fichiers d'étalonnage.

Dans la section Traitement des images scientifiques sur l'écran du Processeur de Données CCD, les cases «Enable» et «Sort Num» sont cochées et le répertoire où résident les images scientifiques est entré (cela peut également être fait en cliquant sur l'icône du dossier et en sélectionnant le sous-répertoire approprié). Ensuite, l'extension de fichier appropriée avec l'indicateur générique «*» pour le chemin de fichier est entrée. Si le chemin de fichier et l'extension des images scientifiques ont été correctement entrés, les Comptages Totaux sur la droite doivent être corrects.

La méthode ci-dessus doit également être utilisée pour spécifier les sous-répertoires et les extensions de fichiers pour les fichiers biais, d'obscurité et de champs plats. Pour chacun de ces ensembles de fichiers d'étalonnage, un sous-répertoire et un nom de fichier complet (pas seulement une extension) peuvent être entrés pour leurs fichiers maître-créés respectifs (d'autres options de spécification de la destination des fichiers maître peuvent être trouvées en «survolant» le champ du sous-répertoire). Comme le montre la figure 7, un maître d'obscurité appelé *mdark.fits* sera créé dans le même sous-dossier où les fichiers d'obscurité individuels sont trouvés.

Les cases à cocher Build et Enable pour chacun des types d'étalonnage doivent également être cochées, et le choix fait pour que la combinaison moyenne (AVE) ou médiane (MED) soit utilisée pour créer les maîtres. Si les fichiers d'obscurité doivent être mises à l'échelle et utilisées comme des champs plats d'obscurité, les cases « Scale » et « Debias » doivent être cochées.

Il existe des variations à cela. Par exemple, pour utiliser des maîtres déjà créés, les cases « Build » ne doivent pas être cochées.

Remarque: Il est important que l'option «Supprimer les valeurs aberrantes» ne soit PAS sélectionnée lorsque la photométrie différentielle est effectuée et que l'intervalle de sondage dans le panneau de commande soit défini sur 0. De même, à moins que l'option « Activer » pour le Filtrage des Numéros de Nom de fichier ou que l'option « Activer l'Option de Correction de Linéarité » soient en cours d'utilisation (voir la section 6.3.2.1 et la section 6.3.2.5, respectivement du guide de l'utilisateur AIJ), elles ne devraient **PAS** être activées.

7.2.2. Mise à jour des informations d'en-tête FITS

AIJ dispose de deux méthodes pour obtenir certaines informations essentielles telles que Masse d'Air, temps BJD_{TDB}, etc., qui seront utiles pendant la phase de photométrie, de traçage et de modélisation. La première méthode consiste à mettre à jour le fichier de mesures créé après l'application de la photométrie différentielle aux images étalonnées. Cette méthode est décrite dans la section 7.6 ci-dessous. Cette méthode, cependant, ne met pas à jour les en-têtes FITS des fichiers étalonnés, donc chaque fois qu'une nouvelle mesure de photométrie différentielle est effectuée sur les images étalonnées, cette mise à jour

doit avoir lieu à nouveau. Il convient de noter que certains logiciels de capture d'appareil photo incluront AIRMASS dans l'en-tête FITS, mais très probablement pas BJD_{TDB}.

La deuxième méthode, qui intervient pendant la phase d'étalonnage, consiste à inclure ces informations directement dans les en-têtes FITS des fichiers étalonnés. Ainsi, au moment où les fichiers d'étalonnage sont corrigés avec des biais, des poses d'obscurité et des champs plats, leurs en-têtes FITS sont également mis à jour. Avec cette méthode, plusieurs cycles de modélisation peuvent être effectués avec différents paramètres de photométrie, sans avoir à mettre à jour le fichier de mesures après chaque cycle avec des informations telles que AIRMASS et l'heure BJD_{TDB}.

Pour mettre à jour les en-têtes FITS pendant le processus d'étalonnage, l'utilisateur doit sélectionner Général dans la section Mises à jour des En-têtes FITS de l'écran du processeur de données CCD (voir la figure 7). L'écran Convertisseur de Coordonnées DP apparaît alors (figure 8), s'il n'est pas déjà ouvert.

Pour mettre à jour les en-têtes FITS, AIJ a besoin des coordonnées d'ascension droite et de déclinaison de la cible, ainsi que de l'emplacement où l'observation a été effectuée. Comme décrit ci-dessous, ces informations peuvent être saisies manuellement, ou AIJ peut extraire automatiquement ces données des en-têtes FITS si elles y ont été incluses par le logiciel de capture d'images de l'utilisateur.

Quelle que soit la méthode utilisée par AIJ pour obtenir les coordonnées de la cible et l'emplacement d'observation, l'utilisateur doit sélectionner Auto dans la section Heure dynamique de l'écran du Convertisseur de Coordonnées DP. Cela permettra à AIJ de tenir compte du nombre approprié de secondes intercalaires supplémentaires lors de ses conversions de temps vers BJD_{TDB}.

Il est également important que les images scientifiques brutes contiennent des informations dans leurs en-têtes FITS sur la date/heure de début de l'observation, ainsi que sur le temps d'exposition. Les sections 6.3.2.6.1 et 6.3.2.6.2 du Guide de l'utilisateur AIJ décrivent les mots-clés d'en-tête FITS acceptables qu'AIJ peut utiliser pour obtenir ces informations.

7.2.2.1. Saisie Manuelle des Informations sur la Cible et l'Emplacement de l'Observation

En cas de saisie manuelle des coordonnées de la cible, l'utilisateur doit sélectionner « Saisie Manuelle du Convertisseur de Coordonnées » sous la case Source des coordonnées de l'Observatoire, puis saisir les champs d'ascension droite et de déclinaison de la cible dans la section Equatorial J2000 sur l'écran du Convertisseur de Coordonnées DP.

De même, dans le cas d'une saisie manuelle de l'emplacement de l'observateur, l'utilisateur doit sélectionner « Saisie manuelle du convertisseur de coordonnées » sous la case Source de l'emplacement de l'observatoire, puis saisir les champs Lon (longitude), Lat (latitude) et Alt (altitude) dans la section Emplacement Géographique de l'Observatoire sur l'écran du Convertisseur de Coordonnées DP. Une description de la manière dont l'utilisateur peut créer une entrée pour son observatoire, dans une liste d'observatoires prédéfinis, se trouve sous « Personnaliser les Données de l'Observatoire », accessible à partir de l'onglet Aide sur l'écran du Convertisseur de Coordonnées DP. L'utilisateur peut ensuite accéder ultérieurement à ces informations stockées via la liste déroulante ID de l'Observatoire sur l'écran du Convertisseur de Coordonnées DP afin de renseigner automatiquement les entrées pour l'Emplacement Géographique de l'Observatoire.

7.2.2.2. Extraction Automatique des Informations sur la Cible et l'Emplacement de l'Observation

Si les coordonnées d'ascension droite et de déclinaison font déjà partie de l'en-tête FITS de l'image, l'utilisateur peut demander à AIJ d'extraire automatiquement ces informations en sélectionnant « En-tête FITS cible RA/DEC (2000) » sous la case Source des Coordonnées de la Cible. De même, si l'emplacement de l'observation fait déjà partie de l'en-tête FITS de l'image, l'utilisateur peut sélectionner « Longitude et latitude de l'en-tête FITS » sous la case Source de l'Emplacement de l'Observatoire.

Ensuite, l'utilisateur doit sélectionner l'icône  sur l'écran du Processeur de Données CCD. L'écran Paramètres Généraux de l'En-tête FITS apparaît alors (Figure 9).

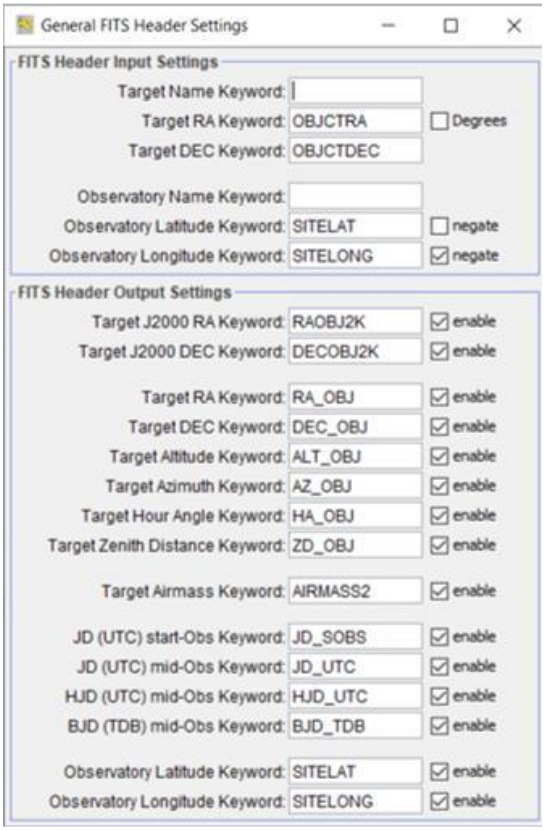


Figure 9 – Écran des paramètres de l'en-tête FITS général

Les mots-clés appropriés dans l'en-tête FITS de l'image associés à l'ascension droite et à la déclinaison de la cible doivent ensuite être inclus dans les entrées de Mot-clé *Target RA* et *Target DEC* sous la partie de l'écran Paramètres d'Entrée de l'En-tête FITS (voir Figure 9). Les paires de mots-clés courantes pour ces informations sont : RA_OBJ, DEC_OBJ et OBJCTRA, OBJCTDEC ; cependant, l'utilisateur doit confirmer quelle paire de mots-clés est placée dans l'en-tête FITS des images par le logiciel de capture d'images de l'utilisateur.

De même, si l'emplacement de l'observateur est inclus dans l'en-tête FITS de l'image, les mots-clés FITS appropriés associés à ces informations doivent être inclus dans le mot-clé Latitude d'Observation et le mot-clé Longitude d'Observation. SITELAT et SITELONG sont ces mots-clés. REMARQUE : certains logiciels de capture d'images, tels que SkyX Pro, peuvent placer un nombre positif dans l'en-tête FITS pour la longitude même s'il s'agit de longitude ouest (la longitude ouest est généralement indiquée avec

un signe négatif, sauf si elle est exprimée en Elongitude, à savoir, le nombre total de degrés à partir de la longitude 0). Si la longitude ouest est un nombre positif dans l'en-tête FITS de l'utilisateur, alors l'utilisateur doit cocher la case « negate », comme illustré dans la Figure 9, pour indiquer à AIJ que le nombre trouvé dans l'en-tête FITS doit en réalité avoir un signe négatif qui lui est associé.

La partie de l'écran Paramètres de Sortie de l'En-tête FITS indique les éléments qui seront ajoutés aux images étalonnées (indiquées par celles dont la case « activé » est cochée). Remarque : il est suggéré que tous les mots-clés par défaut restent « activés ».

IMPORTANT : si une mise à jour d'AIJ est effectuée, il est conseillé à l'utilisateur de s'assurer que l'entrée pour le « Mot-clé (BJD) (TDB) mid-Obs» sur l'écran Paramètres Généraux de l'En-tête FITS est définie sur BJD_TDB (les versions antérieures d'AIJ définissaient cette valeur d'entrée sur BJD_UTC).

7.2.2.3. Informations WCS

Enfin, bien que cela ne soit pas fait dans cet exemple, les coordonnées du système de coordonnées mondial (WCS) pour chaque étoile de chaque image peuvent être obtenues en sélectionnant l'option Résolution de Plaque sur l'écran du Processeur de Données CCD. Il convient toutefois de noter que ce processus peut prendre beaucoup de temps et qu'il n'est pas nécessaire dans de nombreux cas (voir la section 7.4 ci-dessous pour obtenir les coordonnées WCS pour les images sélectionnées).

7.2.3. Commencer le Processus d'Étalonnage

En utilisant les paramètres d'exemple de la Figure 7, lorsque le bouton START est sélectionné, la routine DP exécute automatiquement les étapes suivantes :

1. Crée un Maître Biais (mbias.fits) à partir des 16 fichiers de biais.
2. Crée un Maître d'obscurité (mdark.fits) à partir des 16 fichiers d'obscurité. Puisque deBias est sélectionné, cela corrige ce Maître d'obscurité avec le Maître Biais. Ainsi, le Maître Dark sera débarrassé de son biais.
3. Crée un Maître Flat (mflat.fits) à l'aide des 16 fichiers plats de la manière suivante :
    a. calcule d'abord un facteur d'échelle qui représente le rapport entre les temps d'exposition des champs plats et le temps d'exposition des fichiers d'obscurité d'origine (dans cet exemple, le facteur d'échelle serait de 0,0667 = 3 s/45 s) ;
    b. effectue une correction de biais à l'aide du Maître Biais ;
    c. effectue une correction d'obscurité à l'aide du Maître d'obscurité, mis à l'échelle avec le facteur d'échelle ;
    d. supprime les dégradés ;
    e. normalise les champs plats calibrés.
4. Met à jour les en-têtes FITS des fichiers calibrés.
5. Calibre chaque image scientifique à l'aide du Maître Biais, du Maître d'obscurité et du Maître champ plat résultants. Un affichage d'image est visible pour chaque image pendant son calibrage.
6. Les images scientifiques étalonnées sont stockées dans un sous-répertoire d'étalonnage dans le sous-répertoire contenant les images scientifiques. Dans cet exemple, le sous-répertoire

s'appellera *pipelineout* et ses fichiers porteront le suffixe *_out*. Remarque : il est préférable de cocher l'option 32 bits pour ces fichiers étalonnés enregistrés.

7.2.4. Fonctionnement en Temps Réel

En plus d'effectuer l'étalonnage de l'image après l'observation, AIJ est également capable de fonctionner « en temps réel » si l'intervalle d'interrogation est défini sur une valeur différente de zéro et que les options appropriées sont sélectionnées dans la rubrique Post-traitement. Dans ce cas, à la fréquence d'intervalle d'interrogation spécifiée, AIJ recherchera automatiquement dans le répertoire d'images scientifiques les fichiers nouvellement ajoutés qui correspondent aux critères de correspondance de modèle de fichier et de filtrage numérique spécifiés sur l'écran du Processeur de Données CCD. AIJ les étalonnera ensuite, effectuera éventuellement une photométrie différentielle sur eux et mettra éventuellement à jour la courbe de lumière (voir les cas à cocher sous Post-traitement sur l'écran du Processeur de Données CCD pour sélectionner ces options).

7.2.5. Options supplémentaires

La section 6 du Guide de l'utilisateur AIJ fournit d'autres options disponibles pour l'écran du Processeur de Données CCD.

7.3. Chargement des images d'étalonnage

Après l'étalonnage, les images du sous-répertoire d'étalonnage peuvent être chargées dans une pile AIJ (voir la section 7.1 pour savoir comment charger un ensemble d'images).

