



HAL
open science

Détection et caractérisation des exoplanètes par imagerie directe : VLT/SPHERE et au-delà

Arthur Vigan

► **To cite this version:**

Arthur Vigan. Détection et caractérisation des exoplanètes par imagerie directe : VLT/SPHERE et au-delà. Planétologie et astrophysique de la terre [astro-ph.EP]. Aix-Marseille Université (AMU), 2018. tel-02117622

HAL Id: tel-02117622

<https://theses.hal.science/tel-02117622>

Submitted on 2 May 2019

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.

Habilitation à Diriger des Recherches

Arthur Vigan

*Centre National de la Recherche Scientifique
Laboratoire d'Astrophysique de Marseille*

Détection et caractérisation des exoplanètes par imagerie directe : VLT/SPHERE et au-delà

Soutenue publiquement le 19 décembre 2018
devant un jury composé de

Mme. Magali Deleuil_____	Présidente
Mme. Anne-Marie Lagrange_____	Tutrice
M. Dimitri Mawet_____	Rapporteur
M. Laurent Pueyo_____	Rapporteur
M. Anthony Boccaletti_____	Rapporteur
M. Marcel Carbillet_____	Examineur

Table des matières

1	TRAVAUX DE RECHERCHE	3
1.1	INSTRUMENTATION POUR L'IMAGERIE A HAUT-CONTRASTE	4
1.1.1	DETECTION DES EXOPLANETES PAR IMAGERIE DIFFERENTIELLE : DEPUIS LES SIMULATIONS JUSQU'AU CIEL	6
1.1.2	CARACTERISATION DES EXOPLANETES PAR SPECTROSCOPIE LONGUE-FENTE A HAUT-CONTRASTE	11
1.1.3	CONTROLE DU FRONT D'ONDE POUR LA CORRECTION DES ABERRATIONS NON-COMMUNES	16
1.1.4	VERS LE HAUT-CONTRASTE SUR LES GRANDS TELESCOPES SEGMENTES : ETAPE 1 – LE COPHASAGE	20
1.2	RECHERCHE ET ETUDES DE SYSTEMES PLANETAIRES PAR IMAGERIE DIRECTE	23
1.2.1	CONTRAINTES SUR LA POPULATION DES PLANETES GEANTES JEUNES	24
1.2.2	ETUDE DE COMPAGNONS SUBSTELLAIRES	27
2	RETOUR VERS LE FUTUR	34
2.1	VALIDATION DES MODELES DE FORMATION PLANETAIRES	34
2.2	HAUT-CONTRASTE ET HAUTE-RESOLUTION SPECTRALE : PROJET HIRISE	35
2.3	HAUT-CONTRASTE SUR LES GRANDS TELESCOPES SEGMENTES	36
3	PERSPECTIVES GENERALES	38
4	ENCADREMENT	41
5	ENSEIGNEMENT ET DIFFUSION DES CONNAISSANCES	43
6	SELECTION DE PUBLICATIONS	45
7	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	46

1 TRAVAUX DE RECHERCHE

La détection et la caractérisation des exoplanètes est un domaine dont l'ampleur a explosé au cours des 20 dernières années, depuis la confirmation de la première exoplanète autour d'une étoile de type solaire par Mayor & Queloz (1995). La multiplication des méthodes de détection et le perfectionnement de chacune d'elles offre à présent un arsenal complet pour étudier tous types de systèmes planétaires.

L'imagerie directe des exoplanètes est un bon exemple de méthode de détection qui a connu plusieurs révolutions à mesure que l'instrumentation s'est perfectionnée : d'abord avec le développement des télescopes de 8-10 m, qui a permis de bénéficier d'une résolution angulaire accrue, puis l'arrivée de l'optique adaptative sur ces télescopes, suivi par le développement de stratégies d'observations spécifiques, associées à des algorithmes avancés d'analyse des données, et enfin l'arrivée d'une nouvelle génération d'instruments entièrement dédiés à cette méthode, utilisant optique adaptative extrême et coronagraphie pour aller chercher des compagnons toujours plus proches de leur étoile.

