



HAL
open science

Recherche des exoplanètes, mesure de leurs propriétés physiques et orbitales

Pascal Bordé

► **To cite this version:**

Pascal Bordé. Recherche des exoplanètes, mesure de leurs propriétés physiques et orbitales. Astrophysique stellaire et solaire [astro-ph.SR]. Université Paris Sud - Paris XI, 2013. tel-00917762

HAL Id: tel-00917762

<https://theses.hal.science/tel-00917762v1>

Submitted on 12 Dec 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Recherche des exoplanètes, mesure de leurs propriétés physiques et orbitales

THÈSE

présentée et soutenue publiquement le 26 novembre 2013

pour l'obtention d'une

Habilitation à diriger des recherches

(spécialité astronomie, astrophysique)

par

Pascal Bordé

Composition du jury

<i>Président :</i>	Jean-Pierre Bibring	Professeur à l'université Paris-Sud
<i>Rapporteurs :</i>	Anne-Marie Lagrange	Directrice de recherches au CNRS
	Alain Lecavelier des Étangs	Directeur de recherches au CNRS
	Gérard Rousset	Professeur à l'université Paris-Diderot
<i>Examineurs :</i>	Thomas Rodet	Professeur à l'ENS Cachan
	Franck Selsis	Chargé de recherches au CNRS

Mis en page avec la classe thesul.

Pour Nathalie, Clément, Raphaël & Côme.

Sommaire

Prologue	1
-----------------	----------

Chapitre 1

Interférométrie optique à longue base

1.1	Principe de l'interférométrie	3
1.2	Application aux exoplanètes	4
1.3	Instrument	5
1.3.1	Étalonnage	6
1.3.2	Activité de recherche & développement	7
1.4	Observations	8
1.4.1	Le compagnon faible de θ Draconis	8
1.4.2	Travaux de physique stellaire	10
1.5	Conclusion	12

Chapitre 2

Coronographie stellaire

2.1	Principe d'un coronographe	15
2.2	Nécessité d'une optique active ou adaptative	16
2.3	Conclusion	18

Chapitre 3

La mission spatiale COROT

3.1	Présentation de COROT	21
3.2	Détection des transits	24
3.3	Prévision des performances de COROT	25
3.4	Caractérisation fine des transits	26
3.5	Classement automatique des candidats et probabilité de l'hypothèse planétaire	30
3.6	Deux des planètes découvertes par COROT	31
3.6.1	COROT-7b, une super-terre ultra-chaude	31

3.6.2	COROT-8b, un mini-saturne dense	33
3.7	Conclusion	34
	Épilogue	37
	Bibliographie	39
	Références	39
	Annexe A <i>Curriculum Vitae</i>	47
	Annexe B Article non publié sur θ Draconis	59

Prologue

La recherche et l'étude des planètes extrasolaires, ou exoplanètes, étendent le champ de la planétologie comparée hors du Système solaire. D'une manière générale, il s'agit de connaître l'atmosphère, la surface, la structure interne (éventuellement le champ magnétique) des planètes à la date de leur observation, mais on souhaite aussi comprendre leur formation et leur évolution physique et orbitale en tenant compte de l'influence de leur étoile et éventuellement des autres planètes de leur système. Les nombreuses exoplanètes découvertes et étudiées depuis une vingtaine d'années sont extrêmement diverses et cette diversité fait écho à celle que l'exploration spatiale a mise en évidence dans le Système solaire. Ainsi existent-ils par exemple des « super-terres » qui n'ont pas d'équivalents autour du Soleil. Il y a donc beaucoup à apprendre à explorer cette diversité.

L'exoplanétologie est également fortement motivée par un questionnement sur l'origine de la Vie et la place de l'Homme dans l'Univers. La Terre est-elle une planète unique en tant qu'havre de vie ? ou seulement en tant qu'havre de vie technologique ? En ce sens, cette jeune discipline poursuit la révolution copernicienne au-delà de la réalisation au XX^e siècle que le Soleil n'est qu'une banale étoile d'une banale galaxie de l'Univers.

Au sein de ce vaste cadre, ce sont les observations, leur analyse et les instruments qu'elles nécessitent qui ont été au cœur de mon effort de recherche depuis 1999. Classiquement, la découverte de nouvelles exoplanètes passe par l'examen depuis le sol et/ou l'espace de compagnons de petite taille et/ou de faible masse autour d'étoiles proches ou lointaines. Connaissant bien les propriétés physiques des étoiles (masse, rayon, température, métallicité, âge, etc.), on mesure les orbites et les propriétés physiques de leurs compagnons, ce qui permet d'inférer leur nature planétaire, et parfois au passage de questionner la définition d'une planète. Après une première modélisation de leur structure interne, des études plus poussées, éventuellement supportées par de nouvelles observations, pourront révéler des informations supplémentaires sur la composition chimique et les propriétés physiques de leur atmosphère et de leur exosphère.

Les techniques utilisées pour la recherche et l'observation des exoplanètes sont nombreuses. Je ne discuterai que celles auxquelles j'ai contribué ou dont j'ai utilisé les mesures. En interférométrie optique à longue base, j'ai travaillé sur l'étalonnage des mesures et sur l'observation de systèmes doubles à haut contraste (chap. 1). En imagerie coronographique, j'ai travaillé sur la correction des tavelures avec un système d'optique adaptative spatiale (chap. 2). Enfin, en photométrie des transits, j'ai travaillé sur le traitement des données : détection des signaux de transit, classement des candidats et modélisation des courbes de lumière (chap. 3).

Certaines de ces techniques se combinent admirablement, ce qui permet de mesurer plus complètement les caractéristiques du système étoile-planète, ainsi que de gagner en confiance sur la nature planétaire de l'objet observé. Les combinaisons discutées par la suite sont d'une part, interférométrie et vélocimétrie (chap. 1), et d'autre part, photométrie et vélocimétrie (chap. 3). D'autres combinaisons existent et sont possibles.

L'analyse approfondie des (parfois rares) mesures acquises afin d'épuiser toute l'information qu'elles contiennent, tout autant que le besoin d'intégrer dans un ensemble cohérent des mesures provenant d'ins-

truments différents, nécessite l'apprentissage et la mise en œuvre de solides connaissances en probabilités, statistiques, traitement du signal et analyse numérique. Mon cheminement d'instrumentaliste et d'observateur dans le domaine des exoplanètes s'est donc accompagné d'un indissociable cheminement théorique en matière d'analyse des données que j'évoquerai au fil de ce document.

Pour conclure ce prologue, je signale au lecteur qu'il trouvera en annexe, après l'épilogue et la bibliographie, un *curriculum vitae* et un article non publié sur l'étoile double θ Draconis. Mes articles publiés sont tous téléchargeables en format PDF depuis ma page personnelle à l'adresse

<http://www.ias.u-psud.fr/pperso/pborde/publications.html>.

Bonne lecture !

1

Interférométrie optique à longue base

Sommaire

1.1	Principe de l'interférométrie	3
1.2	Application aux exoplanètes	4
1.3	Instrument	5
1.3.1	Étalonnage	6
1.3.2	Activité de recherche & développement	7
1.4	Observations	8
1.4.1	Le compagnon faible de θ Draconis	8
1.4.2	Travaux de physique stellaire	10
1.5	Conclusion	12

1.1 Principe de l'interférométrie

L'interférométrie optique à longue base est une technique avec laquelle on cherche à atteindre une résolution angulaire meilleure que celle qu'on pourrait avoir avec un télescope classique au prix d'une perte de sensibilité et de la formation d'image au sens classique du terme. Ainsi, en faisant interférer la lumière collectée par deux télescopes éloignés d'une distance B grande devant leur diamètre respectif D , on fabrique un nouvel instrument dont la résolution angulaire λ/B est nettement meilleure que λ/D . La distance B s'appelle longueur de base, ou plus simplement base, de l'interféromètre. Par exemple, les télescopes les plus distants du réseau CHARA (McAlister et al., 2012) sont éloignés de 330 m, ce qui confère à ce réseau une résolution angulaire dans le visible de l'ordre de 3 millisecondes d'angles (contre une seconde pour les télescopes individuels d'un mètre de diamètre). Cette résolution correspond précisément à l'écart angulaire qui existe entre 51 Pegasi et son jupiter chaud (Mayor & Queloz, 1995). De ce point de vue, l'interférométrie à longue base est une technique bien adaptée à l'observation d'exoplanètes qui se trouvent nécessairement angulairement très proches de leur étoile.

Toutefois, l'amélioration de la résolution angulaire s'accompagne d'une perte de sensibilité en raison de l'allongement du train optique et de la nécessité, en l'absence de systèmes d'optique adaptative, de limiter les temps de pose en dessous du temps caractéristique d'évolution de la turbulence (typiquement 10 ms dans le visible). Les interféromètres de première génération ont ainsi été limités à l'observation d'étoiles plutôt brillantes, comme par exemple les géantes rouges. Pour les générations suivantes, l'effort a donc porté sur l'équipement des télescopes individuels avec des systèmes d'optique adaptative, comme par exemple MACAO (Arsenault et al., 2004) sur le VLTI (Glindemann et al., 2000), mais aussi de suiveurs de franges, comme par exemple FINITO (Le Bouquin et al., 2008) également sur le VLTI, dont le rôle est de

compenser l'écart de chemin optique introduit par la turbulence entre les bras de l'interféromètre. Avec ces systèmes, des objets moins lumineux, comme les noyaux actifs de galaxies peuvent être étudiés.

Outre la perte de sensibilité (partiellement restaurée par les systèmes évoqués plus haut), il n'est pas question de former une image avec un interféromètre, car avec deux petits trous au lieu d'un disque plein, la pupille d'entrée de l'instrument est bien trop lacunaire. Et pour cause : comme dans l'expérience des trous d'Young, l'interféromètre ne mesure que le contraste d'un paquets de franges ! Après étalonnage de l'instrument (§1.3.1), ce contraste peut être théoriquement relié, via le théorème de Zernike-Van Cittert, au module d'un point de la transformée de Fourier de la distribution d'intensité de la source observée.

Avec un interféromètre à plus de deux télescopes, la situation s'arrange d'autant plus que la pupille d'entrée se comble. Et dès qu'on dispose d'au moins trois télescopes, il devient possible de mesurer une grandeur supplémentaire, la *fermeture (ou clôture) de phase*¹, qui est robuste vis-à-vis de la turbulence et apporte une information de phase sur la transformée de Fourier mentionnée plus haut.

Quoi qu'il en soit, pour qu'on puisse progresser dans la connaissance d'un objet astronomique, il est nécessaire de compenser les lacunes de l'instrument en introduisant une forte information *a priori*, en général sous la forme d'un modèle simple de l'objet, c'est-à-dire ne comportant qu'un petit nombre de paramètres libres. Par exemple, faute de pouvoir former l'image d'une étoile, on la représente par un disque de brillance uniforme dont le diamètre angulaire est inconnu (modèle à un seul paramètre libre), ou de manière plus sophistiquée, par un disque assombri au limbe (deux paramètres libres ou plus). Ainsi, même avec un nombre modeste de mesures interférométriques et à condition d'avoir une idée de ce qu'on regarde, il est possible de contraindre les valeurs des paramètres et de synthétiser une image simplifiée de l'objet.

1.2 Application aux exoplanètes

Pour ma thèse de doctorat, j'ai exploré théoriquement et pratiquement l'utilisation d'un interféromètre à deux télescopes pour la mesure de l'orbite et de la luminosité relative d'une exoplanète dans l'infrarouge proche. Il s'agissait à terme d'observer des planètes géantes chaudes ou « pégasides », c'est-à-dire du type de 51 Pegasi b (fig 1.1), et même (avec pas mal d'optimisme !) d'en faire un spectre à basse résolution, pour mettre par exemple en évidence la raie du méthane à 3,3 μm . Ces planètes sont bien peu lumineuses en regard de leur étoile : environ dix mille fois moins dans l'infrarouge proche. Le signal mesuré est donc largement dominé par celui de l'étoile. Pour avoir une chance de distinguer celui de la planète, il faut soit disposer d'un instrument avec une grande dynamique, ce qui se traduit par une grande précision de mesure, soit mettre en œuvre un procédé pour rejeter le signal de l'étoile avant la mesure, ce qui permet de réduire la dynamique nécessaire. Le premier cas correspond à l'interférométrie constructive sur laquelle j'ai surtout travaillé, tandis que le second correspond à l'interférométrie destructive ou « annulante » bien étudiée à l'IAS dans le cadre du projet de mission spatiale Darwin (Léger et al., 1996 ; Fridlund et al., 2000 ; Cockell et al., 2009).

Pour commencer en douceur, j'ai visé des étoiles binaires avec une secondaire peu lumineuse, ce qu'on appelle des *binaires à haut contraste*. Même pour ces étoiles, à l'époque de mon doctorat, cela représentait un défi qui ne pouvait être relevé qu'avec un instrument suffisamment fiable, précis et stable. Avec ces *desiderata* en tête, l'équipe d'interférométrie du LÉZIA² avait développé une unité de recombinaison utilisant des fibres monomodes et baptisée FLUOR (Coudé du Foresto, 1994 ; Perrin, 1996). En effet, avec une solution classique à base d'une recombinaison, l'effet de la turbulence est difficile à mesurer et la précision sur le contraste des franges ne descend pas en dessous de 10 %. Les fibres monomodes ont l'avantage de transformer les fluctuations de phase causées par la turbulence atmosphérique en fluc-

1. *phase closure* en anglais

2. Pierre Léna, Vincent Coudé du Foresto, Guy Perrin & Steve Ridgway du NOAO.

tuations d'intensité qui sont nettement plus faciles à mesurer. La précision sur le contraste des franges descend ainsi au niveau du pourcent.

Si la période orbitale de la binaire est longue devant la durée des observations, on peut considérer qu'elle est fixe sur le ciel. Dans ce cas, la binaire est complètement décrite par la séparation angulaire et l'angle de position de la secondaire par rapport à la primaire, par les diamètres angulaires de chacune d'elles et par le rapport de luminosité entre les deux composantes. Ces 5 paramètres ne pourront être déterminés que si on dispose de suffisamment d'observations. Dans ce cas, on peut fabriquer une image synthétique de la binaire à la date moyenne de ces observations. L'application répétée de cette procédure à différentes dates permet d'obtenir une série d'images et le calcul d'une orbite comme le décrit par exemple Heintz (1978) pour les binaires visuelles.

Lorsque la période orbitale est plus courte (la période orbitale de 51 Peg b est de 4,2 jours) et/ou lorsqu'on ne peut pas acquérir suffisamment de mesures pour déterminer les 5 paramètres précédents, il est utile de faire appel à une orbite spectroscopique si elle est disponible, comme c'est le cas pour une grande partie des exoplanètes. On peut alors considérer les paramètres de l'orbite spectroscopique comme connus pour réduire le nombre de paramètres du modèle interférométrique à déterminer, ou bien on utilise les deux jeux de données conjointement pour déterminer tous les paramètres. J'ai pratiqué les deux approches sur les cibles que j'ai observées.

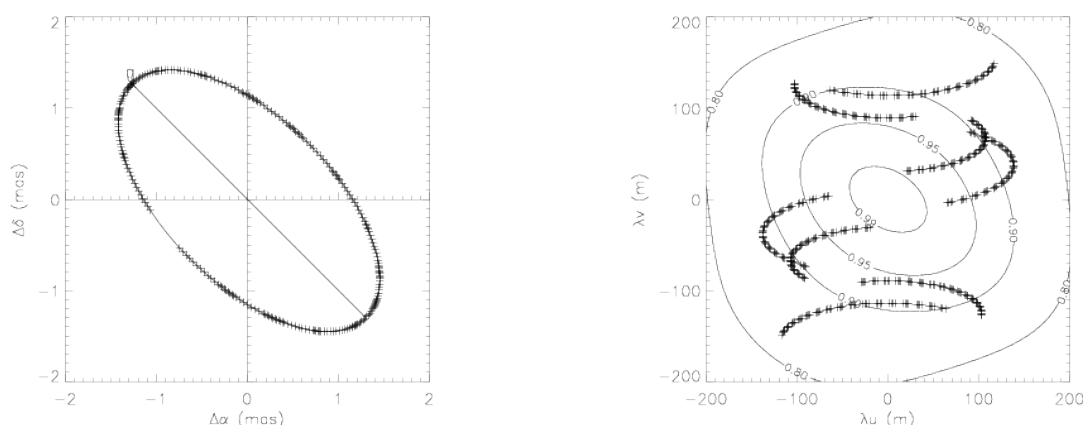


FIGURE 1.1 – Simulation d'observations de 51 Pegasi avec le VLTI. À gauche : orbite de 51 Pegasi b. À droite : lignes de niveau du modèle interférométrique et bases projetées dans le plan de Fourier.

1.3 Instrument

L'instrument FLUOR est remarquablement simple dans son principe : la lumière collectée par chacun des deux télescopes est injectée dans deux fibres monomodes dont les cœurs sont rapprochés dans un coupleur en forme de X pour superposer les champs électromagnétiques. Les deux sorties interférométriques sont complémentaires. Il existe aussi deux dérivations photométriques en amont dans chacun des bras afin de corriger l'effet de la turbulence atmosphérique (fig. 1.2).

Cet instrument a fonctionné sur l'interféromètre IOTA (Traub et al., 2003) jusqu'à l'été 2002, date à laquelle il a été déménagé sur l'interféromètre CHARA (McAlister et al., 2012). J'ai utilisé FLUOR sur ces deux interféromètres (fig. 1.3).

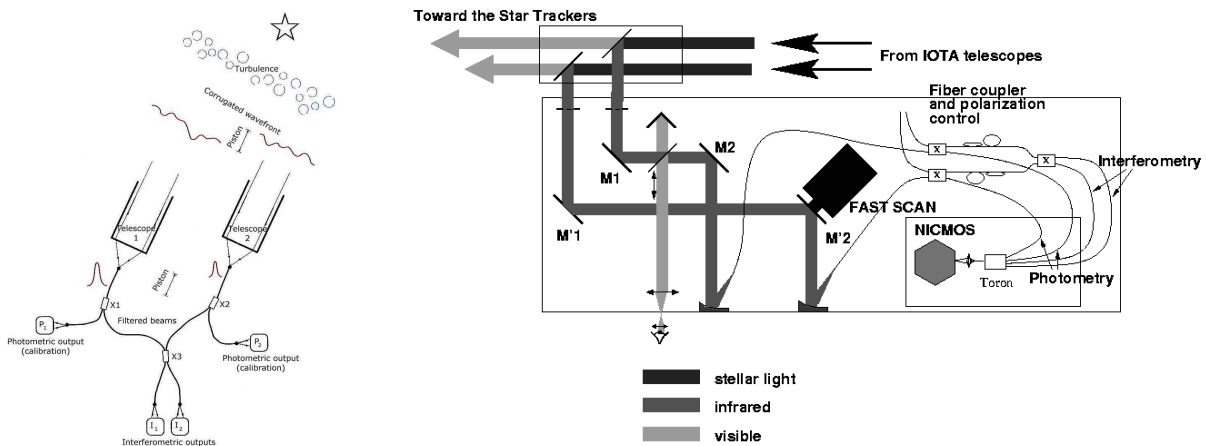


FIGURE 1.2 – À gauche : principe du recombineur fibré FLUOR. Il y a deux dérivations photométriques pour l'étalonnage et deux sorties interférométriques complémentaires. À l'exception du « piston », les fluctuations de phase dues à la turbulence sont transformées en fluctuations d'intensité qui sont mesurées et corrigées. À droite : schéma de la table optique de FLUOR. Le *fast scan* est un miroir monté sur une céramique piézo-électrique qui permet un balayage rapide de la différence de marche. NICMOS est une matrice de détecteurs infrarouges contenue dans un cryostat refroidi à l'azote liquide.

1.3.1 Étalonnage

Pour mesurer l'efficacité interférométrique de l'instrument, il faut mesurer le contraste des franges d'une source étalon, c'est-à-dire d'une source dont on connaît la visibilité théorique. En pratique, il s'agit d'une étoile non résolue et de visibilité attendue égale à 1, ou d'une étoile de diamètre angulaire calculé ou déjà mesuré. Cette mesure doit être effectuée de façon répétée au cours de la nuit pour corriger les variations dues au changement des conditions d'observation (turbulence atmosphérique, réglages instrumentaux, attitude des télescopes, etc.). Les étalons doivent avoir des caractéristiques proches de celle de la cible (position sur le ciel, magnitude, couleur, etc.), d'où la nécessité de disposer d'un catalogue. C'est pourquoi Vincent Coudé du Foresto m'a confié la tâche de compiler un tel catalogue à partir du catalogue d'étalons infrarouges de Cohen et al. (1999). Ce catalogue est ma contribution à la problématique de l'étalonnage de précision en interférométrie. Il est constitué d'étoiles bien choisies (notamment par

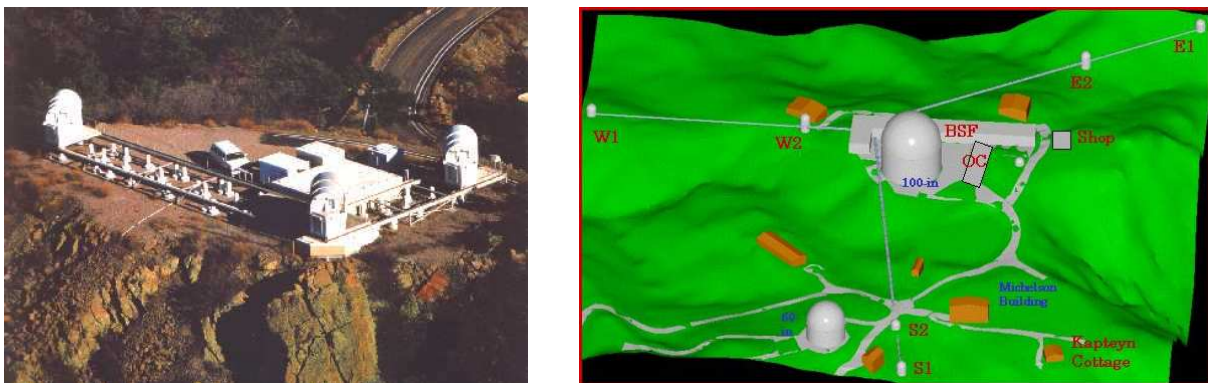


FIGURE 1.3 – À gauche : *Infrared and optical telescope array* (IOTA) au Mont Hopkins en Arizona. À droite : *Center for high-angular resolution astronomy* (CHARA) au Mont Wilson en Californie.

la vérification de leur nature d'étoile simple en utilisant les catalogues du Centre de données astronomiques de Strasbourg) et pour lesquelles le diamètre est calculée par la méthode spectro-photométrique de Cohen et al. (1999). Il n'est pas une compilation de toutes les mesures interférométriques existantes comme peut l'être le catalogue CHARM de Richichi et Percheron (2002), mis à jour par Richichi et al. (2005). Ce catalogue a été étendu par la suite à des étoiles de plus petite taille, mieux adaptées à l'éta-lonnage avec des bases longues comme celles de CHARA (Mérand et al., 2006a). Ces deux catalogues (fig. 1.4) ont prouvé leur utilité puisque ces deux articles font respectivement l'objet de 81 et 55 citations actuellement.

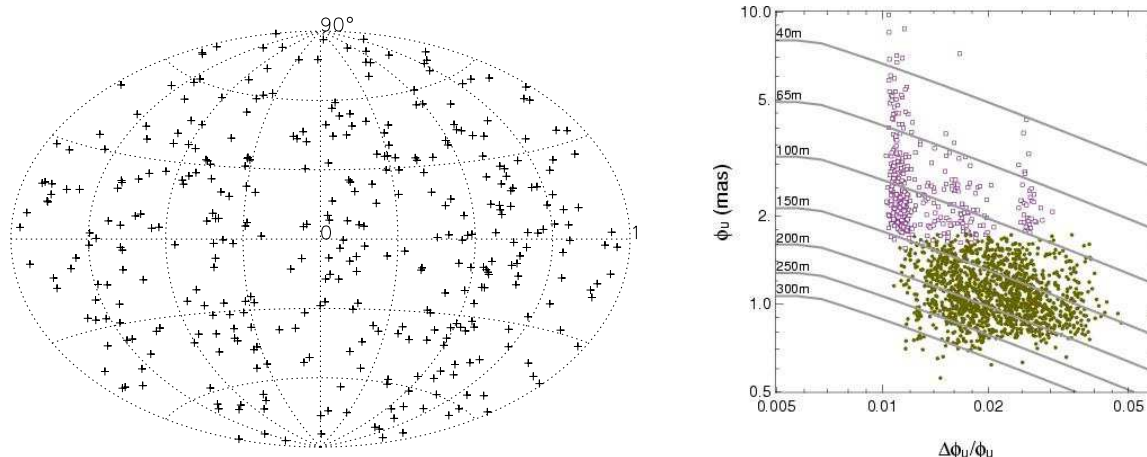


FIGURE 1.4 – À gauche : couverture du ciel pour le premier catalogue. À droite : comparaison entre le catalogue initial (□) et son extension (●). Les étoiles sont reportées dans un diagramme diamètre angulaire-incertitude relative. Celles qui se trouvent sous la courbe correspondant à une base donnée sont utilisables pour un éta-lonnage au pourcent près à cette base et en bande K.

Ces catalogues qui ne contiennent que quelques centaines d'étoiles peuvent se révéler insuffisants pour les programmes plus exigeants visant des objets plus faibles, comme des noyaux actifs de galaxie. C'est pourquoi, il est aussi utile de disposer d'outils qui estiment les diamètres angulaires d'étoiles piochées dans des catalogues non spécialisés, mais beaucoup plus gros. Andy Boden de CalTech a ainsi développé *getCal*³, tandis qu'en France, un groupe de travail du Centre Jean-Marie Mariotti⁴ (JMMC), auquel je participais lorsque j'étais doctorant, développait le logiciel *SearchCal*⁵ sous la direction de Daniel Bonneau (Bonneau et al., 2004, 2006, 2011). *SearchCal* est aujourd'hui intégré au logiciel ASPRO du JMMC pour la préparation des observations interférométriques.

1.3.2 Activité de recherche & développement

En tant que scientifique du contingent à l'Observatoire de Paris pour le compte de la Direction générale de l'armement en 1999-2000, j'ai participé à un travail expérimental de recherche & développement sur les fibres monomodes un peu en marge de mes principales activités de recherche. Il s'agissait de tester des prototypes de fibres monomodes fabriqués par la société Le Verre Fluoré dans l'infrarouge moyen autour de 10 μm . Ces prototypes auraient pu servir à pousser l'interférométrie infrarouge vers les plus grandes longueurs d'onde, en particulier pour le projet Darwin. Le concept instrumental de cette mission reposait sur la technique d'interférométrie destructive et nécessitait l'utilisation de fibres monomodes

3. <http://nexsci.caltech.edu/software/getCal/>

4. C'est le centre français d'expertise en interférométrie (<http://www.jmmc.fr/>).

5. http://www.jmmc.fr/searchcal_page.htm

pour rendre acceptable la tolérance sur la qualité optique des miroirs. Cette mission n'a finalement pas été sélectionnée par l'ESA. De 2000 à 2003, j'ai testé deux générations de composants du Verre Fluoré (Bordé et al., 2003a ; P. Bordé et al., 2003b) ; la dernière génération semblait prometteuse (fig. 1.5), mais faute d'argent pour l'alimenter, cette R&D n'a pas été poursuivie.

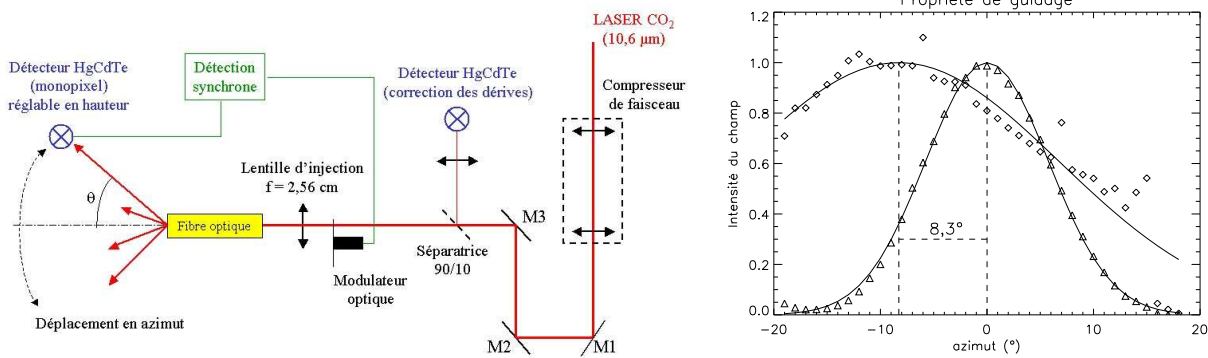


FIGURE 1.5 – À gauche : schéma du banc de mesure installé au Laboratoire de physique des lasers à Villetaneuse. À droite : démonstration des propriétés de guidage de l'échantillon de fibre testé : le champ rayonné par la fibre est décentré lorsque la fibre est tournée sur son axe, mais ce n'est pas le cas pour un trou filtrant.

1.4 Observations

1.4.1 Le compagnon faible de θ Draconis

Pour ma thèse de doctorat, j'ai observé quatre étoiles doubles précédemment mesurées par interférométrie (Capella, δ Tri, ι Peg et 64 Psc) afin de valider la procédure de traitement des données et affiner leurs orbites grâce à l'excellente précision de FLUOR. Cependant, l'addition de mauvaises conditions météorologiques à un manque de fiabilité d'IOTA n'ont pas permis d'aller au bout de ce projet. Ce n'est qu'en 2004-2005 durant mon post-doctorat que suffisamment de mesures furent obtenues sur θ Draconis en collaboration avec Takayuki Kotani (alors post-doctorant au LESIA) pour obtenir des résultats publiables (fig.1.6). θ Draconis est une binaire spectroscopique à haut contraste n'ayant alors pas encore fait l'objet d'observations interférométriques, mais pour laquelle la vitesse radiale de la faible secondaire avait pu être mesurée en quatre points par Mazej et al. (2000). En utilisant FLUOR sur CHARA, nous avons réussi à détecter la secondaire et à mesurer en bande K un rapport de luminosité (ou contraste) d'environ 63, soit une différence de magnitude de 4,5. Un record pour l'époque !

Au-delà du record, on détermine l'inclinaison de l'orbite par interférométrie, ce qui permet d'en déduire les masses individuelles des étoiles contre la seule fonction des masses dans le cas de la vélocimétrie radiale. Et en mettant tout ensemble, on obtient un tableau très complet des propriétés physiques du système (table 1.1).

Techniquement, l'article montrait également pour la première fois sur un cas concret qu'il fallait tenir compte de la corrélation entre les mesures interférométriques introduite par l'utilisation répétée d'une même étoile-étalon et/ou d'une même base, ainsi que l'avait montré théoriquement Perrin (2003). Pour θ Dra, on voyait que cela augmentait l'incertitude sur les paramètres dépendants d'une variation absolue de la visibilité, comme le diamètre angulaire de la primaire, mais diminuait l'incertitude sur les paramètres dépendants d'une variation relative de la visibilité, comme l'inclinaison de l'orbite.

	Primaire	Secondaire
Type spectral	F8IV	M1V
Masse (M_{\odot})	$1,23 \pm 0,12$	$0,471 \pm 0,043$
Rayon (R_{\odot})	$2,613 \pm 0,034$	$0,44 \pm 0,06$
$\log g$	$3,69 \pm 0,10$	$4,82 \pm 0,29$
T_{eff} (K)	6136 ± 65	3626 ± 247
Luminosité (L_{\odot})	$8,67 \pm 0,4$	0,03
M_V (mag)	$2,408 \pm 0,061$	10,4
M_K (mag)	$1,176 \pm 0,058$	$5,67 \pm 0,40$
a (10^{-2} AU)	$1,369 \pm 0,041$	$3,56 \pm 0,13$

TABLE 1.1 – Paramètres physiques de θ Dra déduits du traitement conjoint des mesures de vitesse radiale et de visibilité au carré.

Malgré ces premières, l'article fut rejeté par l'*Astrophysical Journal* au motif que la détection interférométrique du compagnon faible n'était pas suffisamment convaincante⁶. Dans notre article, la preuve de la détection interférométrique du compagnon reposait sur le fait que l'ajustement du modèle d'étoile double sur les données était de meilleure qualité que pour le modèle d'étoile simple. Techniquement, la qualité de l'ajustement est mesurée par la valeur du χ^2 réduit, qui est plus faible pour le modèle de binaire ($\chi_r^2 = 2,0$) que pour celui d'étoile unique ($\chi_r^2 = 3,4$). Nous pensions que cet écart était significatif, mais le rapporteur jugea que non, en vertu du *critère statistique d'Akaike* (Akaike, 1974). Nous ne connaissions pas ce critère et à cette époque, nous avons décidé qu'il nous fallait collecter plus de mesures pour présenter une détection plus convaincante. Ce fut une double erreur : premièrement car les mesures supplémentaires, collectées sous la forme de fermetures de phase avec un autre instrument de CHARA, MIRC (Monnier et al., 2004), présentèrent des difficultés d'interprétation d'origine instrumentale supposée, ce qui, conjugué avec la fin du post-doctorat de Takayuki Kotani, mit un terme provisoire à l'étude de θ Draconis ; et deuxième parce que le rapporteur avait tort : le critère d'Akaike, que j'ai fini par calculer en mai 2013 pour une conférence à Marseille, montre bien que la détection est statistiquement significative !