Afin de s'assurer que les indicateurs de champ de vision (FOV) sont corrects pour les axes vertical et horizontal sur l'Écran d'Affichage des Images pour les images d'étalonnage, les échelles de pixels X et Y correctes doivent être définies. Les échelles de pixels auront été définies correctement si les coordonnées WCS ont déjà été trouvées en utilisant soit l'option Plate Solve sur l'écran du Processeur DP CCD (voir la section 7.2.2.3) soit l'une des options WCS->Plate Solve sur l'Écran d'Affichage des Images (voir la section 7.4). Alternativement, les échelles de pixels correctes peuvent être saisies manuellement en sélectionnant, en haut de l'Écran d'Affichage de l'Image, « WCS->Définir l'échelle de pixels pour les images sans WCS… », puis en saisissant les valeurs correctes d'échelle de pixels X et Y.

7.4. Résolution de plaques à l'aide d'AIJ

La résolution de plaques consiste à associer les étoiles d'une image à leurs coordonnées. En option, ces informations peuvent également être stockées de manière permanente dans l'en-tête FITS de l'image pour une éventuelle utilisation ultérieure. Les informations stockées dans l'en-tête FITS utilisent les informations WCS ; ces informations permettent aux exécutions ultérieures d'identifier les coordonnées d'ascension droite et de déclinaison des étoiles sélectionnées.

Voici des exemples où il peut être souhaitable d'utiliser une ou plusieurs images de plaques résolues :

1. il peut être utile de résoudre une plaque pour localiser l'emplacement exact de l'étoile cible dans un champ d'étoiles encombré ;
2. si les images sont mal alignées tout au long de la session d'observation, ou si un retournement au méridien s'est produit, il peut être utile de suivre la position d'étoiles particulières d'une image à l'autre pendant le processus de photométrie différentielle en utilisant leurs coordonnées d'ascension droite et de déclinaison.

Les images qui contiennent des informations WCS provenant d'autres logiciels peuvent être utilisées par AIJ, ou AIJ lui-même peut être utilisé pour résoudre une ou plusieurs images dans la pile d'images. Cette dernière opération est effectuée en sélectionnant dans le menu Affichage d'image « WCS->Résolution de plaque en utilisant Astrometry.net (avec options)… ». Un écran similaire à celui de la Figure 10 apparaît alors.

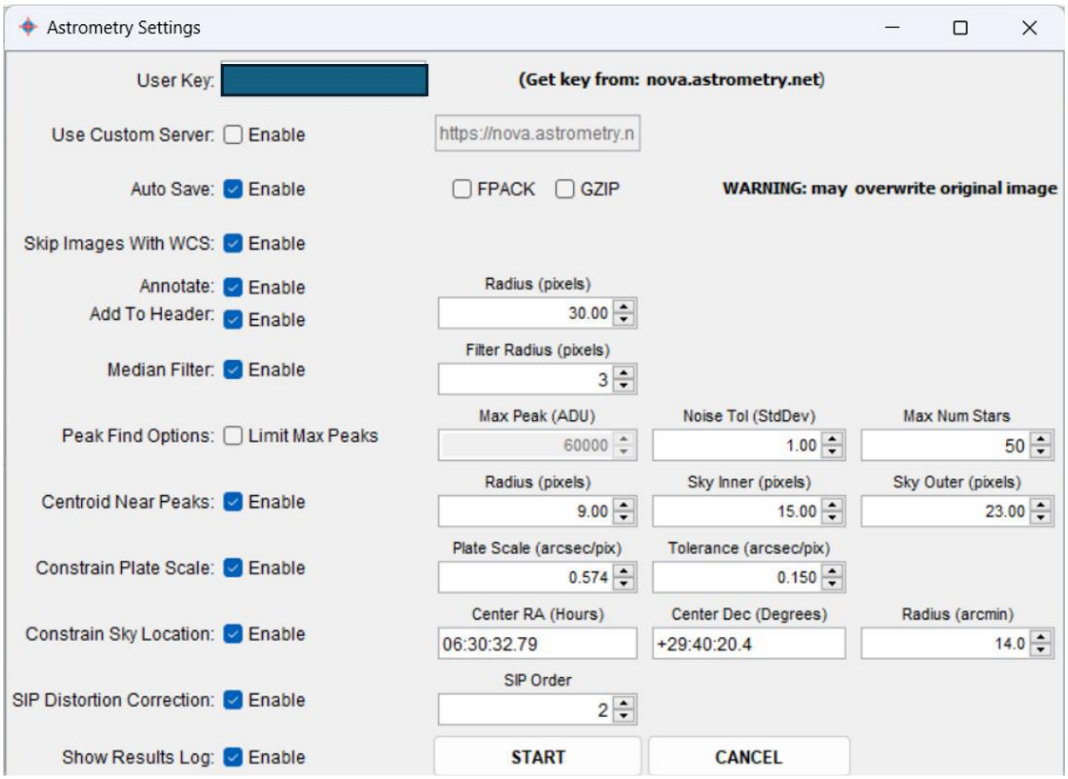


Figure 10. Écran des Paramètres d'astrométrie

AIJ peut alors utiliser soit la fonction en ligne astrometry.net pour résoudre la plaque, soit les utilisateurs Windows peuvent utiliser une version locale qui ne nécessite pas de connexion en ligne. Ce qui suit décrit chacune de ces deux alternatives.

7.4.1. Alternatives à Astrometry.net

Alternative 1 : Résolution de plaques à l'aide de la version en ligne d'Astrometry.net

Pour cette alternative, une clé Astrometry.net est d'abord obtenue. Cela se fait en se connectant à http://nova.astrometry.net/signin/?next=/api_help en utilisant, par exemple, les informations de connexion Google de l'utilisateur. La clé se trouve ensuite sous Mon profil dans le menu déroulant du tableau de bord. Elle est appelée « ma clé API ». Cette clé est ensuite saisie dans le champ Clé utilisateur sur l'Écran des Paramètres d'Astrométrie d'AIJ.

Alternative 2 : Résolution de plaque à l'aide d'une version locale d'Astrometry.net

Les utilisateurs Windows peuvent utiliser une alternative à la version en ligne d'astrometry.net pour effectuer la résolution de plaque. Dans ce cas, AIJ utilise un serveur astrometry.net local. Le serveur, développé par Andy Galasso, s'appelle ansvr. Il peut être installé en allant sur http://adgsoftware.com/ansvr/ et en suivant les instructions d'installation. Une fois installé, la résolution

de plaque peut être effectuée localement en activant « Utiliser un Serveur Personnalisé » sur l'écran des Paramètres d'Astrométrie (voir Figure 10).

7.4.2. Informations sur l'astrométrie

Une fois l'alternative appropriée pour invoquer astrometry.net choisie, les autres entrées suivantes doivent être effectuées sur l'Écran des Paramètres d'Astrométrie :

1. « AutoSave » doit être coché si l'utilisateur souhaite que les en-têtes FITS des fichiers d'image d'origine soient mis à jour en permanence avec les informations WCS appropriées.
2. La sélection de l'option « Annoter » permet à AIJ de dessiner autour des étoiles trouvées dans SIMBAD, un cercle de taille « Rayon (pixels) », ainsi qu'une annotation du nom de l'étoile. Si cette option est sélectionnée, « Ajouter à l'en-tête » entraînera l'ajout de ces annotations à l'en-tête FITS de l'image.
3. Le ou les numéros de tranche des images de la pile de plaque à résoudre doivent être saisis dans les champs Tranche de début et Tranche de fin.
4. Les rayons des paramètres d'ouverture et d'anneau qui seront utilisés pendant le processus de photométrie différentielle (voir la section 7.5.1 ci-dessous) doivent être saisis dans les champs Rayon, Ciel intérieur et Ciel extérieur.
5. La valeur d'échelle de pixels correcte pour le système d'imagerie de l'utilisateur doit ensuite être saisie, ainsi qu'une certaine tolérance pour sa précision.
6. Ensuite, les coordonnées d'ascension droite et de déclinaison approximatives du centre de l'image, ainsi qu'un rayon de recherche pour les étoiles appropriées qui peuvent être utilisées pendant le processus de résolution de la plaque. L'utilisateur peut essayer de commencer par la largeur de l'image, puis la réduire à partir de là.
7. Toutes les autres valeurs et cases à cocher peuvent être définies telles qu'elles apparaissent dans la Figure 10. Lorsque START est sélectionné, le processus de résolution de la plaque commence.

7.5. Effectuer une Photométrie Différentielle

7.5.1. Sélectionner les Paramètres d'Ouverture et d'Anneau Appropriés

La première étape du processus de photométrie différentielle consiste à définir le rayon approprié de l'ouverture et les rayons des anneaux intérieur et extérieur de l'anneau. Cela se fait comme suit : L'icône sur l'écran d'Affichage de l'Image est sélectionnée, ce qui entraîne l'affichage de l'écran Mesures à Ouvertures Multiples (Figure 11).

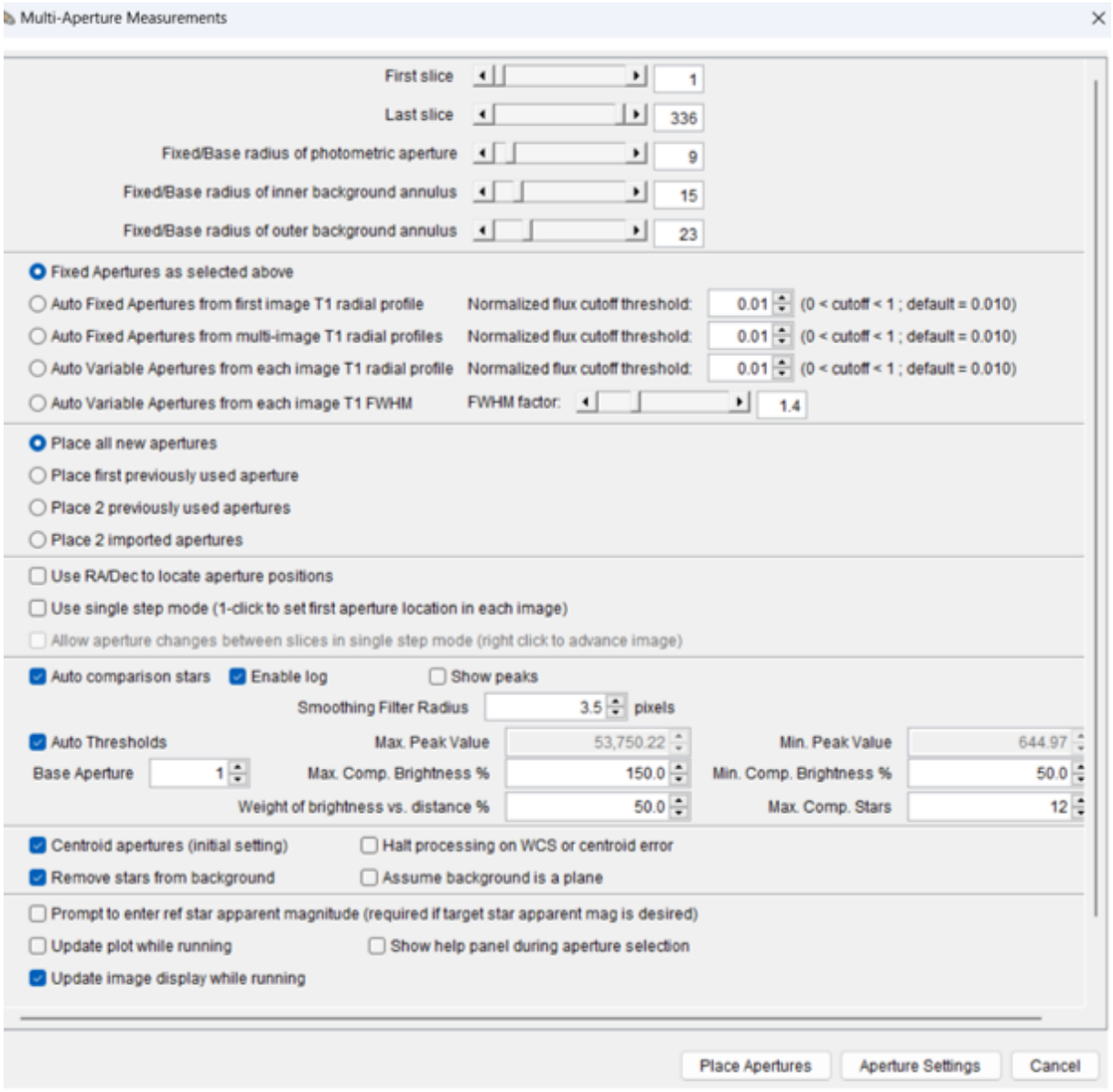


Figure 11. Écran de Mesures multi-ouvertures

Les rayons de l'ouverture et de l'anneau peuvent ensuite être définis de manière appropriée à l'aide de l'une des trois méthodes.

Méthode 1. Les paramètres de rayons initiaux peuvent être déterminés à l'aide de l'Écran de Profil de Turbulence associé à l'étoile cible (voir figure 12) et l'option d'Ouvertures Fixes peut ensuite être utilisée pour définir ces valeurs. L'écran de Profil de Turbulence apparaît lorsque le réticule en croix est placé sur l'étoile cible et que l'utilisateur maintient la touche Alt enfoncée en cliquant sur l'étoile (Remarque: que l'alt-clic sur l'étoile ne maintient pas le réticule sur l'étoile). Le rayon indiqué pour la source et les valeurs de début et de fin pour l'arrière-plan peuvent ensuite être utilisés pour le rayon d'ouverture initial, et les paramètres de rayons annulaires intérieurs et externes, respectivement.