Mes travaux de recherche depuis ma thèse m'ont fait participer activement à l'évolution de l'imagerie directe et en particulier à la transition vers la nouvelle génération d'instrument dédiés. J'ai progressivement développé un profil d'*Instrument Scientist* dans ce domaine, ce qui m'a amené à aborder de nombreuses problématiques associées à la fois à des questions instrumentales et à des questions astrophysiques. J'ai en particulier eu la chance d'être impliqué très tôt dans le développement scientifique et technique de l'instrument SPHERE, l'imageur d'exoplanètes de seconde génération pour le VLT.

Ce manuscrit présente de manière synthétique mes travaux de recherche effectués depuis 2006. Les résultats les plus marquants y sont développés, et mes contributions de moindre importance sur des sujets connexes sont simplement évoqués. Pour plus de clarté, j'ai séparé mes activités de recherche en deux sections qui concernent le **développement d'instrumentation pour l'imagerie à haut-contraste** (Sect. 1.1) et la **recherche et l'études de systèmes planétaires par imagerie directe** (Sect. 1.2). Mes perspectives de recherche dans ces deux domaines seront détaillées dans la Sect. 2, et je des perspectives plus générales sont présentées dans la Sect. 3.

1.1 Instrumentation pour l'imagerie à haut-contraste

Mes travaux de recherche en instrumentation s'inscrivent dans le cadre du développement d'instrumentation pour atteindre le haut-contraste et la haute-résolution angulaire, deux techniques totalement indissociables pour permettre la détection et la caractérisation des exoplanètes à grande séparation orbitale par imagerie :

- Haute-résolution angulaire : la détection d'objets en orbite à quelques unités astronomiques autour d'étoiles situées à quelques dizaines de parsecs de la Terre nécessite de pouvoir sonder des séparations angulaires inférieures à la seconde d'arc. A ce jour, plus de 95% des exoplanètes connues orbitent à des séparations angulaires $\ll 100$ mas (<http://exoplanets.eu/>).
- Haut-contraste : la luminosité intrinsèque des planètes géantes jeunes dans le proche-infrarouge est considérablement plus faible que celle de leur étoile. Bien qu'encore relativement mal calibrés pour les petites masses ($< 20\text{-}30 M_{\text{Jup}}$) et les âges jeunes (< 500 Myr), les modèles d'évolution prédisent des contrastes variant entre 10^4 et 10^6 (10-15 mag) en bande H pour des compagnons entre 50 et $1 M_{\text{Jup}}$ (e.g. Burrows et al. 1997 ; Baraffe et al. 2003 ; Marley et al. 2007 ; Baraffe et al. 2015).

Les résolutions angulaires de l'ordre de quelques centaines de millisecondes d'arc (mas) peuvent être atteintes avec des télescopes de la classe des 8-10 m dans le proche-infrarouge (bande H, $1.6 \mu\text{m}$), qui offrent une limite de diffraction de l'ordre de 30-40 mas. Pour atteindre la limite de diffraction sur ces télescopes, il est cependant obligatoire qu'ils soient équipés de systèmes d'optique adaptative (OA) à grand nombre de degrés de liberté et fonctionnant à des cadences élevées (Fusco et al. 2006).

Le haut-contraste nécessite l'utilisation de coronographes (Lyot 1930) dont le rôle est de supprimer ou atténuer la diffraction du télescope et ainsi augmenter la dynamique accessible dans les images. La coronagraphie est un champ de recherche extrêmement prolifique qui a connu des développements importants depuis le début des années 2000. Une revue sur les coronographes est disponible dans Guyon et al. (2006), mais le domaine a encore connu de nombreuses avancées depuis 2006, par exemple sur le front des coronographes de phase (Mawet et al. 2009 ; N'Diaye et al. 2012a), des coronographes de type Lyot à pupille apodisée (N'Diaye et al. 2016a), ou encore des apodiseurs gris (N'Diaye et al. 2007), colorés (N'Diaye et al. 2015), en phase (Kenworthy et al. 2007) ou binaires (Kasdin et al. 2007 ; Carlotti 2013).