De quoi s'agit-il ? Le modèle de binaire a plus de paramètres que celui d'étoile simple. Aussi est-ce tellement surprenant que l'ajustement soit meilleur ? Peut-on vraiment affirmer qu'il est le plus plausible ? Pour répondre à cette question, plusieurs critères statistiques ont été proposés, et parmi ceux-ci, celui d'Akaike qui concerne les modèles emboîtés⁷, comme c'est le cas pour notre problème. Il s'agit de calculer $2 \ln(L) - 2n$, où L est la valeur maximale de la vraisemblance du modèle et n le nombre de ses paramètres. Le modèle préférable est celui qui maximise cette quantité. On voit donc qu'Akaike pénalise une vraisemblance plus grande obtenue au prix d'une complexité supplémentaire en soustrayant un terme proportionnel au nombre de paramètres. Dans le cas de θ Draconis, on trouve (à une constante additive commune près) 147 pour le modèle d'étoile double et 63 pour le modèle d'étoile simple. Si on en croît Akaike, le compagnon faible est donc bien détecté ! Il est donc dans mes projets de resoumettre cet article dans le courant de l'année prochaine.

6. Cet article est fourni en annexe.

7. c'est-à-dire de complexité croissante et pour lesquels un modèle plus simple est un cas particulier d'un modèle plus complexe

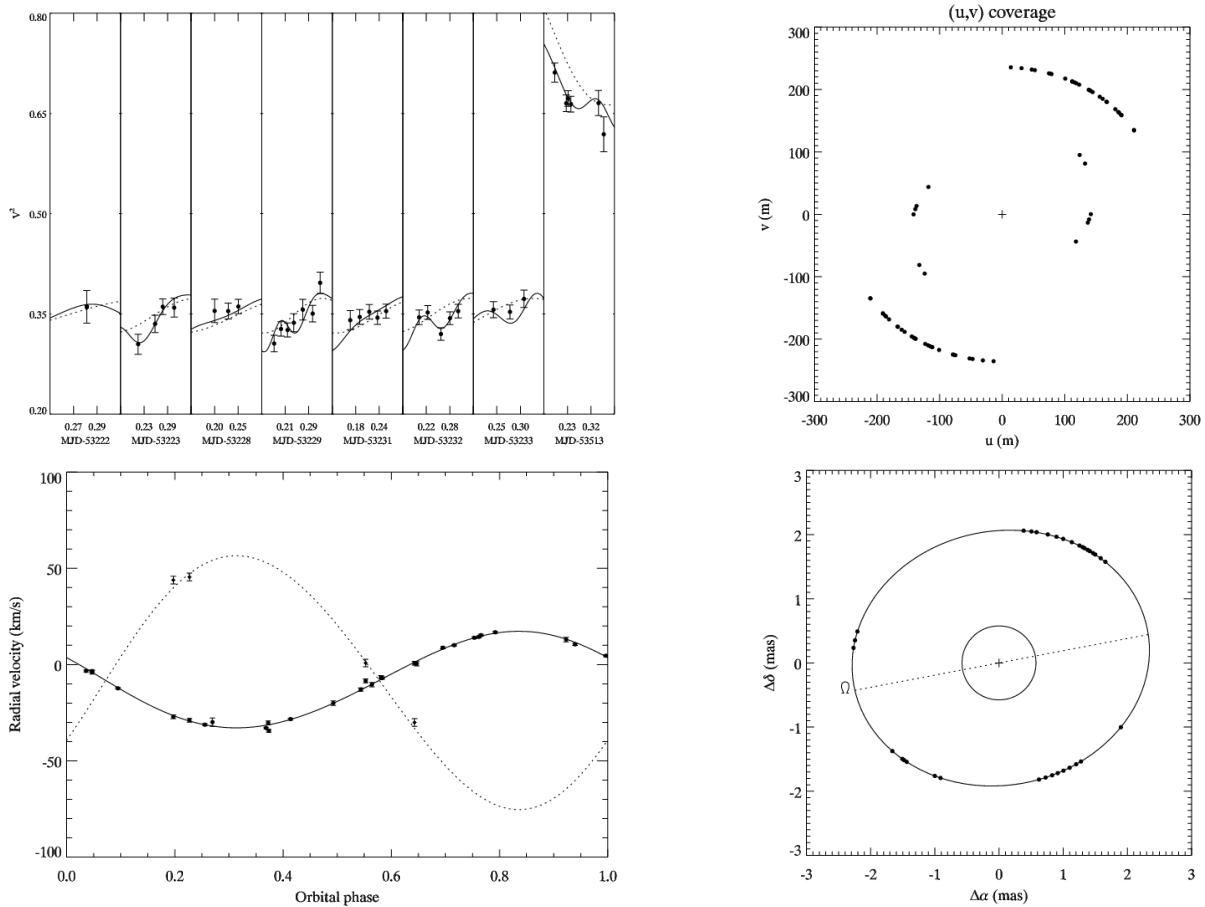


FIGURE 1.6 – θ Draconis. En haut à gauche : évolution du carré de la visibilité des franges d’interférence au cours du temps (mesures et modèles). Le modèle d’étoile simple est en trait pointillé, tandis que le modèle d’étoile double est en trait plein. En haut à droite : extrémités des vecteurs de base projetés sur le ciel. En bas à gauche : vitesse radiale de la primaire (trait plein) et de la secondaire (trait pointillé). En bas à droite : orbite synthétisée.

1.4.2 Travaux de physique stellaire

Étoiles géantes et enveloppes moléculaires

En tant qu’observateur sur IOTA, je suis coauteur de deux publications sur des étoiles géantes variables de type Mira (et sur des variables semi-régulières) : 1) mesure de diamètres en bande L’ (Chagnon et al., 2002), c’est-à-dire autour de $3,8 \mu\text{m}$, et 2) mise en évidence d’enveloppes moléculaires étendues (Mennesson et al., 2002) à partir de mesures interférométriques en bande L’ et K’.

Le premier article décrit une série de mesures avec TISIS, l’extension en bande L’ de FLUOR sur IOTA, mis en place et exploité dans le cadre des thèses de doctorat de Gilles Chagnon et de Bertrand Mennesson. TISIS fut le premier recombineur en bande L’ à délivrer des mesures de diamètre de l’ordre de 20 mas. Le premier article sert de base de données pour le deuxième article qui s’appuie également sur des mesures en bande K’. Les enveloppes moléculaires furent par la suite bien étudiées par Perrin et ses collaborateurs autour de supergéantes de différents types (Perrin et al., 2004a, 2004b, 2005). Kervella et al. (2003) en trouvèrent également autour de Céphéides (Mérand et al., 2006b, 2007, également). La mise en évidence observationnelle de ces enveloppes moléculaires est un des apports importants et originaux

de l'interférométrie en physique stellaire.

Étoile géante et modèle d'atmosphère (Arcturus)

Pousser la précision de mesure interférométrique sous le pourcent requiert une connaissance approfondie des étoiles-étalons qui passe par une modélisation précise de leur atmosphère. En 2003-2004, j'ai collaboré avec Tijnl Verhooft à une étude poussée d'Arcturus, une étoile-étalon classique pour la photométrie, la spectrométrie et l'interférométrie dans l'infrarouge proche parce qu'elle offre un bon compromis entre luminosité et compacité de son atmosphère (Verhooft et al., 2005). Nous avons modélisé l'atmosphère de cette étoile avec MARCS (Plez et al., 1992), ce qui a permis d'obtenir des profils spécifiques d'assombrissement centre-bord aux longueurs d'onde d'observation (des filtres étroits dans la bande K). Curieusement, nous avons obtenu un désaccord statistiquement significatif entre les mesures et les prédictions des modèles d'atmosphère, qu'ils soient à géométrie plane ou sphérique. Après avoir rejeté des hypothèses liées à l'étalonnage ou à la photosphère d'Arcturus, nous en sommes venus à envisager la possibilité de l'existence d'un compagnon faible.

La binarité d'Arcturus est une histoire longue et pleine de rebondissements qui n'a conduit jusqu'à présent à aucune conclusion fermement établie. Dans notre papier, le compagnon est considéré comme fixe pendant la durée des observations et est donc caractérisé par sa position (ρ, θ) par rapport à la primaire et par un rapport de flux r . Le meilleur modèle est caractérisé par $\chi_r^2 = 2,6$ contre 5,5 dans le cas d'une étoile seule (fig. 1.7). Peut-on en conclure que le compagnon existe ? Certains penseront que 2,6 est une valeur de χ_r^2 encore trop grande pour valider cette hypothèse et en effet, si des mesures indépendantes n'avaient pas déjà soulevé cette question, il n'y aurait pas lieu de retenir cette hypothèse.

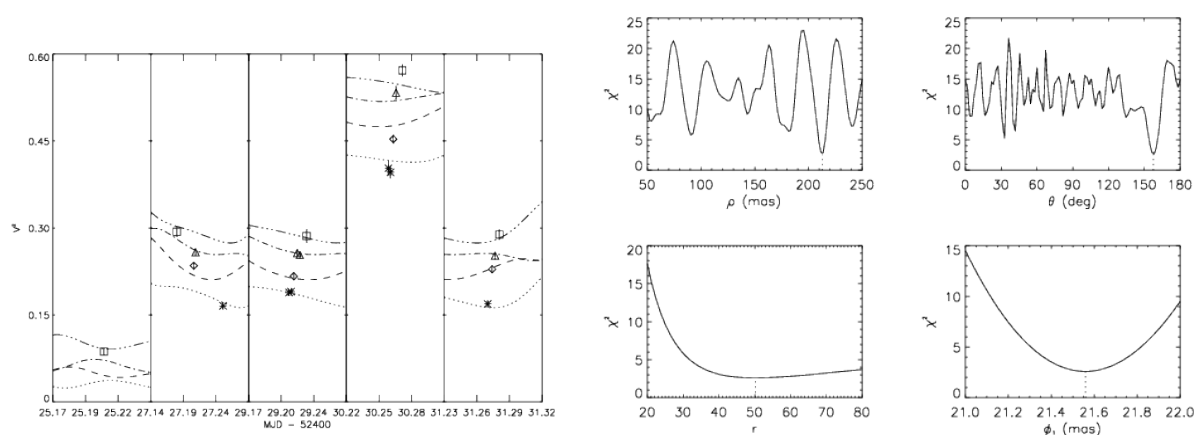


FIGURE 1.7 – À gauche : mesures de la visibilité au carré en fonction du temps et modèle de binaire. À droite : courbes marginales de χ^2 pour la séparation angulaire ρ et l'angle de position θ de la secondaire, le rapport de luminosité r et le diamètre angulaire de la primaire ϕ_1 .

La haute précision est un art difficile qui nécessite de ne rien laisser au hasard. Cela peut malheureusement nécessiter un surcroît d'observations qu'on n'est pas toujours en mesure de fournir.

Étoiles de la séquence principale

J'ai participé à deux études menées par Pierre Kervella (alors à l'Eso) sur des étoiles chaudes et brillantes de la séquence principale : Sirius (Kervella et al., 2003) et Procyon (Kervella et al., 2004). Il est intéressant de mieux connaître ces deux étoiles parce qu'elles servent souvent d'étoiles-étalons pour

la spectro-photométrie. Les mesures de visibilité furent obtenues en bande K avec VINCI⁸, l'instrument de mise en service du VLTI, et à des bases de 24 et 66 m.

Mon rôle fut de calculer le diamètre angulaire de disque assombri de ces étoiles à partir des mesures de visibilité (fig. 1.8). Avec des diamètres angulaires de 5 à 6 mas, Sirius & Procyon sont de petites étoiles en regard des géantes évoquées plus haut. Dans les deux cas, le diamètre angulaire est converti en diamètre linéaire en utilisant la parallaxe telle que mesurée par le satellite Hipparcos. Les articles montrent que ce diamètre permet d'améliorer la précision sur l'âge et le stade évolutif qui sont issus d'un diagramme de Hertzsprung-Russell de la forme $\log(L/L_{\odot}) = f(\log(T_{\text{eff}}))$.

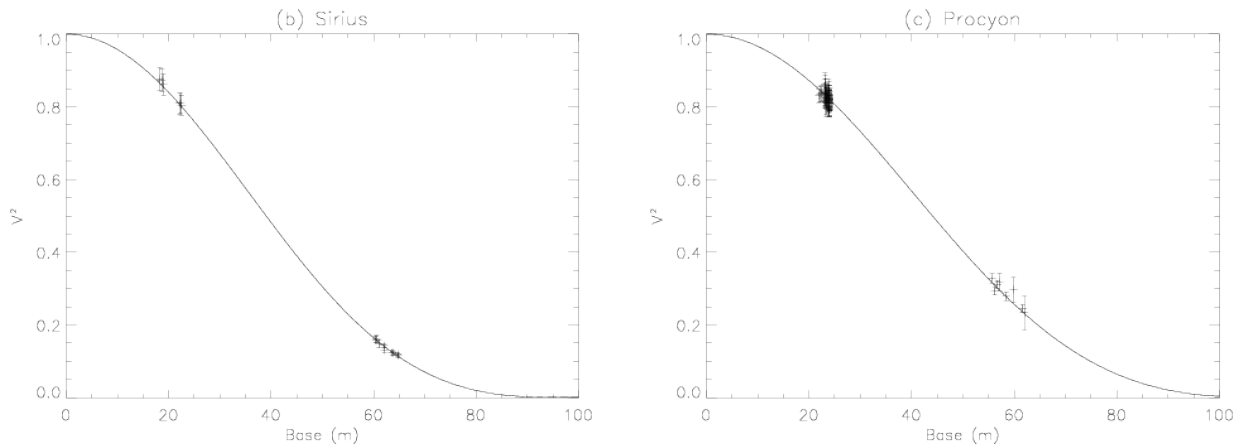


FIGURE 1.8 – Mesures interférométriques du diamètre angulaire de Sirius (à gauche) et de Procyon (à droite).

Il est amusant de noter que ces deux étoiles possèdent un compagnon faible qui est une naine blanche de période orbitale 50 ans pour Sirius et 40 ans pour Procyon. Ce sont donc également des binaires à haut contraste, ce qui ne pouvait pas être mis en évidence avec VINCI.

1.5 Conclusion

Je considère que mon ambitieux programme de thèse démarré en 2000 a fini par aboutir en 2006 avec la détection du compagnon faible de θ Draconis, même s'il ne s'agissait pas d'une exoplanète géante. D'un côté, il fut regrettable que ce résultat n'ait pas été publié à l'époque, mais d'un autre côté, ce fut une leçon et un aiguillon pour la suite de mes recherches. Restant dans le domaine de la détection d'exoplanètes, j'ai continué à réfléchir aux problèmes de tests d'hypothèses et d'estimation paramétrique. À cette période, un séminaire de Phil Gregory qui présentait son livre sur l'analyse bayésienne a particulièrement retenu mon attention et ravivé mes souvenirs d'étudiant (Gregory, 2005).

Sans élaborer longuement sur le sujet, on peut dire que, quoique l'application du critère d'Akaike conduise à préférer le modèle d'étoile double, ce critère reste insatisfaisant en ce sens qu'on ne peut avoir une idée claire de la confiance à accorder à la détection. On aimerait bien chiffrer à quel point le modèle d'étoile double est plus probable que celui d'étoile simple, mais en théorie classique des probabilités, on ne peut pas directement calculer la probabilité d'une hypothèse, ou le rapport des probabilités associées à deux hypothèses⁹, car une hypothèse n'est pas une variable aléatoire. Tout ce qu'on peut faire, c'est rejeter ou non une hypothèse sur la base d'un certain degré de confiance (test dit « de l'hypothèse nulle »).

8. VLT interferometer commissioning instrument

9. la cote de l'une contre l'autre

Cette limitation est enracinée au plus profond de cette théorie car elle provient de la définition même de la probabilité en tant que « rapport du nombre de cas favorables au nombre de cas possibles » (ou *fréquence*, d'où le nom de théorie « fréquentiste »). Elle ne peut être levée qu'en utilisant une définition différente de la probabilité en tant que degré de plausibilité. C'est le choix de la plus ancienne théorie des probabilités, celle de Bayes et de Laplace, qui a été remise au goût du jour au cours du XX^e siècle, en particulier par Jeffreys, Jaynes et Bretthorst (Jaynes, 2003, par exemple).

La théorie bayésienne permet également de résoudre deux autres questions qui s'étaient posées à moi durant mon doctorat :

1. Comment éliminer du problème de la détection interférométrique un paramètre comme l'angle de position Ω qui n'est d'aucun intérêt astrophysique ? Réponse : traiter ce paramètre comme un *paramètre de nuisance* et « l'intégrer hors du problème » ;
2. Comment imposer à l'estimateur d'une grandeur physique de rester borné dans l'intervalle des valeurs physiquement possibles ? Par exemple, comment imposer à l'estimateur du contraste des franges de rester compris entre 0 et 1 ? Réponse : inclure cette information sous forme de probabilité *a priori* et appliquer le théorème de Bayes.

Comme je le montrerai au chapitre 3, j'ai progressivement mis en œuvre cette théorie ces dernières années, en particulier pour traiter les données de la mission COROT.

Coronographie stellaire

L'interférométrie nécessite une connaissance *a priori* de la source, à moins de multiplier les observations. L'imagerie au contraire capture en une seule fois une image d'une étoile et de son environnement (disque circumstellaire, planètes, etc.), ce qui permet d'observer des environnements complexes sans *a priori*. L'imagerie doit faire face aux mêmes défis que l'interférométrie pour l'observation des exoplanètes : résolution angulaire et grande dynamique (ou grand contraste). Ainsi, on peut mettre en parallèle avec l'interférométrie constructive la technique de soustraction d'image de référence, qui permet par exemple à Krist et al. (2000) d'obtenir avec le télescope spatial Hubble une magnifique image du disque circumstellaire autour de TW Hydrae. La coronographie, quant à elle, est une technique d'imagerie inventée par Lyot pour observer la couronne du Soleil (*corona* en latin) en dehors des éclipses (Lyot, 1932). Elle a été étendue aux autres étoiles afin de supprimer la lumière stellaire avant l'arrivée sur le détecteur, de sorte que les structures circumstellaires faibles ne soient pas noyées dans le bruit de photo-électrons dû à l'étoile. La coronographie est donc à mettre en parallèle avec l'interférométrie destructive.

Sommaire

2.1 Principe d'un coronographe	15
2.2 Nécessité d'une optique active ou adaptative	16
2.3 Conclusion	18

2.1 Principe d'un coronographe

Pour ne pas que la lumière du Soleil ou d'une étoile arrive jusqu'au détecteur, on pourrait penser de prime abord qu'il suffirait de la bloquer en insérant une pastille opaque sur l'axe optique. Malheureusement, cette pastille diffracte la lumière de manière identique à un écran percé d'un petit trou¹⁰, ce qui envoie de la lumière partout sur le plan focal. L'idée géniale de Lyot a consisté à bloquer cette lumière diffusée par un diaphragme.

Ces dernières années, on a proposé un nombre considérable de variations autour de cette idée (Aime, 2007). Dans tous les cas, la lumière est focalisée une première fois dans un plan image où son amplitude et/ou sa phase sont altérées, de sorte qu'après passage par un plan pupille dans lequel se trouve le diaphragme de Lyot, la lumière de l'étoile sur l'axe soit considérablement atténuée. Avec certains concepts, cette atténuation est infinie en théorie dans le cadre d'hypothèses simplificatrices (sources monochromatiques, etc.), mais ce n'est jamais le cas en pratique.

10. Par application du théorème de Babinet sur les écrans complémentaires.

La figure 2.1 présente un schéma de principe du coronographe à bande limitée sur lequel j'ai travaillé (Kuchner & Traub, 2002 ; P. Bordé & Traub, 2007a). Ici, seule l'amplitude est manipulée. Le diaphragme de Lyot est la pupille limitante et impose sa figure de diffraction. On perd donc de l'énergie par rapport à une pupille pleine.

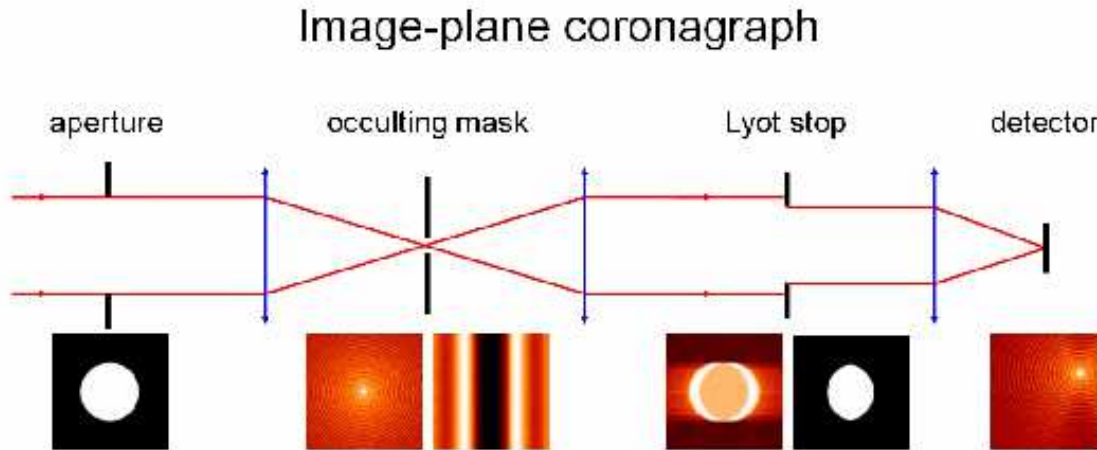


FIGURE 2.1 – Coronographe avec masque d'amplitude à bande limitée. Sur le détecteur apparaît clairement l'image du compagnon qui était « noyée » dans celle de l'étoile juste avant le masque d'amplitude. Au contraire, l'étoile a disparu.

Une autre idée consiste à modifier la forme de la pupille d'entrée, à l'apodiser ou encore à concentrer l'énergie de l'étoile en modifiant la forme des miroirs. Citons par exemple le coronographe à apodisation d'amplitude induite par la phase (*Phase-induced amplitude apodization coronagraph* ou PIAAC) de Guyon et al. (2005). L'avantage de ce coronographe est d'utiliser la pleine pupille. Olivier Guyon a montré que ce qu'on pouvait faire de mieux en théorie (compromis résolution/transmission) était un profil de transmission en fonction de λ/D ayant une forme de figure d'Airy inversée, et son concept de PIAA est assez proche de l'optimum théorique (Guyon et al., 2006).

2.2 Nécessité d'une optique active ou adaptative

L'observation d'exoplanètes comparables à la Terre nécessite d'atteindre un contraste de l'ordre de 10^{10} dans le visible. Les systèmes qui viennent d'être présentés ne sont jamais parfaitement réalisés : au sol, il y a de la turbulence atmosphérique bien sûr, mais même dans l'espace, il reste les imperfections du polissage des optiques, les légères hétérogénéités de la fabrication des matériaux constitutifs des lentilles, lames dichroïques, ou polariseurs, la découpe à précision finie des diaphragmes ou des masques, etc. Il y a donc toujours des aberrations de phase et d'amplitude, si minimes soient-elles, et en conséquence un résidu de lumière diffusée vers le détecteur. Ce résidu est pour une part statique et pour une part dynamique en raison des flexions mécaniques du télescope, de la dilatation thermique, des effets de gravité, des (micro-)vibrations, etc. Si on décompose les déformations du front d'onde en composantes de Fourier, on constate que chaque composante sinusoïdale agit comme un réseau de diffraction et donne naissance à deux répliques de la tache image de l'étoile symétriques par rapport à l'axe optique. C'est ce qu'on appelle des tavelures (fig. 2.2) et on parle de bruit de tavelures (*speckle noise* en anglais) pour

désigner l'effet indésirable de l'addition cohérente de toutes ces taches.

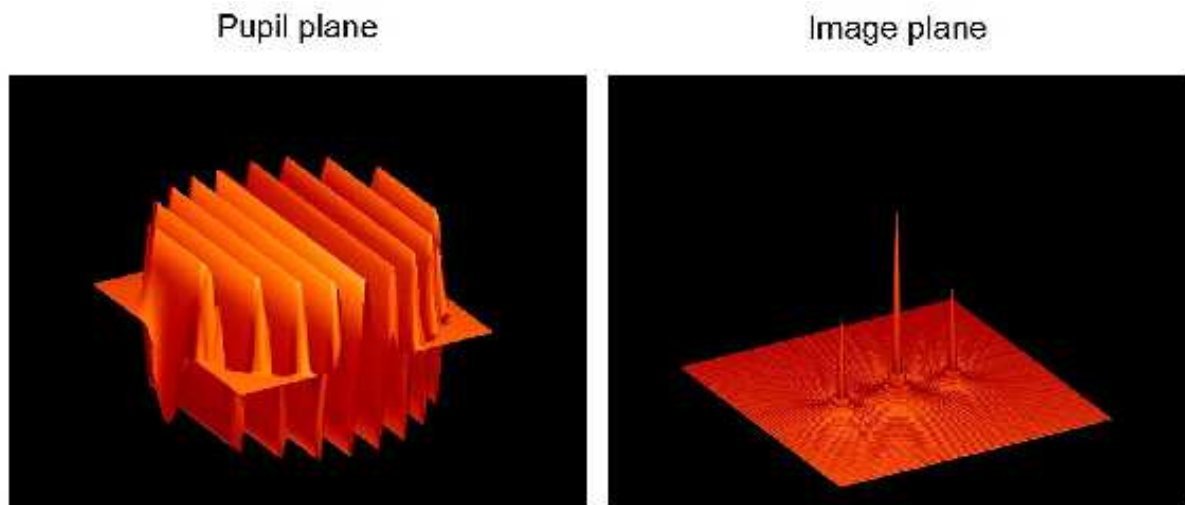


FIGURE 2.2 – Principe de formation des tavelures : une déformation sinusoidale du front d'onde dans le plan pupille agit comme un réseau de diffraction et fait naître deux taches images symétriques dans le plan image.

La partie dynamique des aberrations du front d'onde ne peut être corrigée que si l'on embarque une optique active ou adaptative (suivant la fréquence de correction désirée), c'est-à-dire qu'on inclut (au moins) un miroir déformable dans le train optique. Pour savoir comment piloter ce miroir déformable, il faut mesurer les aberrations. Dans un système d'optique adaptative classique, on utilise pour cela un senseur de front d'onde, par exemple celui de Shack-Hartmann. Cependant, au niveau ultra-fin de correction où l'on souhaite travailler, si la voie d'analyse est distincte de la voie d'imagerie, la correction appliquée ne sera pas tout à fait la bonne car les deux voies auront des défauts optiques légèrement différents. Ainsi, mon principal travail de post-doctorant en collaboration avec Wesley Traub au *Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics* fut de développer une théorie pour la mesure et la correction du bruit de tavelures en utilisant un miroir déformable (P. J. Bordé & Traub, 2006a). Cette théorie reprend et développe le travail original de Malbet et al. (1995). Pour l'essentiel, on utilise trois configurations distinctes et successives du miroir déformable pour modifier le front d'onde (méthode de « diversité de phase »). Et sachant comment le miroir a été déformé, la mesure de l'intensité dans le plan image permet de déterminer le champ électrique en chaque pixel du détecteur. On peut ensuite piloter le miroir déformable pour minimiser l'énergie des tavelures dans une certaine zone du détecteur et produire une zone noire (*dark hole* en anglais) propice à la détection d'exoplanètes.

L'application visée était le projet *Terrestrial Planet Finder Coronagraph* (TPF-C) de la NASA (Ford et al., 2003). J'ai mis en pratique cette théorie sur le *High Contrast Imaging Testbed* (HCIT) développé par Trauger et al. (2004) au *Jet Propulsion Laboratory* (JPL) de CalTech. Les premiers résultats furent encourageants (P. J. Bordé et al., 2006b), mais la disponibilité de cet équipement ne fut pas suffisante pour permettre une mise en œuvre convaincante de la méthode.

On voit une simulation de ce qu'on aurait pu obtenir sur la figure 2.3. Pour que la méthode fonctionne d'un seul coup, il ne faudrait pas que la théorie contienne d'approximation linéaire (ce qui est le cas) et que le miroir déformable soit parfaitement modélisé. En pratique, il est donc nécessaire d'itérer. À mesure que les aberrations s'affaiblissent, la linéarité de la théorie est de mieux en mieux vérifiée et les défauts de modélisation sont intégrés dans les défauts du front d'onde. Le système introduit également des défauts d'amplitude, soit de manière directe, soit par transformation des défauts de phase en amplitude au cours

de la propagation de l'onde. Leur correction nécessite soit de sacrifier la moitié de la zone noire, soit d'utiliser un deuxième miroir déformable.

2.3 Conclusion

Je suis rentré en France avant d'avoir démontré expérimentalement la méthode que j'avais proposée. Peu de temps plus tard, en utilisant une méthode qui ne corrige que dix tavelures à chaque itération, c'est-à-dire une méthode moins sophistiquée, mais probablement plus robuste que la mienne, Trauger et Traub (2007) ont démontré sur le HCIT un contraste supérieur à 2×10^9 . Après un traitement visant à supprimer la composante statique des tavelures, ils ont même atteint un contraste de l'ordre de 10^{11} . Depuis, en raison des dérives budgétaires et des retards sans fin du *James Webb Space Telescope* (JWST) et de la crise économique mondiale, le projet TPF-C (avec son miroir elliptique de 8 m par 3 m !) a été abandonné. Des télescopes plus petits et moins coûteux sont à l'étude. J'en parlerai dans l'épilogue.

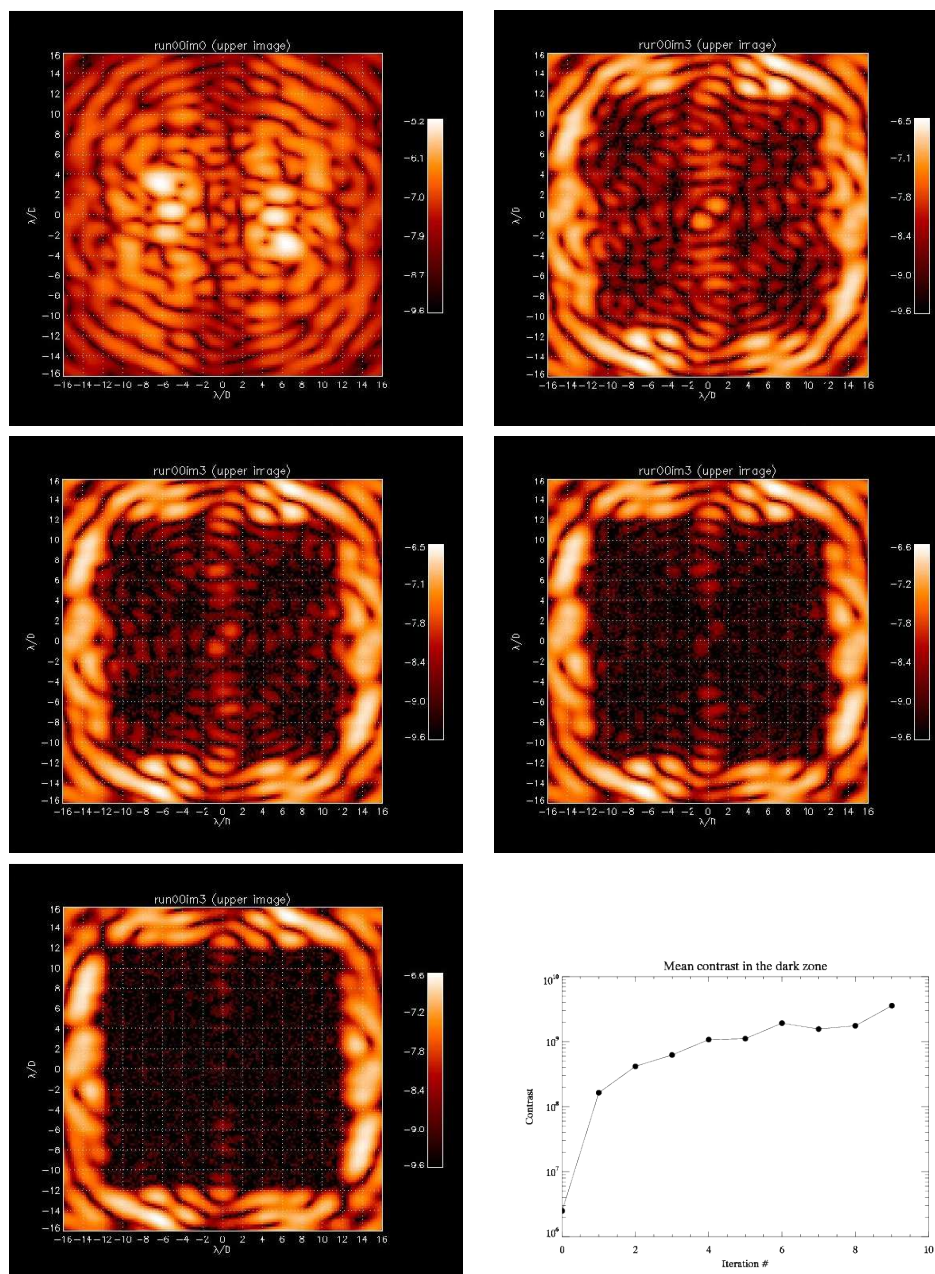


FIGURE 2.3 – Simulation de la correction itérative du bruit de tavelures sur le *High Contrast Imaging Testbed* (HCIT).