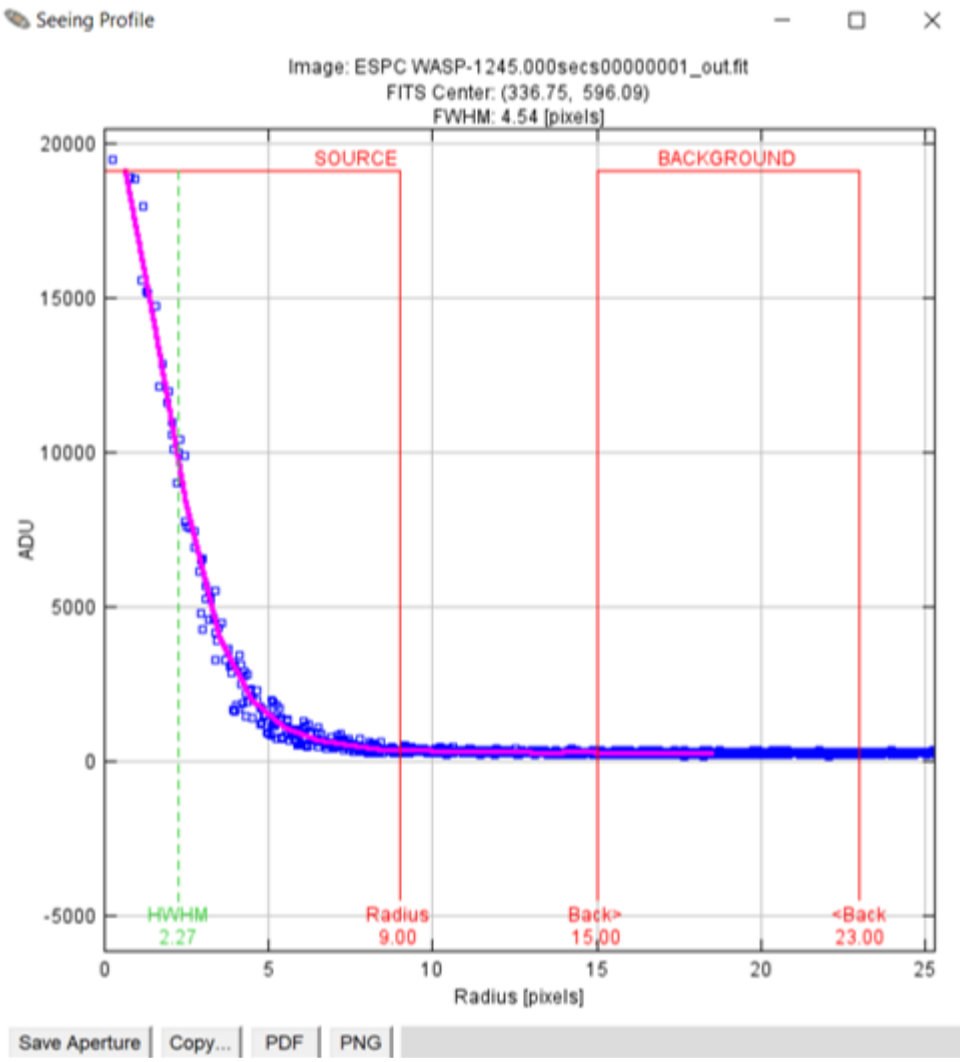


Figure 12. Écran du Profil de Turbulence

Méthode 2. Comme le montre la figure 11, plusieurs options peuvent être sélectionnées pour régler automatiquement les rayons d'ouverture et d'anneau. Ces options incluent :

1. De définir la même taille d'ouverture pour toutes les images en fonction du profil de l'étoile cible uniquement dans la première image ;
2. De définir la même taille d'ouverture pour toutes les images en fonction du profil de l'étoile cible sur toutes les images ;
3. De varier les tailles d'ouverture d'image à image en fonction du profil de l'étoile cible dans chaque image ;
4. De varier les tailles d'ouverture d'image à image en fonction de la FWHM de l'étoile cible.

Pour les options 2 et 3, un écran de résumé apparaît montrant la distribution des rayons d'ouverture et d'anneau sur toutes les images. De plus, la barre de curseur de cet écran de résumé peut être utilisée pour afficher les Profils de Turbulence spécifiques pour chacune des images.

Méthode 3. Enfin, les paramètres d'ouverture/d'anneau initiaux peuvent être déterminés en utilisant ceux qui maximisent le rapport signal/bruit de l'étoile cible. AIJ peut être utilisé pour déterminer le rapport signal/bruit de l'étoile cible de la manière suivante :

1. Cliquez sur l'icône  Définir les paramètres d'ouverture sur l'écran d'Affichage de l'Image. Définissez les rayons d'ouverture et d'anneau sur certains paramètres initiaux, puis cliquez sur OK.
2. Cliquez sur l'icône  Photométrie à Ouverture Unique dans la barre d'outils d'AIJ. Placez les cercles concentriques résultants sur l'étoile cible dans l'Affichage de l'Image et faites un clic gauche.
3. Cela produira un nouveau tableau de Mesures qui devrait inclure la mesure du rapport signal/bruit sous la colonne Source_SNR. Chaque modification ultérieure des paramètres d'ouverture et des sélections de Photométrie à Ouverture Unique ajoutera une nouvelle ligne à ce tableau.
4. Remarque : chaque ligne nouvellement créée (étrangère) dans le tableau de Mesures doit ensuite être supprimée avant que le tableau de Mesures ne soit utilisé pour la modélisation du transit. Pour cela, sélectionnez la ou les lignes à supprimer dans le tableau Mesures, puis sélectionnez Édition->Couper dans la barre de menu du tableau Mesures.

L'une des méthodes ci-dessus peut être utilisée pour obtenir un ensemble initial de paramètres d'ouverture et d'anneau. Les paramètres finaux des rayons d'ouverture et d'anneau doivent être ceux qui minimisent la moyenne quadratique (RMS) des résidus de la courbe de lumière créée pendant l'ajustement du modèle de transit. La RMS est une mesure de la façon dont le modèle « s'adapte » aux données observées. Cela implique que plusieurs exécutions de l'ajustement du modèle, comme décrit dans la section 7.11 ci-dessous, doivent être exécutées avec des valeurs différentes pour les paramètres d'ouverture et de rayons d'anneau.

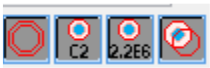
7.5.2. Sélectionnez les Étoiles de Comparaison et Commencez la Photométrie Différentielle

La section 6.4.2 décrit les directives pour sélectionner des étoiles de comparaison appropriées. Cependant, AIJ propose un processus automatisé pour le faire. En particulier, l'option « Comparaison automatique des étoiles » (voir Figure 11) permet à l'utilisateur de définir le nombre maximal d'étoiles de comparaison à sélectionner, ainsi qu'un numéro d'ouverture spécifié par l'utilisateur pour la cible (généralement 1). De plus, l'utilisateur peut définir les critères suivants à utiliser par AIJ pour sélectionner automatiquement les étoiles de comparaison :

1. une valeur ADU maximale et minimale spécifiée par l'utilisateur ou générée par AIJ
2. la luminosité de l'étoile par rapport à un pourcentage spécifié par l'utilisateur au-dessus et en dessous de la luminosité de l'étoile cible
3. un pourcentage de pondération appliqué à la luminosité de l'étoile relative à celle de la cible par rapport à la distance de l'étoile à la cible.

En parcourant les images de la pile, il peut sembler qu'elles sont progressivement décalées les unes par rapport aux autres et donc pas toutes alignées. Les sections 7.5.3 et 7.5.4 ci-dessous montrent comment gérer différents degrés de désalignement, ainsi qu'un retournement au méridien.

L'utilisateur doit d'abord activer les quatre icônes suivantes dans la barre de menu Affichage d'image :



Ces sélections permettent d'afficher les anneaux d'ouverture/anneau avec les noms des étoiles cibles et des étoiles de comparaison et les décomptes intégrés associés, et aident à positionner automatiquement les anneaux d'ouverture/anneau sur le centroïde de chaque étoile. Notez que dans un champ encombré, il peut être approprié de désactiver l'affichage des anneaux d'ouverture et des décomptes intégrés en désélectionnant la première et la troisième des quatre icônes ci-dessus.

Ensuite, en cliquant sur l'onglet Paramètres d'ouverture dans l'écran Mesures Multi-Ouvertures (Figure 11), l'écran Paramètres de Photométrie d'Ouverture (Figure 13) s'affiche. Sur cet écran, la méthode de centroïde Howell est généralement utilisée pour les étoiles faibles. De plus, l'utilisateur doit saisir une liste de mots-clés séparés par des virgules pour toutes les valeurs d'en-tête FITS qu'il souhaite extraire et ajouter au tableau des Mesures. De plus, les valeurs appropriées pour le gain de l'appareil photo d'imagerie, le bruit de lecture et le courant d'obscurité doivent être saisies. (Remarque : bien que AIJ utilise actuellement le terme « gain CCD » pour la première entrée, pour les caméras CMOS, cette entrée doit faire référence au gain système de l'appareil photo (c'est-à-dire les électrons par ADU). Enfin, les paramètres appropriés pour les avertissements de Saturation et de Linéarité doivent être définis. Toutes les autres cases à cocher peuvent être conservées telles qu'elles sont présentées. L'utilisateur doit ensuite sélectionner OK, ce qui le ramène à l'écran Mesures Multi-Ouvertures.

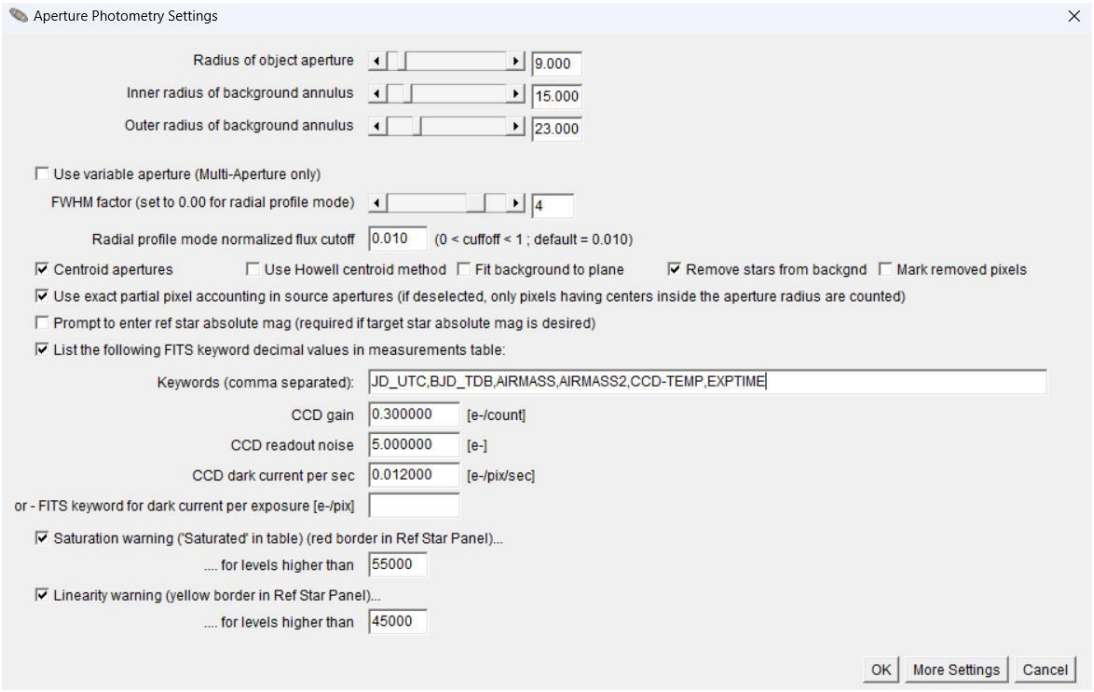


Figure 13. Écran Paramètres de Photométrie d'Ouverture

L'utilisateur doit ensuite sélectionner Placer les Ouvertures, puis placer et cliquer sur les cercles concentriques flottants sur l'étoile cible et les étoiles de comparaison si l'option d'ouverture Fixe a été choisie, ou simplement sur l'étoile cible si l'une des options d'ouverture automatique a été choisie. L'affichage de l'image apparaîtrait alors similaire à celui de la figure 14.

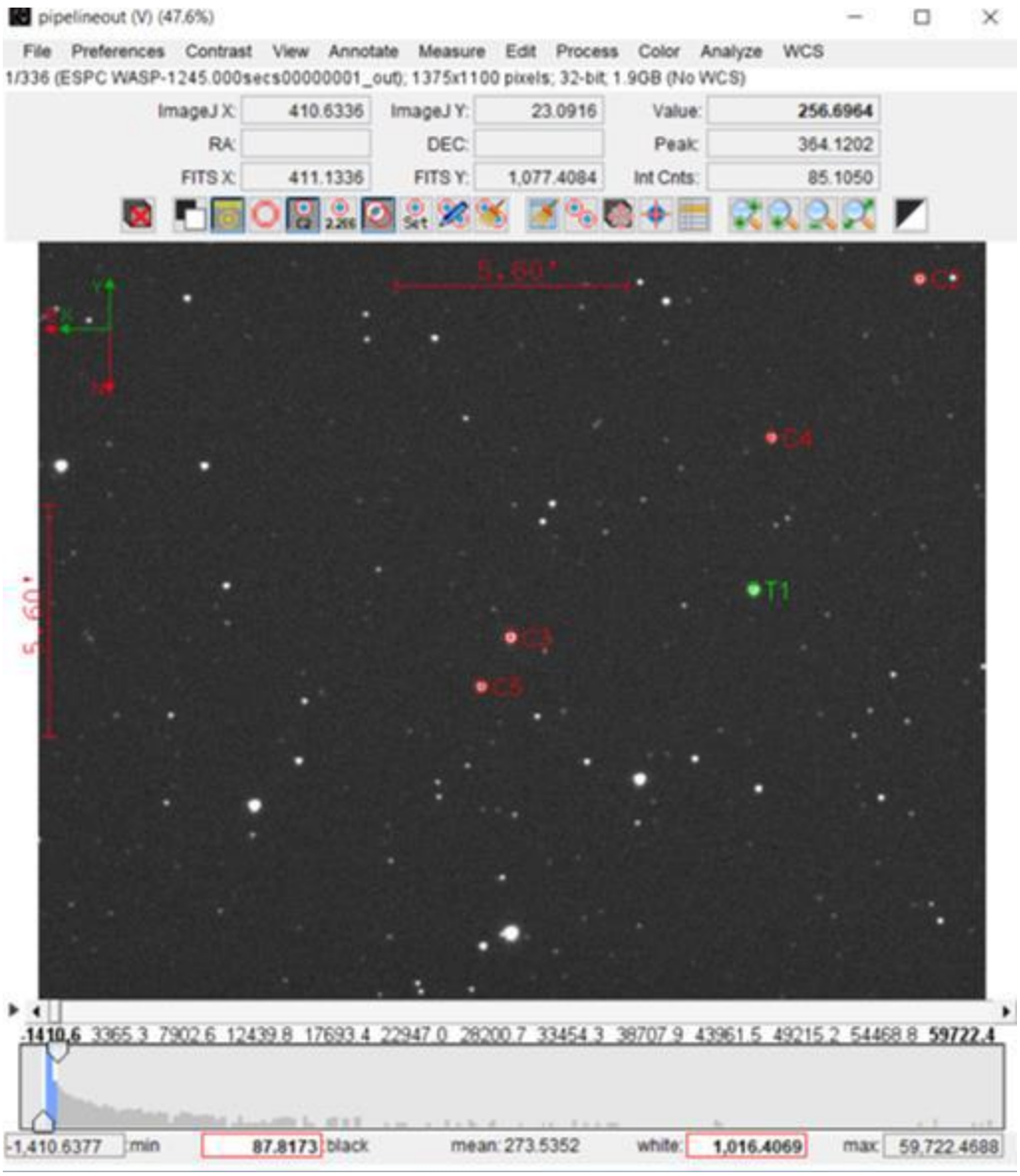


Figure 14. Échantillon d'Image avec Ouverture / Anneau Appliqué aux Étoiles Cibles et de Comparaison

Ensuite, en appuyant sur Entrée sur le clavier, le processus de photométrie différentielle commencera. Un tableau de Mesures sera construit avec chaque ligne représentant les mesures de chaque tranche dans la pile. Les étiquettes de l'en-tête de table des Mesures identifient le type de données dans la colonne de l'étiquette. Certaines de ces étiquettes correspondent à des identificateurs d'en-tête FITS communs, et d'autres sont les Mots clés spécifiés dans l'affichage des Paramètres de Photométrie d'Ouverture (voir figure 13).