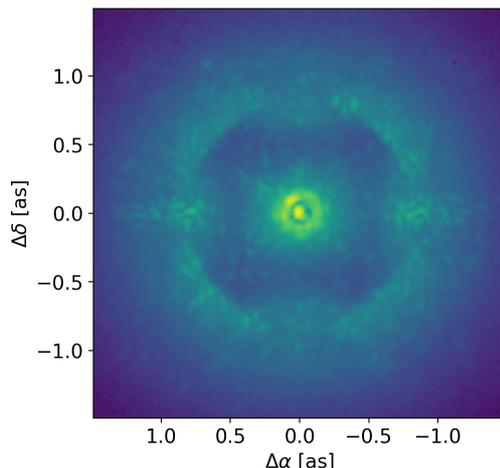


Figure 1 - Image coronographique prise avec l'instrument SPHERE/IRDIS. Cette image met en évidence les structures classiques visibles dans des données d'imagerie à haut-contraste: 1) le rayon de correction de l'optique adaptative qui se traduit sous la forme d'un disque sombre d'un rayon de $20\lambda/D$, 2) au centre le masque coronographique opaque d'un rayon de $\sim 2\lambda/D$ avec en son centre la tache de Fresnel, 3) les speckles quasi-statiques qui se retrouvent dans tout le plan focal, 4) les résidus temporels de l'OA qui se traduisent sous la forme d'un halo résiduel (vertical ici) dans la zone corrigée. L'utilisation d'un coronographe de Lyot à pupille apodisée permet ici de supprimer complètement la diffraction, ce qui explique l'absence d'anneaux d'Airy autour de l'étoile.

La combinaison de la haute-résolution angulaire, grâce à de grands télescopes, et du haut-contraste, grâce à la coronagraphie, n'est cependant pas suffisante pour atteindre les contrastes nécessaires à la détection de planètes géantes jeunes ou de disques circumstellaires. En effet, la correction de la turbulence atmosphérique, les télescopes et les optiques de instruments ne sont pas parfaits, ce qui crée des aberrations optiques résiduelles qui se traduisent dans les images sous la forme de speckles (tavelures en français, mais ce terme est peu utilisé) dont la taille caractéristique (λ/D) est la même que celle de la PSF des exoplanètes qui sont cachées dans les données. La Figure 1 présente un exemple typique d'image à haut-contraste prise avec un coronographe de type APLC (Soummer 2005). De plus, les aberrations à l'origine des speckles étant variables avec le temps (turbulence résiduelle, optique en mouvement, contraintes mécaniques sur les

optiques variant avec la température, etc) ces speckles ne sont pas statiques dans le temps (Soummer et al. 2007), ce qui rend leur estimation et leur soustraction complexe. Ils sont en général qualifiés de speckles *quasi-statiques*, et sont considérés comme la limitation principale pour l'imagerie à haut-contraste.

La solution la plus couramment employée pour discriminer les speckles par rapport au signal astrophysique d'intérêt est d'introduire une forme de diversité dans les données, puis de tirer parti de cette diversité connue lors de l'analyse des données. Les formes de diversité les plus utilisées sont la diversité angulaire (*Angular Differential Imaging*, ADI ; Marois et al. 2006) et la diversité spectrale (*Spectral Differential Imaging*, SDI ; Racine et al. 1999), mais il est également possible d'utiliser la polarisation (*Polarimetric Differential Imaging*), des étoiles de référence distinctes (*Reference Differential Imaging*, *Binary Differential Imaging*) ou même la diversité orbitale pour les planètes suffisamment proches de leur étoile (*Orbital Differential Imaging*). Différentes méthodes d'analyse des données sont ensuite utilisées pour tirer parti de ces différentes stratégies d'observation (Marois et al. 2006 ; Lafrenière et al. 2007a ; Thatte et al. 2007 ; Soummer et al. 2012 ; Mugnier et al. 2009 ; ...).