La mission spatiale COROT

L'idée que des exoplanètes puissent trahir leur présence en passant devant leur étoile est directement inspirée des passages, ou *transits*, de Mercure et Vénus devant le Soleil. On la trouve par exemple chez Belorizky (1938) ; Struve (1952) ; Rosenblatt (1971) ; Borucki et Summers (1984), mais elle ne fut réalisée pour la première fois qu'en 1999 depuis le sol par Charbonneau et al. (2000) et Henry et al. (2000), et tout de suite après depuis l'espace avec le télescope Hubble (Brown et al., 2001). Elle inspira de nombreux programmes de recherche au sol et dans l'espace, dont la mission spatiale COROT du CNES à laquelle je participe depuis 1999.

Sommaire

3.1	Présentation de COROT	21
3.2	Détection des transits	24
3.3	Prévision des performances de COROT	25
3.4	Caractérisation fine des transits	26
3.5	Classement automatique des candidats et probabilité de l'hypothèse planétaire	30
3.6	Deux des planètes découvertes par COROT	31
3.6.1	COROT-7b, une super-terre ultra-chaude	31
3.6.2	COROT-8b, un mini-saturne dense	33
3.7	Conclusion	34
	Références	39

3.1 Présentation de COROT

La mission spatiale COROT est la première mission purement astronomique du CNES, c'est-à-dire ne relevant pas des sciences de la Terre. Le lancement par une fusée Soyouz a eu lieu fin 2006 depuis Baïkonour et a placé le satellite sur une orbite polaire à environ 900 km d'altitude. Ses deux programmes scientifiques principaux sont d'une part, l'étude de la structure interne des étoiles par sismologie, et d'autre part, la détection d'exoplanètes qui éclipsent partiellement leur étoile-hôte (Baglin, 2003). Pour mener à bien ces programmes, le satellite embarque un photomètre de haute précision constitué d'un télescope de 27 cm et de deux paires de détecteurs CCD fonctionnant de 350 à 1050 nm (Auvergne et al., 2009). Chaque programme utilise une paire de détecteurs. Pour la sismologie, il s'agit d'observer un petit nombre d'étoiles très brillantes pour maximiser le rapport signal à bruit de la mesure des modes d'oscillation stellaire, tandis que pour l'exoplanétologie, il s'agit au contraire d'observer simultanément un grand nombre d'étoiles plus faibles pour maximiser les chances d'observation de transits d'exoplanètes.

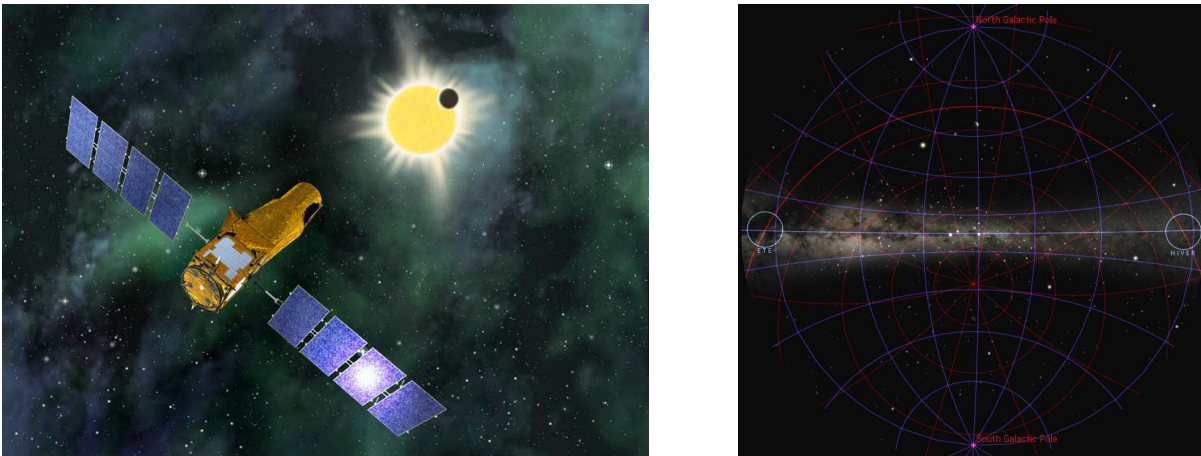


FIGURE 3.1 – À gauche : image d’artiste du satellite COROT. À droite : les « yeux » de COROT sont les deux zones du ciel accessibles à l’observation.

Le télescope peut-être pointé dans deux zones opposées du ciel, appelées « yeux » de COROT, dont la densité moyenne d’étoiles a été jugée suffisante pour le programme d’exoplanétologie (fig. 3.1). En été, COROT regarde dans la constellation de l’Aigle, c’est la direction dite « du centre galactique » ($6h50,0^\circ$), et en hiver dans la constellation de la Licorne, c’est la direction dite « de l’anti-centre galactique » ($18h50,0^\circ$). Chaque champ appartenant à l’une de ces régions est observé en continu pendant au maximum 5 mois, suite à quoi le télescope doit se retourner pour éviter le Soleil. Entre deux campagnes longues, ou *long runs*, notées LRc ou LRa, on insère des campagnes courtes, ou *short runs*, notées SRC ou SRa (table 3.1).

Campagne	date de début	date de fin	durée (jours)	nombre de cibles (voie exo.)
IRa01	18/01/2007	03/04/2007	75	9879
SRc01	03/04/2007	09/05/2007	36	6975
LRc01	09/05/2007	15/10/2007	159	11408
LRa01	15/10/2007	03/03/2008	140	11408
SRa01	03/03/2008	31/03/2008	28	8150
LRc02	31/03/2008	08/09/2008	161	11408
SRc02	08/09/2008	06/10/2008	28	11408
SRa02	06/10/2008	12/11/2008	37	10265
LRa02	12/11/2008	30/03/2009	138	11408

TABLE 3.1 – Liste des premières campagnes d’observation de COROT de début 2007 à fin 2008. IR signifie *Initial Run*. COROT a observé un total de 163 664 étoiles dans un champ total de $58^{\circ 2}$ entre février 2007 et octobre 2012. La campagne la plus courte a duré 21 jours et la plus longue 152 jours (durée moyenne : 78 jours). Plus de 91 % du temps a été consacré aux observations.

Dans la voie dédiée aux exoplanètes, il est possible d’enregistrer simultanément les courbes de lumière d’au maximum 6 000 étoiles par CCD¹¹ qui chacun couvre un champ de $1,4^\circ \times 1,4^\circ$. La luminosité de chaque étoile est mesurée toutes les 32 s en sommant le nombre de photo-électrons accumulés par les pixels d’une zone prédéfinie entourant l’étoile et appelée « masque photométrique ». Pour la plupart

11. COROT a disposé de 2 CCD fonctionnels jusqu’en mars 2009, puis d’un seul CCD fonctionnel jusqu’en novembre 2012.

des étoiles, les mesures à 32 s sont groupées par paquets de 16 par l'ordinateur de bord, de sorte qu'on ne dispose en fait que d'une mesure toutes les 512 s, mais dans tous les cas, le flux photométrique est exprimé en nombre photo-électrons par 32 secondes.

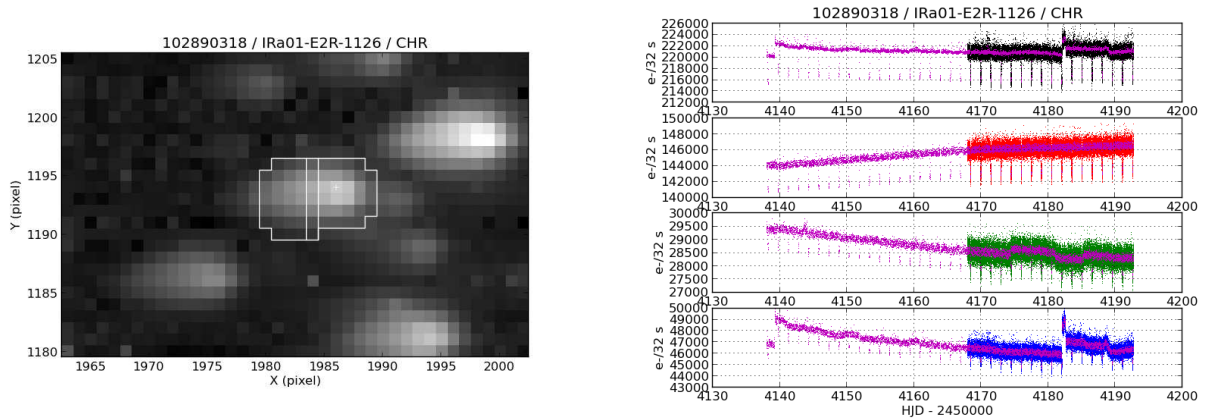


FIGURE 3.2 – À gauche : image de l'étoile Corot-1 de magnitude $V = 13,6$. Le masque photométrique est représenté en surimpression, ainsi que les sous-masques bleu à gauche, vert au centre, et rouge à droite. À droite : les quatre courbes de lumières de Corot-1 (blanche, rouge, verte et bleue de haut en bas).

Le télescope est volontairement défocalisé dans la voie sismologique et comporte un prisme-objectif dans la voie exoplanétologique afin de répartir la lumière d'une étoile sur plus de pixels. Cela permet de diminuer la sensibilité de la mesure vis-à-vis de la gigue du télescope¹² et de minimiser le bruit quantique, et ainsi d'atteindre la précision photométrique cherchée. La précision obtenue est en dessous de 0,1 % sur une étoile de magnitude 14 en 512 s (typiquement deux fois le bruit quantique). En contrepartie, cela introduit un étalement important des taches images avec des recouvrements entre étoiles proches. Dans la voie exo., la taille angulaire d'un pixel sur le ciel est de $2,32''$. Pour une étoile de magnitude 14, un masque photométrique comporte de l'ordre d'une cinquantaine de pixels et couvre une zone de l'ordre de $18'' \times 14''$ sur le ciel. Pour un sous-ensemble des cibles, le masque est divisé en trois sous-masques dans le sens de la dispersion du prisme (fig. 3.2). On fabrique ainsi trois courbes de lumière supplémentaires, communément dénommées bleue, verte et rouge, mais dont les frontières en longueur d'onde dépendent du masque utilisé et de la position de l'étoile dans le champ. Un étalonnage précis en longueur d'onde est donc difficile, mais comme on le verra par la suite, ces courbes apportent une information supplémentaire très utile.

Le choix des étoiles, ainsi que celui des masques associés, se fait pendant la phase de programmation qui débute une campagne. On utilise pour cela une image profonde du champ obtenue par COROT avec une pose exceptionnellement longue¹³ et une base de données spécialement préparée pour les besoins de COROT et qui s'appelle *Exodat* (Deleuil et al., 2009). *Exodat* agrège des catalogues existants et des observations photométriques spécifiques dans les yeux de COROT qui servent notamment à estimer le type spectral et la classe de luminosité des étoiles du champ. Les étoiles-cibles sont sélectionnées de sorte à maximiser le nombre d'étoiles naines, seules étoiles pour lesquelles la précision photométrique est suffisante pour la détection de planètes. Ces étoiles sont identifiées sur la base de leur position dans un diagramme magnitude-couleur. En outre, les étoiles qui sont très contaminées par leurs voisines sont rejetées, ou exceptionnellement, on agrandit la taille du masque afin d'inclure complètement une étoile

12. mouvement erratique du télescope autour de sa ligne de visée (*jitter* en anglais)

13. la durée d'une orbite, soit 1 h 42 min. environ

proche, ceci afin de ne pas dégrader la précision photométrique par augmentation du bruit de gigue.

3.2 Détection des transits

En 1999, sous la direction de Daniel Rouan et d'Alain Léger, je me suis attaqué pour mon stage de DEA au problème la détection des signaux de transits dans les futures données de COROT. En première approximation, on peut considérer que les transits causent des encoches rectangulaires périodiques dans la courbe de lumière. L'idée de départ consiste donc à comparer par inter-corrélation la courbe de lumière mesurée à un signal rectangulaire périodique dont on fait varier la période P , la durée τ des encoches et la date centrale t_c de la première encoche. Cette méthode de détection qui tire parti la forme du signal cherchée est classique en traitement du signal et porte le nom de *filtrage adapté*. Elle est plus efficace que l'analyse de Fourier en raison de la faible ressemblance entre un signal de transit et une sinusoïde.

Le filtrage adapté n'est toutefois pas la seule possibilité. Et pour me convaincre de ce choix, j'ai par exemple exploré en 2007 une autre possibilité utilisant des ondelettes de Haar avec Benjamin Mollier et Olivier Demangeon, alors stagiaires de M1. Ces ondelettes, qui avaient été choisies pour leur forme rectangulaire proche de celle d'un transit, avaient malheureusement une performance moitié moindre que le filtrage adapté en terme de rapport signal à bruit¹⁴.

On peut également citer l'approche de Kovács et al. (2002) qui consiste à procéder à un ajustement aux moindres carrés d'une fonction rectangulaire sur le transit. Cet algorithme, dénommé *Box Least Square* (BLS), a connu une grande popularité après avoir conduit à la détection de nouveaux transits dans les mesures de l'*Optical Gravitational Lensing Experiment* (Udalski, 2002, OGLE). Cependant, il n'est pas difficile de montrer qu'il est mathématiquement équivalent au filtrage adapté décrit plus haut (Tingley, 2003). Ajoutons qu'au-delà du principe de base, l'efficacité réelle d'un algorithme dépend des détails de son implémentation numérique et des propriétés statistiques particulières des données.

Avant de calculer effectuer le filtrage adapté, il faut « préparer » la courbe de lumière en supprimant les variations lentes qui sont dues à l'activité stellaire, ainsi qu'un maximum d'accidents (données manquantes, discontinuités, mesures aberrantes...) qui peuvent affecter le flux photométrique hors des transits. L'essentiel de ce filtrage initial, effectuant un « blanchiment du bruit », est réalisé avec un double filtrage médian. Le filtrage médian à petite échelle élimine les points aberrants à l'aide d'une médiane glissante sur une durée d'un peu plus d'une heure, tandis que le filtrage médian à grande échelle élimine la variabilité stellaire et les discontinuités à l'aide d'une médiane glissante sur une durée d'une dizaine d'heures. On a recours ici à filtrage non linéaire par médiane (et non un filtrage linéaire par moyenne par exemple) pour son aptitude à préserver les signaux rectangulaires cherchés. Mentionnons que de juin 2007 à janvier 2008, Aldo Bonomo, alors doctorant de Nuccio Lanza à l'université de Catane (Sicile), est venu travailler avec moi à l'IAS sur différentes méthodes de pré-traitement des courbes de lumière (Bonomo et al., 2009).

Dans le cas de signaux rectangulaires, le filtrage adapté prend une forme particulièrement simple qui consiste à calculer le rapport signal à bruit sur la profondeur ε des transits dans l'hypothèse d'un triplet (P, τ, t_c) . Pour n points de mesure lors des transits,

$$\frac{S}{B} = \frac{\varepsilon \sqrt{n}}{\sigma},$$

où σ est l'écart-type du bruit (calculé de manière robuste) sur la courbe de lumière blanchie. Pour chaque courbe de lumière, l'algorithme identifie donc le triplet de plus haut S/B et replie la courbe à la période correspondante pour un examen plus poussé (fig. 3.3). L'expérience montre qu'il faut $S/B \gtrsim 15$ pour

14. Quoique les ondelettes soient un outil à la mode pour l'analyse, la compression ou le débruitage des signaux, elles n'accomplissent de prodiges que là où elles sont utilisées à bon escient.

que le signal soit vraiment exploitable par la suite. À ce stade, le filtrage adapté a permis de trouver ce qui ressemblait le plus à un signal de transit dans la courbe de lumière, mais cela ne garantit pas qu'il s'agisse bien d'un transit, et encore moins d'un transit d'exoplanète.

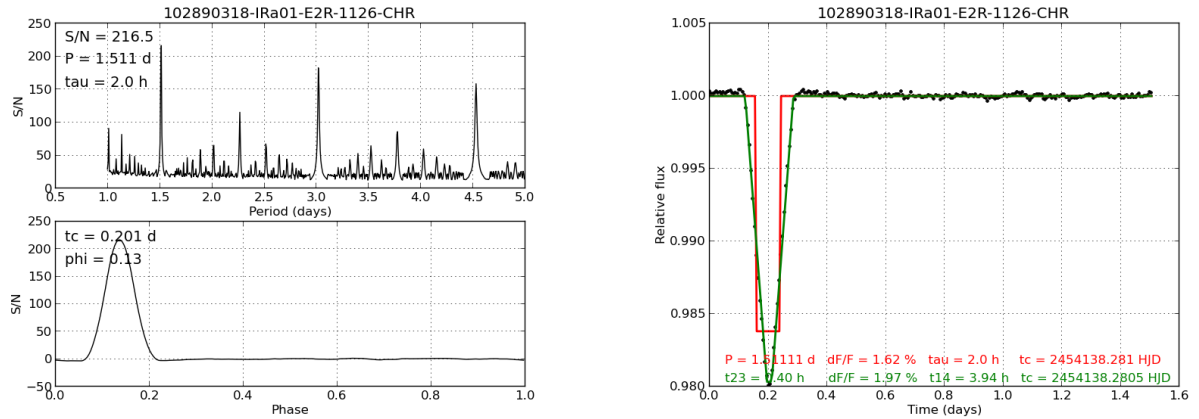


FIGURE 3.3 – Détection des transits de COROT-1b par filtrage adapté. À gauche : S/B en fonction de la période orbitale P testée (en haut) et en fonction de la phase $\phi = t_c/P$ du premier transit. À droite : courbe de lumière moyenne sur une période orbitale après blanchiment du bruit. On a superposé en rouge l'approximation rectangulaire du transit (telle que déterminée par le filtrage adapté) et en vert l'ajustement d'un modèle trapézoïdal.

3.3 Prédiction des performances de COROT

Partant de l'idée optimiste que des observations de suivi bien conduites permettraient à coup sûr d'identifier la nature des signaux détectés par l'algorithme précédent, la question de la détectabilité d'une exoplanète par transit se ramène donc à un simple critère sur le S/B . J'ai utilisé cette idée avant le lancement de COROT pour estimer la future moisson exoplanétaire de la mission (P. Bordé et al., 2001, 2003c). Pour cela, on simule les champs observés à l'aide du modèle galactique de Besançon (Robin & Creze, 1986). Pour chaque étoile du champ, à partir d'un modèle des bruits l'instrument, on peut savoir quel type de planète (période ou demi-grand axe, rayon) serait détectable par COROT (fig. 3.4). En 2003, j'en conclus donc sans surprise que les petites planètes ($R_p \leq 2 R_{\oplus}$) seraient préférentiellement détectées autour des petites étoiles (G2–K2) brillantes ($V=12-14$), tandis que les planètes géantes seraient majoritairement détectées autour des étoiles faibles ($V=15-16$) qui sont les plus nombreuses, et ce quel que soit leur type (A2–G2).

On peut enfin calculer un nombre total de planètes détectables en supposant par exemple qu'il existe une planète par étoile de période comprise entre 0 et 75 jours. Toutefois, les chiffres obtenus varient grandement (d'un facteur 2 à 10) en fonction de la forme de la densité de probabilité choisie pour la période orbitale. Pour les planètes géantes, en utilisant la densité de probabilité pour la période telle qu'elle était connue en 2003 et en appliquant la fréquence observée de 1,5 % pour ces planètes, je prévoyais alors de l'ordre de 75 planètes géantes détectables.

Ce chiffre était optimiste pour trois raisons majeures :

1. On avait considéré un modèle de bruit blanc gaussien (même si les contributions instrumentales étaient incluses) ce qui conduisait à un seuil de détection à un rapport signal à bruit de l'ordre de 7, moitié moins de ce qu'il faudrait en réalité ;

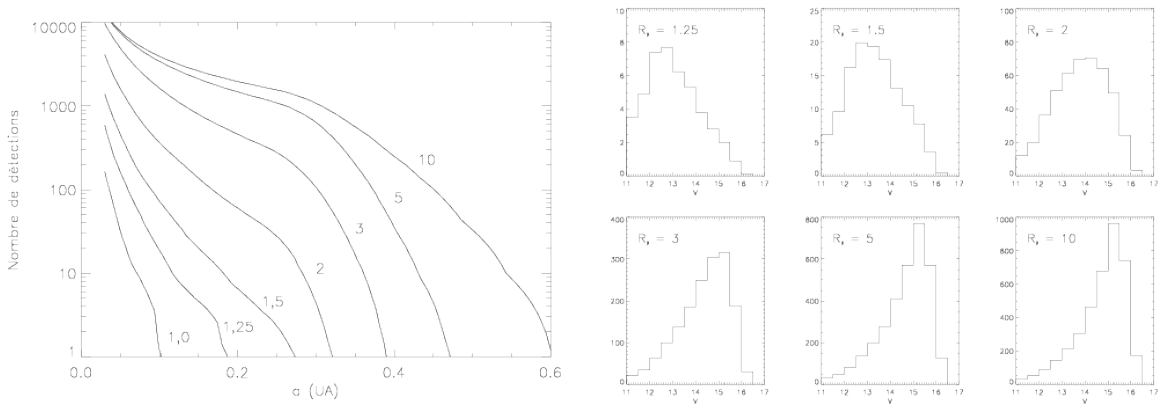


FIGURE 3.4 – À gauche : nombre de planètes détectables par COROT en 2,5 ans en fonction du demi-grand axe de l’orbite. Chaque courbe correspond à un rayon planétaire différent variant de 1 à 10 rayons terrestres. On fait l’hypothèse que toutes les étoiles observées possèdent une planète de rayon et de demi-grand axe considérés. À droite : pour un rayon planétaire de 1,25 à 10 rayons terrestres, histogrammes du nombre de planètes détectables en fonction de la magnitude de l’étoile-cible. Ici, on a normalisé à une planète par étoile dans la gamme de périodes orbitales accessibles à COROT.

2. On avait anticipé que la variabilité stellaire serait la principale cause de détections manquées, alors qu’en fait la principale difficulté viendrait de l’écrasante majorité des signaux de transits dus à des compagnons stellaires (faux positifs astrophysiques) ;
3. On avait supposé que le suivi au sol serait possible dans tous les cas, alors qu’en réalité, la spectrométrie des vitesses radiales n’est pas praticable aujourd’hui avec une précision suffisante pour des étoiles chaudes, en rotation rapide et/ou de magnitude plus grande que 15,5. En outre, on ne dispose pas du temps de télescope nécessaire pour suivre tous les candidats par vélocimétrie radiale.

3.4 Caractérisation fine des transits

La préparation de la courbe de lumière au filtrage adapté introduit une légère distorsion des transits qui est sans conséquence pour l’identification du meilleur triplet (P, τ, t_c) , mais qu’on souhaite éviter pour une caractérisation fine du signal trouvé. Pour cette raison, une fois que le signal à plus haut S/B a été localisé, on découpe la courbe de lumière initiale autour des transits, on élimine les points aberrants, on corrige la courbure locale de la courbe de lumière par division par un polynôme d’ordre 2, puis on rephase tous les transits. On procède alors aux opérations suivantes :

1. Estimation du rayon et de la masse de l’étoile-cible à partir du type spectral fourni par Exodat ;
2. Mesure des paramètres morphologiques du transit moyen en utilisant un modèle à fronts montant et descendant rectilignes et à fond plat ou arrondi ;
3. Vérification de la constance de la profondeur de chaque transit ;
4. Calcul du rayon de l’objet éclipsant à partir de la profondeur relative du transit et du rayon de l’étoile-cible ;
5. Comparaison de la durée du transit à la durée maximale attendue pour une exoplanète en orbite circulaire autour de l’étoile-cible considérée ;
6. Calcul de la densité de l’étoile-cible à partir des paramètres du transit ;

7. Recherche de transits secondaires ;
8. Comparaison de la profondeur relative des transits pairs et impairs ;
9. Comparaison de la profondeur relative des transits entre les courbes bleue, verte et rouge si elles existent.

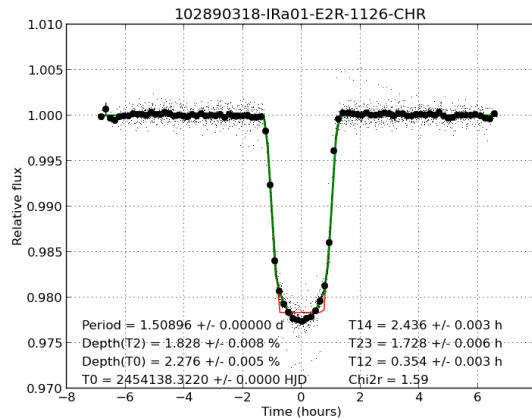


FIGURE 3.5 – Transit moyen de COROT-1b. Sont superposés un modèle trapézoïdal à fond plat (en rouge) et à fond arrondi (en vert). Le modèle à fond arrondi conduit à une estimation plus exacte des durées T_{12} et T_{23} .

Pour qu'il s'agisse bien d'une exoplanète, il faut que :

- l'étoile-cible soit une naine (tests de durée du transit et de densité stellaire) ;
- l'objet éclipse ait un rayon plus petit que 2 rayons joviens (test de rayon) ;
- la période trouvée soit correcte (transits pairs et impairs de même profondeur) ;
- il n'y ait pas d'éclipse secondaire (ou une éclipse secondaire assez peu profonde pour être compatible avec une planète) ;
- le transit détecté ne soit pas dû à une étoile éclipse voisine de l'étoile-cible (test des couleurs).

Aucun de ces tests pris isolément n'est suffisamment robuste pour pouvoir identifier avec certitude la nature de l'objet éclipse. En les combinant, on peut toutefois formuler des hypothèses et dans certains cas où on dispose de la photométrie en trois couleurs et en effectuant une analyse détaillée de l'environnement de l'étoile-cible, on arrive à attribuer de manière convaincante le signal de transit observé à une étoile éclipse voisine. C'est un sujet dans lequel j'ai investi beaucoup de temps récemment (figs. 3.6 & 3.7). Les calculs correspondants nécessitent de disposer de modèles bien caractérisés de la tache image pour différentes couleurs d'étoile et différentes positions sur le détecteur. Ainsi, au cours de l'année 2013, deux élèves-ingénieurs en 2^e année de l'École Centrale Paris, Thomas Saint-Paul et Francisco Vazquez, ont effectué un projet avec moi sur la dérivation de ces modèles directement des observations de COROT. Il s'agissait d'une part d'estimer l'exactitude des modèles semi-empiriques mis à ma disposition par Pascal Guterman lorsqu'il était ingénieur au Laboratoire d'astrophysique de Marseille, et d'autre part, de s'affranchir de l'indexation de ces modèles sur la température effective qui n'est pas une grandeur directement observable. Les résultats de cette étude sont en cours d'intégration à mon logiciel.

Au sein du projet COROT, la recherche et la caractérisation des signaux de transit sont effectuées par le groupe de détection (*Detection Working Group*) dont j'ai assuré la direction en décembre 2009 à octobre 2012. Ce groupe de travail international est formé de scientifiques de plusieurs instituts qui ont chacun développé leurs propres outils de détection et de caractérisation de transits. La mise en commun

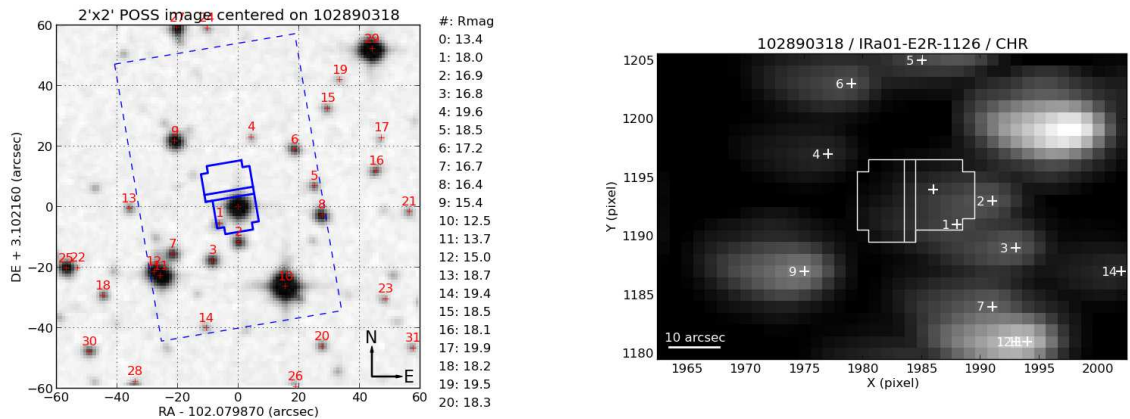


FIGURE 3.6 – À gauche : image du ciel centrée sur COROT-1 tirée du *Palomar Observatory All-Sky Survey* (POSS). Les étoiles environnantes sont numérotées par ordre de distance angulaire croissante à la cible. On a superposé en trait plein le masque photométrique de COROT-1 et en trait pointillé la région du ciel couverte par l’imagerie de droite. À droite : imagerie autour de COROT-1 calculée à partir des informations connues sur les étoiles environnantes. On a supprimé COROT-1 pour montrer la contamination photométrique due aux autres étoiles : 1 % du flux photométrique mesuré est dû à l’étoile 1, 2 % est dû à l’étoile 2, et la contribution des autres étoiles est négligeable. La contamination totale des étoiles 1 et 2 est inégale dans les couleurs : elle est par exemple de 5 % dans le rouge (sous-masque de droite) et de moins de 1 % dans le bleu (sous-masque de gauche). En étudiant séparément la contribution de chacune de ces étoiles à chacune des couleurs, on peut montrer qu’il est peu probable que l’une d’entre elles soit responsable du transit observé, ce qui conforte l’hypothèse d’un transit planétaire devant COROT-1.

des résultats et leur discussion au sein du groupe permet d’obtenir des listes de candidats plus riches et plus fiables. Des priorités associées à chaque candidat sont fixées lors de téléconférences où sont examinées les résultats aux tests cités plus haut. Typiquement, un candidat de priorité 1 est intégralement compatible avec un transit exoplanétaire, tandis que les candidats de priorité 2, 3 ou 4, ont échoué à 1, 2 ou 3 tests. La liste ordonnée des candidats pour une campagne donnée vers le centre ou l’anti-centre est alors transmise au groupe de suivi (*Follow-Up Working Group*) qui se charge d’organiser les observations complémentaires nécessaires et de les analyser.

Transdet¹⁵, le logiciel que j’ai développé et perfectionné lors de tests en aveugle préparatoires à la mission (P. Bordé et al., 2007b) a servi d’outil de base pour la contribution de l’équipe de l’IAS au groupe de détection. Sous ma direction, Benjamin Samuel, stagiaire de M2, puis doctorant de 2007 à 2011, puis Céline Cavarroc, post-doctorante en 2010–2011, ont à la fois fait évoluer ce logiciel et effectué la majeure partie du dépouillement des données (Samuel, 2011 ; Cavarroc et al., 2012). Tout récemment, Édouard Tollet, stagiaire de L3 en juin-juillet 2013 a participé très significativement à l’analyse des données de la campagne LRC10 et a considérablement augmenté la rapidité d’exécution de Transdet en recodant en C les procédures les plus lentes et en répartissant automatiquement les données à traiter entre tous les processeurs disponibles. Transdet fournit à présent de manière automatique et en moins de 10 s une analyse complète d’une courbe de lumière sous la forme d’un document de 5 pages en PDF.