Voici quelques-unes des valeurs les plus importantes du tableau Mesures qui seront utilisées ultérieurement dans l'analyse des exoplanètes (dans la notation ci-dessous, xx = Tn pour une étoile désignée comme cible et xx = Cn pour une étoile désignée comme étoile de comparaison) :

> Source-Sky_xx – Nombre d'ADU dans l'ouverture de photométrie, ajusté pour les comptages du fond de ciel qui se trouvent dans l'anneau de photométrie ;

tot_C_cnts – Nombre total de comptages Source-Sky de toutes les étoiles de comparaison sélectionnées ;
rel_flux_Tn – Flux relatif de l'étoile cible Tn = Source-Sky de Tn divisé par tot_C_cnts ;
rel_flux_Cn – Flux relatif de l'étoile de comparaison Cn = Source-Sky de Cn divisé par le nombre total de comptages Source-Sky de toutes les autres étoiles de comparaison sélectionnées ;
rel_flux_err_xx – Erreur associée au flux relatif correspondant.

À ce stade, le tableau Mesures doit être enregistré dans un sous-répertoire comme quelque chose appelé Analyse AIJ. Pour cela, sélectionnez Fichier->Enregistrer Sous dans le menu du tableau Mesures et sélectionnez le sous-répertoire Analyse AIJ. Le tableau Mesures peut ensuite être stocké par AIJ avec une extension xls, .tbl ou .txt. L'extension à utiliser pour le tableau Mesures peut être définie en allant dans la barre de menu principale d'AIJ et en sélectionnant : Édition->Options->Entrée/Sortie et en saisissant l'extension souhaitée dans la case « Extension de fichier pour les tableaux ». Remarque : il est préférable d'utiliser une extension de .tbl pour le tableau Mesures.

Il convient de noter que si la photométrie différentielle doit être refaite sur des images actuellement dans la pile, les étapes suivantes doivent être effectuées :

1. Effacez les anneaux d'ouverture/anneau existants en sélectionnant l'icône  « effacer les ouvertures et les annotations de la superposition » sur l'Affichage de l'Image.
2. Sur l'écran Mesures à Ouvertures Multiples (Figure 11), assurez-vous que la case à cocher à côté de « Placer toutes les nouvelles ouvertures » est cochée.

7.5.3. Traitement des Images mal Alignées

Un décalage dans l'orientation de l'image et donc un décalage d'alignement peuvent se produire si le guidage est mauvais. Si le décalage de l'image n'est pas trop important, la fonction Align Stack d'AIJ peut être utilisée pour aligner les images dans la pile active. Cela peut être accompli en sélectionnant l'icône « aligner la pile à l'aide des ouvertures » sur l'écran d'Affichage des Images et en saisissant un paramètre d'ouverture assez grand, avec des paramètres d'anneau plus grands correspondants. Les images de la pile sont alignées à l'aide de cette fonction et les images alignées résultantes sont stockées dans un nouveau sous-répertoire intitulé « alignées ». Les images de ce sous-répertoire doivent alors être celles utilisées pendant la phase de photométrie différentielle. L'utilisateur ne doit pas oublier de rétablir les paramètres d'ouverture et d'anneau en fonction de ceux qui sont appropriés pour la phase de photométrie différentielle. Il convient de noter que l'utilisation d'images alignées annule l'utilisation de colonnes de tableau de mesure telles que X(FITS)_T1, Y(FITS)_T1 comme mesures de décalage d'image, car les valeurs de ces colonnes seront respectivement les mêmes pour chaque image.

En cas de rotation d'image due à un décalage important de l'image, et que la fonction Align d'AIJ ne peut pas la corriger, les opérations suivantes peuvent être effectuées :

1. Tout d'abord, effectuez la résolution de plaque de chaque image (voir la section 7.4).
2. Une fois la résolution de plaques terminée, l'utilisateur peut ensuite effectuer la photométrie différentielle comme auparavant, mais sur l'écran des Mesures Multi-Ouvertures (figure 11), la case étiquetée «Utiliser RA / DEC pour localiser les positions d'ouverture» doit être cochée. De plus, la Première et la Dernière tranche doivent indiquer la gamme entière de tranches.

3. Lorsque le bouton "Placer les Ouvertures" est sélectionné sur cet écran, l'utilisateur placerait ensuite les anneaux d'ouverture / anneau sur les étoiles cibles et les étoiles de comparaison et, comme précédemment, appuyez sur Entrée sur le clavier. Toutes les images de la pile sont désormais analysées.

7.5.4. Faire face à un Retournement au Méridien

Si un retournement au méridien s'était produit pendant la session d'imagerie, les images seraient tournées à 180 ° de l'orientation illustrée à la figure 5. Ainsi, pour les images prises après le retournement, les anneaux d'ouverture / anneau ne tomberaient pas sur les emplacements corrects pour les étoiles cibles et les étoiles de comparaison. Remarque : Même si l'appareil photo d'imagerie lui-même a été tourné immédiatement avant le début de l'imagerie après le retournement au méridien, il est peu probable que les étoiles cibles et les étoiles de comparaison atterrissent dans les mêmes anneaux d'ouverture / anneau.

Pour mener une photométrie différentielle avec AIJ dans le cas d'un retournement au méridien, la méthode suivante peut être utilisée (Remarque: S'il y a des images mal alignées pendant la période pré-retournement ou pendant la période post- retournement, alors la méthode décrite dans la section 7.5. 3 doit être utilisée):

1. Tout d'abord, résolvez la plaque juste de la première image de toute la séquence. Ceci est accompli en entrant «1» dans les champs de tranche de démarrage et de tranche de fin de l'écran des paramètres d'astrométrie. Cela entrainera la résolution de plaque de la première image de la pile uniquement.
2. Ensuite, le numéro de tranche de l'image dans la pile immédiatement après le retournement au méridien doit être entré dans ces deux champs et sa résolution de plaque effectuée.
3. Sur l'écran de Mesures Multi-Ouvertures (voir figure 11), la case étiquetée «Utiliser RA / DEC pour localiser les positions d'ouverture» doit ensuite être COCHÉE et la case à cocher étiquetée «Arrêter le traitement sur WCS ou une erreur de centroïde» doit être DÉCOCHÉE.

Lorsque la photométrie différentielle est maintenant réalisée, AIJ procèdera dans les images antérieures au retournement, en utilisant les coordonnées dans la première tranche pour le placement de l'ouverture et de l'anneau sur les images antérieures au retournement, puis en utilisant les coordonnées de la première tranche après le retournement pour les images restantes dans la pile.

7.5.5. Stocker et Récupérer plus tard les Emplacements des Étoiles Cibles et des Étoiles de Comparaison

Il est parfois souhaitable de stocker, puis à un moment ultérieur, de retrouver l'emplacement de la cible et des sélections d'étoiles de comparaison de l'utilisateur. AIJ fournit deux méthodes pour ce faire avant le début du processus de photométrie différentielle, mais après la sélection des étoiles cibles et des étoiles de comparaison. La première méthode peut être utilisée pour les images non résolues et la deuxième méthode pour les images résolues.

Méthode 1:

1. Sur l'écran d'Affichage de l'Image, sélectionnez Fichier-> Enregistrer les ouvertures. Cela sauvera les coordonnées X, Y de chaque étoile Tn et Cn.
2. Pour récupérer plus tard ces étoiles, l'option Fichier-> Ouvrir les ouvertures peut être sélectionnée.

Méthode 2:

1. Avant le début du processus de photométrie différentielle, au moins la première image de la pile doit être résolue à la plaque.
2. Sur l'écran des Mesures Multi-Ouvertures, l'entrée «RA / DEC pour localiser les positions d'ouverture» doit être sélectionnée, et les entrées «Utiliser les ouvertures X précédentes…» et le «traitement d'arrêt sur WCS ou erreur de centroïde» ne doivent PAS être sélectionnées.
3. Ensuite, l'utilisateur doit placer les ouvertures sur la cible et les étoiles de comparaison souhaitées, puis appuyer sur Entrée pour conduire la photométrie différentielle sur toutes les images.
4. Une fois le tableau des Mesures créé, à partir de l'Affichage de l'Image, l'utilisateur doit ensuite sélectionner le fichier-> Exporter les ouvertures vers la liste RA / DEC… puis stocker le fichier résultant des emplacements d'étoiles cibles et de comparaison dans le répertoire d'analyse d'AIJ.

Avec la méthode 2, si l'utilisateur souhaite alors utiliser cette même sélection d'étoiles cibles et de comparaison ultérieurement, le processus suivant serait suivi:

1. Sur l'Affichage de l'Image, l'utilisateur sélectionnerait alors Fichier-> Importer des aperçus à partir de la liste RA / DEC… et choisirait le fichier précédemment stocké des emplacements cibles et de comparaison des étoiles. Les sélections d'étoiles cibles et comparaisons deviendraient alors vert clair et rouge, respectivement.
2. Ensuite, sur l'écran des Mesures Multi-Ouvertures, l'utilisateur sélectionnerait l'onglet «Placer n ouvertures» et sélectionnerait «Utiliser RA / DEC pour localiser les positions d'ouverture».
3. L'utilisateur appuierait ensuite sur Entrée pour commencer le processus de photométrie différentielle comme d'habitude.

7.6. Préparez-vous à l'Ajustement du Modèle

En préparation d'un ajustement du modèle, l'icône principale multi-tracé  de la barre d'outils d'AIJ doit être sélectionnée. Lorsque cela est fait, les quatre écrans suivants apparaissent :

Multi-Tracé principal
Paramètres des étoiles de référence Multi-Tracé
Multi-Tracé des données Y
Paramètres d'ajustement du jeu de données.

Un fichier AIJ avec une extension .plotcfg contient les informations utilisées pour créer ces écrans. Ce fichier peut être trouvé sur http://www.astrodennis.com, ainsi que les fichiers d'étalonnage et les images scientifiques pour l'exemple WASP-12b dans ce document. De plus, un fichier modèle .plotcfg à usage général peut également être trouvé sur http://www.astrodennis.com. L'utilisateur peut ouvrir un fichier .plotcfg en allant dans le coin supérieur gauche de l'écran Principal Multi-Tracés et en sélectionnant «Fichier-> Ouvrir la configuration du tracé à partir du fichier…» De même, la disposition actuelle des écrans ci-dessus peut être stockée en sélectionnant « Fichier-> Enregistrer la configuration du tracé… »

La première étape consiste à mettre à jour les valeurs correctes dans les entrées de la colonne AIRMASS, HJD_UTC et BJD_TDB dans le tableau des Mesures si cela n'a pas été fait pendant la phase d'étalonnage (voir la section 7.2 ci-dessus). Ceci est accompli comme suit:

Dans le menu principal multi-tracés, sélectionnez «Table-> Ajouter de nouvelles colonnes de données astronomiques à la table». Les deux écrans suivants apparaissent ensuite: "Convertisseur de Coordonnées MP" et "Ajouter des données astronomiques à la table" (voir figure 15).

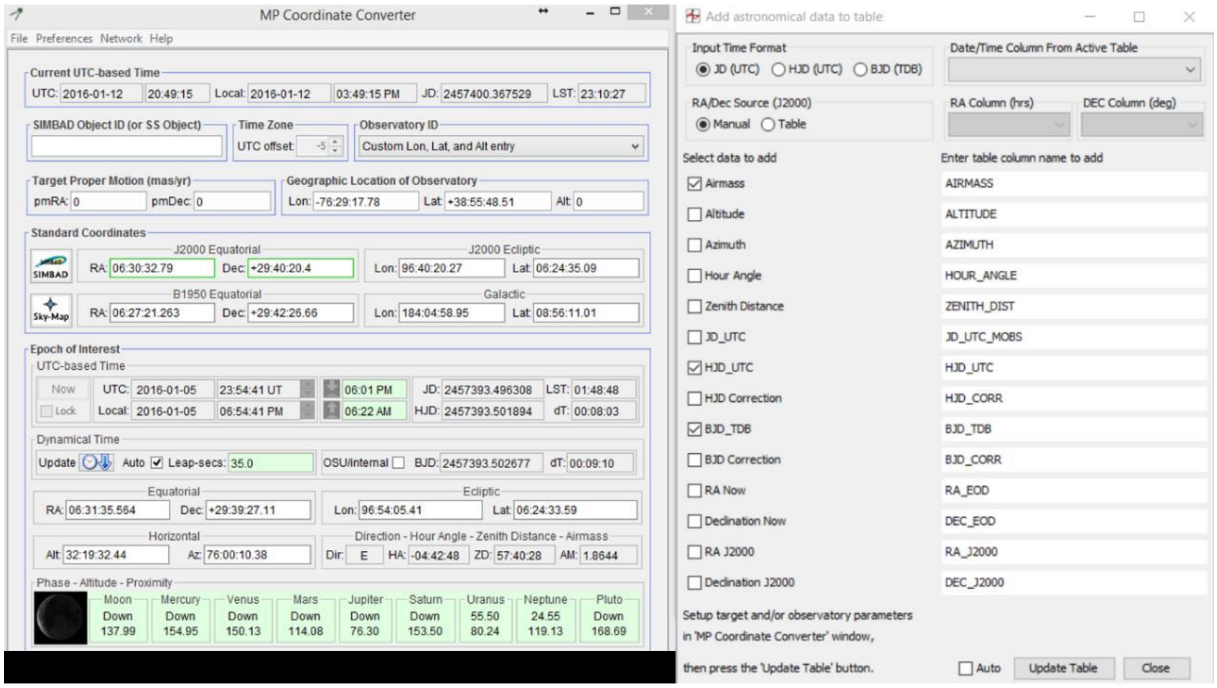


Figure 15. Écrans pour Corriger les Valeurs d'AIRMASS et de Temps Standard

Sur l'écran du Convertisseur de Coordonnées MP, vérifiez que les valeurs sont correctes pour l'Emplacement Géographique de l'Observatoire et les Coordonnées Équatoriales J2000 pour l'étoile cible. Sélectionnez également Auto dans la section de Temps Dynamique. Sur l'écran «Ajouter des données astronomiques à la table», vérifiez que les cases sont cochées comme indiqué dans l'écran le plus à droite de la figure 15, puis sélectionnez Mise à Jour de la Table. Appuyez sur OK si la boîte de dialogue "Over-write existing data?" apparaît. Les colonnes AIRMASS, HJD_UTC et BJD_TDB dans le tableau des Mesures seront ensuite mises à jour.

7.7. Conduire un Ajustement du Modèle

Sur l'écran Principal Multi-Tracés, la valeur appropriée doit être sélectionnée pour l'entrée par défaut des données X (à savoir le délai à utiliser). Dans l'exemple illustré à la figure 16, comme les valeurs du délai (préféré) de BJD_TDB ont été incluses dans le tableau des Mesures, BJD_TDB est sélectionné. Les entrées appropriées pour Titre et Sous-titre sont également faites.