Cette courte introduction sur les techniques nécessaires au haut-contraste soulignent la nécessité de disposer d'une instrumentation spécifiquement développée pour offrir toutes les possibilités mentionnées précédemment. En Europe, l'instrument de seconde génération pour le VLT SPHERE (*Spectro-Polarimetric High-contrast Exoplanet REsearch* ; Beuzit et al. 2008) a été développé dans cette optique, avec l'objectif de fournir à la communauté un imageur d'exoplanète performant qui permette de sonder des gammes de séparation orbitale et de masse de planètes inaccessible à la génération précédente d'instruments (VLT/NaCo ; Gemini-N/NIRI ; Gemini-S/NICI ; HST/NICMOS ; Keck/NIRC2).

L'instrument SPHERE a été développé par un consortium de 12 instituts européens, dont le Laboratoire d'Astrophysique de Marseille. Ses principales caractéristiques sont résumées ci-dessous :

- Une optique adaptative extrême basée sur un analyseur de Shack-Hartmann filtré de 40x40 sous-pupille, un miroir déformable offrant 1300 actionneurs dans la pupille, et fonctionnant à une fréquence de 1.2 kHz (Fusco et al. 2006 ; Petit et al. 2014 ; Sauvage et al. 2014),
- Des optiques communes de très haute qualité de fabrication (Hugot et al. 2012 ; Dohlen et al. 2016),
- Différents types de coronographes fonctionnant dans le visible et dans l'infrarouge proche (Boccaletti et al. 2008 ; Guerri et al. 2011),
- 3 sous-systèmes scientifiques :
 - ZIMPOL (Thalmann et al. 2008) : un polarimètre fonctionnant dans le domaine visible avec un champ de 3" ;
 - IFS (Claudi et al. 2008) : un spectrographe à intégrale de champ couvrant les bandes YJ ou YJH à des résolutions spectrales de 50 ou 30 et dans un champ de 1.7"x1.7",
 - IRDIS (Dohlen et al. 2008) : un spectro-imageur et polarimètres couvrant les bandes Y, J, H et Ks avec un champ de ~10".

Le développement de SPHERE s'est étendu sur plus d'une dizaine d'années, et a atteint son apogée en 2014 avec la mise sur le ciel à Paranal et l'entrée en service début 2015. Depuis cette date, l'instrument offre des performances sans précédent qui ont déjà mené à la publication de plus de 90 résultats scientifiques directement liés aux observations avec SPHERE (<http://telbib.eso.org/?instrument%5B%5D=SPHERE>).

Dans le contexte du développement de SPHERE, j'ai mené des travaux de recherche en instrumentation avec pour but de répondre à plusieurs grandes questions :

- (1) Comment détecter les planètes par imagerie différentielle ?**
- (2) Comment caractériser les planètes détectées ?**
- (3) Comment améliorer les capacités de détection ?**
- (4) Comment aller plus loin avec la prochaine génération de télescopes ?**

1.1.1 Détection des exoplanètes par imagerie différentielle : depuis les simulations jusqu'au ciel

Simulations réalistes pour l'estimation des performances

- **Vigan**, Moutou, Langlois, Allard, et al. ; 2010, MNRAS, 407, 71 : "[Photometric characterization of exoplanets using angular and spectral differential imaging](#)"

Mes travaux sur le mode *Dual-Band Imaging* (DBI) de IRDIS ont été réalisés au moyen du simulateur de données CAOS (Carillet et al. 2004) et d'un module spécifique pour SPHERE (Boccaletti et al. 2008) développé dans le cadre du projet SPHERE. Outre les nombreuses simulations pour tester des points spécifiques de performance, un travail majeur que j'ai accompli a été la simulation d'un jeu de données réaliste représentatives de 4 heures d'observation acquises dans de bonnes conditions (0.8" de seeing median, vent faible) en mode *Angular Differential Imaging* (ADI). Ces simulations réalistes m'ont permis :

- de démontrer que dans des conditions réalistes d'observation l'instrument IRDIS permettrait d'atteindre la spécification technique de performance en détection (10^{-6} de contraste à 0.5") ;
- d'effectuer une première estimation des performances photométriques de l'instrument, et d'étudier les implications en terme de caractérisation des planètes détectées avec ce mode d'observation. J'ai en particulier déterminé l'intérêt des différentes paires de filtres DBI implémentées dans IRDIS pour la caractérisation en utilisant une métrique basée sur le contenu scientifique apporté par les observations à différentes longueurs d'onde.