Si cet outil sophistiqué aide considérablement pour l’identification de transits non exoplanétaires et le jugement de la qualité des transits les plus prometteurs, l’établissement des priorités pour le suivi nécessite malgré tout une intervention humaine, voire des discussions entre spécialistes lors des télécon-

15. Mot-valise pour *transit detector*. Initialement codé en IDL, Transdet a été intégralement recodé en Python en 2008.

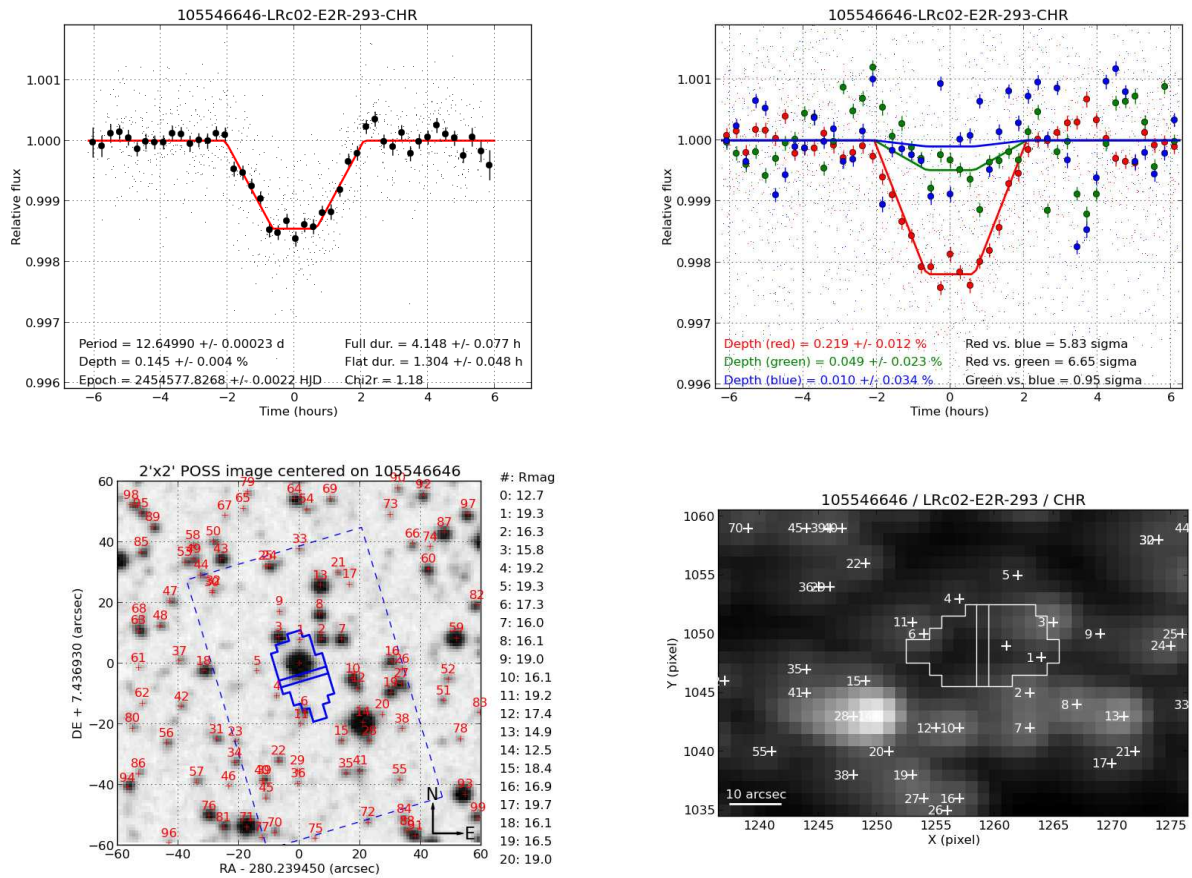


FIGURE 3.7 – Exemple de signal de transit dû à une étoile binaire à éclipses voisine de l'étoile-cible. En haut à gauche : courbe de lumière moyenne du transit obtenue en sommant tous les pixels du masque photométrique. En haut à droite : courbes de lumière moyennes du transit obtenues en sommant séparément les pixels des sous-masques bleu, vert et rouge. On note que la profondeur relative est bien plus grande dans le rouge que dans le bleu. En bas à gauche : image du ciel tirée du POSS (analogue à la fig. 3.6 à gauche). En bas à droite : calcul de la contamination par les voisins (analogue à la fig. 3.6 à droite). Au contraire de COROT-1, on montre ici que l'étoile responsable du transit n'est très probablement pas l'étoile-cible, mais plutôt l'étoile 3.

férences mentionnées plus haut. En effet les différents tests utilisés pèsent différemment dans l'estimation de la priorité et plusieurs ne sont pas indépendants. Ainsi, les tentatives pour attribuer une note globale à un candidat sur la base de sous-notes aux différents tests n'ont rien donné de concluant.

3.5 Classement automatique des candidats et probabilité de l'hypothèse planétaire

Dans le cas de COROT, il est loisible de faire intervenir un petit groupe d'experts pour le classement des candidats en une poignée de priorités car le nombre des candidats n'excède pas quelques dizaines par campagne. En revanche, ce fonctionnement ne serait pas suffisamment efficace pour un projet de plus grande envergure produisant bien plus de candidats, tel que PLATO proposé à l'ESA et qui observerait de l'ordre d'un million d'étoiles naines (Rauer et al., 2013), soit cinq fois plus que COROT. Dans cette perspective, il était intéressant de réfléchir à la manière de fabriquer un système automatique de classement des candidats.

En outre, la publication de listes de candidats comme celle de la mission américaine Kepler (Batalha et al., 2013) conduit nécessairement à des études dans lesquelles tous ces candidats sont traités au même niveau. Citons par exemple l'étude de Traub (2012) qui extrapole à partir de cette liste une valeur pour la fréquence des planètes telluriques dans la zone habitable. Or, il faudrait pondérer ces candidats en fonction de leur qualité, c'est-à-dire en fait de leur probabilité d'être de véritables planètes. Entre autres choses, cela permettrait une comparaison plus robuste entre les observations et les prédictions des modèles de formation des systèmes stellaires comme par exemple ceux développés par Mordasini et al. (2012a, 2012b).

Le besoin de disposer d'une probabilité planétaire s'applique aux candidats en attente des observations de suivi qui permettront à court terme d'établir avec certitude leur véritable nature, et plus encore à de ceux pour lesquels le suivi n'est même pas envisageable aujourd'hui. Certains appellent cela la *validation planétaire* des candidats. Ce sujet a fait l'objet d'un atelier récent au LAM en mai 2013 où j'ai été invité à présenter les travaux de l'équipe de l'IAS.

Sachant que la théorie des probabilités de Bayes-Laplace fournirait un cadre théorique permettant de combiner de manière cohérente les différents tests utilisés, j'ai donc proposé fin 2010 à Olivier Demangeon d'effectuer la deuxième partie de sa thèse (février 2011–mars 2012) sur le développement d'un système expert de classement des transits (Demangeon, 2013).

L'approche retenue est la suivante : on envisage un ensemble d'hypothèses pouvant expliquer le signal observé (systèmes doubles ou triples impliquant ou non une planète) et on calcule la probabilité, définie en tant que mesure numérique du degré de plausibilité, de chacune des hypothèses de cet ensemble à l'aide du théorème de Bayes. La probabilité de l'hypothèse planétaire remplace la priorité telle que définie dans la section précédente et permet le classement des candidats.

Afin de limiter (au moins dans un premier temps) la complexité des calculs et d'assurer une analyse rapide, les courbes de lumière ne sont décrites que par un petit nombre de paramètres qui résultent de l'ajustement de modèles simples de transit : période, profondeur relative, durée de l'immersion-émersion, durée de la phase immergée. On compare aussi les profondeurs des transits pairs et impairs, et on fait une recherche de transit secondaire (en supposant une orbite circulaire). Pour ce faire, le modèle de « trapèze à fond arrondi » que j'ai proposé permet une détermination plus exacte de la durée d'immersion que dans le cas du trapèze classique.

Le travail d'Olivier a abouti à un premier classement de 22 candidats issus du LRc02 et dont les natures sont connues grâce au suivi déjà effectué. Deux planètes sur cinq sont identifiées d'emblée avec des probabilités de 99,8 % et 99,5 %. Six faux positifs sont également correctement identifiés, et aucun faux positif n'est annoncé comme planète. Ces résultats sont prometteurs, mais pas assez satisfaisants

pour passer à l'analyse complète des données de COROT. Pour améliorer le classement, il est nécessaire d'inclure :

- des informations statistiques sur les étoiles observées issues d'un modèle de population galactique comme celui de Besançon ;
- la profondeur relative des transits dans les trois couleurs lorsque cette information est disponible ;
- l'information sur la contamination de chacune des étoiles voisines prises individuellement.

J'ai montré à la section précédente combien ces deux dernières informations pouvaient être discriminantes.

Sur le « marché de la validation planétaire », le logiciel d'Olivier, baptisé *Bayesian analysis for the ranking of transits* ou BART, est en concurrence avec celui de Morton (2012), développé pour Kepler. Morton a adopté une approche différente dans laquelle la statistique des étoiles observées a le mérite d'être incluse, mais qui ne fournit pas, contrairement à BART, les valeurs des paramètres associés à chacune des hypothèses envisagées. Ces deux logiciels sont rapides et permettent de traiter des listes entières de candidats. Il existe aussi deux logiciels qui font une analyse très poussée des courbes de lumière en utilisant des modèles physiques de transit : *Blender* développé au Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics (Torres et al., 2011) et *PASTIS* développé au LAM (Almenara et al., 2012). Ils nécessitent tous les deux des super-calculateurs et ne peuvent être utilisés que pour analyser des petits nombres de courbes de lumière.

3.6 Deux des planètes découvertes par COROT

Il n'est pas dans mon intention de faire ici une revue exhaustive des planètes découvertes par COROT, ce que le lecteur intéressé pourra trouver par ailleurs (Moutou et al., 2013). Je vais focaliser mon propos sur les deux planètes sur lesquelles j'ai le plus travaillé, COROT-7b (§ 3.6.1) et COROT-8b (§ 3.6.2).

3.6.1 COROT-7b, une super-terre ultra-chaude

COROT-7b revêt une importance particulière car c'est la première exoplanète de petite taille, dans le régime dit des « super-terres » ($R_p \leq 2 R_\oplus$, $M_p \leq 10 M_\oplus$), pour laquelle ont été mesurés le rayon (Léger et al., 2009) et la masse (Queloz et al., 2009 ; Hatzes et al., 2010). Ce genre de découverte était très attendu de COROT dont une des justifications était la possibilité de détecter des petites exoplanètes, allant ainsi au-delà de ce qui était possible avec des relevés au sol, tels WASP (Pollacco et al., 2006) ou HAT (Bakos et al., 2004), traditionnellement limités aux exoplanètes géantes.

L'étoile COROT-7 était particulièrement favorable à la détection d'une petite planète car c'est une des étoiles les plus brillantes observées par COROT ($V = 11,7$) et la courbe de lumière enregistrée est exceptionnellement « propre » (peu de trous, pas de discontinuités, peu de points aberrants). En outre, la planète COROT-7b, quoique de petite taille et donnant lieu à un transit de profondeur relative de seulement 3×10^{-4} , orbite avec une période ultra-courte de 20,5 h, ce qui fait que le S/B est tout de même de 32 en 131 jours. C'était donc un signal relativement facile à détecter, et ce dès quelques semaines d'observation, quoique les transits individuels soient « noyés » dans le bruit. COROT-7 est néanmoins une étoile active (de variabilité de l'ordre de 2 %) dont la période de rotation d'environ 23 jours est comparable à celle du Soleil (fig. 3.8).

Le rayon de COROT-7b et surtout sa masse ont subi quelques ajustements au cours du temps, suite à une mise à jour de la masse et du rayon de COROT-7 à $0,91 \pm 0,03 M_\odot$ et $0,82 \pm 0,04 R_\odot$ par Bruntt et al. (2010), et surtout suite à la difficulté de traiter proprement les mesures de vitesse radiale en raison de l'importance de la variabilité stellaire. Hatzes et al. (2011) ont mis un terme au débat et je retiens ici leurs valeurs de masse et rayon pour COROT-7b : $7,42 \pm 1,21 M_\oplus$ et $1,58 \pm 0,10 R_\oplus$. Il s'agit donc

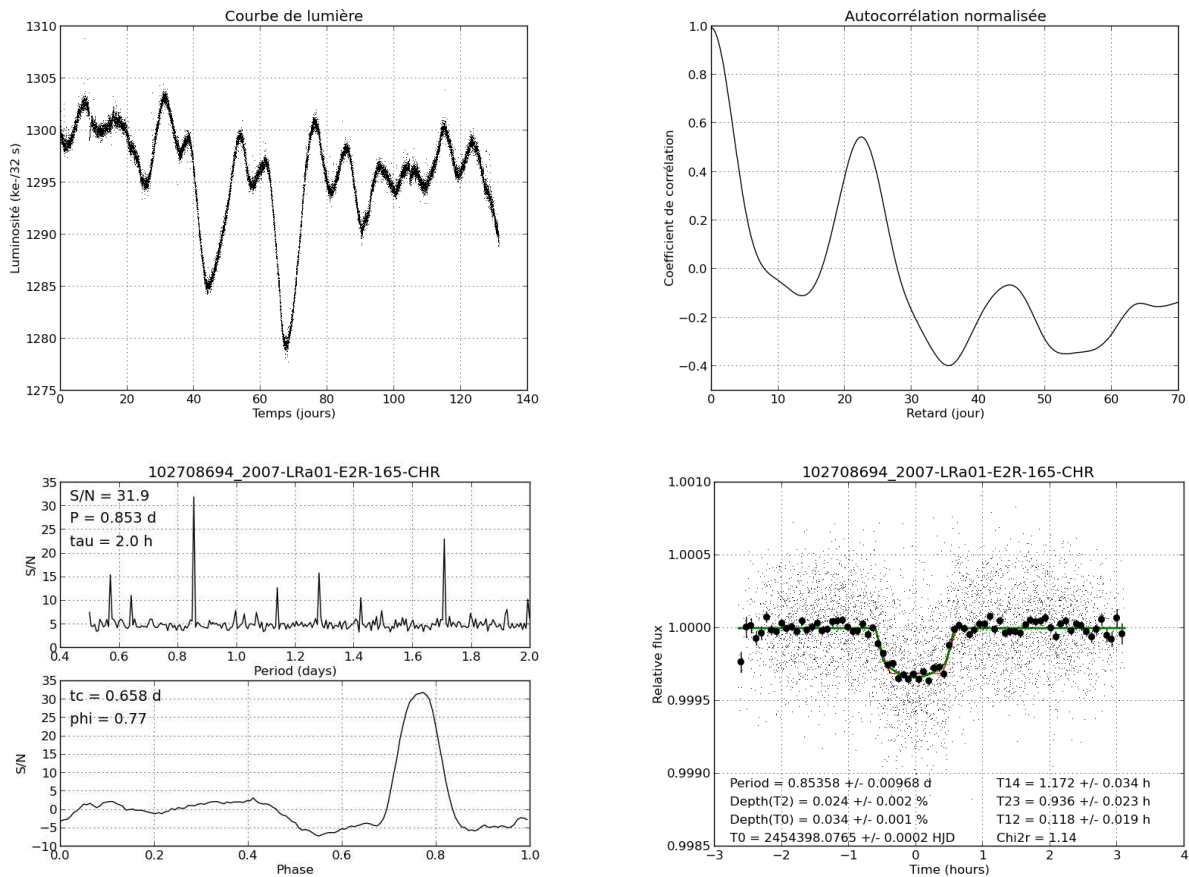


FIGURE 3.8 – COROT-7. En haut à gauche : courbe de lumière. La variabilité de l'étoile (présence de taches) est clairement apparente. En haut à droite : fonction d'autocorrélation de la courbe de lumière. Le pic à 23 jours signe la période de rotation de l'étoile. En bas à gauche : le filtrage adapté donne une détection à une période de 0,85 jours et une phase de 0,77 avec $S/B \approx 32$. En bas à droite : courbe de lumière du transit. J'y ai superposé un modèle de trapèze en rouge et un modèle de trapèze à fond arrondi en vert.

d'une planète rocheuse dont la densité moyenne ($10,4 \pm 1,8$) s'approche de celle de Mercure (fig. 3.9). Il est remarquable que peu de temps après, Kepler ait détecté une planète quasi-semblable, Kepler-10b (Batalha et al., 2011).

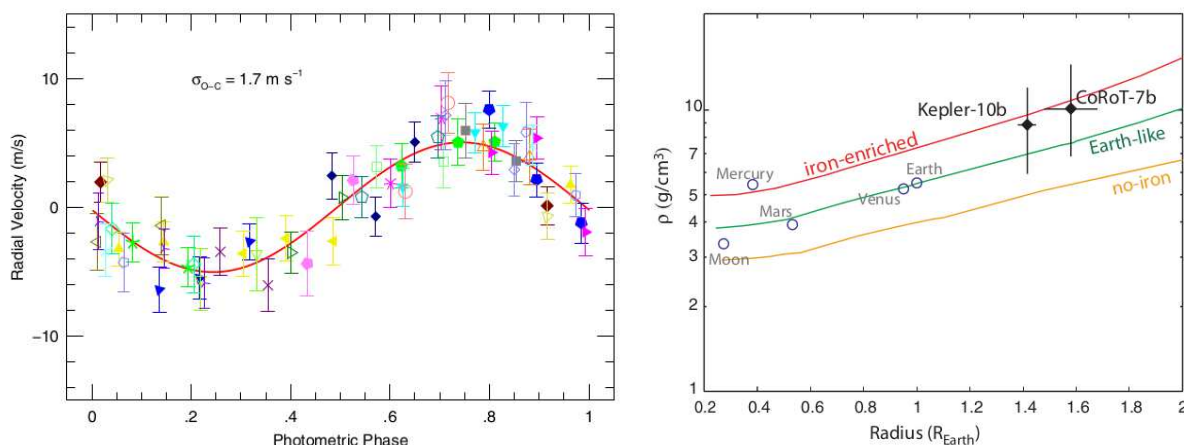


FIGURE 3.9 – COROT-7. À gauche : courbe de vitesse radiale pour COROT-7b seule. À droite : relation masse volumique-rayon pour différents types de planètes rocheuses. COROT-7b et Kepler-10b pourraient avoir une composition plus proche de Mercure que de la Terre.

Mon collègue de l'IAS, Alain Léger, a mené une étude théorique des conditions physiques qui pourraient régner à la surface de COROT-7b en supposant que la planète admette une rotation et une révolution synchrones (Léger et al., 2011). Dans ce cas, le point substellaire serait si chaud (environ 2500 K) qu'il pourrait exister à cet endroit un océan de lave. En revanche, la face opposée serait très froide (environ 50 K). Deux doctorants de notre équipe, Benjamin Samuel et Olivier Demangeon ont été associés à ces travaux.

Notons enfin que COROT-7b appartient à un système comprenant au moins une autre, sinon deux autres petites planètes à très courte période qui n'ont été détectées que dans les mesures de vitesse radiale (Hatzes et al., 2010). Les caractéristiques globales du système de COROT-7 rentrent donc bien dans le tableau général des systèmes multiples et compacts de super-terres tel que décrit par Mayor et al. (2011) et Lovis et al. (2011).

3.6.2 COROT-8b, un mini-saturne dense

COROT-8b est une exoplanète d'environ 1,6 rayon jovien et 0,2 masse jovienne qui tourne en 6,2 jours autour d'une naine K1 sur une orbite circulaire (P. Bordé et al., 2010). Sa densité moyenne, égale à $1,6 \pm 0,1$, est proche de celle de Neptune (1,76).

Pour l'étude de COROT-8b, j'ai programmé un logiciel d'ajustement au sens des moindres carrés d'un modèle physique de transit sur les courbes de lumière (et non plus seulement un modèle descriptif comme dans le cas des trapèzes). Pour s'assurer de trouver l'optimum global, l'espace des paramètres est exploré à grande échelle en utilisant une grille de conditions initiales pour des optimisations locales à l'aide de l'algorithme de Levenberg-Marquardt (Press et al., 1997). Deux stagiaires de L3 ont contribué au développement de cet outil, Sven Jakumeit en juin-juillet 2007, puis Ophélie Fabre en juin-juillet 2008. Pour COROT-8b, l'optimisation des paramètres du modèle (qui inclut une loi d'assombriement centre-bord à deux paramètres pour l'étoile) s'est faite en parallèle avec Szilard Csizmadia de l'agence spatiale allemande (DLR) à Berlin qui a utilisé de son côté un algorithme génétique (fig. 3.10). Par la suite, j'ai proposé à Patrick Gaulme, post-doctorant dans notre équipe en 2011, de reprendre ce problème

d'estimation paramétrique dans un cadre bayésien (avec mise en œuvre de chaînes de Markov pour les nécessaires calculs numériques d'intégrales). Le logiciel qu'il a développé a été utilisé pour COROT-25b et COROT-26b (Almenara et al., 2013).

Pour COROT-8b, nous avons pour la première fois modélisé séparément les courbes de lumière bleue, verte et rouge. Cela a nécessité de calculer une correction de la contamination par les voisins, couleur par couleur, ce qui n'existait pas. C'est pour cette raison que je me suis lancé initialement dans les calculs de contamination décrits au § 3.4. Et comme à cette époque, le logiciel automatique de traitement de COROT n'était pas encore optimal pour les couleurs, j'ai utilisé des courbes de lumière corrigées avec *SysRem* (Mazeh et al., 2009), un logiciel qui soustrait les effets systématiques qui sont repérés par leur action commune sur un grand nombre de courbes de lumière¹⁶. En obtenant des paramètres cohérents séparément dans les trois couleurs, l'hypothèse d'un transit dû à une exoplanète s'en est trouvée très renforcée.

Enfin, j'ai procédé au chronométrage des transits : il s'agit de rechercher des variations dans la date attendue pour les transits (*Transit timing variations* ou TTVs en anglais) qui trahissent l'influence gravitationnelle, et donc l'existence, d'autres planètes dans le système de COROT-8. À l'époque, je n'ai rien trouvé d'intéressant (fig. 3.10), mais j'ai depuis été contacté à deux reprises par Thomas Sauer, un astronome amateur allemand qui, ayant accumulé des mesures de transits de cette planète sur plusieurs années¹⁷, a peut-être mis à jour de réelles variations. Ce sera un de mes projets de recherche pour 2014.

3.7 Conclusion

Concluons cette partie avec quelques chiffres pour illustrer l'aventure de COROT en matière d'exoplanètes. Des signaux de transits ont été détectés dans plus de 3 900 courbes de lumière, dont 86 % ont été immédiatement attribués à des binaires à éclipses. Jusqu'à septembre 2012, 530 candidats ayant des profondeurs relatives de 0,02 à 5 % et des périodes de 0,5 à 95 jours, ont été inscrits sur les listes de suivi au sol. Plus de 200 nuits de télescopes de la classe des 1–2 m ont été utilisées pour des observations de suivi photométrique, ainsi qu'environ 350 nuits sur des spectromètres à vitesse radiale (principalement HARPS à La Silla et SOPHIE à l'OHP). La nature de plus de 280 candidats a été clairement établie, tandis que celle d'environ 250 candidats demeure incertaine. Seulement 6 % des candidats se révèlent des planètes dont on parvient à mesurer la masse par vélocimétrie radiale. La fraction de jupiters chauds, de l'ordre de 1 %, est compatible avec les estimations issues des données de vélocimétrie radiale et comparable avec celle obtenue par Kepler. En revanche, la fraction de neptunes chauds semble inférieure aux attentes (Bonomo et al., 2012). En comparaison de Kepler, COROT a également trouvé très peu de systèmes multiples (seulement deux), ce qui s'explique par le fait qu'il s'agit le plus souvent de petites planètes à des périodes déjà un peu trop longues pour ses capacités. Il a néanmoins fait une œuvre pionnière avec COROT-7b (§ 3.6.1), mais aussi COROT-3b la première naine brune au rayon et à la masse simultanément connus (Deleuil et al., 2008). Les exoplanètes découvertes par COROT sont remarquablement bien caractérisées et sont d'une grande diversité (Moutou et al., 2013).

À titre personnel, j'ai pleinement participé à cette aventure scientifique à travers mes activités dans le groupe de détection (dont j'ai eu la charge de décembre 2009 à octobre 2012) et également au conseil scientifique (à partir de décembre 2009). Je prépare actuellement une publication sur COROT-30b et COROT-31b qui sont deux jupiters chauds. Enfin, d'ici fin 2015 au plus tard, j'aimerais, en collaboration avec Olivier Demangeon, que soit calculée la probabilité planétaire de tous les candidats de la mission, en particulier pour une confrontation avec les modèles de formation planétaire.

16. En 2009, j'ai entrepris de faire travailler Olivier Martin, stagiaire de M1, sur ce genre de problématique en utilisant la méthode d'analyse en composantes principales, mais cela n'a rien donné de véritablement utilisable.

17. disponibles dans la base de données TRESCA (<http://var2.astro.cz/EN/>)

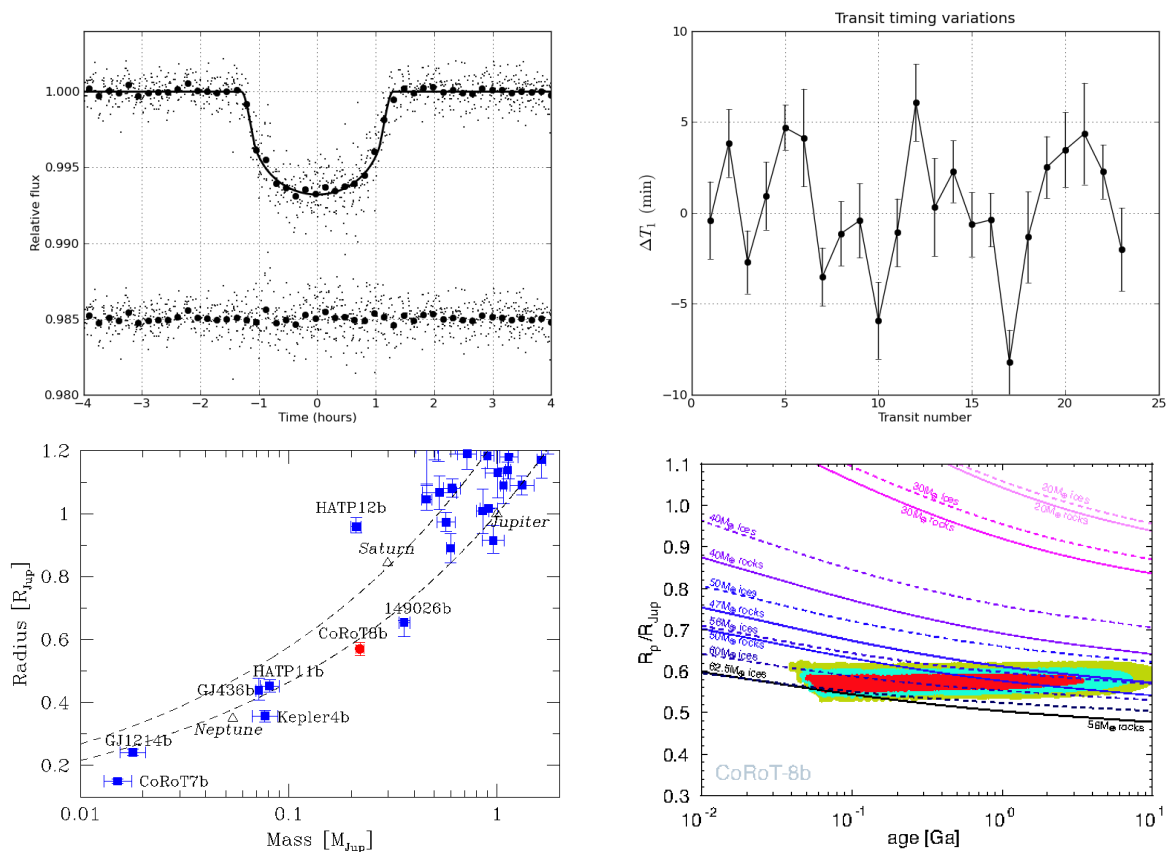


FIGURE 3.10 – COROT-8. En haut à gauche : courbe de lumière du transit avec modèle physique superposé. En haut à droite : chronométrage des transits. Les variations observées sont dues au bruit de mesure d’un transit au suivant. Elles ne trahissent donc pas la présence d’une planète supplémentaire. En bas à gauche : diagramme masse-rayon avec en traits pointillés les lignes iso-densité pour Jupiter et Saturne. En bas à droite : modèle de contraction de CoRoT-8b en fonction du temps. On estime le contenu en éléments lourds à 47–63 M_{\oplus} et le contenu en hydrogène et hélium à 7–23 M_{\oplus} .

Épilogue

Conclusion générale

MES recherches sur les exoplanètes se sont concentrées sur la détection de ces objets et la mesure de leurs propriétés physiques et orbitales. Pour cela, j’ai mis en œuvre, ou utilisé les mesures, de techniques de haute résolution angulaire (interférométrie à longue base et coronagraphie), de spectrométrie des vitesses radiales et de photométrie de haute précision, dans les domaines visible ou infrarouge. Dans la plupart des cas, ces techniques sont complémentaires et permettent de dresser un tableau très complet des systèmes stellaires et planétaires étudiés. Pour tirer tout le parti possible des mesures, j’ai découvert à quel point il était nécessaire de faire appel à de solides connaissances en traitement des données et en analyse numérique. Seule la théorie de Bayes-Laplace, qui fournit des règles quantitatives pour le raisonnement inductif (ou plausible), permet de répondre de manière complètement satisfaisante à nombre des questions que je me suis posées, ou qui m’ont été posées, et ce depuis mon stage de DEA en 1999.

En partant de mes débuts en 1999, je considère que mes apports les plus significatifs concernent :

- la production de catalogues d’étoiles-étalons pour l’interférométrie ;
- la détection interférométrique du compagnon faible de l’étoile binaire spectrométrique θ Draconis ;
- la correction des tavelures avec un miroir déformable derrière un coronographe spatial ;
- l’estimation des performances de COROT avant son lancement ;
- la recherche et la caractérisation des signaux de transits dans les courbes de lumière de COROT ;
- ma participation à l’étude de COROT-7b et mon étude de COROT-8b.

J’aimerais à présent conclure mon travail sur COROT par une estimation de la probabilité planétaire de chaque candidat en collaboration avec Olivier Demangeon. Ce projet pourrait être éventuellement étendu aux candidats de Kepler.

Perspectives

L’**EX**oplanétologie est une science jeune et foisonnante qui a encore de beaux jours devant elle. Au-delà des fantastiques découvertes de COROT et Kepler, vers quoi allons-nous à court terme ? Avant la fin de la décennie, nous devrions voir le lancement de la petite mission CHEOPS de l’ESA dont le but est de mesurer les transits autour d’étoiles brillantes de quelques super-terres (à plutôt courte période) précédemment détectées par vélocimétrie radiale (Broeg et al., 2013). Cela devrait faire progresser notre connaissance de ces objets et surtout fournir des cibles pour des observations complémentaires à haut S/B , en particulier depuis l’espace avec le JWST. Sur les étoiles brillantes, CHEOPS aura la concurrence de la mission américaine TESS dont les objectifs sont comparables, mais avec l’ambition supplémentaire de détecter de nouvelles exoplanètes (Ricker et al., 2010). Mes travaux en matière de photométrie des transits pourraient donc être facilement réinvestis, au moins sur CHEOPS en collaboration avec le LAM.

Regardons maintenant à moyen terme (la décennie 2020–2030). Je vois deux directions majeures pour faire progresser l'exoplanétologie :

1. La recherche de planètes telluriques dans la zone tempérée ;
2. L'étude spectrométrique des atmosphères de planètes de moyenne et grande tailles.

Sur le premier point, PLATO, en compétition à l'ESA pour la mission M3, se propose de rechercher des transits autour d'un million d'étoiles naines (de magnitude $V < 13$) réparties sur une large fraction de la voûte céleste (Rauer et al., 2013). Pour les 85 000 naines les plus brillantes ($V < 11$), il serait possible de mesurer avec une bonne précision les paramètres stellaires par sismologie, donnant ainsi accès à une mesure précise de la masse et du rayon de petites planètes (après un suivi au sol par vélocimétrie radiale).

Sur le premier point également, le projet NEAR, qui devrait être proposé à l'ESA dans le cadre du futur appel M4, se propose de mesurer les orbites astrométriques des étoiles dans un rayon de 20 pc autour du Soleil (Malbet et al., 2012). En association avec des mesures de vélocimétrie radiale, cela pourrait permettre de recenser les petites planètes dans la zone tempérée, ainsi que de mesurer leurs orbites et leurs masses. Ces planètes pourraient alors faire l'objet d'une étude spectrométrique de leur atmosphère par une mission subséquente.

Sur le deuxième point, on peut citer premièrement Echo, en compétition à l'ESA pour la mission M3, qui se propose de faire la spectrométrie en transmission des atmosphères de planètes transitantes (Tinetti et al., 2012). Les cibles accessibles seraient surtout des planètes à courte période de moyenne et grande taille.

Toujours sur le deuxième point, SPICES, qui sera peut-être en compétition pour M4 et/ou pour L3, se propose de faire la spectrométrie en émission dans le visible de planètes orbitant à plusieurs UA de leur étoile (Boccaletti et al., 2012). Les cibles les plus accessibles seraient des planètes géantes jeunes et donc encore chaudes et lumineuses.