Également sur l'écran Principal Multi-Tracés, sous la boîte de Sélection de la Région d'Ajustement et de Normalisation, les entrées sont faites pour les boîtes Gauche et Droite qui représentent respectivement les temps de démarrage du transit prédit (entrée) et de fin (sortie). En haut à droite de l'écran Principal Multi-Tracés, l'icône de copie  est ensuite sélectionnée. Cela positionne les temps d'entrée et de sortie prévus sur les marqueurs verticaux aux endroits appropriés sur l'écran du Tracé des Mesures. Les marqueurs verticaux doivent rester intacts par la suite afin de montrer quelles étaient les prédictions initiales. Cependant, les marqueurs d'ajustement et de normalisation doivent ensuite être positionnés sur les points de pénétration et de sortie apparents comme indiqué sur l'écran du tracé de mesures (figure

22). Les marqueurs ajustés et normalisés sont utilisés par AIJ pour définir les données hors transit qui sont utilisées pour calculer une ligne de base que l'ajustement du modèle utilise pour calculer le flux normalisé relatif sur toute l'observation.

Les champs Left Trim et Right Trim peuvent être utilisés pour éliminer une certaine quantité de données pré-ingression et post-égression du modèle. Cela peut être fait, par exemple, s'il y avait une systématique au début ou à la fin de la session d'observation. Les valeurs dans la région de retournement au méridien, d'ajustement et de normalisation et des boites de marqueurs verticaux ne sont que la partie décimale du temps associé (par exemple, 0,83508 serait entré si le temps en question était 2457395.83508). Si, cependant, l'heure de début est, disons, 2457395.83508 et que l'heure de fin «roule» dans, disons, 2457396.00175, alors la partie décimale du début doit être de 0,83508, mais la partie décimale finale devrait être de 1,00175.

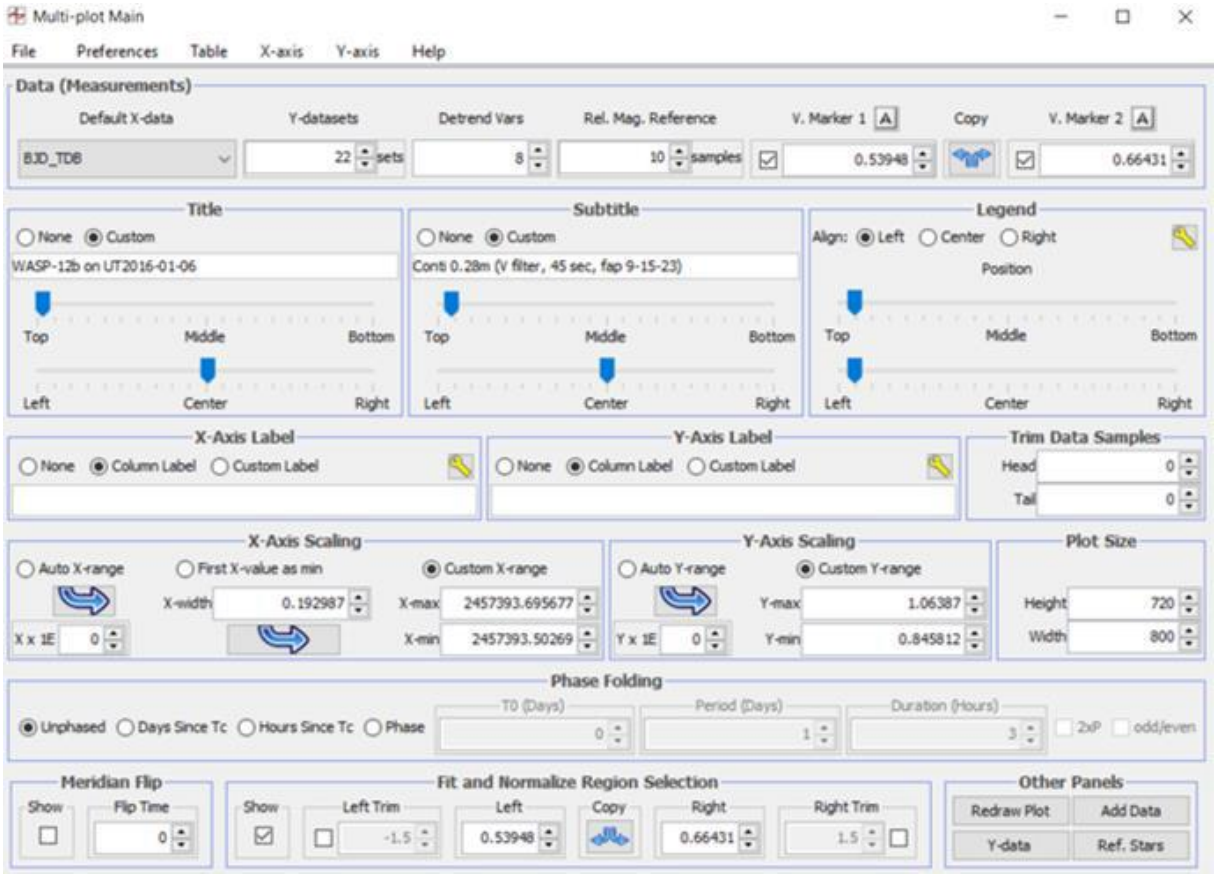


Figure 16. Écran Principal Multi-tracés

Ensuite, sous la boite d'échelle de l'axe X, cochez le bouton Auto X-Range et cliquez sur l'icône  Les boîtes X-Min et X-Max seront automatiquement remplies avec les valeurs X minimale et X maximale (temps BJD_TDB dans cet exemple) qui sont dans le tableau des Mesures. Remarque: Pour que cela fonctionne, au moins une ligne sur l'écran multi-tracés Y (voir figure 17) doit avoir sa case cochée dans la colonne de tracé. Alternativement, l'utilisateur peut cliquer sur la zone X personnalisée et remplir différentes valeurs X-MIN et X-MAX. La boîte d'échelle de l'axe Y peut être utilisée maintenant ou ultérieurement pour permettre aux différents tracés d'être dimensionnés afin qu'ils

apparaissent tous sur l'écran du tracé des mesures (voir figure 22). Les entrées de Taille de Tracé sont utilisées pour dimensionner l'écran de Tracé des Mesures sur le moniteur informatique de l'utilisateur.

Si un retournement au méridien s'est produit, ou s'il y a une rupture dans la session d'image et que les étoiles se sont déplacées vers une autre partie de l'appareil photo d'imagerie, alors la Boite de Retournement au Méridien sur l'écran Principal Multi-Tracés est utilisée pour placer une ligne dans le milieu de l'intervalle où cette discontinuité des données s'est produite. La boite Afficher doit être cochée et une entrée faite dans la boite du Temps de Retournement afin que la ligne de Retournement au Méridien soit placée sur l'écran de Tracé des Mesures à l'endroit approprié.

7.8. Tracé de la Courbe de Lumière

Avant qu'un tracé visuel des ensembles de données sélectionnés puisse être obtenu via l'écran de Tracé des Mesures (figure 22), l'écran Multi-Tracés des Données Y (figure 17) doit être configuré. C'est l'écran principal qui détermine où et comment les différents ensembles de données sont tracés.

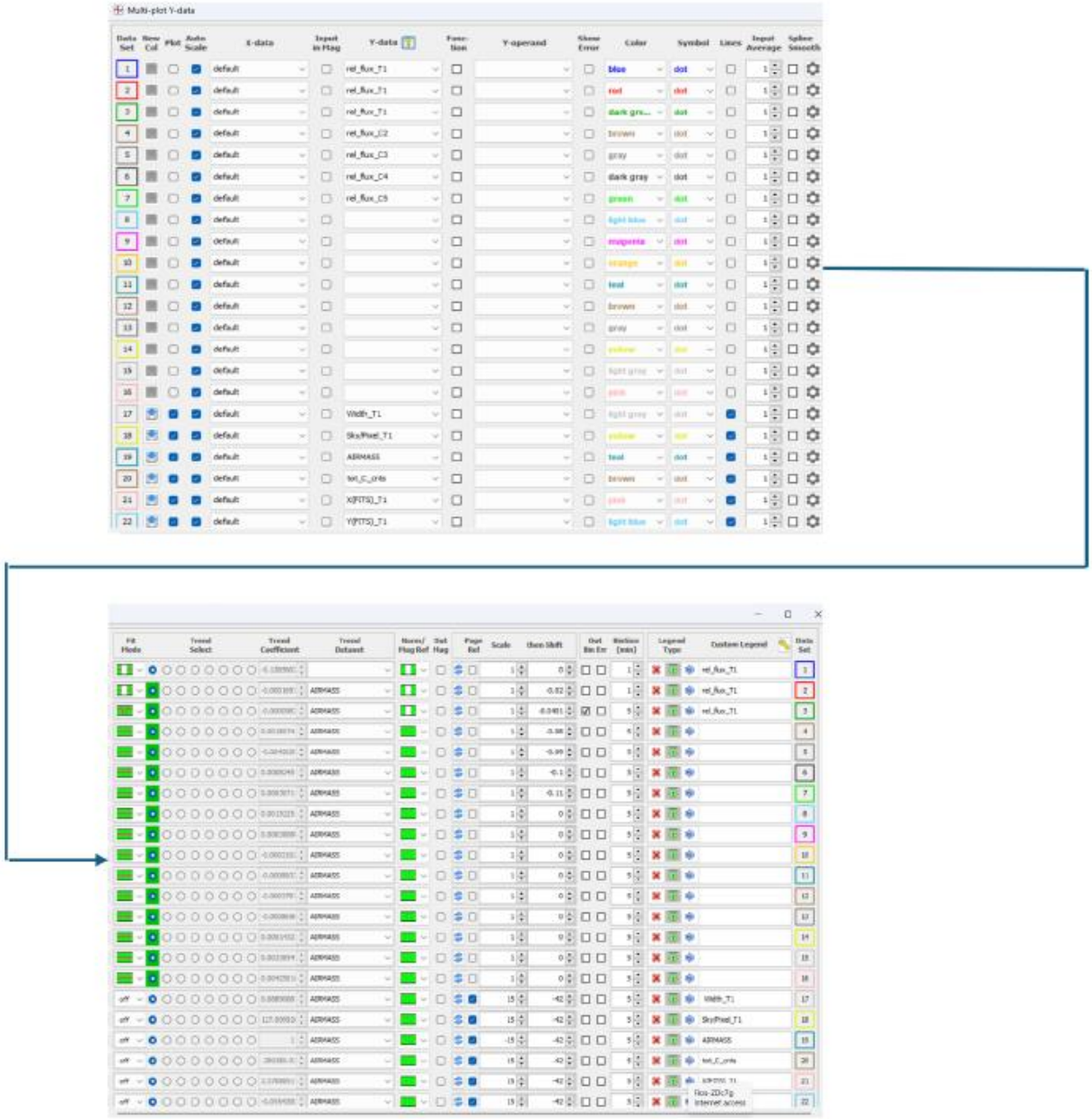


Figure 17. Écran Multi-Tracés des Données Y

Voici les paramètres clés et sélections de l'écran Multi-Tracés des Données Y:

La colonne de Tracé est utilisée pour sélectionner si un ensemble de données particulier doit être tracé.

Pour chaque ensemble de données particulier, la colonne X-Data indique quelles valeurs de la table de Mesures sont utilisées sur l'axe X. Une sélection "par défaut" équivaut aux valeurs par défaut spécifiées sur l'écran Principal Multi-Tracés ; Dans l'exemple utilisé tout au long ici, BJD_TDB est le défaut. La colonne de Données Y est utilisée pour sélectionner quelles colonnes de la table de Mesures sont utilisées pour les valeurs de l'axe Y.

La colonne Moyenne d'Entrée indique le nombre de points dans l'ensemble de données associées qui sont combinées en un point. Cela devrait être défini sur 1, sauf s'il est nécessaire de combiner des points

de données en raison de temps d'exposition très courts. Notez que la moyenne des entrées ne modifie pas les données de table des Mesures sous-jacentes, sauf si l'utilisateur ajoute des colonnes supplémentaires contenant des données moyennées comme décrit dans la section 7.12.

La colonne Spline Smooth est utilisée pour analyser les images prises à partir de télescopes spatiaux tels que Kepler et Tess et ne sont donc pas pertinents pour les observations au sol décrites ici.

La colonne Mode d'Ajustement est utilisée pour sélectionner le type d'ajustement qui doit être appliqué à l'ensemble de données respectives, ainsi que l'étendue des données (indiquée par la zone verte) qui sera incluse dans l'ajustement. Ainsi, comme le montre la figure 22, les points de données bruts du changement relatif du flux de T1 sont tracés sans ajustement, tandis que le deuxième tracé est un ajustement des données brutes en utilisant un paramètre de détente de la masse d'air, et un troisième tracé est un ajustement des données à l'aide d'un modèle de transit supposé et d'un paramètre de détente de la masse d'air. Également comme le montre cet exemple, les changements de flux relatif des quatre étoiles de comparaison sont ajustés avec un modèle en ligne droite. La raison des quatre derniers tracés linéaires est parce qu'il est supposé qu'il ne devrait pas y avoir de changements relatifs dans la luminosité de l'étoile de comparaison tout au long de la session d'imagerie, contrairement au flux relatif de T1 où il est supposé qu'il y ait une baisse de la luminosité due au transit de l'exoplanète.

La colonne Trend Select a deux objectifs. Tout d'abord, elle reflète les paramètres de détente qui sont appliqués au mode d'ajustement associé, qui eux-mêmes seront sélectionnés sur l'écran des paramètres d'ajustement de l'ensemble de données (figure 18). Les paramètres de détente actifs sont indiqués en vert. Deuxièmement, la sélection d'un paramètre de détente particulier reflétera son coefficient de tendance et le type associé de données de détente (par exemple, AIRMASS).

La colonne Norm / Mag Ref indique la plage de données utilisées pour normaliser l'ensemble de données respectives. Dans l'exemple de la figure 17, le flux relatif de T1 est normalisé en fonction des données hors transit - c'est-à-dire des données à gauche du début du transit (point d'entrée) et à droite de la fin du transit (point de sortie). Comme discuté précédemment, ces deux derniers points sont définis par les valeurs dans les boîtes de sélection de la région ajustées et normalisées sur l'écran Principal Multi-Tracés (figure 16).

Lorsqu'elle est cochée, la colonne Page Rel indique que les colonnes d'échelle et de décalage doivent être interprétées comme le pourcentage de la gamme Y. Non coché signifie que les valeurs d'échelle et de décalage sont des nombres absolus appliqués à la gamme Y. Les valeurs d'échelle et de décalage, ainsi que les valeurs Y-Min et Y-Max sur l'écran Principal Multi-Tracés, sont utilisées pour positionner correctement les différents tracés sur l'écran des Tracés de Mesures. Il convient de noter que l'ensemble de données brutes représentant le flux relatif de T1 (à savoir la première ligne de la figure 17) devrait toujours avoir une valeur d'échelle = 1. En effet, ces données peuvent être utilisées par d'autres programmes d'ajustement globaux et ne doivent pas être mis à l'échelle.

Enfin, la colonne Out Bin permet un overlay montrant des données regroupées à une taille de binning spécifiée par l'utilisateur. Une taille de bac de 5 minutes est généralement une taille acceptable. Notez que le «binning» ici ne doit pas être confondu avec le binning des pixels que l'utilisateur peut avoir effectué pendant le processus de capture d'image. En outre, le regroupement des données d'AIJ n'affecte pas l'ajustement du modèle car cette fonctionnalité est à des fins d'affichage uniquement.

7.9. Écran des Ajustements des Jeux de Données

L'écran des paramètres d'ajustement de l'ensemble de données (figure 18) est automatiquement ouvert chaque fois qu'il y a un ajustement de transit sélectionné pour un ensemble de données (dans ce cas, jeu de données 3) en Mode Ajustement sur l'écran Multi-Tracés des Données Y (Figure 17). Les entrées utilisateur suivantes sur l'écran de Définition des Ajustements des Jeux de Données sont réalisées et affectent la courbe de lumière résultante :

Période – la période orbitale, si elle est disponible, à partir de https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu; par exemple, dans le cas de WASP-12b, elle est de 1,0914 jours.

Paramètres de l'étoile hôte – le type spectral (Sp.T) de l'étoile hôte ; cela sert strictement à estimer le rayon *R** de l'étoile hôte, qui lui-même est utilisé simplement pour calculer le rayon de l'exoplanète. Si l'utilisateur a connaissance de *R** (par exemple, à partir de https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu, cette valeur peut être saisie dans la case *R*(Rsun)*. Dans cet exemple pour WASP-12, *R**=1,74942.

Quad LD U1 et Quad LD U2 – il s'agit des coefficients quadratiques d'assombrissement du limbe associés à l'étoile hôte et au filtre particulier utilisé. Ces valeurs peuvent être trouvées en utilisant le calculateur de coefficient d'assombrissement des limbes à l'adresse http://astroutils.astronomy.ohio-state.edu/exofast/limbdark.shtml. Dans l'exemple ici, les coefficients utilisés pour WASP-12b sont respectivement 0,39056081 et 0,3026992. Notez qu'ils sont placés dans la Colonne Centrale Prioritaire et sont verrouillés.

Choisissez les paramètres de détente possibles suivants dans les listes déroulantes, cependant, ne sélectionnez initialement que AIRMASS comme celui à utiliser :

1. AIRMASS
2. Width_T1
3. Sky/Pixel_T1
4. X(FITS)_T1
5. Y(FITS)_T1
6. tot_C_cnts
7. BJD_TDB
8. CCD-TEMP.

Comme on le verra ci-dessous, AIJ dispose d'un utilitaire permettant de sélectionner automatiquement les paramètres de détente qui minimisent la valeur statistique du BIC, qui est elle-même une mesure de la qualité de l'ajustement du modèle de transit.

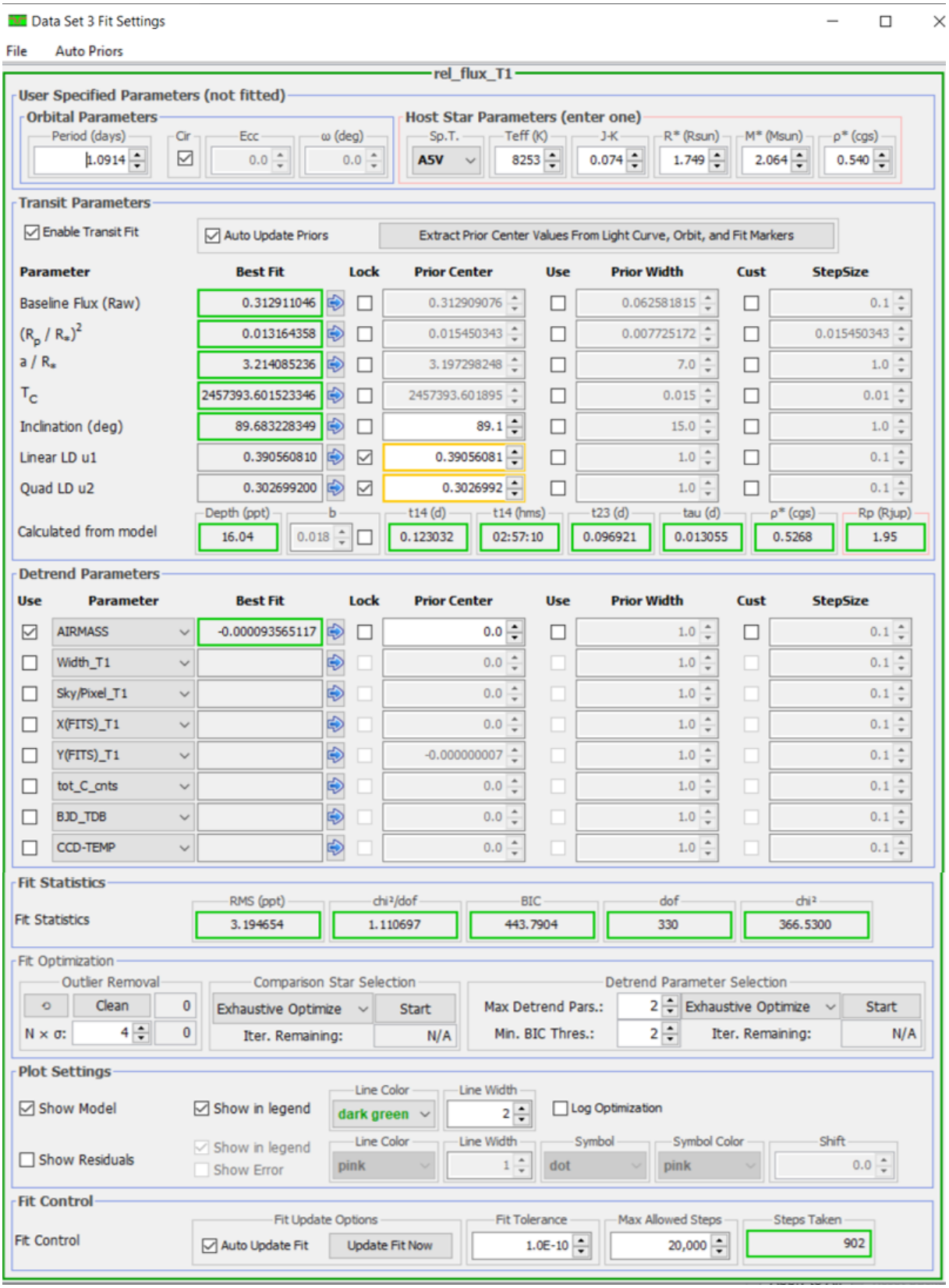


Figure 18. Écran des Paramètres d'Ajustement de l'Ensemble des Données

Les valeurs Y-min et Y-max sur l'écran Principal Multi-Tracé peuvent être ajustées pour afficher les parties souhaitées du tableau de Mesures sur le tracé, bien que, comme mentionné précédemment, il soit préférable de sélectionner Auto-X-range sous Mise à l'Échelle de l'Axe X sur l'écran Principal Multi-Tracé pour afficher toute la plage des valeurs X.

Il est possible de voir comment l'ajustement est amélioré en appliquant un nombre quelconque de paramètres de détente. Le plus courant est AIRMASS. D'autres paramètres de détente peuvent également être sélectionnés. Si un retournement au méridien ou une rupture dans la collecte de données s'est produit là où les étoiles se sont déplacées sur la caméra d'imagerie, alors Meridian_Flip peut également être sélectionné (notez que si cela est fait, la sélection et la valeur du temps de retournement doivent être effectuées sur l'écran Principal Multi-Tracé). D'autres paramètres de détente peuvent également être sélectionnés pour voir leur(s) effet(s) sur l'ajustement du modèle. Une bonne règle empirique pour savoir si un paramètre de détente est efficace est de consulter la valeur du Critère d'Information Bayésien (BIC). Si elle diminue de plus de 3,0 lorsqu'un paramètre de détente est sélectionné, alors ce paramètre de détente doit être sélectionné. S'il diminue de moins de 3,0 ou augmente, alors le paramètre de détente n'est pas si pertinent. Voir la section 7.11 pour une discussion plus détaillée sur la sélection des paramètres de détente.

Les paramètres de tracé sur l'écran de Configuration de l'Ajustement de l'Ensemble de Données permettent de définir si et comment le modèle de transit et les résidus sont affichés. De plus, une valeur de décalage permet de déplacer le tracé résiduel vers le haut ou vers le bas sur l'écran de Tracé des Mesures.

Enfin, l'écran Multi-Tracés des Paramètres de l'Étoile de Référence (Figure 19) permet de désélectionner ou de sélectionner les étoiles de comparaison que l'utilisateur souhaite inclure dans l'ajustement du modèle. Cela est utile s'il est déterminé après avoir visualisé le flux relatif d'une étoile de comparaison particulière dans l'écran du Tracé des Mesures (Figure 22) que ses points de données ne suivent pas un ajustement linéaire, c'est-à-dire une indication qu'il s'agit très probablement d'une étoile variable. Dans un tel cas, l'étoile de comparaison peut être désélectionnée de l'ensemble des étoiles de comparaison à utiliser. La Figure 20 montre un exemple où l'étoile de comparaison C5 peut être désélectionnée. Lorsque cette désélection a lieu, l'identifiant de l'étoile de comparaison « C » est remplacé par un « T » à la fois sur le Multi-Tracé des Étoiles de Référence comme illustré sur la Figure 20, ainsi que sur l'Affichage d'Image (voir Figure 21). La case de sélection de l’étoile de comparaison désélectionnée dans la Figure 17 peut alors être décochée afin que son tracé n’apparaisse plus.