Finalement, à plus long terme (après 2030) il faudra envisager une (ou deux) mission(s) d'étude spectrométrique des atmosphères de planètes telluriques. Dans le visible, ce pourrait être une version de SPICES avec un plus grand miroir, et dans l'infrarouge, ce pourrait être un interféromètre composé de satellites volant en formation. Des concepts de ce genre sont en compétition dans le cadre de la sélection par l'ESA des thèmes scientifiques pour les missions L2 et L3.

En cette matière, les choix de l'ESA vont se préciser bientôt, puisque nous saurons fin novembre 2013 quels sont les thèmes scientifiques retenus pour les missions L2 et L3, puis en février 2014 quelle est la mission choisie pour M3. Comme pour tant d'autres, ces choix auront bien évidemment un impact direct sur les orientations de mes recherches futures. S'il fallait trancher aujourd'hui, je privilégierais la mission Echo pour l'obtention de spectres (en transmission) d'exoplanètes de différents types, et même s'il n'y a que peu de super-terres dans l'échantillon. Il me semble en effet que ce dont l'exoplanétologie a le plus besoin à court terme pour se développer c'est d'un sérieux rapprochement avec la planétologie pour passer à la vitesse supérieure en matière d'(exo)planétologie comparée. Echo est actuellement inscrit en tête de la prospective de l'équipe d'exoplanétologie de l'IAS et mon collègue Marc Ollivier est le responsable scientifique de la contribution française à l'instrument.

Bibliographie

Références

- Aime, C. (Ed.). (2007, avril–mai). *Optical techniques for direct imaging of exoplanets, in comptes rendus de physique de l'académie des sciences* (Vol. 8) (N^{os} 3–4). Elsevier.
- Akaike, H. (1974). A New Look at the Statistical Model Identification. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 19, 716-723.
- Almenara, J. M., Bouchy, F., Gaulme, P., Deleuil, M., Havel, M., Gandolfi, D., ... Weingrill, J. (2013, juillet). Transiting exoplanets from the CoRoT space mission. XXIV. CoRoT-25b and CoRoT-26b : two low-density giant planets. *Astron. & Astrophys.*, 555, A118. doi: 10.1051/0004-6361/201321462
- Almenara, J. M., Díaz, R. F., Santerne, A., & Moutou, C. (2012, décembre). PASTIS : Planetary Analysis and Small Transit Investigation Software. In S. Boissier, P. de Laverny, N. Nardetto, R. Samadi, D. Valls-Gabaud, & H. Wozniak (Eds.), *Sf2a-2012 : Proceedings of the annual meeting of the french society of astronomy and astrophysics* (p. 217-220).
- Arsenault, R., Donaldson, R., Dupuy, C., Fedrigo, E., Hubin, N. N., Ivanescu, L., ... Gigan, P. (2004, octobre). MACAO-VLTI adaptive optics systems performance. In D. Bonaccini Calia, B. L. Ellerbroek, & R. Ragazzoni (Eds.), *Society of photo-optical instrumentation engineers (spie) conference series* (Vol. 5490, p. 47-58). doi: 10.1117/12.552548
- Auvergne, M., Bodin, P., Boissard, L., Buey, J.-T., Chaintreuil, S., Epstein, G., ... Zanatta, P. (2009, octobre). The CoRoT satellite in flight : description and performance. *Astron. & Astrophys.*, 506, 411-424. doi: 10.1051/0004-6361/200810860
- Baglin, A. (2003). COROT : A minisat for pionnier science, asteroseismology and planets finding. *Advances in Space Research*, 31, 345-349. doi: 10.1016/S0273-1177(02)00624-5
- Bakos, G., Noyes, R. W., Kovács, G., Stanek, K. Z., Sasselov, D. D., & Domsa, I. (2004, mars). Wide-Field Millimagnitude Photometry with the HAT : A Tool for Extrasolar Planet Detection. *Pub. Astron. Soc. Pac.*, 116, 266-277. doi: 10.1086/382735
- Batalha, N. M., Borucki, W. J., Bryson, S. T., Buchhave, L. A., Caldwell, D. A., Christensen-Dalsgaard, J., ... Gould, A. (2011, mars). Kepler's First Rocky Planet : Kepler-10b. *Astrophys. J.*, 729, 27. doi: 10.1088/0004-637X/729/1/27
- Batalha, N. M., Rowe, J. F., Bryson, S. T., Barclay, T., Burke, C. J., Caldwell, D. A., ... Welsh, W. F. (2013, février). Planetary Candidates Observed by Kepler. III. Analysis of the First 16 Months of Data. *Astrophys. J. Supp.*, 204, 24. doi: 10.1088/0067-0049/204/2/24
- Belorizky, D. (1938). Le Soleil, Etoile Variable. *L'Astronomie*, 52, 359-361.
- Boccaletti, A., Schneider, J., Traub, W., Lagage, P.-O., Stam, D., Gratton, R., ... Beerer, I. M. (2012, octobre). SPICES : spectro-polarimetric imaging and characterization of exoplanetary systems. From planetary disks to nearby Super Earths. *Experimental Astronomy*, 34, 355-384. doi: 10.1007/s10686-012-9290-5

- Bonneau, D., Clausse, J.-M., Delfosse, X., Duvert, G., Borde, P., Mourard, D., ... Cruzalebes, P. (2004, octobre). The JMMC evolutive search calibrator tool. In W. A. Traub (Ed.), *Society of photo-optical instrumentation engineers (spie) conference series* (Vol. 5491, p. 1160).
- Bonneau, D., Clausse, J.-M., Delfosse, X., Mourard, D., Cetre, S., Chelli, A., ... Zins, G. (2006, septembre). SearchCal : a virtual observatory tool for searching calibrators in optical long baseline interferometry. I. The bright object case. *Astron. & Astrophys.*, 456, 789-789. doi: 10.1051/0004-6361 :20054469
- Bonneau, D., Delfosse, X., Mourard, D., Lafrasse, S., Mella, G., Cetre, S., ... Zins, G. (2011, novembre). SearchCal : a Virtual Observatory tool for searching calibrators in optical long-baseline interferometry. II. The faint-object case. *Astron. & Astrophys.*, 535, A53. doi: 10.1051/0004-6361/201015124
- Bonomo, A. S., Aigrain, S., Bordé, P., & Lanza, A. F. (2009, février). Modelling solar-like variability for the detection of Earth-like planetary transits. II. Performance of the three-spot modelling, harmonic function fitting iterative nonlinear filtering, and sliding boxcar filtering. *Astron. & Astrophys.*, 495, 647-653. doi: 10.1051/0004-6361 :200810726
- Bonomo, A. S., Chabaud, P. Y., Deleuil, M., Moutou, C., Bouchy, F., Cabrera, J., ... Schneider, J. (2012, novembre). Detection of Neptune-size planetary candidates with CoRoT data. Comparison with the planet occurrence rate derived from Kepler. *Astron. & Astrophys.*, 547, A110. doi: 10.1051/0004-6361/201219780
- Bordé, P. J., Perrin, G. S., Nguyen, C. T., Amy-Klein, A., Daussy, C., Raynal, P.-Y., ... Maze, G. (2003a, février). 10- μ m wavefront spatial filtering : first results with chalcogenide fibers. In W. A. Traub (Ed.), *Society of photo-optical instrumentation engineers (spie) conference series* (Vol. 4838, p. 273-279).
- Bordé, P., Bouchy, F., Deleuil, M., Cabrera, J., Jorda, L., Lovis, C., ... Wuchterl, G. (2010, septembre). Transiting exoplanets from the CoRoT space mission. XI. CoRoT-8b : a hot and dense sub-Saturn around a K1 dwarf. *Astron. & Astrophys.*, 520, A66. doi: 10.1051/0004-6361/201014775
- Bordé, P., Fressin, F., Ollivier, M., Léger, A., & Rouan, D. (2007b, juillet). Transdet : a Matched-filter based Algorithm for Transit Detection – Application to Simulated COROT Light Curves. In C. Afonso, D. Weldrake, & T. Henning (Eds.), *Transiting extrapolar planets workshop* (Vol. 366, p. 145).
- Bordé, P., Perrin, G., Amy-Klein, A., Daussy, C., & Mazé, G. (2003b, octobre). Updated results on prototype chalcogenide fibers for 10 μ m wavefront spatial filtering. In M. Fridlund, T. Henning, & H. Lacoste (Eds.), *Earths : Darwin/tpf and the search for extrasolar terrestrial planets* (Vol. 539, p. 371-374).
- Bordé, P., Rouan, D., & Léger, A. (2001). Exo-planet detection with the COROT space mission. I. A multi-transit detection criterion. *Comptes Rendus Physique*, 7, 1049-1055.
- Bordé, P., Rouan, D., & Léger, A. (2003c, juillet). Exoplanet detection capability of the COROT space mission. *Astron. & Astrophys.*, 405, 1137-1144. doi: 10.1051/0004-6361 :20030675
- Bordé, P., & Traub, W. (2007a, avril). Speckle noise reduction techniques for high-dynamic range imaging. *Comptes Rendus Physique*, 8, 349-354. doi: 10.1016/j.crhy.2007.04.004
- Bordé, P. J., & Traub, W. A. (2006a, février). High-Contrast Imaging from Space : Speckle Nulling in a Low-Aberration Regime. *Astrophys. J.*, 638, 488-498. doi: 10.1086/498669
- Bordé, P. J., Traub, W. A., Kern, B. D., Trauger, J. T., & Kuhnert, A. C. (2006b, juillet). Speckle nulling for exoplanet detection with space-based coronagraphic telescopes. In *Society of photo-optical instrumentation engineers (spie) conference series* (Vol. 6265). doi: 10.1117/12.670553
- Borucki, W. J., & Summers, A. L. (1984, avril). The photometric method of detecting other planetary systems. *Icarus*, 58, 121-134. doi: 10.1016/0019-1035(84)90102-7

- Broeg, C., Fortier, A., Ehrenreich, D., Alibert, Y., Baumjohann, W., Benz, W., ... Thomas, N. (2013, avril). CHEOPS : A transit photometry mission for ESA's small mission programme. In *European physical journal web of conferences* (Vol. 47, p. 3005). doi: 10.1051/epjconf/20134703005
- Brown, T. M., Charbonneau, D., Gilliland, R. L., Noyes, R. W., & Burrows, A. (2001, mai). Hubble Space Telescope Time-Series Photometry of the Transiting Planet of HD 209458. *Astrophys. J.*, 552, 699-709. doi: 10.1086/320580
- Bruntt, H., Deleuil, M., Fridlund, M., Alonso, R., Bouchy, F., Hatzes, A., ... Queloz, D. (2010, septembre). Improved stellar parameters of CoRoT-7. A star hosting two super Earths. *Astron. & Astrophys.*, 519, A51. doi: 10.1051/0004-6361/201014143
- Cavarrac, C., Moutou, C., Gandolfi, D., Tingley, B., Ollivier, M., Aigrain, S., ... Wuchterl, G. (2012, février). Transiting exoplanets from the CoRoT space mission Resolving the nature of transit candidates for the LRa03 and SRa03 fields. *Astrophys. & Space Sc.*, 337, 511-529. doi: 10.1007/s10509-011-0897-1
- Chagnon, G., Mennesson, B., Perrin, G., Coudé du Foresto, V., Salomé, P., Bordé, P., ... Traub, W. (2002, novembre). L'-Band Interferometric Observations of Evolved Stars. *Astron. J.*, 124, 2821-2832. doi: 10.1086/343057
- Charbonneau, D., Brown, T. M., Latham, D. W., & Mayor, M. (2000, janvier). Detection of Planetary Transits Across a Sun-like Star. *Astrophys. J.*, 529, L45-L48. doi: 10.1086/312457
- Cockell, C. S., Herbst, T., Léger, A., Absil, O., Beichman, C., Benz, W., ... Bordé, P. (2009, mars). Darwin – an experimental astronomy mission to search for extrasolar planets. *Experimental Astronomy*, 23, 435-461. doi: 10.1007/s10686-008-9121-x
- Cohen, M., Walker, R. G., Carter, B., Hammersley, P., Kidger, M., & Noguchi, K. (1999, avril). Spectral Irradiance Calibration in the Infrared. X. A Self-Consistent Radiometric All-Sky Network of Absolutely Calibrated Stellar Spectra. *Astron. J.*, 117, 1864-1889.
- Coudé du Foresto, V. (1994). *Interférométrie astronomique infrarouge par optique guidée monomode*. Thèse de doctorat, Université Paris VII, Observatoire de Meudon.
- Deleuil, M., Deeg, H. J., Alonso, R., Bouchy, F., Rouan, D., Auvergne, M., ... Zucker, S. (2008, décembre). Transiting exoplanets from the CoRoT space mission . VI. CoRoT-Exo-3b : the first secure inhabitant of the brown-dwarf desert. *Astron. & Astrophys.*, 491, 889-897. doi: 10.1051/0004-6361 :200810625
- Deleuil, M., Meunier, J. C., Moutou, C., Surace, C., Deeg, H. J., Barbieri, M., ... Hodgkin, S. (2009, août). Exo-Dat : An Information System in Support of the CoRoT/Exoplanet Science. *Astron. J.*, 138, 649-663. doi: 10.1088/0004-6256/138/2/649
- Demangeon, O. (2013). *Détection et caractérisation d'exoplanètes : développement et exploitation du banc d'interférométrie annulante Nulltime et conception d'un système automatisé de classement des transits détectés par CoRoT*. Thèse de doctorat non publiée, Université Paris-Sud.
- Ford, V. G., Hull, A. B., Shaklan, S. B., Levine, M. B., White, M. L., Lowman, A. E., & Cohen, E. J. (2003, novembre). Terrestrial Planet Finder coronagraph. In D. R. Coulter (Ed.), *Society of photo-optical instrumentation engineers (spie) conference series* (Vol. 5170, p. 1-12). doi: 10.1117/12.512633
- Fridlund, M., Volonte, S., Laurance, R., Whitcomb, G., & Karlsson, A. (2000, juillet). *Darwin infrared space interferometer. Concept and feasibility study report* (Rapport technique N° ESA-SCI(2000)12). European Space Agency.
- Glindemann, A., Abuter, R., Carbognani, F., Delplancke, F., Derie, F., Gennai, A., ... Wilhelm, R. (2000, juillet). The VLT Interferometer : a unique instrument for high-resolution astronomy. In P. Léna & A. Quirrenbach (Eds.), *Society of photo-optical instrumentation engineers (spie) conference series* (Vol. 4006, p. 2-12).

- Gregory, P. C. (2005). *Bayesian Logical Data Analysis for the Physical Sciences : A Comparative Approach with 'Mathematica' Support*. Cambridge University Press.
- Guyon, O., Pluzhnik, E. A., Galicher, R., Martinache, F., Ridgway, S. T., & Woodruff, R. A. (2005, mars). Exoplanet Imaging with a Phase-induced Amplitude Apodization Coronagraph. I. Principle. *Astrophys. J.*, 622, 744-758. doi: 10.1086/427771
- Guyon, O., Pluzhnik, E. A., Kuchner, M. J., Collins, B., & Ridgway, S. T. (2006, novembre). Theoretical Limits on Extrasolar Terrestrial Planet Detection with Coronagraphs. *Astrophys. J. Supp.*, 167, 81-99. doi: 10.1086/507630
- Hatzes, A. P., Dvorak, R., Wuchterl, G., Guterman, P., Hartmann, M., Fridlund, M., ... Pätzold, M. (2010, septembre). An investigation into the radial velocity variations of CoRoT-7. *Astron. & Astrophys.*, 520, A93. doi: 10.1051/0004-6361/201014795
- Hatzes, A. P., Fridlund, M., Nachmani, G., Mazeh, T., Valencia, D., Hébrard, G., ... Schneider, J. (2011, décembre). The Mass of CoRoT-7b. *Astrophys. J.*, 743, 75. doi: 10.1088/0004-637X/743/1/75
- Heintz, W. D. (1978). *Double Stars*. D. Reidel Publishing Company.
- Henry, G. W., Marcy, G. W., Butler, R. P., & Vogt, S. S. (2000, janvier). A Transiting "51 Peg-like" Planet. *Astrophys. J.*, 529, L41-L44. doi: 10.1086/312458
- Jaynes, E. T. (2003). *Probability Theory – The Logic of Science*. Cambridge University Press.
- Kervella, P., Thévenin, F., Morel, P., Berthomieu, G., Bordé, P., & Provost, J. (2004, janvier). The diameter and evolutionary state of Procyon A. Multi-technique modeling using asteroseismic and interferometric constraints. *Astron. & Astrophys.*, 413, 251-256. doi: 10.1051/0004-6361 :20031527
- Kervella, P., Thévenin, F., Morel, P., Bordé, P., & Di Folco, E. (2003, septembre). The interferometric diameter and internal structure of Sirius A. *Astron. & Astrophys.*, 408, 681-688. doi: 10.1051/0004-6361 :20030994
- Kovács, G., Zucker, S., & Mazeh, T. (2002, août). A box-fitting algorithm in the search for periodic transits. *Astron. & Astrophys.*, 391, 369-377. doi: 10.1051/0004-6361 :20020802
- Krist, J. E., Stapelfeldt, K. R., Ménard, F., Padgett, D. L., & Burrows, C. J. (2000, août). WFPC2 Images of a Face-on Disk Surrounding TW Hydrae. *Astrophys. J.*, 538, 793-800. doi: 10.1086/309170
- Kuchner, M. J., & Traub, W. A. (2002, mai). A Coronagraph with a Band-limited Mask for Finding Terrestrial Planets. *Astrophys. J.*, 570, 900-908. doi: 10.1086/339625
- Léger, A., Mariotti, J. M., Mennesson, B., Ollivier, M., Puget, J. L., Rouan, D., & Schneider, J. (1996, octobre). Could We Search for Primitive Life on Extrasolar Planets in the Near Future? *Icarus*, 123, 249-255.
- Le Bouquin, J.-B., Bauvir, B., Haguenaer, P., Schöller, M., Rantakyro, F., & Menardi, S. (2008, avril). First result with AMBER+FINITO on the VLTI : the high-precision angular diameter of V3879 Sagittarii. *Astron. & Astrophys.*, 481, 553-557. doi: 10.1051/0004-6361 :20078550
- Léger, A., Grasset, O., Fegley, B., Codron, F., Albarede, A. F., Barge, P., ... Sotin, C. (2011, mai). The extreme physical properties of the CoRoT-7b super-Earth. *Icarus*, 213, 1-11. doi: 10.1016/j.icarus.2011.02.004
- Léger, A., Rouan, D., Schneider, J., Barge, P., Fridlund, M., Samuel, B., ... Zanatta, P. (2009, octobre). Transiting exoplanets from the CoRoT space mission. VIII. CoRoT-7b : the first super-Earth with measured radius. *Astron. & Astrophys.*, 506, 287-302. doi: 10.1051/0004-6361/200911933
- Lovis, C., Ségransan, D., Mayor, M., Udry, S., Benz, W., Bertaux, J.-L., ... Santos, N. C. (2011, avril). The HARPS search for southern extra-solar planets. XXVIII. Up to seven planets orbiting HD 10180 : probing the architecture of low-mass planetary systems. *Astron. & Astrophys.*, 528, A112. doi: 10.1051/0004-6361/201015577
- Lyot, B. (1932). Étude de la couronne solaire en dehors des éclipses. Avec 16 figures dans le texte. *Zeitschrift für Astrophysik*, 5, 73.

- Malbet, F., Léger, A., Shao, M., Goullioud, R., Lagage, P.-O., Brown, A. G. A., ... Zinnecker, H. (2012, octobre). High precision astrometry mission for the detection and characterization of nearby habitable planetary systems with the Nearby Earth Astrometric Telescope (NEAT). *Experimental Astronomy*, 34, 385-413. doi: 10.1007/s10686-011-9246-1
- Malbet, F., Yu, J. W., & Shao, M. (1995, avril). High-Dynamic-Range Imaging Using a Deformable Mirror for Space Coronagraphy. *Pub. Astron. Soc. Pac.*, 107, 386. doi: 10.1086/133563
- Mayor, M., Marmier, M., Lovis, C., Udry, S., Ségransan, D., Pepe, F., ... Santos, N. C. (2011, septembre). The HARPS search for southern extra-solar planets XXXIV. Occurrence, mass distribution and orbital properties of super-Earths and Neptune-mass planets. *ArXiv e-prints*.
- Mayor, M., & Queloz, D. (1995, novembre). A Jupiter-Mass Companion to a Solar-Type Star. *Nature*, 378, 355-359.
- Mazeh, T., Guterman, P., Aigrain, S., Zucker, S., Grinberg, N., Alapini, A., ... Wuchterl, G. (2009, octobre). Removing systematics from the CoRoT light curves. I. Magnitude-dependent zero point. *Astron. & Astrophys.*, 506, 431-434. doi: 10.1051/0004-6361/200912037
- Mazeh, T., Naef, D., Torres, G., Latham, D. W., Mayor, M., Beuzit, J., ... Zucker, S. (2000, mars). The Spectroscopic Orbit of the Planetary Companion Transiting HD 209458. *Astrophys. J.*, 532, L55-L58.
- McAlister, H. A., ten Brummelaar, T. A., Ridgway, S. T., Gies, D. R., Sturmman, J., Sturmman, L., ... Webster, L. (2012, juillet). Recent technical and scientific highlights from the CHARA Array. In *Society of photo-optical instrumentation engineers (spie) conference series* (Vol. 8445). doi: 10.1117/12.926452
- Mennesson, B., Perrin, G., Chagnon, G., du Coudé Foresto, V., Ridgway, S., Merand, A., ... Lacasse, M. (2002, novembre). Evidence for Very Extended Gaseous Layers around O-rich Mira Variables and M Giants. *Astrophys. J.*, 579, 446-454. doi: 10.1086/342671
- Mérand, A., Aufdenberg, J. P., Kervella, P., Foresto, V. C. d., ten Brummelaar, T. A., McAlister, H. A., ... Turner, N. H. (2007, août). Extended Envelopes around Galactic Cepheids. III. Y Ophiuchi and α Persei from Near-Infrared Interferometry with CHARA/FLUOR. *Astrophys. J.*, 664, 1093-1101. doi: 10.1086/518597
- Mérand, A., Bordé, P., & Coudé du Foresto, V. (2006a, février). A catalog of bright calibrator stars for 200-m baseline near-infrared stellar interferometry. *Astron. & Astrophys.*, 447, 783-783. doi: 10.1051/0004-6361 :20041323e
- Mérand, A., Kervella, P., Coudé du Foresto, V., Perrin, G., Ridgway, S. T., Aufdenberg, J. P., ... Berger, D. H. (2006b, juillet). Extended envelopes around Galactic Cepheids. II. Polaris and δ Cephei from near-infrared interferometry with CHARA/FLUOR. *Astron. & Astrophys.*, 453, 155-162. doi: 10.1051/0004-6361 :20054466
- Monnier, J. D., Berger, J.-P., Millan-Gabet, R., & ten Brummelaar, T. A. (2004, octobre). The Michigan Infrared Combiner (MIRC) : IR imaging with the CHARA Array. In W. A. Traub (Ed.), *Society of photo-optical instrumentation engineers (spie) conference series* (Vol. 5491, p. 1370).
- Mordasini, C., Alibert, Y., Georgy, C., Dittkrist, K.-M., Klahr, H., & Henning, T. (2012b, novembre). Characterization of exoplanets from their formation. II. The planetary mass-radius relationship. *Astron. & Astrophys.*, 547, A112. doi: 10.1051/0004-6361/201118464
- Mordasini, C., Alibert, Y., Klahr, H., & Henning, T. (2012a, novembre). Characterization of exoplanets from their formation. I. Models of combined planet formation and evolution. *Astron. & Astrophys.*, 547, A111. doi: 10.1051/0004-6361/201118457
- Morton, T. D. (2012, décembre). An Efficient Automated Validation Procedure for Exoplanet Transit Candidates. *Astrophys. J.*, 761, 6. doi: 10.1088/0004-637X/761/1/6
- Moutou, C., Deleuil, M., Guillot, T., Baglin, A., Bordé, P., Bouchy, F., ... the CoRoT Exoplanet Science Team (2013, juin). CoRoT : harvest of the exoplanet program. *ArXiv e-prints*.

- Perrin, G. (1996). *Une unité de recombinaison à fibres pour l'interféromètre IOTA, application à l'étude des étoiles de type tardif*. Thèse de doctorat, Université Paris VII, Observatoire de Meudon.
- Perrin, G. (2003, mars). The calibration of interferometric visibilities obtained with single-mode optical interferometers. Computation of error bars and correlations. *Astron. & Astrophys.*, 400, 1173-1181.
- Perrin, G., Ridgway, S. T., Coudé du Foresto, V., Mennesson, B., Traub, W. A., & Lacasse, M. G. (2004a, mai). Interferometric observations of the supergiant stars α Orionis and α Herculis with FLUOR at IOTA. *Astron. & Astrophys.*, 418, 675-685. doi: 10.1051/0004-6361 :20040052
- Perrin, G., Ridgway, S. T., Mennesson, B., Cotton, W. D., Woillez, J., Verhoelst, T., ... Lacasse, M. G. (2004b, octobre). Unveiling Mira stars behind the molecules. Confirmation of the molecular layer model with narrow band near-infrared interferometry. *Astron. & Astrophys.*, 426, 279-296. doi: 10.1051/0004-6361 :20041098
- Perrin, G., Ridgway, S. T., Verhoelst, T., Schuller, P. A., Coudé du Foresto, V., Traub, W. A., ... Lacasse, M. G. (2005, juin). Study of molecular layers in the atmosphere of the supergiant star μ Cep by interferometry in the K band. *Astron. & Astrophys.*, 436, 317-324. doi: 10.1051/0004-6361 :20042313
- Plez, B., Brett, J. M., & Nordlund, A. (1992, mars). Spherical opacity sampling model atmospheres for M-giants. I - Techniques, data and discussion. *Astron. & Astrophys.*, 256, 551-571.
- Pollacco, D. L., Skillen, I., Collier Cameron, A., Christian, D. J., Hellier, C., Irwin, J., ... Wilson, D. M. (2006, octobre). The WASP Project and the SuperWASP Cameras. *Pub. Astron. Soc. Pac.*, 118, 1407-1418. doi: 10.1086/508556
- Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T., & Flannery, B. P. (1997). *Numerical Recipes in C, The Art of Scientific Computing* (Second éd.). Cambridge University Press.
- Queloz, D., Bouchy, F., Moutou, C., Hatzes, A., Hébrard, G., Alonso, R., ... Wuchterl, G. (2009, octobre). The CoRoT-7 planetary system : two orbiting super-Earths. *Astron. & Astrophys.*, 506, 303-319. doi: 10.1051/0004-6361/200913096
- Rauer, H., Catala, C., Aerts, C., Appourchaux, T., Benz, W., Brandeker, A., ... Zwintz, K. (2013, octobre). The PLATO 2.0 Mission. *ArXiv e-prints*.
- Richichi, A., & Percheron, I. (2002, mai). CHARM : A Catalog of High Angular Resolution Measurements. *Astron. & Astrophys.*, 386, 492-503.
- Richichi, A., Percheron, I., & Khristoforova, M. (2005, février). CHARM2 : An updated Catalog of High Angular Resolution Measurements. *Astron. & Astrophys.*, 431, 773-777. doi: 10.1051/0004-6361 :20042039
- Ricker, G. R., Latham, D. W., Vanderspek, R. K., Ennico, K. A., Bakos, G., Brown, T. M., ... Worden, S. P. (2010, janvier). Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS). In *American astronomical society meeting abstracts 215* (Vol. 42, p. 450.06).
- Robin, A., & Creze, M. (1986, mars). Stellar populations in the Milky Way - A synthetic model. *Astron. & Astrophys.*, 157, 71-90.
- Rosenblatt, F. (1971, février). A Two-Color Photometric Method for Detection of Extra solar Planetary Systems. *Icarus*, 14, 71. doi: 10.1016/0019-1035(71)90103-5
- Samuel, B. (2011). *Détection et caractérisation d'exoplanètes avec le télescope spatial CoRoT – Contributions à la découverte et l'étude physique de la super-terre CoRoT-7b*. Thèse de doctorat non publiée, Université Paris-Sud.
- Struve, O. (1952, octobre). Proposal for a project of high-precision stellar radial velocity work. *The Observatory*, 72, 199-200.
- Tinetti, G., Beaulieu, J. P., Henning, T., Meyer, M., Micela, G., Ribas, I., ... Yurchenko, S. N. (2012, octobre). EChO. Exoplanet characterisation observatory. *Experimental Astronomy*, 34, 311-353. doi: 10.1007/s10686-012-9303-4

- Tingley, B. (2003, mai). A rigorous comparison of different planet detection algorithms. *Astron. & Astrophys.*, 403, 329-337. doi: 10.1051/0004-6361 :20030355
- Torres, G., Fressin, F., Batalha, N. M., Borucki, W. J., Brown, T. M., Bryson, S. T., . . . Welsh, W. F. (2011, janvier). Modeling Kepler Transit Light Curves as False Positives : Rejection of Blend Scenarios for Kepler-9, and Validation of Kepler-9 d, A Super-earth-size Planet in a Multiple System. *Astrophys. J.*, 727, 24. doi: 10.1088/0004-637X/727/1/24
- Traub, W. A. (2012, janvier). Terrestrial, Habitable-zone Exoplanet Frequency from Kepler. *Astrophys. J.*, 745, 20. doi: 10.1088/0004-637X/745/1/20
- Traub, W. A., Ahearn, A., Carleton, N. P., Berger, J., Brewer, M. K., Hofmann, K., . . . Weigelt, G. (2003, février). New Beam-Combination Techniques at IOTA. In W. A. Traub (Ed.), *Interferometry for Optical Astronomy II* (Vol. SPIE 4838, p. 45-52).
- Trauger, J. T., Burrows, C., Gordon, B., Green, J. J., Lowman, A. E., Moody, D., . . . Wilson, D. (2004, octobre). Coronagraph contrast demonstrations with the high-contrast imaging testbed. In J. C. Mather (Ed.), *Society of photo-optical instrumentation engineers (spie) conference series* (Vol. 5487, p. 1330-1336). doi: 10.1117/12.552520
- Trauger, J. T., & Traub, W. A. (2007, avril). A laboratory demonstration of the capability to image an Earth-like extrasolar planet. , 446, 771-773. doi: 10.1038/nature05729
- Udalski, A. (2002, juin). New Transits from the Ogle-III Survey. *IAU Circ.*, 7925, 2.
- Verhoelst, T., Bordé, P. J., Perrin, G., Decin, L., Eriksson, K., Ridgway, S. T., . . . Waelkens, C. (2005, mai). Is Arcturus a well-understood K giant ?. Test of model atmospheres and potential companion detection by near-infrared interferometry. *Astron. & Astrophys.*, 435, 289-301. doi: 10.1051/0004-6361 :20042356

A

Curriculum Vitae

Pascal Bordé

Maître de conférences en astronomie & astrophysique

Institut d'astrophysique spatiale, bât. 121

Université Paris-Sud

91405 Orsay

Tél. : 01 69 85 86 25 · Fax : 01 69 85 86 75

pascal.borde@ias.u-psud.fr · <http://www.ias.u-psud.fr/pperso/pborde/>

Né le 16 mars 1974 aux Lilas (93), marié, 3 enfants.

Titres & diplômes

- 2007 Titularisation en tant que maître de conférences, classe normale
- 2004 Qualification aux fonctions de maître de conférences en section 34
- 2003 Titularisation en tant que professeur agrégé, classe normale
- 2003 Doctorat de l'université Pierre & Marie Curie (Paris 6), *mention Très Honorable*
- 1999 DEA Méthodes instrumentales en astrophysique (Paris-Sud), *mention Bien*
- 1999 Magistère EEA (Paris-Sud), *mention Bien*
- 1998 Lauréat du concours de l'agrégation externe de Sc. Physiques, option Phys. Ap. (23^e)
- 1997 Maîtrise EEA (Paris-Sud), *mention Bien*
- 1997 Certificat d'Astrophysique (Paris-Sud), *mention Bien*
- 1997 Test of English for International Communication (TOEIC) : 920/990
- 1996 Licence EEA (Paris-Sud), *mention Bien*
- 1992 Baccalauréat C, *mention Bien*

Parcours

- 2010–2012 **Accueil en délégation à mi-temps au CNRS**
 Depuis 2006 **Maître de conférences en astronomie & astrophysique, Paris-Sud**
 Détection et caractérisation de planètes extrasolaires par photométrie des transits avec la mission spatiale COROT (CNES).
- 2003–2006 **Bourse post-doctorale Michelson, Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics**
 Étude théorique et expérimentale de concepts d'imagerie à très haute dynamique dans le visible. Application à la détection et à la spectroscopie d'exoplanètes pour la mission Terrestrial Planet Finder (NASA).
- 2000–2003 **Allocataire-moniteur-normalien, Paris 6 & Observatoire de Paris**
 Détection et caractérisation de planètes extrasolaires par photométrie visible (mission spatiale COROT du CNES) et par interférométrie infrarouge à très haute précision (instrument FLUOR sur les interféromètres à longues bases IOTA puis CHARA).
- 1999–2000 **Scientifique du contingent, DGA & Observatoire de Paris**
 Caractérisation d'un prototype de fibre monomode à $10\ \mu\text{m}$: construction d'un banc de test, mesures en laboratoire & traitement des données.
- 1995–1999 **élève-professeur à l'ENS Cachan, département EEA, section Phys. Ap.**
 1992–1995 Classes de mathématiques supérieures puis spéciales P' (lycée Charlemagne à Paris).
 1989–1992 Lycée Louis-le-Grand à Paris.

Activités d'enseignement

Résumé

La table ci-dessous fournit le résumé de mes activités d'enseignement (en hTD) par niveau et par année (le service pouvant être équilibré sur deux années consécutives).

Année	Licence	Master	Doctorat	Total	Requis
2006–2007	61	85	18	164	150
2007–2008	48	89	18	155	150
2008–2009	92	114	18	224	192
2009–2010	90	59	14	163	192
2010–2011	14	88	0	102	96
2011–2012	20	99	0	119	96
2012–2013	75	130	0	205	192

Licence

- Mécanique du point et du solide (L1 Physique)** : TP en 2007 (28 h) et TD de 2007 à 2009 (40 h). Cinématique, changements de référentiel, dynamique dans les référentiels galiléens et non galiléens, énergie, moment cinétique, dynamique des solides indéformables, mouvements à force centrale, systèmes à deux corps, centre de masse, collisions ;
- Histoire des sciences (L2 Chimie/Maths)** : TD en L2 Chimie en 2008 et 2009 (12 h), puis en L2 Maths en 2013 (15 h). Étude de dossiers sur les représentations du monde de Ptolémée à Copernic en 2008 et 2009, sur les observatoires français au XIX^e en 2013, et sur la relativité de Galilée à Einstein en 2008, 2009 et 2013. Les étudiants font une présentation orale et réalisent une affiche ;

-
3. **Mathématiques pour les sciences physiques (L3 Physique et applications)** : TD d'algèbre en 2008, 2009 et 2012 (14 h) ; TD d'analyse complexe en 2012 (10 h) ; TP de calcul formel (*Mathematica*) en 2008 (32 h) et 2009 (64 h) ; CM d'algèbre en 2011 (12 h) et 2012 (14 h) ; responsable de l'UE depuis 2011. Algèbre linéaire et multi-linéaire : vecteurs, formes linéaires, produit scalaire, notation de Dirac (bras et kets), opérateurs, métrique, base réciproque, covariance et contravariance, convention d'Einstein, changements de bases, tenseurs, algèbre tensoriel, symétrie des tenseurs, produit vectoriel. Analyse complexe : dérivabilité des fonctions complexes (conditions de Cauchy-Riemann), intégration sur un contour du plan complexe (théorème de Cauchy), développements en séries (Taylor, Laurent), singularités, théorème des résidus, calcul d'intégrale par la méthode des résidus.

Master

1. **Physique atomique (M1 Physique fondamentale)** : TP en 2007 (32 h) et 2008 (24 h). Étude expérimentale de la résonance magnétique (effet Brossel). Réalisation d'un laser à colorant et étude du phénomène de saturation ;
2. **Traitement du signal (M1 Physique et applications, puis M1 Physique appliquée et mécanique)** : TD (12 h) et TP (16 h) de 2007 à 2011. Signal & bruit, processus aléatoires, distribution de Dirac et produit de convolution, série et transformée de Fourier, échantillonnage, énergie des signaux, systèmes linéaires et invariants, filtrages analogiques ;
3. **Systèmes et méthodes d'imagerie (M1 Physique appliquée et mécanique)** : CM en 2011, 2012 et 2013 (7 h) et TD en 2012 (5 h) et 2013 (7 h). Optique de Fourier : diffraction de Fresnel et de Fraunhofer, théorie ondulatoire des lentilles minces, systèmes d'imagerie cohérent et incohérent, fonction de transfert optique ;
4. **Traitement du signal (M2 Outils et systèmes de l'astronomie et de l'espace)** : CM (12 h) avec polycopié et TP (12 h) depuis 2011. Probabilités : logique des propositions (algèbre de Boole), règles de la somme, du produit et de Bayes, tests d'hypothèses, distributions discrètes et continues, estimateurs, changements de variable, distributions conjointes ou vectorielles, corrélation, théorème central limite, estimation d'une grandeur constante à partir d'une série de mesures. Analyse de Fourier de signaux continus et discrets, filtrages temporel et fréquentiel, échantillonnage et quantification ;
5. **Automatique (M2 Outils et systèmes de l'astronomie et de l'espace)** : CM (18 h) avec polycopié et TP (4 h) depuis 2007. 1. Automatique analogique : filtre linéaire, fonction de transfert, transformation de Laplace, modèles du premier et du second ordre, diagrammes de Bode, de Nyquist et de Black, abaque de Black-Nichols, stabilité, précision, rapidité et correction des systèmes bouclés, régulation et poursuite, correcteur PID – 2. Automatique numérique : signaux et systèmes numériques, transformation en z, asservissements numériques, synthèse de correcteurs ;
6. **Radioastronomie (M2 Outils et systèmes de l'astronomie et de l'espace)** : TP en 2007 (7 h) et 2008 (42 h). Étude d'une chaîne d'acquisition d'un signal radio à 10 GHz. Observation du Soleil.

Doctorat

Cours d'approfondissement sur les exoplanètes (module de 15 h) : CM (12 h) avec diapositives de 2007 à 2010 (A. Boccaletti du LESIA assure la partie 3). 1. Historique, statistiques des planètes connues – 2. Méthodes de détection indirecte : spectrométrie des vitesses radiales, photométrie des transits, astrométrie, micro-lentilles gravitationnelles – 3. Méthodes de détection directe : coronographie et

interférométrie – 4. Formation, migration, intérieurs et atmosphères, nouvelles classes de planètes – 5. Astrobiologie, missions *Darwin* et *Terrestrial Planet Finder*.

Encadrement doctoral et stagiaires

Depuis mon recrutement à l'IAS en tant que maître de conférences en septembre 2006, j'ai encadré plusieurs étudiants (3 en doctorat, 2 en M2, 2 en M1, 3 en L3 et 2 en 2^e année de l'École Centrale Paris), ainsi qu'une post-doctorante, sur la détection d'exoplanètes par photométrie des transits avec la mission spatiale COROT :

1. Sven Jakumeit, stagiaire de L3 en juin-juillet 2007, puis Ophélie Fabre, stagiaire de L3 en juin-juillet 2008, ont travaillé successivement sur la modélisation analytique et numérique des transits afin d'estimer les paramètres physiques et orbitaux des exoplanètes détectées ;
2. Benjamin Mollier, stagiaire de M1 en juin-juillet 2007, a travaillé sur la comparaison d'algorithmes de détection de transits par filtrage adapté et par ondelettes ;
3. De mars à juin 2007, Benjamin Samuel a effectué son stage de M2 sous ma direction sur un algorithme de détection automatique de transits par filtrage adapté. De septembre 2007 à avril 2011, j'ai assuré l'essentiel de l'encadrement de sa thèse de doctorat (officiellement dirigée à l'IAS par Alain Léger) qui porte sur l'exploitation des mesures de COROT. Il s'agissait d'abord d'analyser les données pour y chercher de potentielles exoplanètes dont la nature est confirmée par des observations complémentaires depuis le sol, puis de faire l'étude astrophysique des exoplanètes trouvées. Benjamin est co-auteur d'une demi-douzaine d'articles qui sont parus fin 2009 dans un numéro spécial d'*Astronomy & Astrophysics* (A&A) sur COROT. Depuis juin 2011, Benjamin est post-doctorant au LÉSIA où il continue de travailler sur COROT. Il continue d'être associé aux publications issues du projet ;
4. De juin 2007 à janvier 2008, Aldo Bonomo, doctorant de Nuccio Lanza à l'université de Catane (Sicile), a travaillé à l'IAS sous ma direction sur les méthodes de pré-traitement de courbes de lumière avant la recherche de transits. Ce travail a donné lieu à une publication commune dans A&A parue en 2009 (Bonomo et al., A&A 495, 647) ;
5. En janvier-février puis en juillet-août 2009, Olivier Martin, stagiaire de M1 sous ma direction, a travaillé sur la correction des effets systématiques dans les courbes de lumière de COROT par analyse en composantes principales ;
6. De mars à juin 2009, Benjamin Mollier, stagiaire de M2 sous ma direction, a effectué des statistiques préliminaires pour chaque campagne d'observation sur le nombre de candidats détectés, suivis depuis le sol et dont la nature est finalement ou non résolue. Il a également travaillé sur les propriétés statistiques du bruit dans les courbes de lumière et a comparé les performances de détection réelles à celles attendues pour un instrument parfait ;
7. De janvier 2010 à décembre 2011, Céline Cavarroc, post-doctorante à mi-temps sur COROT a effectué sous ma direction la recherche de transits exoplanétaires dans les courbes de lumière de COROT. Ce travail a conduit à une publication dans *Astrophysics and Space Science* en 2012 (Cavarroc et al., ApSS 337, 511). En outre, Céline a co-signé diverses publications dont par exemple celle sur la découverte de COROT-16b (Ollivier et al., A&A 541, A149) ;
8. De février 2011 à juin 2013, j'ai assuré l'essentiel de l'encadrement de la deuxième partie du doctorat d'Olivier Demangeon (officiellement dirigé à l'IAS par Marc Ollivier). Olivier a développé un logiciel automatique de classement des signaux de transit détectés par COROT fondé sur une approche probabiliste bayésienne. Il s'agit d'améliorer l'efficacité des opérations de suivi au

sol qui visent à confirmer la nature planétaire des compagnons en établissant des priorités sur la base de la probabilité que le signal observé soit bien dû à une exoplanète. Ce travail n'a pas encore donné lieu à publication ;

9. De septembre 2012 à juin 2013, Thomas Saint-Paul & Francisco Fernandez, élèves en 2^e année à l'École Centrale Paris et au M1 de physique fondamentale de Paris-Sud, effectuent un projet de 300 h sous ma direction. Ils travaillent sur l'amélioration de l'exactitude de la photométrie de COROT par la correction du flux lumineux parasite dû aux étoiles de l'environnement proche d'une étoile-cible donnée.
10. De juin à juillet 2013, Édouard Tollet, stagiaire de L3, a travaillé sous ma direction sur l'amélioration de la vitesse d'exécution de mon logiciel automatique de recherche de signaux de transit, rendant ainsi possible une exploration plus fine des courbes de lumière et se traduisant par une augmentation de la capacité de détection des petits signaux de transit.

Vulgarisation

1. Dans le cadre de l'année mondiale de l'astronomie (AMA09), j'ai organisé en partenariat avec Hervé Dole de l'IAS, deux cycles de conférences à l'université Paris-Sud pour les étudiants de L1 et le grand public (7 conférences de janvier à mai, puis 8 conférences de septembre à décembre) ;
2. Au cours de ma carrière, j'ai participé à une demi-douzaine d'émissions radiophoniques traitant de divers sujets d'astronomie. J'ai aussi écrit trois livres dans la collection des Petites pommes du savoir et j'ai adapté en français L'astronomie pour les nuls (voir liste des publications).

Activités liées à l'administration

1. De mai 2007 à avril 2010, je fus le représentant de l'IAS au conseil scientifique du Centre Jean-Marie Mariotti (JMMC). Le JMMC (formellement un GDR) est le centre français d'expertise en interférométrie astronomique à longue base. Il a pour vocation d'une part d'assister les astronomes utilisateurs du Very Large Telescope Interferometer (VLTI), et d'autre part de développer des logiciels de préparation et d'analyse des observations interférométriques. Ce centre qui met en réseau 10 laboratoires est hébergé au Laboratoire d'astrophysique de Grenoble (LAOG) et dispose en moyenne de 2,5 astronomes et de 2,5 ingénieurs par an ;
2. Depuis décembre 2009, je suis l'un des trois représentants élus du collège des chercheurs au Conseil de laboratoire de l'IAS ;
3. Depuis avril 2010, je suis membre élu de la Commission consultative des spécialistes de l'université (CCSU) de Paris-Sud en section 34 ;
4. Depuis octobre 2010, je suis membre du groupe de travail thématique astronomie-astrophysique du CNES ;
5. Depuis juin 2011, je suis membre du conseil scientifique du Centre international d'ateliers scientifiques (CIAS) de l'Observatoire de Paris ;
6. Depuis septembre 2011, je suis le responsable pour Paris-Sud du master 2 Outils et systèmes de l'astronomie et de l'espace (M2 OSAE) ;
7. Depuis septembre 2012, je suis enseignant référent en licence de Physique et applications (L3 PAPP), c'est-à-dire que j'assure le suivi d'une douzaine d'étudiants.

Activités liées à la recherche

Prix

- 2004 Lauréat du programme « Initiative Post-doc » : prix de 5000 € décerné par le ministère délégué à la recherche pour l'aide au retour des post-doctorants français en poste à l'étranger

Participation à des comités et fonctions d'organisation

1. Depuis décembre 2006, je suis co-investigateur de la mission COROT ;
2. De mai 2007 à mars 2011, je fus l'organisateur de réunions bibliographiques semi-mensuelles (de type *journal club*) à l'IAS sur les exoplanètes et la haute résolution angulaire ;
3. Depuis décembre 2009, je suis membre du Conseil scientifique de COROT ;
4. De décembre 2009 à octobre 2012, je fus le coordinateur au sein du projet COROT du groupe de travail qui assure la détection des transits exoplanétaires dans les courbes de lumière ;
5. De septembre 2010 à juin 2011, je fus organisateur des séminaires scientifiques de l'IAS.

Publications

Revue à comité de lecture

1. Transiting exoplanets from the CoRoT space mission. XXIII. CoRoT-21b : a doomed large Jupiter around a faint subgiant star, M. Pätzold, M. Endl, S. Csizmadia, D. Gandolfi, L. Jorda, et al., *A&A* 545, A6 (2012) ;
2. Transiting exoplanets from the CoRoT space mission. XXII. CoRoT-16b : a hot Jupiter with a hint of eccentricity around a faint solar-like star, M. Ollivier, M. Gillon, A. Santerne, G. Wuchterl, M. Havel, et al., *A&A* 541, A149 (2012) ;
3. Planetary transit candidates in the CoRoT-SRc01 field, A. Erikson, A. Santerne, S. Renner, P. Barge, S. Aigrain, et al., *A&A* 539, A14 (2012) ;
4. Transiting exoplanets from the CoRoT space mission Resolving the nature of transit candidates for the LRa03 and SRa03 fields, C. Cavarroc, C. Moutou, D. Gandolfi, B. Tingley, M. Ollivier, et al., *ApSS* 337, 511 (2012) ;
5. Transiting exoplanets from the CoRoT space mission. XX. CoRoT-20b : A very high density, high eccentricity transiting giant planet, M. Deleuil, A. Bonomo, S. Ferraz-Mello, A. Erikson, F. Bouchy, et al., *A&A* 538, A145 (2012) ;
6. Planetary transit candidates in the CoRoT LRa01 field, L. Carone, D. Gandolfi, J. Cabrera, A. Hatzes, H. Deeg, et al., *A&A* 538, A112 (2012) ;
7. Transiting exoplanets from the CoRoT space mission. XXI. CoRoT-19b : a low density planet orbiting an old inactive F9V-star, E. Guenther, R. Diaz, J.-C. Gazzano, T. Mazeh, D. Rouan, et al., *A&A* 537, A136 (2012) ;
8. Transiting exoplanets from the CoRoT space mission. XIX. CoRoT-23b : a dense hot Jupiter on an eccentric orbit, D. Rouan, H. Parviainen, C. Moutou, M. Deleuil, M. Fridlund, et al., *A&A* 537, A54 (2012) ;
9. The mass of CoRoT-7b, A. Hatzes, M. Fridlund, G. Nachmani, T. Mazeh, D. Valencia, et al., *ApJ* 743, 75 (2011) ;
10. CoRoT LRa02-E2-0121 : Neptune-size planet candidate turns into a hierarchical triple system with a giant primary, L. Tal-Or, A. Santerne, T. Mazeh, F. Bouchy, C. Moutou, et al., *A&A* 534, A67 (2011) ;
11. Transiting exoplanets from the CoRoT space mission. XVIII. CoRoT-18b : a massive hot Jupiter on a prograde, nearly aligned orbit, G. Hébrard, T. M. Evans, R. Alonso, M. Fridlund, A. Ofir, et al., *A&A* 533, A130 (2011) ;

-
12. Transiting exoplanets from the CoRoT space mission. XVII. The hot Jupiter CoRoT-17b : a very old planet, S. Csizmadia, C. Moutou, M. Deleuil, J. Cabrera, M. Fridlund, et al., *A&A* 531, A41 (2011) ;
 13. Transiting exoplanets from the CoRoT space mission. XVI. CoRoT-14b : an unusually dense very hot Jupiter, B. Tingley, M. Endl, J.-C. Gazzano, R. Alonso, T. Mazeh, et al., *A&A* 528, A97 (2011) ;
 14. Transiting exoplanets from the CoRoT space mission. XV. CoRoT-15b : a brown dwarf transiting companion, F. Bouchy, M. Deleuil, T. Guillot, S. Aigrain, L. Carone, et al., *A&A* 525, A68 (2011) ;
 15. Transiting exoplanets from the CoRoT space mission. XIV. CoRoT-11b : a transiting massive hot Jupiter in a prograde orbit around a rapidly rotating F-type star, D. Gandolfi, G. Hébrard, R. Alonso, M. Deleuil, E. Guenther, et al., *A&A* 524, A55 (2010) ;
 16. Transiting exoplanets from the CoRoT space mission. XIII. CoRoT-13b : a dense hot Jupiter in transit around a star with solar metallicity and super-solar lithium content, J. Cabrera, H. Bruntt, M. Ollivier, R. Diaz, Sz. Csizmadia, et al., *A&A* 522, A110 (2010) ;
 17. Transiting exoplanets from the CoRoT space mission. XI. CoRoT-8b : a hot and dense sub-Saturn around a K1 dwarf, P. Bordé, F. Bouchy, M. Deleuil, J. Cabrera, L. Jorda, et al., *A&A* 520, A66 (2010) ;
 18. Transiting exoplanets from the CoRoT space mission. XII. CoRoT-12b : a short-period low-density planet transiting a solar analog star, M. Gillon, A. Hatzes, Sz. Csizmadia, M. Fridlund, M. Deleuil, et al., *A&A* 520, A97 (2010) ;
 19. CoRoT-10b : a giant planet in a 13.24 day eccentric orbit, A. Bonomo, A. Santerne, R. Alonso, J.-C. Gazzano, M. Havel, et al., *A&A* 520, A65 (2010) ;
 20. The SARS algorithm : detrending CoRoT light curves with Sysrem using simultaneous external parameters, A. Ofir, R. Alonso, A. Bonomo, L. Carone, S. Carpano, et al., *MNRAS* 404, 99 (2010) ;
 21. A transiting giant planet with a temperature between 250K and 430K, H. Deeg, C. Moutou, A. Erikson, Sz. Csizmadia, B. Tingley, et al., *Nature* 464, 384 (2010) ;
 22. Transiting exoplanets from the CoRoT space mission. IX. CoRoT-6b : a transiting "hot Jupiter" planet in an 8.9d orbit around a low-metallicity star, M. Fridlund, G. Hébrard, R. Alonso, M. Deleuil, D. Gandolfi, et al., *A&A* 512, A14 (2010) ;
 23. Transit timing analysis of CoRoT-1b, S. Csizmadia, S. Renner, P. Barge, E. Agol, S. Aigrain, et al., *A&A* 510, A94 (2010) ;
 24. Planetary transit candidates in CoRoT-LRc01 field, J. Cabrera, M. Fridlund, M. Ollivier, D. Gandolfi, S. Csizmadia, et al., *A&A* 506, 501 (2009) ;
 25. Planetary transit candidates in Corot-IRa01 field, S. Carpano, J. Cabrera, R. Alonso, P. Barge, S. Aigrain, et al., *A&A* 506, 491 (2009) ;
 26. Removing systematics from the CoRoT light curves. I. Magnitude-dependent zero point, T. Mazeh, P. Guterman, S. Aigrain, S. Zucker, N. Grinberg, et al., *A&A* 506, 431 (2009) ;
 27. Noise properties of the CoRoT data : a planet-finding perspective, S. Aigrain, F. Pont, F. Fressin, A. Alapini, R. Alonso, et al., *A&A* 506, 425 (2009) ;
 28. The secondary eclipse of CoRoT-1b, R. Alonso, A. Alapini, S. Aigrain, M. Auvergne, A. Baglin, et al., *A&A* 506, 353 (2009) ;
 29. Rate and nature of false positives in the CoRoT exoplanet search, J. M. Almenara, H. Deeg, S. Aigrain, R. Alonso, M. Auvergne, et al., *A&A* 506, 337 (2009) ;
 30. Planetary transit candidates in the CoRoT initial run : resolving their nature, C. Moutou, F. Pont, F. Bouchy, M. Deleuil, J. M. Almenara, et al., *A&A* 506, 321 (2009) ;
 31. The CoRoT-7 planetary system : two orbiting super-Earths, D. Queloz, F. Bouchy, C. Moutou, A. Hatzes, G. Hébrard, et al., *A&A* 506, 303 (2009) ;
 32. Transiting exoplanets from the CoRoT space mission. VIII. CoRoT-7b : the first super-Earth with measured radius, A. Léger, D. Rouan, J. Schneider, P. Barge, M. Fridlund, et al., *A&A* 506, 287 (2009) ;
 33. Transiting exoplanets from the CoRoT space mission. VII. The hot-Jupiter-type planet CoRoT-5b, H. Rauer, D. Queloz, S. Csizmadia, M. Deleuil, R. Alonso, et al., *A&A* 506, 281 (2009) ;

34. Modelling solar-like variability for the detection of Earth-like planetary transits. II. Performance of the three-spot modelling, harmonic function fitting, iterative nonlinear filtering, and sliding boxcar filtering, A. Bonomo, S. Aigrain, P. Bordé, and A. Lanza, *A&A* 495, 647 (2009) ;
35. Transiting exoplanets from the CoRoT space mission. VI. CoRoT-Exo-3b : the first secure inhabitant of the brown-dwarf desert, M. Deleuil, H. Deeg, R. Alonso, F. Bouchy, D. Rouan, et al., *A&A* 491, 889 (2008) ;
36. Transiting exoplanets from the CoRoT space mission. V. CoRoT-Exo-4b : stellar and planetary parameters, C. Moutou, H. Bruntt, T. Guillot, A. Shporer, E. Guenther, et al., *A&A* 488, L47 (2008) ;
37. Transiting exoplanets from the CoRoT space mission. IV. CoRoT-Exo-4b : a transiting planet in a 9.2 day synchronous orbit, S. Aigrain, A. Collier-Cameron, M. Ollivier, F. Pont, L. Jorda, et al., *A&A* 488, L43 (2008) ;
38. Transiting exoplanets from the CoRoT space mission. III. The spectroscopic transit of CoRoT-Exo-2b with SOPHIE and HARPS, F. Bouchy, D. Queloz, M. Deleuil, B. Loeillet, A. Hatzes, et al., *A&A* 482, L25 (2008) ;
39. Transiting exoplanets from the CoRoT space mission. II. CoRoT-Exo-2b : a transiting planet around an active G star, R. Alonso, M. Auvergne, A. Baglin, M. Ollivier, C. Moutou, et al., *A&A* 482, L21 (2008) ;
40. Transiting exoplanets from the CoRoT space mission. I. CoRoT-Exo-1b : a low-density short-period planet around a G0V star, P. Barge, A. Baglin, M. Auvergne, H. Rauer, A. Léger, et al., *A&A* 482, L17 (2008) ;
41. Speckle noise reduction techniques for high-dynamic range imaging, P. Bordé and W. Traub, *C. R. Physique* 8, 349 (2007) ;
42. Could we identify hot ocean-planets with COROT, Kepler and doppler velocimetry ?, F. Selsis, B. Chazelas, P. Bordé, M. Ollivier, F. Brachet, et al., *Icarus* 191, 453 (2007) ;
43. High-contrast imaging from space : speckle nulling in a low aberration regime, P. Bordé and W. Traub, *ApJ*, 638, 488 (2006) ;
44. Instrumental stability requirements for exoplanet detection with a nulling interferometer : variability noise as a central issue, B. Chazelas, F. Brachet, P. Bordé, B. Mennesson, M. Ollivier, et al., *Appl. Opt.* 45, 984 (2006) ;
45. Is Arcturus a well-understood K giant ? Test of model atmospheres and potential companion detection by near-infrared interferometry, T. Verhoelst, P. Bordé, G. Perrin, L. Decin, K. Eriksson, et al., *A&A* 435, 289 (2005) ;
46. A catalog of bright calibrator stars for 200-meter baseline near-infrared stellar interferometry, A. Mérand, P. Bordé, and V. Coudé du Foresto, *A&A*, 433, 1155 (2005) ;
47. The diameter and evolutionary state of Procyon A. Multitechnique modeling using asteroseismic and interferometric constraints, P. Kervella, F. Thévenin, P. Morel, G. Berthomieu, P. Bordé, and J. Provost, *A&A* 413, 251 (2004) ;
48. The interferometric diameter and internal structure of Sirius A, P. Kervella, F. Thévenin, P. Morel, P. Bordé, E. Di Folco, *A&A* 408, 681 (2003) ;
49. Exoplanet detection capability of the COROT space mission, P. Bordé, D. Rouan, and A. Léger, *A&A* 405, 1137 (2003) ;
50. A catalogue of calibrator stars for long baseline stellar interferometry, P. Bordé, V. Coudé du Foresto, G. Chagnon, and G. Perrin, *A&A* 393, 183 (2002) ;
51. L'-band interferometric observations of evolved stars, G. Chagnon, B. Mennesson, G. Perrin, V. Coudé du Foresto, P. Salomé, P. Bordé, M. Lacasse and W. Traub, *AJ* 124, 2821 (2002) ;
52. Evidence for very extended gaseous layers around O-rich Mira variables and M giants, B. Mennesson, G. Perrin, G. Chagnon, V. Coudé du Foresto, S. Ridgway, A. Mérand, P. Salomé, P. Bordé, W. Cotton, S. Morel, P. Kervella, W. Traub, and M. Lacasse, *ApJ* 579, 446 (2002) ;
53. Exoplanet detection with the COROT space mission. I. A multi-transit detection criterion, P. Bordé, D. Rouan, and A. Léger, *CRAS*, t. 2, Série IV, 1049 (2001).

Actes de conférences et autres publications

1. EChO - Exoplanet Characterisation Observatory, G. Tinetti, J.-P. Beaulieu, T. Henning, M. Meyer, G. Micela, et al., *Experimental Astronomy* 34, 311 (2012) ;
2. Detection of small-size planetary candidates with CoRoT data, A. Bonomo, P.-Y. Chabaud, M. Deleuil, C. Moutou, P. Bordé, *The Astrophysics of Planetary Systems : Formation, Structure, and Dynamical Evolution*, Proceedings of the International Astronomical Union, IAU Symposium, Volume 276, p. 523-524 ;
3. The science of EChO, G. Tinetti, J. Cho, C. Griffith, O. Grasset, L. Grenfell, et al., *The Astrophysics of Planetary Systems : Formation, Structure, and Dynamical Evolution*, Proceedings of the International Astronomical Union, IAU Symposium, Volume 276, p. 359-370 ;
4. CoRoT mission highlights, M. Deleuil, P. Bordé, C. Moutou, *The Astrophysics of Planetary Systems : Formation, Structure, and Dynamical Evolution*, Proceedings of the International Astronomical Union, IAU Symposium, Volume 276, p. 44-49 ;
5. A homogeneous analysis of the transit light curves of the CoRoT exoplanets, S. Csizmadia, T. Pasternacki, P. Bordé, EPSC-DPS Joint Meeting 2011, held 2-7 October 2011 in Nantes, France, <http://meetings.copernicus.org/epsc-dps2011>, p.1362 ;
6. Detection of small-size planetary candidates with CoRoT data, A. Bonomo, P.-Y. Chabaud, M. Deleuil, C. Moutou, and P. Bordé, in *Detection and dynamics of transiting exoplanets*, F. Bouchy, R. Diaz, and C. Moutou eds., meeting held at Haute Provence Observatory, 23-27 August 2010 ;
7. The CoRoT exoplanet program : status & results, Deleuil, C. Moutou, P. Bordé, and the CoRoT exoplanet science team, in *Detection and dynamics of transiting exoplanets*, F. Bouchy, R. Diaz, and C. Moutou eds., meeting held at Haute Provence Observatory, 23-27 August 2010 ;
8. Exoplanet discoveries with the CoRoT space observatory, H. Lammer, R. Dvorak, M. Deleuil, P. Barge, H. Deeg, et al., *Solar System Research* 44 (6), 520 (2010) ;
9. The Fourier-Kelvin stellar interferometer : exploring exoplanetary systems with an infrared space mission, W. Danchi, R. Barry, B. Lopez, J.-C. Augereau, M. Ollivier, et al., in *Semaine de l'Astrophysique Française*, M. Heydari-Malayeri, C. Reylé and R. Samadi eds., EdP-Sciences (éditions de Physique) Conference Series, 317 (2009) ;
10. The FIRST project : a single-mode fiber-based, very high-dynamic range, diffraction-limited imaging instrument at visible to near-infrared wavelengths, T. Kotani, G. Perrin, S. Lacour, E. Thiébaud, J. Woillez, et al., in *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy II*, I. McLean & M. Casali eds., SPIE 7014 (2008) ;
11. Transdet : a matched-filter based algorithm for transit detection – application to simulated COROT light curves, P. Bordé, F. Fressin, M. Ollivier, and A. Léger, in *Transiting Extrasolar Planets Workshop*, ASP Conference Series 366, 145 (2007) ;
12. Expected Performance of the CoRoT Planet Search from Light Curve Beauty Contests, C. Moutou, S. Aigrain, J. Almenara, R. Alonso, M. Auvergne et al., in *Transiting Extrasolar Planets Workshop*, ASP Conference Series 366, 127 (2007) ;
13. Scientific performances for the exoplanet channel, P. Barge, C. Moutou, A. Léger, P. Bordé, D. Rouan, et al., in *The CoRoT Mission, Pre-Launch Status, Stellar Seismology and Planet Finding*, ESA SP-1306, 419 (2006)
14. Speckle nulling for exoplanet detection with space-based coronagraphic telescopes, P. Bordé, W. Traub, B. Kern, J. Trauger, and A. Kuhnert, in *Space Telescopes and Instrumentation I : Optical, Infrared, and Millimeter*, SPIE, 6265 (2006) ;
15. Will exobiology out of the solar system stop after the Darwin mission ?, M. Ollivier, A. Léger, P. Bordé, and B. Chazelas, in *Vision in Infrared Astrophysics* (2006) ;
16. Speckle nulling with space-based coronagraphs, P. Bordé & W. Traub, in *Direct Imaging of Exoplanets : Science and Techniques*, C. Aime & F. Vakili eds., IAUC 200 (2006) ;
17. A catalog of bright calibrator stars for 200-meter baseline near-infrared stellar interferometry, A. Mérand, P. Bordé, and V. Coudé du Foresto, in *New Frontiers in Stellar Interferometry*, W. Traub ed., SPIE 5491, 1185–1195 (2004) ;

18. JMMC evolutive Search Calibrator tool, D. Bonneau, J.-M. Clausse, X. Delfosse, G. Duvert, P. Bordé, D. Mourard, P. Berio, and P. Cruzalebes, in *New Frontiers in Stellar Interferometry*, W. Traub ed., SPIE 5491, 1160–1165 (2004) ;
19. Updated results on prototype chalcogenide fibers for 10-um wavefront spatial filtering, P. Bordé, G. Perrin, A. Amy-Klein, C. Daussy, and G. Mazé, in *Toward Other Earths, Darwin/TPF and the search for extrasolar terrestrial planets*, ESA SP-539, 371–374 (2004) ;
20. The JMMC evolutive Search Calibrator tool, D. Bonneau, J.-M. Clausse, X. Delfosse, G. Duvert, P. Bordé, D. Mourard, P. Berio, and P. Cruzalebes, in *Semaine de l’Astrophysique Française*, F. Combes et al. eds., EdP-Sciences (éditions de Physique) Conference Series, 56–57 (2004) ;
21. Wave front control for the coronagraphic TPF, P. Bordé, W. Traub, and J. Trauger, in *The Second TPF/Darwin International Conference, Dust Disks and the Formation, Evolution and Detection of Habitable Planets*, <http://planetquest1.jpl.nasa.gov/TPFDarwinConf/confProceedings.cfm> (2004) ;
22. VINCI/VLTI observations of main sequence stars, P. Kervella, F. Thévenin, D. Ségransan, G. Berthomieu, P. Bordé, E. di Folco, T. Forveille, P. Morel, J. Provost, and D. Queloz, in *Stars as Suns : activity, evolution and planets*, A. Dupree & A. Benz eds., IAU Symposium 219, 80–84 (2004) ;
23. Modeling of alpha Cen and Procyon using VLTI observations, P. Kervella, F. Thévenin, P. Morel, G. Berthomieu, J. Provost, P. Bordé, and D. Ségransan, in *Solar and solar-like oscillations : insights and challenges for the Sun and stars*, IAU Joint Discussion 12, 57 (2003) ;
24. A catalogue of reference stars for long baseline stellar interferometry, P. Bordé, V. Coudé du Foresto, G. Chagnon, and G. Perrin, in *Interferometry in Optical Astronomy II*, W. Traub ed., SPIE 4838, 538–545 (2003) ;
25. 10-micron wavefront spatial filtering : first results with chalcogenide fibers, P. Bordé, G. Perrin, T. Nguyen, A. Amy-Klein, C. Daussy, P.-I. Raynal, A. Léger, and G. Mazé, in *Interferometry in Optical Astronomy II*, W. Traub ed., SPIE 4838, 273–279 (2003) ;
26. The FLUOR fibered beam combiner at the CHARA array, V. Coudé du Foresto, P. Bordé, A. Mérand, C. Baudouin, A. Rémond, G. Perrin, S. Ridgway, T. Ten Brummelaar, and H. McAlister, in *Interferometry in Optical Astronomy II*, W. Traub ed., SPIE 4838, 280–285 (2003) ;
27. Full characterization of binary systems with a high dynamic range, P. Bordé and V. Coudé du Foresto, in *Semaine de l’Astrophysique Française*, F. Combes & D. Barret eds., EdP-Sciences (éditions de Physique) Conference Series, 577–580 (2002) ;
28. Prototype chalcogenide fibers for 10-micron wavefront modal filtering, P. Bordé, G. Perrin, T. Nguyen, A. Amy-Klein, C. Daussy, P.-I. Raynal, A. Léger, and G. Mazé, in *Semaine de l’Astrophysique Française*, F. Combes & D. Barret eds., EdP-Sciences (éditions de Physique) Conference Series, 157–160 (2002) ;
29. Planet detection capability of COROT, P. Bordé, D. Rouan, and A. Léger, in *Colloque du Programme National de Planétologie*, O. Grasset, A. Cossard, & C. Sotin eds. (2002) ;
30. Nulling interferometry for the Darwin mission : experimental demonstration of the concept in the thermal infrared with high levels of rejection, M. Ollivier, J.-M. Mariotti, P. Sekulic, G. Michel, A. Léger, P. Bouchareine, J. Brunaud, V. Coudé du Foresto, B. Mennesson, P. Bordé, A. Amy-Klein, A. Vanlerberghe, P.-O. Lagage, G. Artzner, F. Malbet, in *Interferometry in Optical Astronomy*, P. Léna & A. Quirrenbach eds., SPIE 4006, 354–358 (2000) ;
31. Detecting Earth-Uranus class planets with the space mission COROT, D. Rouan, A. Baglin, P. Barge, P. Bordé, M. Deleuil, A. Léger, J. Schneider, and A. Vuillemin, in *Darwin and Astronomy, The Infrared Space Interferometer*, ESA SP-451, 221–228 (2000) ;
32. Detecting Earth-Uranus class planets with the space mission COROT, A. Léger, A. Baglin, P. Barge, P. Bordé, C. Defa, M. Deleuil, D. Rouan, J. Schneider, and A. Vuillemin, in *Planetary Systems in the Universe : Observation, Formation and Evolution*, A. Penny, P. Artymowicz, A.-M. Lagrange & S. Russel eds., ASP Conference Series (1999).