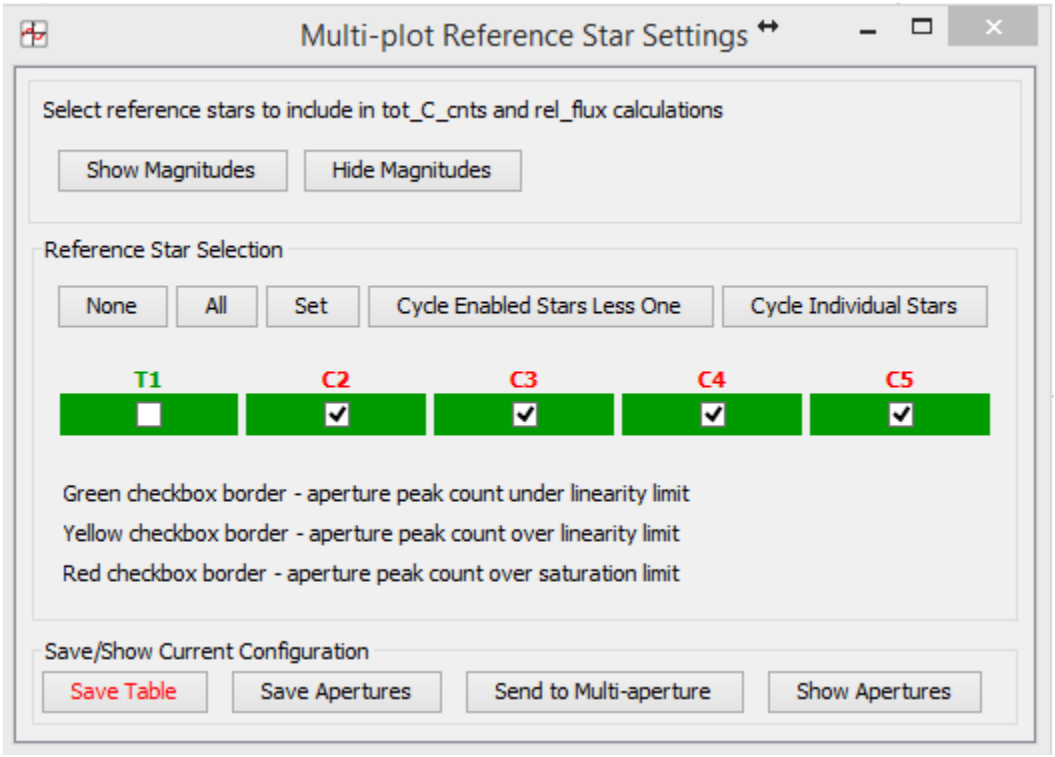


Figure 19. Écran des Paramètres de l'Étoile de Référence Multi-Tracé

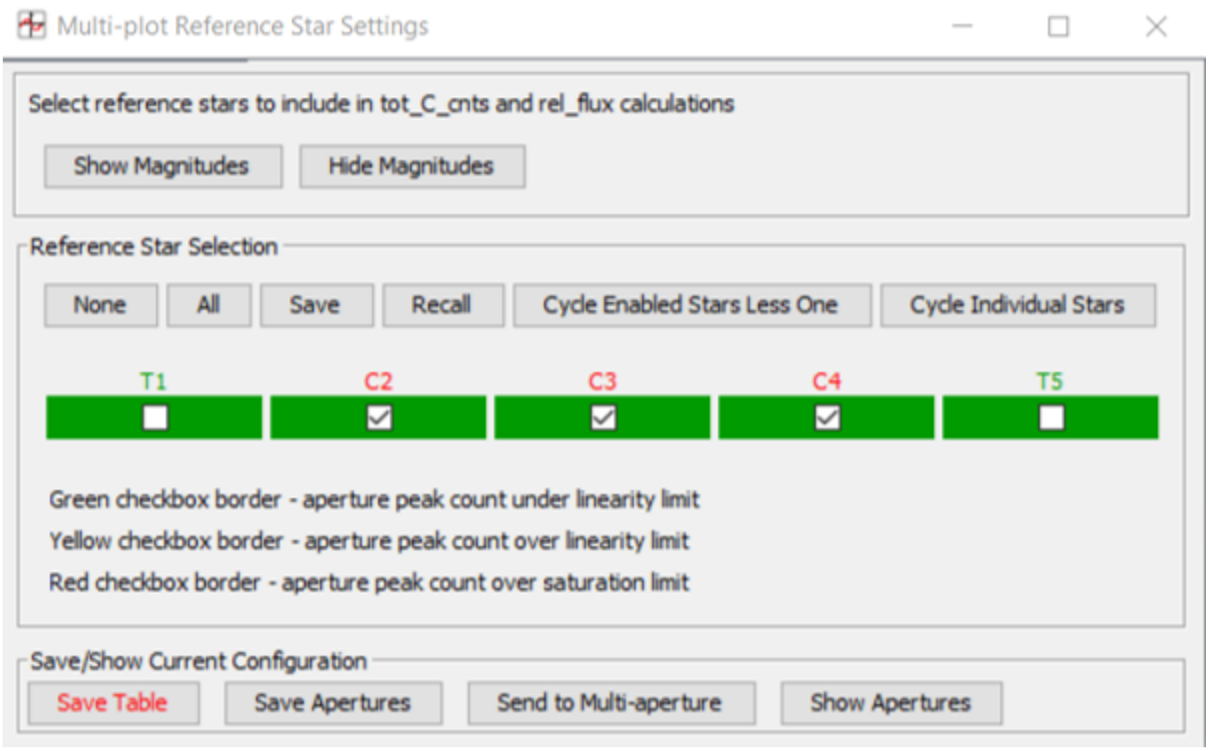


Figure 20. Exemple après désélection de C5

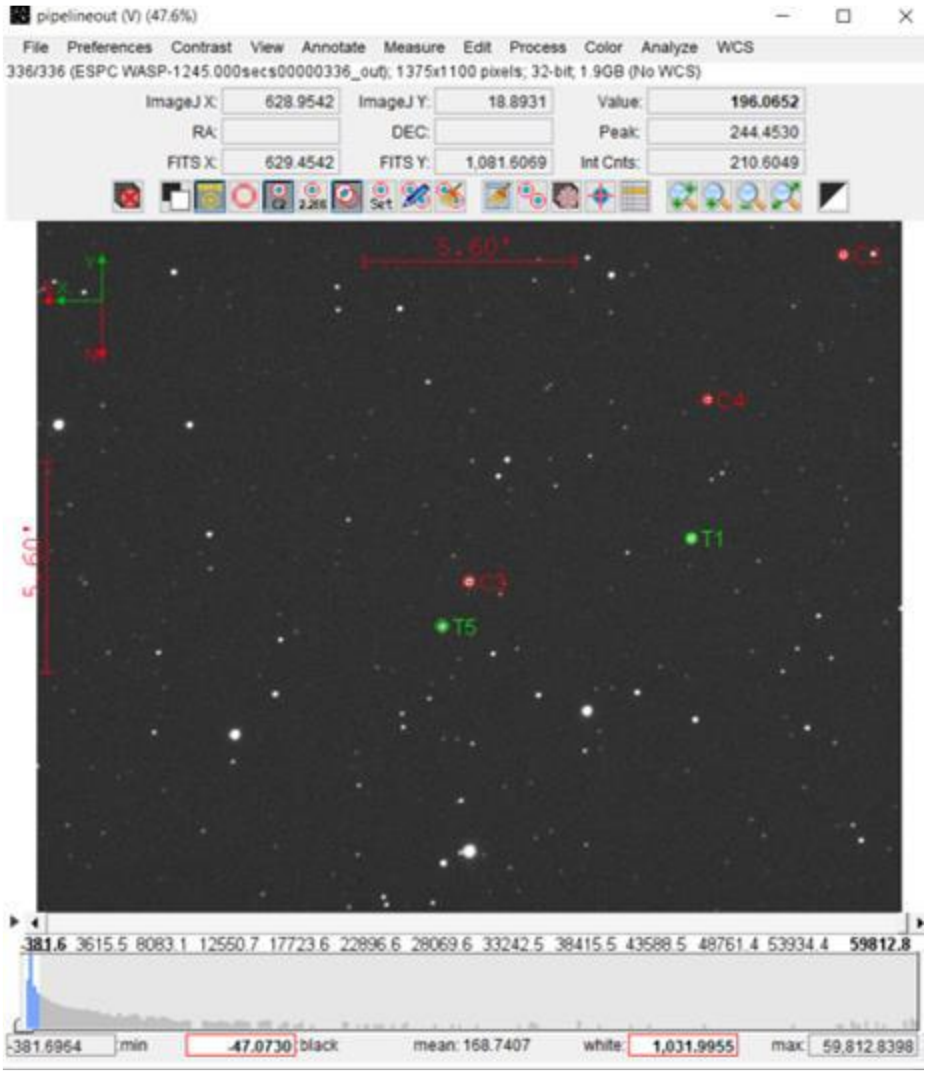


Figure 21. Affichage des images mises à jour montrant que C5 est devenu T5

Les données d'une étoile de comparaison désélectionnée ne sont alors pas incluses dans le calcul du flux relatif de la cible et donc dans l'ajustement du modèle, mais ses données sont toujours conservées dans le tableau des Mesures mais avec un en-tête de colonne « Tnn » contre « Cnn ».

Une fois la photométrie différentielle effectuée et après que les valeurs appropriées sur l'écran d'Ajustement de l'Ensemble de Données ont été définies, AIJ propose une méthode manuelle et automatisée pour optimiser l'ajustement du modèle de transit. La section 7.11 décrit comment un ajustement du modèle AIJ peut être optimisé manuellement. L'ajustement du modèle peut être optimisé automatiquement en utilisant les trois fonctions suivantes dans la région Optimisation de l'Ajustement de l'écran des Ensembles de Données :

1. *Suppression des valeurs aberrantes :* à l'aide du bouton Nettoyer, les points de données d'observation qui sont des valeurs aberrantes en raison de leur erreur photométrique peuvent être supprimés du modèle: (1) étant plus de N fois en dessous ou au-dessus du modèle de transit (clic gauche) ; (2) étant plus de N fois la valeur RMS du modèle de transit (Maj-clic gauche) ; ou (3) commencer plus de N fois la médiane de toutes les erreurs photométriques (Alt-clic

gauche). Le survol du bouton Nettoyer décrit comment sélectionner chacune de ces options de "nettoyage".

2. *Sélection d'étoiles de comparaison* – en cliquant sur Démarrer, AIJ parcourra toutes les combinaisons d'étoiles de comparaison et sélectionnera celles qui minimisent le modèle d'ajustement RMS.
3. *Sélection des paramètres de détente* – en cliquant sur Démarrer, AIJ sélectionnera le nombre spécifié par l'utilisateur de paramètres de détente qui minimisent la mesure statistique BIC, compte tenu d'un seuil BIC minimum spécifié par l'utilisateur.

Les paramètres de la Figure 16, de la Figure 17, de la Figure 18 et de la Figure 19 ont produit la courbe de lumière et d'autres tracés illustrés dans la Figure 22. Notez qu'en plus des tracés de courbe de lumière pour les étoiles cibles et les étoiles de comparaison, la Figure 22 contient également des tracés des valeurs de la Table de Mesures suivantes qui sont des mesures de systématique courante, qui peuvent être corrélées avec des anomalies dans les tracés de courbe de lumière :

1. *Width_T1 :* une mesure des changements dans la fonction d'étalement du point de l'étoile cible en raison de changements dans les conditions de visibilité ;
2. *Sky/Pixel :* une mesure des changements dans le ciel d'arrière-plan ;
3. *AIRMASS :* les changements attendus dans la masse d'air à l'emplacement de l'observateur ;
4. *tot_C_cnts :* le nombre total de sources du ciel de toutes les étoiles de comparaison sélectionnées – une mesure de transparence et de visibilité (dans des conditions idéales, ce tracé et celui de l'AIRMASS inverse doivent se suivre);
5. *X(FITS)_T1 :* une mesure du décalage de l'image de l'étoile cible sur l'axe X ;
6. *Y(FITS)_T1 :* une mesure du décalage de l'image de l'étoile cible sur l'axe Y.

Enfin, la figure 23 est un exemple d'ajustement d'exoplanète basé sur des données collectées par l'astronome amateur Paul Benni pour l'exoplanète Wasp-76b. Elle montre comment un paramètre de détente Meridian_Flip a été utilisé pour prendre en charge un décalage dans les points de données causé par l'atterrissage des étoiles cibles et des étoiles de comparaison sur une partie différente de l'appareil photo d'imagerie après le basculement au méridien.

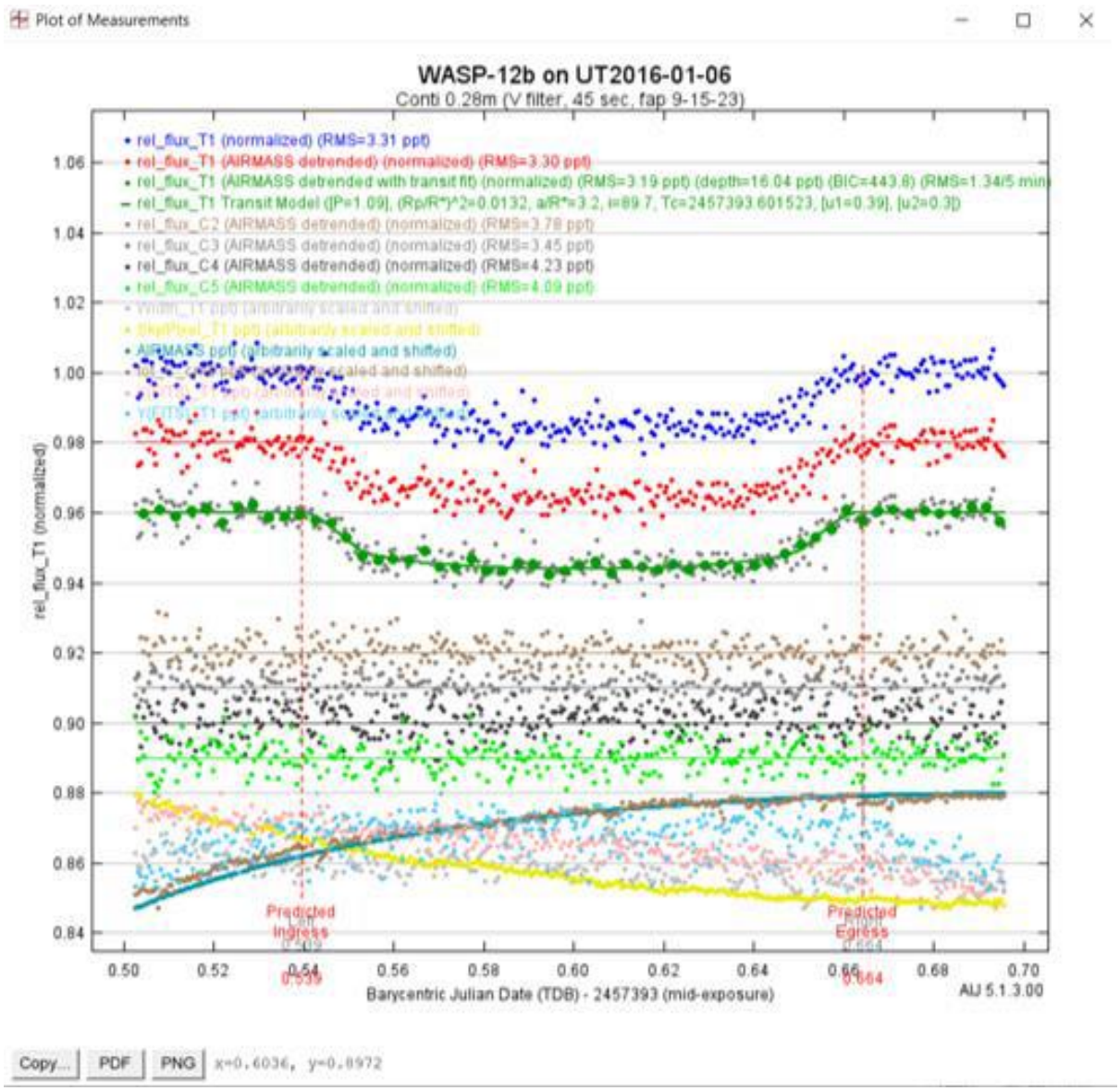


Figure 22 – Tracé de l'Écran des Mesures

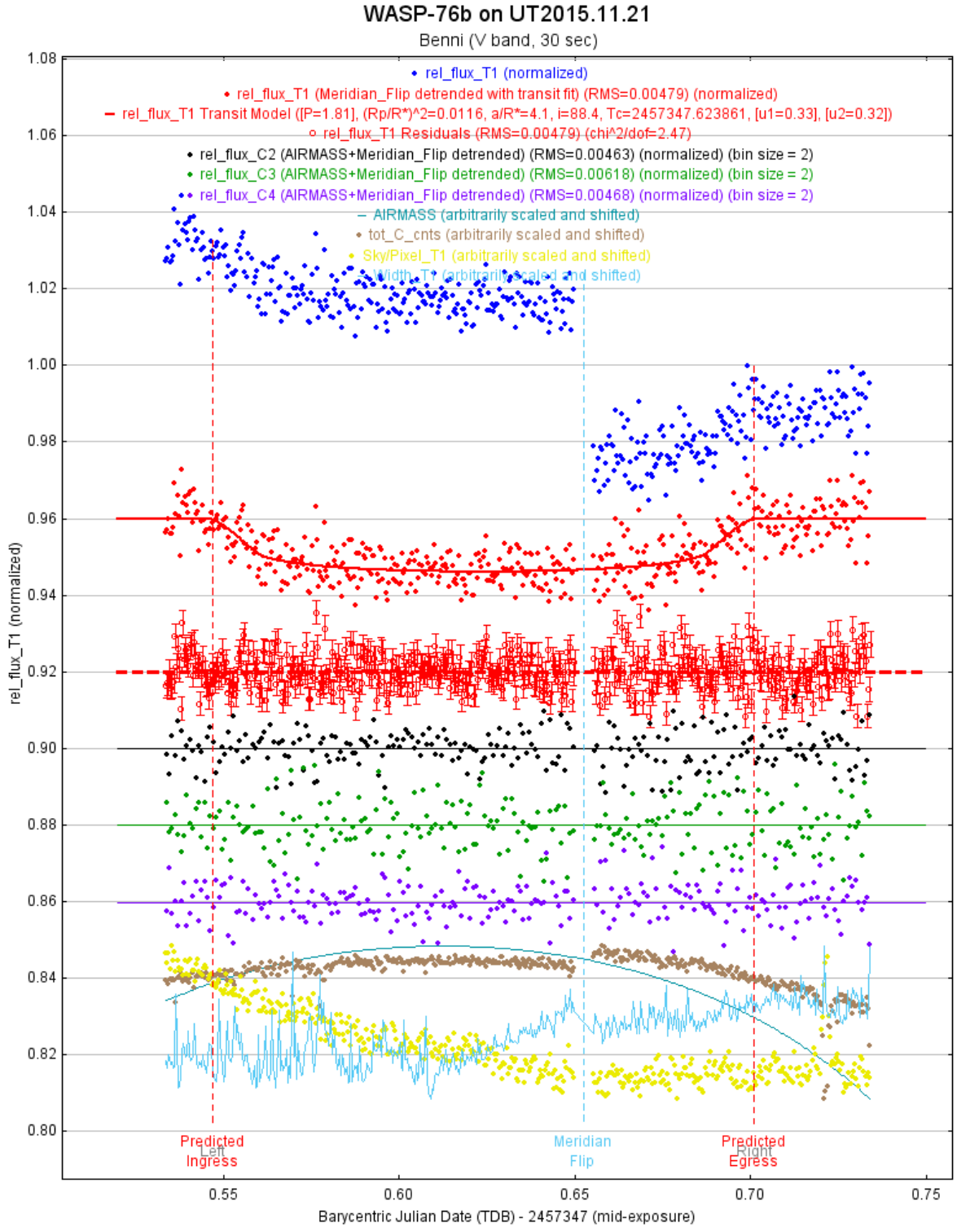


Figure 23. Exemple d'Utilisation du Paramètre Meridian_Flip Detrend

7.10. Enregistrement des Données du Modèle

Étant donné que l'ensemble des ajustements du modèle et des ajustements de détente précédents ne modifie pas le Tableau des Mesures, il est conseillé à l'utilisateur d'enregistrer l'état actuel de ces paramètres d'ajustement et d'autres en sélectionnant Fichier->Enregistrer tout ou Fichier=>Enregistrer tout (avec options) dans le coin supérieur gauche de l'écran Principal Multi-tracé.

Dans certains cas, l'utilisateur peut être amené à trouver la plus petite ouverture photométrique qui ne réduit pas de manière significative le RMS de l'ajustement du modèle. Par exemple, lorsqu'il y a un compagnon proche et qu'il est souhaitable d'éliminer autant que possible tout flux provenant du compagnon qui pourrait affecter les mesures de l'étoile cible. Dans ce cas, après avoir enregistré les informations de l'ajustement initial du modèle comme décrit ci-dessus, l'utilisateur doit recommencer l'ensemble du processus de photométrie différentielle depuis le début. L'ouverture est réduite par incréments à chaque exécution jusqu'à ce que le RMS change de manière significative. Notez que le tableau de mesure de chaque exécution successive, y compris après la première, doit être supprimé après leur enregistrement, car les exécutions de photométrie différentielle suivantes ajouteraient des lignes à un tableau actif.

7.11. Optimisation Manuelle d'un Ajustement de Modèle

Voici les directives pour optimiser manuellement les transits complets uniquement, et non les transits partiels :

1. Sélectionnez initialement AIRMASS comme seul paramètre de détente. Si un retournement au méridien a été effectué, Meridian_Flip doit être conservé comme paramètre de détente tout au long des étapes restantes ci-dessous.

2. Déterminez les effets sur le RMS de la suppression de diverses étoiles de comparaison (comme vu précédemment, AIJ permet à l'utilisateur de « désélectionner » facilement une étoile de comparaison, auquel cas tous les calculs associés à cette étoile sont refaits). Si le RMS diminue lorsqu'une étoile de comparaison particulière est désélectionnée, laissez-la de côté. Il arrive parfois que le flux relatif de ces étoiles montre également une quantité de dispersion supérieure à celle de l'étoile cible et des autres étoiles de comparaison.

3. Avec la sélection ci-dessus des étoiles de comparaison et AIRMASS restant comme seul paramètre de détente (avec peut-être l'ajout de Meridian_Flip), refaites la photométrie différentielle et les ajustements du modèle avec des rayons d'ouverture et d'anneau plus petits et plus grands. Déterminez les effets sur le RMS pour chaque nouvelle combinaison de rayons. Choisissez la combinaison qui donne le RMS le plus bas.

4. Répétez l'étape 2 sur ce nouvel ensemble de rayons pour obtenir le meilleur RMS. En plus de la valeur RMS résultante, enregistrez la valeur BIC qui correspond à la meilleure RMS.

5. Déterminez les effets des différents paramètres de détente. Tout d'abord, supprimez le paramètre de détente AIRMASS et voyez si le BIC augmente de 3 ou plus. Si c'est le cas, conservez le paramètre de détente AIRMASS ; si ce n'est pas le cas, n'incluez pas AIRMASS. Ensuite, ajoutez les paramètres de détente restants un par un et observez les changements dans la valeur BIC. Parmi les paramètres de détente qui entraînent une réduction d'au moins 3 de la valeur BIC, choisissez les (au plus) 2 paramètres qui provoquent la plus grande réduction de cette valeur.

Une façon de réfléchir aux paramètres de détente et à ceux qu'il est « légitime » d'utiliser est de se demander : quels facteurs externes, sans rapport avec la cible elle-même, peuvent influencer le flux relatif de la cible et dont le propre calcul n'est pas basé sur des facteurs qui affectent également la mesure du flux relatif de la cible. Par exemple, puisque le flux relatif de la cible T1 contient Source-Sky comme l'un de ses éléments, alors Source-Sky_T1 ne serait évidemment pas un paramètre de détente approprié pour rel_flux_T1. De plus, il ne faudrait pas utiliser de paramètres de détente, tels que AIRMASS et tot_C_cnts, qui sont eux-mêmes quelque peu corrélés (par exemple, tot_C_cnts suit généralement une trajectoire plus élevée avec un AIRMASS plus faible et une trajectoire plus basse avec un AIRMASS plus élevé).

6. En utilisant l'ensemble résultant de paramètres de détente, répétez à nouveau l'étape 2 pour voir les effets sur le RMS de la suppression d'une ou plusieurs étoiles de comparaison.

Il convient de noter que la réalisation de toutes les étapes ci-dessus est facultative. Cependant, si les résultats de l'ajustement du modèle sont fournis à une équipe scientifique et que ces étapes ne sont pas effectuées par l'observateur, les images calibrées originales de l'observateur peuvent devoir être transférées à l'équipe scientifique pour qu'elle effectue une analyse plus détaillée.

7.12. Entrées dans des Programmes Externes

Pour certaines campagnes de recherche sur les exoplanètes, l'observateur d'exoplanètes peut être invité à soumettre certaines données à des fins d'utilisation par des programmes externes. L'exemple ci-dessous montre comment un fichier peut être créé pour un programme d'ajustement global tel qu'EXOFAST (NASA, 2022A) qui nécessite les éléments suivants pour chaque point de données : son heure BJD_TDB, le flux relatif normalisé de l'étoile cible pour ce point de données, l'erreur du flux relatif normalisé de l'étoile cible et les valeurs de tous les paramètres de détente utilisés dans l'ajustement du modèle AIJ.

La création d'un tel fichier s'effectue comme suit :

Cliquez sur la flèche bas de New Col pour l'ensemble de données représentant le flux relatif normalisé de l'étoile cible (dans l'exemple utilisé ici, il s'agirait de la première flèche bas New Col dans la Figure 17). Un écran contextuel apparaît alors et des entrées sont effectuées comme indiqué dans la Figure 24.

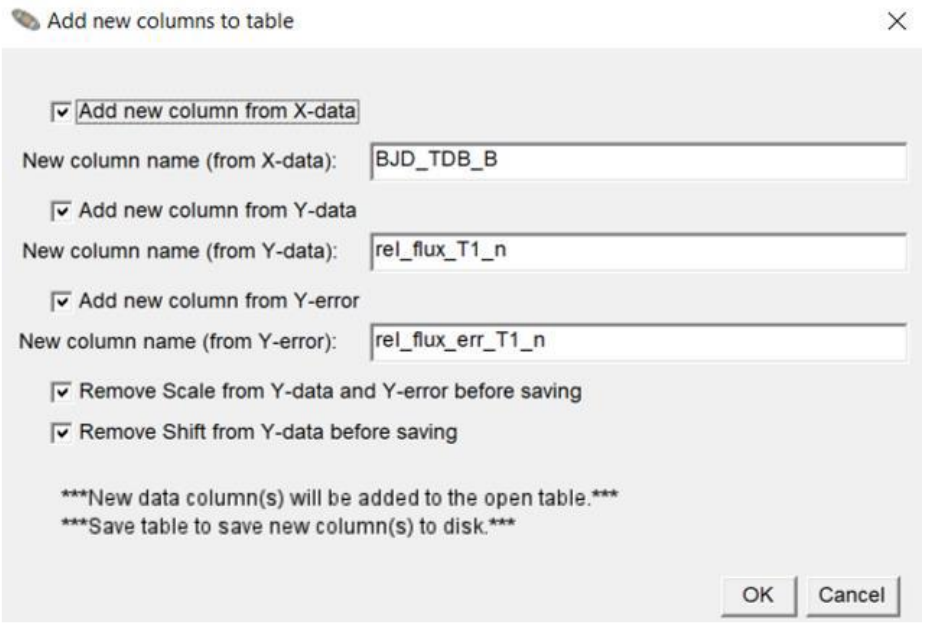


Figure 24. Écran pour Ajouter de Nouvelles Colonnes au Tableau des Mesures

Lorsque vous sélectionnez OK, trois nouvelles colonnes sont ajoutées au tableau des mesures. Ces colonnes ajoutent pour chaque image le flux relatif normalisé de l'étoile cible et l'erreur du flux relatif normalisé de l'étoile cible, en plus du temps de la fonction BJD_TDB à nouveau.

Remarque : les valeurs de Bin Size, Scale et Shift sur l'écran Multi-Tracé de Y (voir Figure 17) affectent le calcul du flux relatif pour T1 dans cet exemple. Si l'une de ces valeurs a été modifiée, réinitialisez-les sur Input Average = 1, Scale = 1 et Shift = 0 avant de cliquer sur la flèche bas New Col dans l'exemple ci-dessus, à moins que ces modifications ne soient intentionnelles (par exemple, si vous souhaitez saisir des points de données moyens). Comme le montre la Figure 24, les cases à cocher en bas de l'écran contextuel forcent de manière pratique les valeurs Scale et Shift à 0 lors du calcul du flux relatif normalisé.

Enfin, pour générer un fichier contenant ces informations pour un programme d'ajustement global externe, la sélection « Fichier->Enregistrer le sous-ensemble de données dans le fichier… » est effectuée à partir de l'écran principal Multi-Tracés. L'écran Enregistrer le sous-ensemble de données apparaît alors (Figure 25) et les entrées sont effectuées comme indiqué. Dans ce cas, la valeur de BJD_TDB, le flux relatif normalisé de l'étoile cible, l'erreur du flux relatif normalisé de l'étoile cible et les valeurs AIRMASS sont sélectionnées. AIRMASS est inclus car il s'agit du paramètre de détente utilisé dans l'ajustement du modèle AIJ.

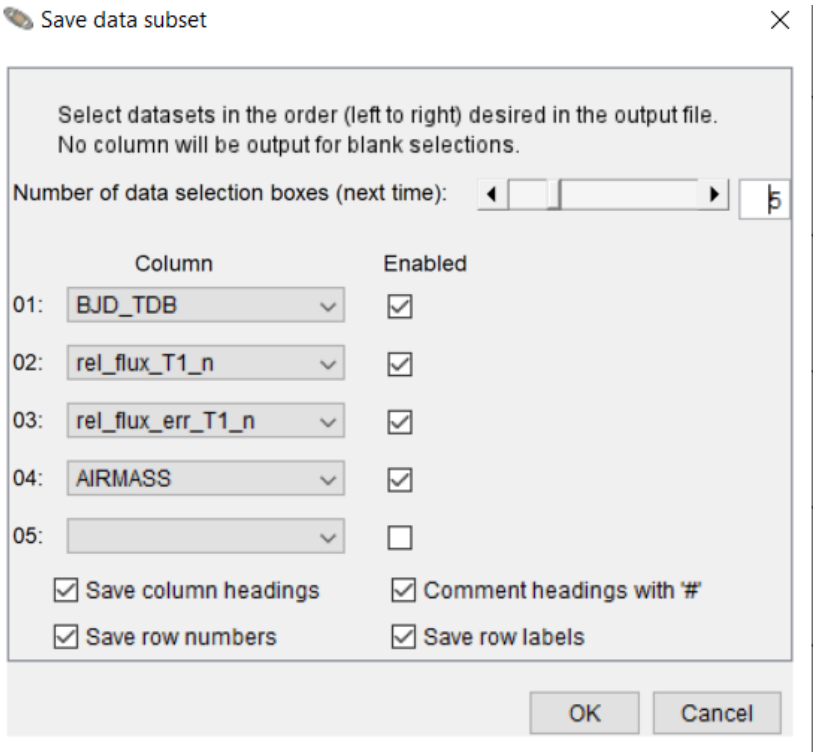


Figure 25. Écran Enregistrer le Sous-ensemble de Données

Lorsque vous sélectionnez OK, un fichier séparé contenant ces valeurs est créé.

Un autre exemple de données transférées vers une entité externe serait le téléchargement par l'utilisateur d'une observation d'exoplanète dans la base de données des exoplanètes de l'AAVSO (AED). Cette base de données est destinée à être une archive des observations d'astronomes amateurs d'exoplanètes confirmées dans le but d'aider à affiner leurs éphémérides, ainsi qu'à détecter toute variation de temps de transit (TTV) qui pourrait indiquer une planète compagne.

Pour télécharger une observation dans l'AED, l'utilisateur doit aller dans Fichier->Créer des données formatées dans la Base de Données des Exoplanètes de l'AAVSO… sur l'écran principal Multi-tracés d'AIJ. Une boîte de dialogue apparaît alors, invitant l'utilisateur à fournir des informations sur l'observation, ainsi qu'une sélection du tableau de mesures associé à l'observation. Un guide d'aide décrivant les entrées de cet écran est disponible à l'adresse suivante : http://www.astrodennis.com/AIJMacroHelp.pdf.

8. Résumé

Comme indiqué dans l'introduction, ce guide a été conçu comme une approche pratique, étape par étape, de l'étalonnage d'images, de la photométrie différentielle, du tracé de courbes de lumière et de la modélisation du transit d'exoplanètes à l'aide d'AIJ. Les utilisateurs sont encouragés à contacter l'auteur à l'adresse e-mail suivante pour toute suggestion de modification dans les domaines qui ne sont pas clairs et qui pourraient nécessiter des explications supplémentaires : dennis@astrodennis.com.

REMERCIEMENTS

L'auteur souhaite remercier tout particulièrement l'auteur d'AIJ, le Dr Karen A. Collins, pour ses suggestions et commentaires lors de la préparation de la version initiale de ce guide et pour son soutien continu.

RÉFÉRENCES

AAVSO : http://www.aavso.org/apps/vsp/ (2017)

Guide de l'AAVSO sur la photométrie CCD/CMOS (2022)

Baudat, G., « *Full Frame Guiding and Focusing* », actes de NEAIC 2017, avril 2017

Conti, D., « *Hubble Exoplanet Pro/Am Collaboration* », actes de la réunion annuelle 2015 de l'AAVSO, novembre 2015.

di Cicco, D., « *The ONAG from Innovation Foresights* », Sky&Telescope, décembre 2012.

Motta, M., « *Amateurs Track a Disintegrating Exoplanet* », Sky&Telescope, avril 2017.

NASA : https://jwst.nasa.gov/ (2017).

NASA : TESS Science Writer's Guide (2018).

NASA : https://exoplanets.nasa.gov/exoplanet-watch/about-exoplanet-watch/overview/ (2022)

NASA : https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/docs/exofast/exofast_home.html (2022A)

Pepper, J. et al., « *The Kilodegree Extremely Little Telescope (KELT): A Small Robotic Telescope for Large-Area Synoptic Surveys*,», (2007), arXiv : 0704.0460v2.

Ricker, G. et al., « *Transiting Exoplanet Survey Satellite* », (2015), Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems 1 (1).

Annexe A :

Feuille de travail d'observation

		Exoplanet:	**WASP-12b**				
		Observer:	**Dennis Conti**				
Item	Host Star/Exoplanet Information:	https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/					
1	RA:	06:30:32.79					
2	Dec:	29:40:20.16					
3	Period (days):	1.0914					
4	R_*:	1.794					
5	T_{eff}:	6154					
6	V mag:	11.6					
	Suggested range of comp stars:	11.16 to 12.35 mag					
7	Link to Reference Paper (optional):						
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:	https://astroutils.astronomy.osu.edu/exofast/limbdark.shtml					
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 not used:						