Vulgarisation

1. Les dix ans du Pommier, ouvrage collectif, éditions Le Pommier, Paris, mars 2009 ;

-
2. Combien de couleurs y a-t-il dans l'arc-en-ciel ?, P. Bordé, éditions Le Pommier, « Les Petites Pommes du Savoir », n° 110, Paris, novembre 2008 ;
 3. 100 questions de sciences à croquer, ouvrage collectif, éditions Le Pommier, « Les Petites Pommes du Savoir », n° 100, Paris, octobre 2007 ;
 4. En quête des planètes extrasolaires, A. Cassan & P. Bordé, Bulletin de l'association des anciens élèves et des élèves de l'ENS Cachan, n° 232, juin 2007 ;
 5. Les exoplanètes ou planètes extrasolaires (site internet), G. Bessou, P. Bordé, C. Dedieu, D. Guillaume, M.-F. Landréa, P. Léna, F. Roques, D. Rouan, J. Schneider, D. Tiphène, Observatoire de Paris, octobre 2005 ;
 6. Qu'est-ce qu'un trou noir ?, P. Bordé, éditions Le Pommier, « Les Petites Pommes du Savoir », n° 75, Paris, novembre 2005 ;
 7. Y a-t-il d'autres planètes habitées dans l'univers ?, P. Bordé, éditions Le Pommier, « Les Petites Pommes du Savoir », n° 56, Paris, octobre 2004 ;
 8. L'astronomie pour les nuls, S. Maran & P. Bordé (adaptation française), éditions First, Paris, septembre 2001 (1^{re} éd.), juillet 2011 (2^e éd.).

B

Article non publié sur θ Draconis

**Direct detection of the faint companion
in the spectroscopic binary θ Draconis with CHARA/FLUOR**

T. Kotani¹

LESIA, UMR8109, Observatoire de Paris-Meudon, 5, place Jules Janssen, 92195 Meudon
Cedex, France

`takayuki.kotani@obspm.fr`

P. Bordé²

Institut d'astrophysique spatiale, bât. 121, Université Paris-Sud 11 and CNRS (UMR
8617), 91405 Orsay, France

`pascal.borde@ias.u-psud.fr`

A. Mérand

Center for High Angular Resolution Astronomy, Georgia State University, PO Box 3965,
Atlanta, Georgia 30302-3965, USA

`antoine@chara-array.org`

S. T. Ridgway

National Optical Astronomical Observatory, 950 North Cherry Avenue, Tucson, AZ 85719,
USA

`ridgway@noao.edu`

J. P. Aufdenberg

Physical Sciences Department, Embry-Riddle Aeronautical University, Daytona Beach, FL
32114, USA

`aufded93@erau.edu`

V. Coudé du Foresto, G. Perrin

LESIA, UMR8109, Observatoire de Paris-Meudon, 5, place Jules Janssen, 92195 Meudon
Cedex, France

`Vincent.Foresto@obspm.fr`, `guy.perrin@obspm.fr`

T. A. Ten Brummelaar, D. H. Berger, J. Sturmman, L. Sturmman, N. H. Turner, H. A.
McAlister

Center for High Angular Resolution Astronomy, Georgia State University, PO Box 3965,
Atlanta, Georgia 30302-3965, USA

`theo@chara-array.org`, `berger@chara-array.org`, `judit@chara-array.org`,
`sturmman@chara-array.org`, `nils@chara-array.org`, `hal@chara.gsu.edu`

Received _____; accepted _____

Version 7

¹Postdoctoral Fellow

²Most of this work was done while a Michelson Postdoctoral Fellow at Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, 60 Garden Street, Cambridge, MA 02138, USA.

ABSTRACT

We report on the determination of the visual orbit of the double-lined spectroscopic binary system θ Draconis (HD 144284) with data obtained at the CHARA Array equipped with the FLUOR beam combiner. θ Draconis is a close binary system showing a large luminosity difference between the primary and the secondary. We have determined the visual orbit of θ Draconis by fitting a Keplerian model to archival radial velocities together with our newly measured interferometric visibilities. We show for the first time that correlations between visibilities have to be taken into account to derive an accurate orbital solution. The primary star is a 1.23 ± 0.12 solar mass F8 sub-giant, and the companion is a 0.47 ± 0.04 solar-mass, M1 main-sequence star with a 3.07-day orbital period. Remarkable is that the magnitude difference between the components, $\Delta K = 4.5 \pm 0.4$, is the largest magnitude difference measured to date by optical interferometry in a spectroscopic binary.

Subject headings: binaries: individual (HD 144284, θ Dra) — binaries: spectroscopic — techniques: interferometric — techniques: radial velocities

1. Introduction

In recent years, high dynamic range measurements with optical interferometers have become more and more important. In this context, spatial filtering by single-mode fibers is a very efficient method to eliminate the effect of atmospheric turbulence, and single-mode fiber linked interferometers have demonstrated the importance of high dynamic range measurements to look for faint structures such as the limb-darkening of an evolved star (Perrin et al. 2000), the change in diameter of a cepheid star (Kervella et al. 2004a; Mérand et al. 2005), hot dust in the central region of a debris disk (Absil et al. 2006), or gravity darkening of a rapidly rotating star (Aufdenberg et al. 2006). Detecting a faint companion in a binary system or a planet in an exoplanet system is also a possible task for single-mode interferometers, however this capability is not well explored observationally. Prior to this work, Matar B was the highest contrast companion detected by long-baseline interferometry in a spectroscopic binary with $\Delta m_{800\text{ nm}} = 3.61 \pm 0.05$, i.e., a contrast of only 28 ± 1 (Hummel et al. 1998). To test the capability to search for a faint companion in a binary system, we carried out the interferometric observation of the close binary system θ Draconis, suspected from spectroscopy to have a contrast of the order of 100. Proper data analysis is also an important part to achieve a high dynamic range measurement. Perrin (2003) showed that correlated noises arising from sharing same calibrators need to be taken into account for a very good estimate of model parameters when fitting the visibilities. Mérand et al. (2005) successfully applied this method to derive a cepheid star diameter. In this paper, we applied model fitting taking into account noise correlation to the case of a binary system for the first time.

θ Dra (13 Dra, HD 144284, HR 5986, and HIP 78527) is a bright ($B = 4.53$, $V = 4.01$, $K = 2.76$) and short period (3.07 days) spectroscopic binary with a primary component of spectral type F8IV. It was classified as a single-lined spectroscopic binary by Campbell

(1899). Unsuccessful attempts to detect the secondary star spectroscopically were made by Curtis (1907), Lu et al. (1988), Mayor & Mazeh (1987), and Duquennoy & Mayor (1991). Miura et al. (1992) observed θ Dra by speckle interferometry, but could not resolve it. The rotational velocity $v \sin i = 28.0$ km/s (de Medeiros & Mayor 1999) is considerably faster than 5.4 km/s, the mean rotational velocity for subgiant stars (de Medeiros, Da Rocha, & Mayor 1996). The rotation of both components is believed to be synchronized with the orbital period (Levato 1976).

Recently, Mazeh et al. (2002) recorded spectra of θ Dra in the near-infrared where the companion – expected to be cooler than the primary – would be easier to detect than in the optical. By analyzing the spectra with a two dimensional cross-correlation technique (TODCOR; Zucker & Mazeh 1994), these authors managed to secure four radial velocities for the companion, compute its spectroscopic orbit, and derived a mass ratio $q = 0.380 \pm 0.013$. Based on the spectral type of the system, they assumed (in agreement with Cox 2000) the primary to have a mass of $1.2 M_{\odot}$, which entails a mass of $0.46 M_{\odot}$ for the secondary. Using tables in Cox (2000), we can then infer that the secondary should be of spectral type M1V and that the magnitude difference between the primary and the secondary should be $\Delta V \approx 5.4$ in the visible and $\Delta K \approx 2.7$ in the near-infrared. Mazeh (2005) estimated $\Delta H \approx 2.5$, but this estimate may be affected by a large systematic error because of the significant rotational broadening of the primary star’s spectra.

With an Hipparcos parallax $\Pi = 47.79 \pm 0.54$ mas (Perryman et al. 1997), θ Dra is one of the farthest stars whose distance has been determined with a 1% accuracy. Using this parallax, the previous mass estimates, and Kepler’s third law, we can expect the angular separation between the component to be of the order of 2 mas. Given θ Dra’s V and K magnitudes, surface brightness relations recently recalibrated by interferometry (Kervella et al. 2004) predict for the primary: (1) an angular diameter of 1.15 ± 0.01 mas, hence a linear

radius of $2.59 \pm 0.04 R_{\odot}$ using the parallax, and (2) an effective temperature of 6150 ± 40 K. Assuming a linear radius of $0.55 R_{\odot}$ for a M1 dwarf (Cox 2000), the secondary should have an angular diameter of about 0.25 mas. With its small mass ratio and large magnitude difference, θ Dra is unique among detached close binaries. Its characteristics in terms of angular sizes and separation make it a challenging but accessible target for near-infrared long baseline interferometry. By a joint processing of interferometry and radial velocity measurements, we were able to fully characterize the system and determine all its orbital and most of its physical parameters, including the stellar masses.

we describe our observations in Sect. 2 and data reduction in Sect. 3. We then establish the inadequacy of single-star models in Sect. 4, before applying a binary-star model to derive the orbital and physical parameters of the system in Sect. 5. Finally, we compare our findings with evolutionary models in Sect. 6.

2. Observations

For our interferometric observations of θ Dra, we used the CHARA Array with the FLUOR beam combiner. The CHARA Array (ten Brummelaar et al. 2005) is a long-baseline optical and infrared interferometer located at Mount Wilson Observatory. It is developed and operated by Georgia State University’s Center for High Angular Resolution Astronomy (CHARA). The six 1-m telescopes of the CHARA array are distributed in a Y-shaped configuration providing 15 baselines with lengths ranging from 34.1 to 330.7 m.

The Fiber-Linked Unit for Optical Recombination (FLUOR), formerly in use at the IOTA interferometer on Mount Hopkins (Coudé du Foresto 1998), was moved to CHARA in 2002 (Coudé du Foresto 2003). FLUOR works in the K’ band (1.95–2.3 μm) and features fluoride-glass single-mode fibers for spatial filtering, as well as for beam combination.

Accurate calibration is achieved by monitoring the intensity of the light coupled into the fibers. The combination of CHARA and FLUOR is optimal for high-dynamic range observations at very high angular resolution.

We observed θ Dra for 8 nights during the summers of 2004 and 2005, on the W1–E2 (251 m) and W2–E2 (152 m) baselines. From the beginning we expected that the 150 m baseline was an optimal baseline but at the time of the observation in 2004, it was not available. θ Dra along with its calibrator stars were observed multiple times during each of these nights. The calibrator stars (Table 1) were selected from a catalog compiled for this specific purpose by Mérand et al. (2005).

3. Data reduction and analysis

An updated version of the FLUOR data reduction software (Mérand et al. 2006) was used to extract the squared modulus of the coherence factor (i.e., fringe contrast) measured between any pair of telescopes. The interferometric efficiency of the instrument (transfer function) was estimated by bracketing every observation of θ Dra by observations of its calibrators. Calibrators chosen for this study are all K giants, whereas θ Dra is an F8 subgiant. The spectral type difference is properly taken into account in the data reduction software, even though it has no significant influence on the final result. Calibrated visibilities (Table 2) were obtained by dividing fringe contrasts by estimates of the interferometric efficiency at the epochs of the observations.

Because of the finite precision with which angular diameters of calibrators are known, any two visibility measurements sharing the same calibrator are correlated. In order to derive realistic error bars, correlations between measurements were taken into account as prescribed by Perrin (2003).

We used the Levenberg-Marquardt algorithm (Press et al. 2002, §15.5) for model fitting. Because this algorithm performs a local search for the least χ^2 and might get trapped into a local minimum, we carried out exhaustive searches for global minima by mapping the parameter space with multi-dimensional grids of initial guesses.

4. Single-star models

Single-star models – uniform disks (UDs) and limb-darkened disks (LDs) – are standard benchmarks in interpreting interferometric measurements. Significant departures from these models signal the detection of additional features in the target, hence the need for more elaborate models. Single-star models also yield angular diameters that can be used as first guesses for the primary’s diameter in subsequent models. In the case of θ Dra, departures from single-star models reveal the presence of the companion. Note that the definitive proof for the companion detection lies in the lower reduced χ^2 (which we denote by χ_r^2) for the binary-star model.

4.1. Uniform-disk model

In monochromatic light, the theoretical squared visibility for a UD is given by

$$V_\lambda^2 = \left[\frac{2J_1(\pi B \theta_{\text{UD}}/\lambda)}{\pi B \theta_{\text{UD}}/\lambda} \right]^2, \quad (1)$$

where J_1 is the first-order Bessel function, B is the projected baseline length, θ_{UD} is the star’s angular diameter, and λ is the wavelength.

From Eq. (1), we compute the theoretical squared visibility for a UD in the K’ band as

$$V_{\text{K}'}^2 = \frac{\int_{\text{K}'} [V_\lambda \tau(\lambda) S(\lambda)]^2 \lambda^2 d\lambda}{\int_{\text{K}'} [\tau(\lambda) S(\lambda)]^2 \lambda^2 d\lambda}, \quad (2)$$

where τ is the transmission of the instrument and S the spectral energy distribution of the star, which we model for θ Dra as a 6200-K black-body distribution. The λ^2 term is included so that the integral is equivalent to the actually computed integral that is performed over wavenumber (Coudé du Foresto 1997).

We find that $\theta_{\text{UD}} = 1.163 \pm 0.007$ mas, in good agreement with the value of 1.15 ± 0.01 mas obtained either by Blackwell & Lynas-Gray (1994) with the Infrared flux method (IRFM), or with the $V - K$ surface brightness relation calibrated by Kervella et al. (2004). However, we also find that $\chi_\nu^2 = 4.38$ for this model, which means that – given our measurement precision – a UD is not a satisfactory representation of our data.

4.2. Limb-darkened disk model

Because a UD model does not exactly yield the physical diameter of the star, we also introduce a LD model for which the monochromatic squared visibility is

$$V_\lambda^2 = \left[\frac{\int_0^1 I(\mu) J_0(\pi B \theta_{\text{LD}} / \lambda \sqrt{1 - \mu^2}) \mu d\mu}{\int_0^1 I(\mu) \mu d\mu} \right]^2, \quad (3)$$

where J_0 is the zeroth-order Bessel function of the first kind, I is the normalized surface intensity profile of the star, and μ the cosine of the viewing angle (Hanbury Brown et al. 1974). The limb-darkening profile cannot be extracted from our measurements and should be modeled *a priori* (see below). As for the UD model, the broad-band squared visibility for the LD model is computed thanks to Eq. (2). Note that the angular diameter, θ_{LD} , is the only free parameter of this model.

For our study, we chose the following four-parameter limb-darkening law:

$$I(\mu) = 1 - \sum_{k=1}^4 a_k (1 - \mu^{k/2}). \quad (4)$$

Claret (2000) tabulated the coefficients a_k for numerous photometric bands and a wide range

of effective temperatures, surface gravities, micro-turbulent velocities, and metallicities. For the purpose of computing the limb-darkening law, we estimate the previous stellar parameters as follows:

- assuming that the star radiates as a black body and that its physical diameter is equal to its UD diameter, the effective temperature is

$$T_{\text{eff}} = \left(\frac{\theta_{\text{UD}}}{2} \right)^{1/2} \left(\frac{F}{\sigma} \right)^{1/4}, \quad (5)$$

where F is the apparent bolometric luminosity and σ the Stephan-Boltzmann constant. Using the bolometric flux determined by Blackwell & Lynas-Gray (1994), we compute $T_{\text{eff}} = 6138 \pm 64$ K in good agreement with the IRFM value of 6169 K (Blackwell & Lynas-Gray 1994) and the surface brightness value of 6150 ± 40 K (Kervella et al. 2004);

- using Hipparcos' parallax and the UD angular diameter, we find a linear radius of $2.62 \pm 0.03 R_\odot$. From Allende Prieto & Lambert (1999), surface gravity $\log g$ is 3.80 ± 0.07 ;
- according to Thévenin (1998), the micro-turbulent velocity is $\zeta_t = 0.9$ km/s;
- because published values for θ Dra's metallicity vary from -0.13 to $+0.2$ (Marsakov & Shevelev 1995; Ibukiyama & Arimoto 2002; Balachandran 1990), we adopt here an average value equal to the solar metallicity.

Using the closest tabulated values ($T_{\text{eff}} = 6250$ K, $\log g = 3.5$, $\zeta_t = 1.0$ km/s, and $[M/H] = 0$), the four limb-darkening coefficients read $a_1 = 0.5267$, $a_2 = 0.0969$, $a_3 = -0.4444$, and $a_4 = 0.2232$.

We find that $\theta_{\text{LD}} = 1.1857 \pm 0.0072$ with $\chi_\nu^2 = 4.35$, and we conclude that a LD is not a better representation of our data than the UD. Figure 1 shows measured visibilities against

the projected baseline length. One can clearly see that the measured visibilities deviate from single-star models, especially at the 150-m projected baseline.

5. Binary-star model

In monochromatic light, the theoretical squared visibility for a binary star is

$$V_\lambda^2 = \frac{V_1^2 + r^2 V_2^2 + 2 V_1 V_2 \cos(2\pi/\lambda \mathbf{B} \cdot \mathbf{s})}{1 + r^2} \quad (6)$$

where V_1 and V_2 are the monochromatic squared visibilities for the primary and secondary stars alone, r is the contrast ratio between the primary and the secondary ($r \geq 1$), \mathbf{B} is the baseline vector, and \mathbf{s} is the primary-secondary angular separation vector on the plane of the sky computed with a Keplerian model. As for the single-star models, the broad-band squared visibility for the binary-star model is computed thanks to Eq. (2).

5.1. Orbital parameters

5.1.1. Separate spectroscopic and interferometric fits

In order to determine the complete set of parameters for the binary, a first method is to solve separately for the interferometric and spectroscopic parameters. The two sets of parameters can then be combined into a unique set so that physical parameters, for example dynamical masses, could be obtained. In this method, (1) we fit the spectroscopic parameters, i.e., the period P , the date of passage at periastron T_0 , the eccentricity e , the longitude of the periastron ω , the radial velocity amplitudes K_1 and K_2 , and the systemic velocity γ , and (2) we fit the interferometric parameters, i.e., the angular diameter of the primary θ_1^{LD} , the position angle of the ascending node Ω , the inclination i , and the contrast ratio $r_{K'}$. The secondary is not resolved even at the longest baseline, so we did not try to

solve for its angular diameter. Once the inclination has been determined, the semi-major axis is given by

$$a = \frac{(K_1 + K_2) P \sqrt{1 - e^2}}{2\pi \sin i}. \quad (7)$$

Spectroscopic data for the primary star were retrieved from Mayor & Mazeh (1987), Duquennoy & Mayor (1991), and Mazeh et al. (2002). For the secondary star, the data of Mazeh et al. (2002) were used. These data can be found in Tables 4 & 5.

Table 6 summarizes the results of this approach. The total χ_r^2 amounts to 1.9 for the separate fits, which is a clear improvement with respect to single-star models for which $\chi_r^2 = 4.4$. Remarkable is the large contrast between the primary and secondary, $r_{K'} = 63 \pm 10$ or $\Delta K' = 4.5 \pm 0.4$, the highest contrast measured so far by long baseline interferometry in a binary system.

5.1.2. Combined spectroscopic and interferometric fits

A more elegant method is to solve for all the orbital parameters at once. This method was first proposed by Morbey (1975) who suggested to fit visual and spectroscopic data simultaneously. The advantage of a joint treatment is that it improves the precision on the parameter estimation, because interferometric and spectroscopic models have orbital parameters in common. In addition, the parameter space is narrowed by different types of data, hence more realistic and physical parameters can be obtained. This method has been successfully applied to interferometric and spectroscopic data by e.g., Boden (1999). In the case of a combined fit, the χ_r^2 function to be minimized is the sum of the visibility χ_r^2 , the primary radial velocity χ_r^2 , and the secondary radial velocity χ_r^2 , that are all given the same weight.

Table 6 summarizes the results of this approach, and Fig. 2 shows the result of our

combined fits for visibility data. Radial velocity model and data are shown in Fig. 3. Our combined fit resulted in $\chi_r^2 = 2.0$. For comparison, we carried out combined fits with single-star models which lead to $\chi_r^2 = 3.4$. These results show that the binary star model is a better representation of the data both for the separate and the combined fits.

Although model fitting was performed with the Marquardt-Levenberg non-linear least-squares algorithm, it is necessary to check whether the parameters found correspond indeed to the true global minimum of the χ^2 hypersurface. To do so, we varied the parameter values around the minimum and plot two-dimensional slices of the χ^2 hypersurface. Figures 4, 5, 6, and 7 show some examples of two-dimensional χ^2 surfaces for combinations of parameters in the combined fit. Obviously, the χ^2 minimum is uniquely determined and no ambiguity is to be feared. From these plots, we can safely conclude that we have found the true global minimum.

Although it is theoretically possible to determine the parallax of θ Dra with the combined fits, the fitting process fails with our current data set. Therefore, we adopt Hipparcos' value for the parallax, i.e., $\Pi = 47.79 \pm 0.54$ mas. Figure 8 displays the reconstructed apparent orbit of θ Dra by using orbital parameters obtained from the combined fits. The secondary star is represented at the periastron.

5.1.3. Model fitting with correlations

A proper χ^2 estimator of the binary parameters has been established by taking correlated noise into account in the interferometric data. Correlations arise from common noise in two visibility estimates, even if taken several days apart with different baselines or interferometers. The common noise is due to uncertainties on the visibility of calibrators in common (Perrin 2003). Ignoring those correlations amounts to overestimating random noise

and therefore arbitrarily decrease χ^2 values in fits making poor fitting solutions become acceptable. This is the main reason why correlations between visibilities must be taken into account. Another reason pertains to the possibility to use relative measurements to retrieve parameters difficult to extract otherwise. A good example of this is the detection of a faint companion near a bright object. Detection may turn out to be difficult if visibilities are systematically calibrated with independent calibrators as the uncertainty on the calibrator diameters will add a noise to the detection process. On the contrary, if a single calibrator is used then the calibrator noise will be common to all visibilities and the amount of relative random fluctuations will be reduced. If the system visibility is close to one, the detection of tiny ripples – the signature of the faint companion – on top of it will be made easier. In other words, choosing a single calibrator will degrade the capability to measure absolute visibilities or parameters but will ease the measurement of relative observables. More generally speaking, taking correlations into account will improve the signal-to-noise ratio on relative parameters despite an increase of the global χ^2 at minimum.

In the particular case of the data reported here, measurements on the long and the short baselines were taken with independent sets of calibrators (see Table 1 and Table 2) and are therefore uncorrelated. However, measurements taken on a given baseline are almost systematically calibrated with the same calibrator or with the same two calibrators. As a consequence correlations need to be taken into account in the fitting process. Errors on calibrator *a priori* visibilities range between 2% on the longest baseline and 0.5% on the shortest one thus representing a good fraction of the final error bar on the object visibility. The correlations induce an increase of the χ^2 minimum by 10% compared to a classical χ^2 estimator. When correlations are taken into account, the error on parameters requiring absolute measurements of visibilities increases. This is spectacular for the primary diameter measurement whose error increases by a factor 2.5 with correlations (see Table 6) and therefore whose error would be strongly underestimated if they were ignored. This is

also true for the contrast ratio between the primary and the secondary. On the other hand, the accuracy on orbital parameters which only require relative visibilities is increased when correlations are used. This is the case for Ω , i and a . The use of correlations did not lead to a significant change on the parameter values.

5.2. Physical parameters

Table 7 summarizes all the physical parameters derived from the orbital parameters obtained with the combined fits. In this section, we comment on the masses, linear radii and effective temperatures of both stars.

5.2.1. Masses

One of the benefits of the addition of interferometric to spectroscopic measurements is the direct determination of the orbital inclination, hence the determination of unambiguous masses via

$$M_{1,2} = \frac{(1 - e^2)^{3/2} (K_1 + K_2)^2 K_{2,1} P}{2\pi G \sin^3 i}. \quad (8)$$

We compute $M_1 = 1.23 \pm 0.12 M_\odot$ and $M_2 = 0.47 \pm 0.04 M_\odot$ for the primary and the secondary, respectively, in good agreement with our expectations (Sect. ??). We note that our direct mass measurement for the primary differs by 2.3σ from the value of $1.51 \pm 0.08 M_\odot$ indirectly estimated by Allende Prieto & Lambert (1999). These authors estimate θ Dra’s primary mass by placing the star in a color magnitude HR diagram, and by comparing its position with computations of stellar evolution for isolated stars performed by Bertelli et al. (1994). Feltzing et al. (2001) estimated the mass of θ Dra to be $1.45 M_\odot$ using same method but a different evolutionary model.

5.2.2. Linear radii

Using the LD angular diameter and Hipparcos’s parallax, we compute for the linear radius of the primary star $R_1 = 2.61 \pm 0.03 R_\odot$. It is in good agreement with the value of $2.57 \pm 0.12 R_\odot$ estimated by Allende Prieto & Lambert (1999).

Using our measurement for M_2 and the mass-radius relation of Chabrier & Baraffe (1997) for low-mass stars, we compute for the linear radius of the secondary $R_2 = 0.44 \pm 0.06 R_\odot$.

At the distance of θ Dra, this corresponds to an angular diameter $\theta_2^{LD} = 0.22 \pm 0.03$ mas. Assuming this angular diameter, the expected visibility for the secondary at the longest baseline used in the course of our observations (251 m), is 0.98 at $2.2 \mu\text{m}$. In order to examine the effect of a finite secondary diameter, we carried out a fit with a 0.22-mas secondary angular diameter, and we confirmed that derived parameters did not change within their error bars.

It is interesting to compare the linear radius with the Roche-lobe radius for a close binary system, because if the star’s radius exceeds the Roche-lobe radius, then gases are free to transfer from one star to the other. According to Iben (1991), Roche lobe radii for the primary ($i = 1$) and the secondary ($i = 2$) stars are given by

$$R_{iL} = 0.52 a \left(\frac{M_i}{M_1 + M_2} \right)^{0.44}. \quad (9)$$

Using Eq. (9), we find that $R_{1L} = 4.78 R_\odot$ is greater than R_1 , and that $R_{2L} = 3.13 R_\odot$ is greater than R_2 as well, indicating that there is probably no on-going mass transfer between these stars. Considering the angular diameter for both components and reconstructed orbit, smallest apparent limb-to-limb separation is too large to make eclipse. These results are consistent with the fact that θ Dra is neither an eclipsing binary nor a variable star according to past observations.

5.2.3. Effective temperatures and luminosities

We calculated the total luminosity of θ Dra system using the bolometric flux from Blackwell & Lynas-Gray (1994) and the Hipparcos distance modulus. To estimate the bolometric luminosity of both components, we first obtained the secondary luminosity by interpolating the tabulated values in Chabrier & Baraffe (1997) based on its mass, then the primary luminosity is obtained by simply subtracting the secondary luminosity from the total luminosity. This procedure gives the primary luminosity of $8.67 \pm 0.4 L_{\odot}$, and secondary luminosity of $0.03 L_{\odot}$. From the mass-luminosity relation of Henry & McCarthy (1993), the secondary absolute V-band magnitude is $M_V = 10.4$ which amounts only to 0.06 % of the luminosity of the primary star in this band. This explains why the secondary star has not been detected by visible spectroscopy so far. Recomputing the effective temperature of the primary star from Sect. 4.2 with the LD angular diameter (instead of the UD diameter), we find $T_{\text{eff}} = 6136 \pm 65$ K in which the difference is very small compared to the single-star model. With the secondary luminosity, linear radii, and the relation $L = 4\pi R^2 \sigma T_{\text{eff}}^4$, we estimated the secondary effective temperature of 3626 K.

6. Comparison with evolutionary models

The stellar age and mass can be estimated with appropriate metallicity by comparing measured temperatures and luminosity to the theoretical evolutionary model. Conversely, evolutionary models can be used to check the consistency of our measured quantities. We used the Padova database of evolutionary models (Girardi et al. 2000) in order to determine the age and mass. We constructed linearly interpolated isochrone tables of T_{eff} and luminosity for the primary star between the tables of different ages. Then we determined the age and mass corresponding to the measured T_{eff} and Luminosity. The best-fit model predicts for the primary an age of $3.22^{+0.23}_{-0.16}$ Gyr and a mass of $1.242^{+0.018}_{-0.024} M_{\odot}$ with

$Z = 0.004$. However, this value of Z corresponds to $[M/H] = -0.7$, which is significantly different from the solar-metallicity we assumed for θ Dra. On the other hand, if we assume a solar metallicity, i.e. $Z = 0.019$, then the model predicts a mass of $1.452^{+0.017}_{-0.014} M_{\odot}$ for the primary star, which differs by 1.8σ from our measurement and an age of $2.791^{+0.075}_{-0.077}$ Gyr. It is consistent with the estimates by Feltzing et al. (2001) who find the age and mass of θ Dra to be 2.88 ± 0.15 Gyr and $1.45 M_{\odot}$ using a solar metallicity model. Figure 9 displays isochrone models for $Z = 0.019$ and $Z = 0.004$. Errors on the dynamical masses are dominated by the error on the orbital inclination and the radial velocity amplitudes. Systematic errors due to variations in seeing and instrumental conditions on visibility data or radial velocity data of the secondary star which contains only 4 measurements might attribute to errors on these orbital elements, which lead to the mismatch between dynamical mass and indirectly derived mass.

To derive more physical quantities for the secondary star, we compared observables, the mass and luminosity in the K-band, with theoretical isochrones, in the same manner as with the primary star. However, in this part of the mass-luminosity diagram, theoretical curves are very tight and as the accuracy of the measured mass and luminosity is poor, an independent estimate of the age is impossible for the secondary star. Therefore, we adopt for the secondary an age identical to that of the primary, i.e., ≈ 3 Gyr. For this age, it is thought that the secondary star is still on the main-sequence.

7. Discussion

We have successfully detected the faint companion in the θ Dra system despite the large contrast. $\Delta K = 4.5 \pm 0.4$ is the largest magnitude difference measured to date by optical interferometry in a spectroscopic binary. Towards a direct detection of exoplanets with optical interferometers, the most favorable targets would be “Hot Jupiters” or “Pegasi

planets”, which are loosely defined as Jupiter-mass planets in weakly eccentric orbits with semi-major axes smaller than 0.1 AU, because of the angular proximity of these objects to their parent stars and the relatively small luminosity ratio between the star and the planet.

Since the discovery of a hot giant gaseous planet around the solar-type star 51 Pegasi by Mayor & Queloz (1995), among the ~ 270 extrasolar planets known so far¹, about 70 belong to the same class of planets as 51 Pegasi b, i.e., Pegasi planets. For about 35 of them that partially eclipse their parent stars, masses and radii are both available thanks to the combination of radial velocimetry and transit photometry (e.g. Charbonneau et al. 2006). For a couple of these, effective temperatures have been obtained via the observation of the secondary eclipse (or “anti-transit”) in the infrared (Charbonneau et al. 2005; Deming et al. 2005, 2006). These observations provide very interesting but still incomplete information to test model atmospheres. A lot more could be learned if we could detect Pegasi planets directly.

Atmosphere models for Pegasi planets predict luminosity ratios between the star and the planet of the order of 10^4 in the near infrared (Sudarsky et al. 2003). Numerical simulations show that Pegasi planets previously known by radial velocimetry could be detected by interferometry from the ground, provided visibilities were measured with an uncertainty of 0.1 % or less (Bordé & Coudé du Foresto 2002; Bordé 2003). Perrin & Ridgway (2005) showed that there is no theoretical limit in measuring visibilities with accuracies as good as 0.01 %.

On the road to the detection of Pegasi planets by long-baseline interferometry, a next step would be the detection of a companion with a contrast of about 1000. However, the uncertainty routinely achieved by the most accurate interferometers, is currently of the

¹See Jean Schneider’s Extrasolar Planets Encyclopaedia at <http://www.exoplanet.eu/>

order of 1–5 % depending on the brightness and the angular size of the target (Mérand et al. 2006, Fig. 7), and it would be difficult to detect such a companion with these precisions unless a good uv coverage is reached. The uncertainties in visibility measurements are dominated by atmospheric piston noise and the uncertainties on calibrator diameters. To reduce piston noise, a fringe tracker is required and/or a good astronomical site with very long atmospheric coherence time like in the high Antarctic plateau. Another attractive solution would be to utilize closure phase measurements which do not depend on atmospheric turbulence.

8. Conclusion

We have measured the apparent orbit of the double-lined spectroscopic binary θ Dra by using the CHARA Array equipped with the FLUOR beam combiner. This is the first interferometric observation for this system. Thanks to the high dynamic range provided by FLUOR, all orbital and physical parameters are estimated despite the large contrast ratio between the primary and the secondary.

We have combined the visibility data with archival spectroscopic data to fit a full orbital parameter set for θ Dra. The final reduced χ_r^2 of 2.0 for the binary model is a clear improvement compared to the single-star model that has a χ_r^2 of 3.4. Moreover we have showed for the first time that correlations between visibilities should be taken into account for an accurate orbital solution.

θ Dra features the highest contrast measured in a binary star with long baseline interferometry. When combined with spectroscopic parameters, the orbital inclination yielded dynamical masses of $1.23 M_\odot$ and $0.47 M_\odot$ for the primary and the secondary, respectively. We have compared the derived temperature and luminosity for the primary

with theoretical isochrones by Girardi et al. (2000), and found that θ Dra is a F8 sub-giant with an age of approximately 3 Gyr. However, the metallicity we derived does not match previous determinations from the literature, and further spectroscopic and interferometric observations are required to investigate this discrepancy. For the secondary, the uncertainty on the mass was too large for an age determination with stellar isochrones. We managed nevertheless to classify it as a dim M1 main-sequence star.

FLUOR was partially funded through grants from the CNRS and Paris Observatory. The CHARA Array was constructed with funding from Georgia State University, the National Science Foundation, the W. M. Keck Foundation, and the David and Lucile Packard Foundation. The CHARA Array is operated by Georgia State University with support from the College of Arts and Sciences, and from the National Science Foundation under NSF Grant AST 0606958. This work was performed in part under contract 1256791 with the Jet Propulsion Laboratory (JPL), funded by NASA through the Michelson Fellowship Program. JPL is managed for NASA by the California Institute of Technology. This research has made use of NASA's Astrophysics Data System and of the SIMBAD database and the VizieR catalogue access tool operated at CDS, Strasbourg, France.

REFERENCES

- Absil, O., et al. 2006, *A&A*, 452, 237
- Allende Prieto, C., & Lambert, D. L. 1999, *A&A*, 352, 555
- Aufdenberg, J. P. et al. 2006, *ApJ*, 645, 664
- Balachandran, S. 1990, *ApJ*, 354, 310
- Bertelli, G., et al. 1994, *A&AS*, 106, 275
- Blackwell, D. E., & Lynas-Gray, A. E. 1994, *A&A*, 282, 899
- Boden, A. F., et al. 1999, *ApJ*, 527, 360
- Bordé, P. 2003, Ph.D. Thesis
- Bordé, P., & Coudé du Foresto, V. 2002, *SF2A-2002*, 577
- Hanbury Brown, R., Davis, J., Lake, R. J. W., & Thompson, R. J. 1974, *MNRAS*, 167, 475
- Chabrier, G. & Baraffe, I. 1997, *â*, 327, 1039
- Campbell, W. W. 1989, *ApJ*, 9, 311
- Charbonneau, D., et al. 2005, *ApJ*, 626, 523
- Charbonneau, D., Brown, T., Burrows, A., & Laughlin, G. 2006, *Protostars and Planets V*, astro-ph/0603376
- Claret, A. 2000, *A&A*, 363, 1081
- Coudé du Foresto, V., Ridgway, S., & Mariotti, J.-M. *A&A*, 121, 379
- Coudé du Foresto, V., et al. 1998, *Proc. SPIE*, 3350, 856

- Coudé du Foresto, V., et al., 2003, Proc. SPIE, 4838, 280
- Cox, A. N. 2000, Allen's Astrophysical Quantities, Fourth Edition, Springer-Verlag
- Curtis, H. D. 1907, ApJ, 26, 263
- de Medeiros, J. R., Da Rocha, C., Mayor, M. 1996, A&A, 314, 499
- de Medeiros, J. R., & Mayor, M. 1999, A&AS, 139, 433
- Deming, D., Seager, S., Richardson, L. J., & Harrington, J. 2005, Nature, 434, 740
- Deming, D., Harrington, J., Seager, S., & Richardson, L. J. 2006, ApJ, 644, 560
- Duquennoy, A., & Mayor, M. 1991, A&A, 248, 485
- Feltzing, S., Holmberg, J., & Hurley, J. R. 2001, A&A, 377, 911
- Girardi, L., Bressan, A., Bertelli, G., & Chiosi, C. 2000, A&AS, 141, 371
- Henry, T. J., & McCarthy, D. W. 1993, AJ, 106, 773
- Hummel, C. A., et al., 1998, ApJ, 116, 2536
- Iben, I. J. 1991, ApJS, 76, 55
- Ibukiyama, A. & Arimoto, N., 2002, A&A, 394, 927
- Kervella, P., et al. 2004a A&A, 416, 941
- Kervella, P., Thevenin, F., Di Folco, E., & Segransan, D. 2004b, A&A, 426, 297
- Levato, H., 1976, ApJ, 203, 680
- Lu, W.-X., Shen, L.-Z., & Jiang, Z.-J. 1988, Chinese J. Astron. Astrophys., 12, 228

- Marsakov, V. A., & Shevelev, Yu. G. 1995, Bulletin d'Information du Centre de Données Stellaires, 47, 13
- Mayor, M., & Mazeh, T. 1987, A&A, 171, 157
- Mayor, M., & Queloz, D. 1995, Nature, 378, 355
- Mazeh, T., et al. 2002, ApJ, 564, 1007
- Mazeh, T., 2005, Private communication
- Mérand, A., Coudé du Foresto, V., Kellerer, A., & ten Brummelaar, T. 2006, SPIE, 6268-88
- Mérand, A., et al. 2005, A&A, 403, 1155
- Miura, N., et al. PASJ, 2, 561
- Morbey, C. L. 1975, PASP, 87, 689
- Perrin, G., et al. 2000, A&A, 418, 675
- Perrin, G. 2003, A&A, 400, 1173
- Perrin, G., Ridgway, S. T. 2005, A&A, 626, 1138
- Perryman, M. A. C., et al. 1997, A&A, 323, L49
- Press, W., Teukolsky, S., Vetterling, W., & Flannery, B. 2002, Numerical recipes in C: the art of scientific computing, Cambridge University Press
- Sudarsky, D., Burrows, A., & Hubeny, I. 2003, ApJ, 588, 1121
- ten Brummelaar, T. A., et al. 2005, ApJ, 628, 453
- Thévenin, F. 1998, CDS, Cat III/193

This manuscript was prepared with the AAS L^AT_EX macros v5.2.

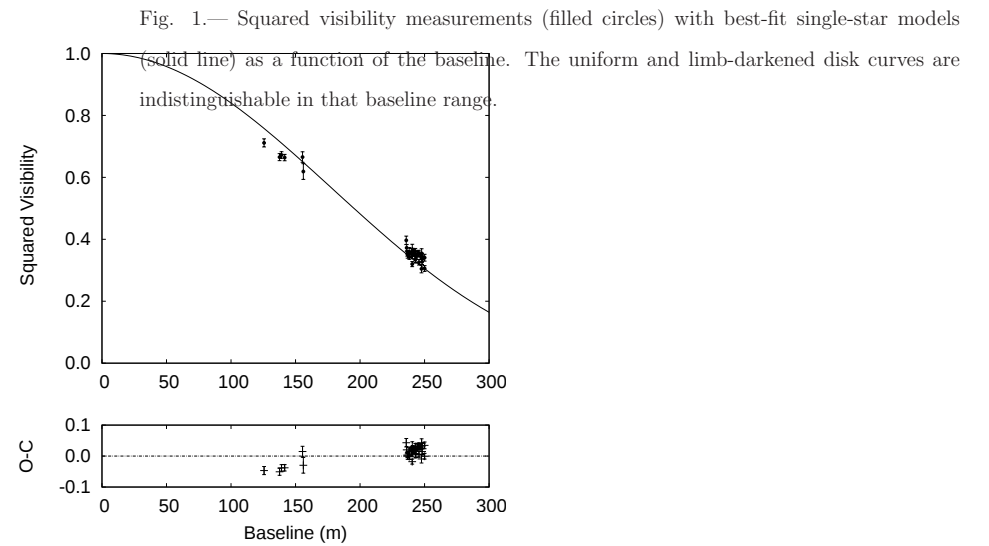


Fig. 2.— Squared visibility measurements (filled circles) with best-fit single-star model (dashed line) and best combined-fit binary-star model (solid line) as a function of time. The bottom panel gives residuals to the single-star model fit (crosses) and the binary star model (triangles). The measurement error bars are only shown for the binary star model for clarity.

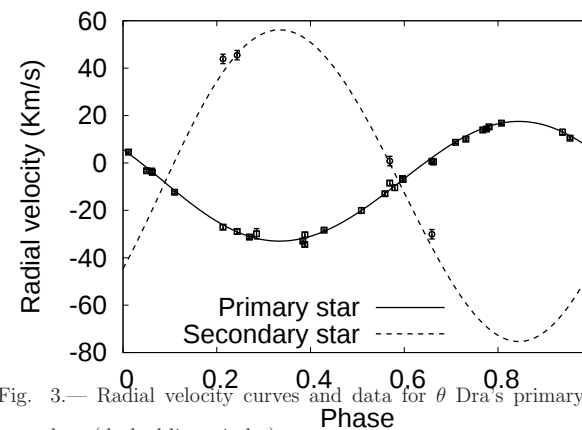
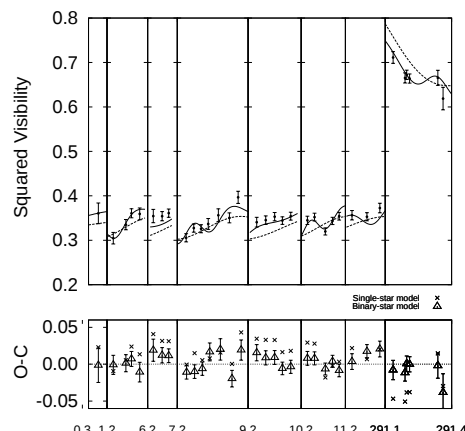


Fig. 3.— Radial velocity curves and data for θ Dra's primary (solid line, squares) and secondary (dashed line, circles).

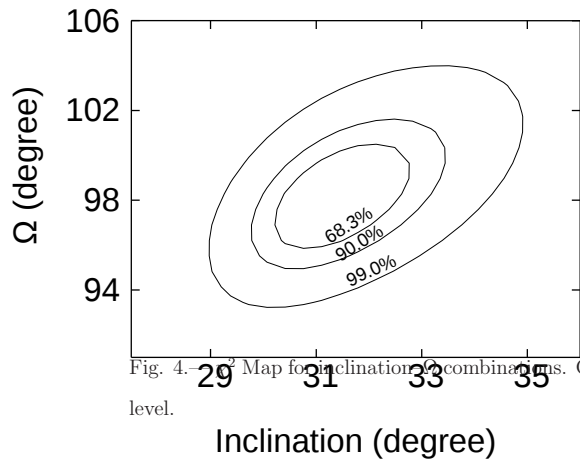


Fig. 4. χ^2 Map for inclination- Ω combinations. Contours show 68.3, 90.0, 99 % confidence level.

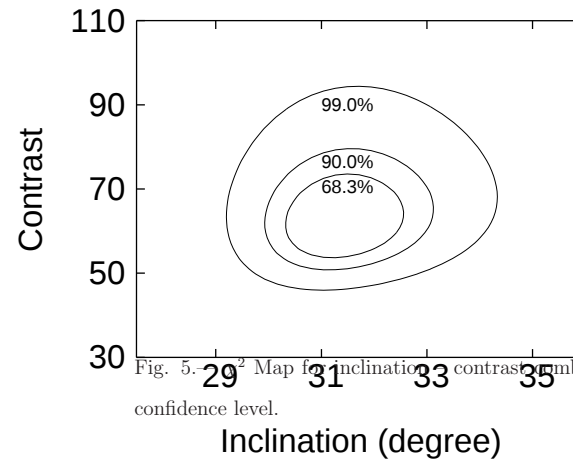


Fig. 5. χ^2 Map for inclination-contrast combinations. Contours show 68.3, 90.0, 99 % confidence level.

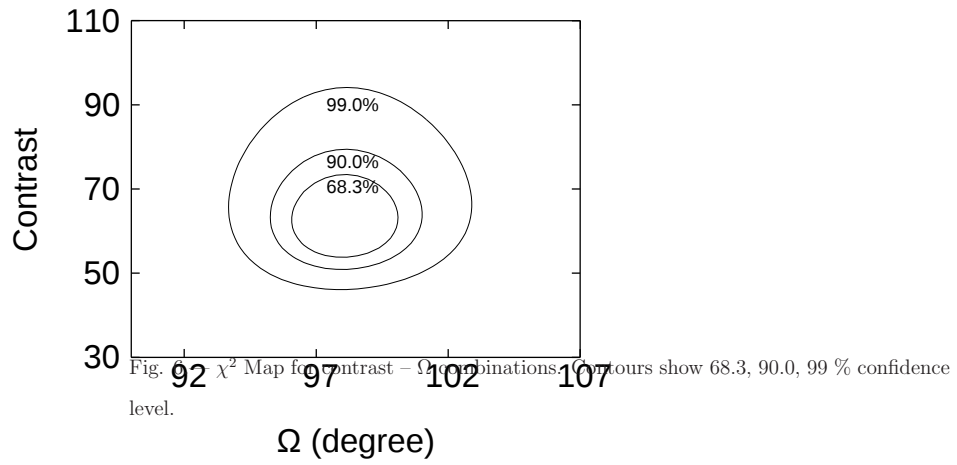


Fig. 6 χ^2 Map for contrast - Ω combinations. Contours show 68.3, 90.0, 99 % confidence level.

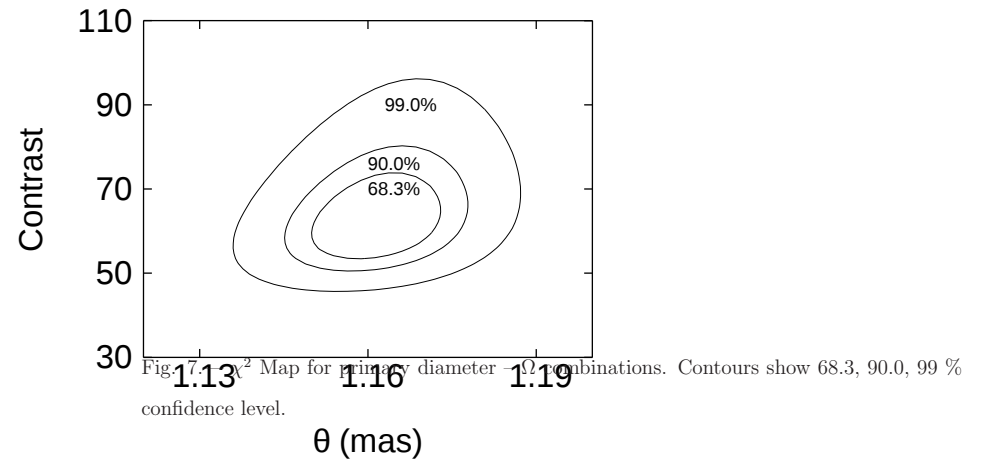


Fig. 7 χ^2 Map for primary diameter - Ω combinations. Contours show 68.3, 90.0, 99 % confidence level.

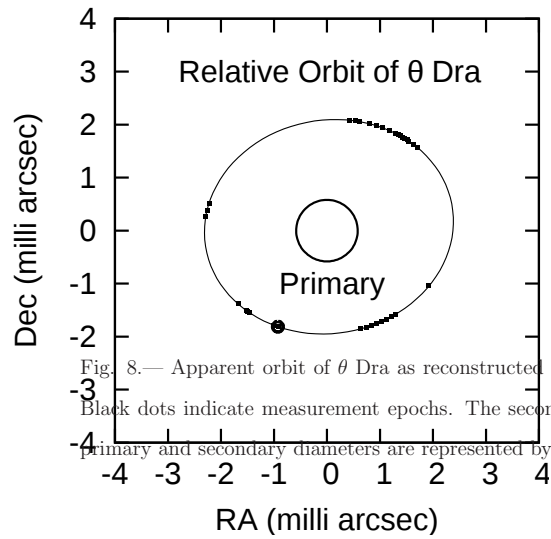


Fig. 8.— Apparent orbit of θ Dra as reconstructed from the measured orbital parameters. Black dots indicate measurement epochs. The secondary star is shown at periastron. The primary and secondary diameters are represented by their sizes in this figure.

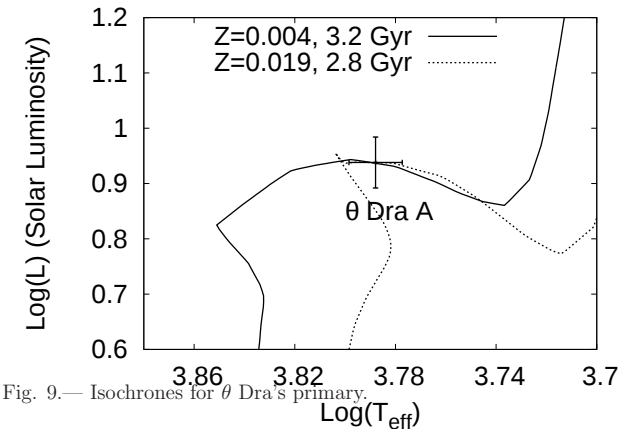


Fig. 9.— Isochrones for θ Dra's primary.

Table 1. Calibrator list for our observations of θ Dra.

Calibrator	V	K	Sp	UD (mas)
HD 139778	5.86	3.30	K1III	1.078 ± 0.027
HD 138852	5.75	3.46	K0III-IV	0.953 ± 0.014
HD 150449	5.28	2.64	K1III	1.322 ± 0.019
HD 191589	7.28	3.14	K5III	1.169 ± 0.016
HD 206842	6.09	3.14	K1III	1.214 ± 0.016
HD 216646	5.82	3.51	K0III	1.051 ± 0.015
HD 159330	6.22	2.79	K2III	1.276 ± 0.015

Table 2. θ Dra visibility data set

MJD	V^2	error	U (m)	V (m)	N^a	Calibrator(s) ^b	Baseline
53222.2830	0.360	0.023	240.50	27.77	16	139778, 191589	W1E2
53223.2199	0.304	0.012	247.61	48.54	27	139778	W1E2
53223.2602	0.335	0.011	242.86	34.86	71	139778, 139778	W1E2
53223.2781	0.360	0.010	240.74	28.53	127	139778, 138852	W1E2
53223.3046	0.359	0.013	238.06	18.91	18	138852, 138852	W1E2
53228.2051	0.354	0.015	247.73	48.91	37	139778	W1E2
53228.2290	0.354	0.010	245.00	40.91	129	139778, 138852	W1E2
53228.2468	0.361	0.009	242.83	34.78	139	138852, 139778	W1E2
53229.1763	0.305	0.009	250.06	57.37	134	139778	W1E2
53229.1988	0.327	0.009	248.11	50.10	122	139778, 138852	W1E2
53229.2206	0.325	0.009	245.68	42.85	128	138852, 139778	W1E2
53229.2416	0.336	0.012	243.13	35.63	71	139778, 138852	W1E2
53229.2717	0.356	0.014	239.65	24.96	126	138852, 139778	W1E2
53229.3045	0.350	0.011	236.85	12.86	132	139778, 138852	W1E2
53229.3304	0.396	0.013	235.84	3.15	132	138852, 206842	W1E2
53231.1710	0.340	0.010	250.05	57.32	109	139778	W1E2
53231.1932	0.345	0.009	248.12	50.15	131	139778, 138852	W1E2
53231.2150	0.353	0.009	245.70	42.90	140	138852, 139778	W1E2
53231.2340	0.344	0.008	243.40	36.40	139	139778, 138852	W1E2
53231.2544	0.354	0.008	240.95	29.21	145	138852, 139778	W1E2
53232.1995	0.344	0.009	247.16	47.15	125	139778, 138852	W1E2
53232.2222	0.352	0.008	244.50	39.52	127	138852, 139778	W1E2
53232.2563	0.319	0.008	240.42	27.53	143	139778, 138852	W1E2
53232.2791	0.343	0.008	238.15	19.27	146	138852, 139778	W1E2
53232.3001	0.354	0.008	236.63	11.46	138	139778, 138852	W1E2
53233.2448	0.356	0.010	241.43	30.67	127	139778, 138852	W1E2
53233.2786	0.352	0.009	237.95	18.43	104	138852, 139778	W1E2
53233.3077	0.372	0.010	236.15	7.58	128	139778, 216646	W1E2
53513.1795	0.711	0.013	125.64	-69.50	54	150449	W2E2
53513.2244	0.665	0.011	137.63	-84.57	92	150449, 150449	W2E2
53513.2308	0.672	0.010	139.16	-86.59	268	150449, 150449	W2E2
53513.2417	0.663	0.010	141.61	-89.96	210	150449, 150449	W2E2

Table 2—Continued

MJD	V^2	error	U (m)	V (m)	N^a	Calibrator(s) ^b	Baseline
53513.3481	0.665	0.016	155.42	58.43	15	159330, 150449	W2E2
53513.3678	0.618	0.025	156.07	52.52	40	150449, 159330	W2E2

^aNumber of scans

^bHD number

Table 3. Spectroscopic parameters

	Mazeh et al. (2002)	This work
Period (days)	$3.07082160 \pm 6.9 \times 10^{-6}$	$3.07082231 \pm 5.1 \times 10^{-6}$
T_0 (MJD)	45971.48 ± 0.13	45971.63 ± 0.11
e	0.039 ± 0.012	0.0316 ± 0.0074
ω (deg)	63 ± 15	81 ± 13
K_1 (km/s)	25.10 ± 0.31	25.31 ± 0.33
K_2 (km/s)	66.0 ± 2.2	65.7 ± 2.2
γ (km/s)	-8.23 ± 0.20	-8.35 ± 0.12
χ_r^2	2.75	2.45

Table 4. θ Dra radial velocity data set for the primary star

MJD	Radial velocity (km s ⁻¹)	error (km s ⁻¹)	ref
44395.963	10.49	0.51	1
44466.888	-3.3	0.50	1
44463.851	-3.39	0.46	1
44995.250	-12.35	0.46	1
44396.933	-31.26	0.53	1
45002.232	-32.97	0.47	1
44464.854	-34.41	0.72	1
44993.158	-28.35	0.46	1
44397.940	-7.01	0.54	1
44465.841	8.75	0.49	1
45000.229	10.07	0.47	1
44340.116	13.91	0.47	1
44376.991	14.34	0.47	1
44994.239	15.22	0.56	1
44991.249	16.80	0.51	1
45446.133	13.01	1.19	2
45473.996	4.6	0.47	2
45480.976	-29.89	2.17	2
45485.003	-6.55	0.89	2
45487.959	-13.00	0.9	2
45778.162	-3.91	1.06	2
45779.162	-30.32	1.00	2
45862.917	0.44	1.13	2
46958.946	-10.43	1.18	2
47318.013	-20.04	1.24	2
50805.650	-28.93	1.0	3
50806.650	-8.48	1.0	3
51227.630	0.73	1.0	3
51484.210	-27.09	1.0	3

References. — (1) Mayor & Mazeh (1987); (2)
Mazeh et al. (2002); (3) Mazeh et al. (2002);

Table 5. θ Dra radial velocity data set for the secondary star. All radial velocities are from Mazeh et al. (2002).

MJD	Radial velocity (km s ⁻¹)	error
50805.65	45.48	2.0
50806.65	0.81	2.0
51227.63	-30.08	2.0
51484.21	43.90	2.0

Table 6. Orbital parameters for θ Dra

Orbital parameter	Separate fits	Combined fits with correlations	Combined fits without correlations
P (days)	$3.07082231 \pm 5.1 \times 10^{-6}$	$3.0708190 \pm 4.3 \times 10^{-6}$	$3.0708206 \pm 4.6 \times 10^{-6}$
T_0 (MJD)	45971.63 ± 0.11	45971.434 ± 0.052	45971.570 ± 0.056
e	0.0316 ± 0.0074	0.0383 ± 0.0085	0.0288 ± 0.0071
K_1 (km/s)	25.31 ± 0.33	25.25 ± 0.27	25.28 ± 0.23
K_2 (km/s)	65.7 ± 2.2	65.7 ± 1.5	65.8 ± 2.0
γ (km/s)	-8.35 ± 0.12	-8.24 ± 0.15	-8.35 ± 0.12
ω (deg)	81 ± 13	57.9 ± 6.1	74.0 ± 6.6
Ω (deg)	97.72 ± 1.3	98.0 ± 1.8	99.8 ± 2.1
i (deg)	30.98 ± 0.83	31.35 ± 0.97	31.95 ± 1.3
a (mas)	2.367 ± 0.049	2.357 ± 0.070	2.321 ± 0.086
$r_{K'}$	63.2 ± 7.0	63 ± 10	60 ± 7
θ_1^{LD} (mas)	1.1625 ± 0.0076	1.1617 ± 0.0079	1.1570 ± 0.0033
θ_2^{LD} (mas)	0.22 ± 0.03	0.22 ± 0.03	0.22 ± 0.03
χ_r^2	1.9	2.0	1.8

Table 7. Physical parameters for θ Dra

	Primary	Secondary
Spectral type	F8IV	M1V
Mass (M_{\odot})	1.23 ± 0.12	0.471 ± 0.043
Linear radius (R_{\odot})	2.613 ± 0.034	0.44 ± 0.06
$\log g$ (cm/s^2)	3.69 ± 0.10	4.82 ± 0.29
T_{eff} (K)	6136 ± 65	3626 ± 247
Luminosity (L_{\odot})	8.67 ± 0.4	0.03
M_V (mag)	2.408 ± 0.061	10.4
M_K (mag)	1.176 ± 0.058	5.67 ± 0.40
a (10^{-2} AU)	1.369 ± 0.041	3.56 ± 0.13

Résumé

L'exoplanétologie est une science jeune qui n'a véritablement démarré qu'en 1995 avec la découverte d'une exoplanète géante en orbite rapprochée autour de l'étoile solaire 51 Pegasi. Mes premières recherches dans ce domaine datent de 1999 et concernent la mission spatiale COROT qui a conduit depuis 2006 à la détection de plus d'une trentaine de nouvelles exoplanètes très diverses. J'ai pleinement participé à l'aventure de COROT, en commençant par l'estimation du nombre de planètes détectables de 1999 à 2003, en poursuivant par la recherche et la caractérisation des signaux d'éclipses partielles ou *transits* lorsque les données furent disponibles à partir de 2007, pour finir par la mesure des propriétés physiques et orbitales des exoplanètes détectées, notamment COROT-7b en 2009, la première exoplanète rocheuse au rayon et à la masse mesurés, et COROT-8b en 2010, un mini-saturne dense. Je travaille actuellement au calcul de la probabilité de la nature planétaire de tous les signaux de transits détectés par la mission. Mes autres travaux de recherche concernent deux techniques de haute résolution angulaire pour la détection directe d'exoplanètes : l'interférométrie à longue base dans l'infrarouge et la coronagraphie dans le visible. En interférométrie, j'ai contribué à la précision de l'étalonnage des instruments en compilant deux catalogues d'étoiles-étalons, j'ai mesuré les propriétés d'un prototype de fibre monomode dans l'infrarouge moyen, et j'ai observé des étoiles naines, géantes et doubles. Mon résultat majeur est la détection directe du compagnon faible de l'étoile θ Draconis. Enfin, en coronagraphie, j'ai développé en 2006 une méthode de correction de tavelures à l'aide d'un miroir déformable dans le cadre du projet *Terrestrial Planet Finder Coronagraph* de la NASA. En cas de sélection du projet ECHO par l'ESA en février 2014, mes recherches futures pourraient concerner la spectrométrie par transmission de l'atmosphère d'exoplanètes à courte période.

Mots-clés: Étoiles, exoplanètes, interférométrie infrarouge à longue base, coronagraphie, photométrie des transits, spectrométrie des vitesses radiales.

Abstract

Exoplanetology is a young science that genuinely took off in 1995 when a giant planet was discovered in close orbit to the solar star 51 Pegasi. My first researches in this field started in 1999 and were concerned with the space mission COROT that has led since 2006 to the discovery of more than thirty diverse exoplanets. I have been fully engaged in the COROT adventure, starting with estimating the number of detectable planets from 1999 to 2003, continuing with the search for and characterization of partial eclipse signals or *transits* when the data became available in 2007, and finishing with the measure of orbital and physical properties of detected exoplanets, most notably COROT-7b in 2009, the first rocky exoplanet with measured mass and radius, and COROT-8b in 2010, a dense small-Saturn. Currently, I work on computing the probability of the planetary nature of all transit signals detected by COROT. My other works deal with two high angular resolution techniques for the direct detection of exoplanets : long-baseline infrared interferometry and visible coronagraphy. Interferometry-wise, I compiled two catalogs of calibrator stars suitable for high-precision instrumental calibrations, I measured the properties of a single-mode fiber prototype in the mid-infrared, and I observed dwarf, giant, and double stars. My major result is the detection of the faint companion to θ Draconis. Finally, coronagraphy-wise, I devised in 2006 a speckle-nulling approach by way of a deformable mirror, to be used in the framework of NASA's *Terrestrial Planet Finder Coronagraph* project. In case ESA selects the ECHO project in February 2014, my future works might be dealing with the transmission spectrometry of short-period exoplanet atmospheres.

Keywords: Stars, exoplanets, long-baseline infrared interferometry, coronagraphy, transit photometry, radial velocity spectrometry.