Ces simulations ont validé les estimations de performance faites durant la phase A du projet avant de démarrer les intégrations en laboratoire. Elles ont également permis de débiter le travail de développement des futurs outils d'analyse des données IRDIS.

Performances du mode IRDIS-DBI en laboratoire

- **Vigan**, Langlois, Dohlen, Zurlo, Moutou, et al. ; 2014, SPIE, 9147 : "[SPHERE/IRDIS: final performance assessment of the dual-band imaging and long slit spectroscopy modes](#)"
- Langlois, **Vigan**, Dohlen, Moutou, et al. ; 2014, SPIE, 9147 : "[Infrared differential imager and spectrograph for SPHERE: performance assessment for on-sky operation](#)"

Le mode principal d'observation avec IRDIS, le mode *Dual-Band Imaging* (DBI ; Vigan et al. 2010), est un mode d'imagerie différentielle spectrale où deux images sont acquises simultanément à deux longueurs d'ondes proches placées de part et d'autre de bandes d'absorptions attendues dans le spectre des exoplanètes que l'on cherche à détecter (e.g. Racine et al. 1999 ; Marois et al. 2000). Pour que cette méthode fonctionne de manière optimale, les aberrations différentielles entre les deux voies optiques de l'instrument doivent être minimisées au maximum pour éviter la création de speckles différents entre les deux images sur le détecteur. Les filtres DBI de IRDIS ont été spécifiquement développés pour offrir un niveau d'aberration différentielle <10 nm *root mean square* (RMS) (Dohlen et al. 2008b), qui est la limite qui avait été fixée durant la phase A pour permettre d'atteindre la spécification technique de contraste (10^{-6} à 0.5", limite à 1σ). L'accent a été mis sur la qualité de ces filtres car ils constituent la principale optique "différentielle" entre les deux voies optiques, tous les autres filtres étant communs. Les deux miroirs non-communs dans IRDIS sont polis à 1-3 nm RMS, ce qui rend leur contribution négligeable dans le budget d'erreur par rapport aux filtres DBI.

La validation de IRDIS a été réalisée au cours d'une quinzaine de campagnes de test à l'IPAG entre 2012 et 2014. Je n'aborderai ici que les aspects de validation de performance, bien que la validation de l'instrument ait également concerné de multiples autres aspects (spécification et validation des *templates* d'observation, paramétrage du détecteur, validation du *dithering motion stage*, détermination du centrage de l'étoile, etc). La plupart des tests ont été réalisés soit sur source interne, sans turbulence, soit avec le simulateur de télescope, qui permettait simuler de la turbulence entre 0.5" et 1.0" et des vitesses de vent entre 0 et 20 m/s. Suivant les périodes, l'acquisition et le centrage de l'étoile, l'acquisition des données, le contrôle des filtres étaient effectués manuellement ou au moyen de *templates* d'observation, l'ensemble de l'automatisation n'ayant été réalisé que vers la mi-2013.

La Figure 2 présente des données obtenues avec le simulateur de télescope dans des conditions classiques d'observation (seeing 0.8", vent 12 m/s) avec la paire de filtre DBI H23 en bande H. L'image de droite montre la soustraction spectrale des deux images IRDIS. Cette soustraction est réalisée en optimisant le décalage

entre les deux images ainsi qu'un facteur global de flux afin de minimiser les résidus dans une zone comprise entre 5 et 20 λ/D (Vigan et al. 2014), qui est la zone principale dans laquelle sont recherchées les planètes. On note la présence de speckles résiduels relativement brillants dans cette zone, de même qu'une asymétrie prononcée dans ces résidus. Encore aujourd'hui une incertitude demeure sur l'origine de certaines de ces structures qui ne sont pas retrouvées dans les données obtenues sur le ciel. Le simulateur de télescope est suspecté d'avoir introduit une quantité importante d'aberrations (notamment chromatiques) qui ont potentiellement limité les performances en laboratoire.

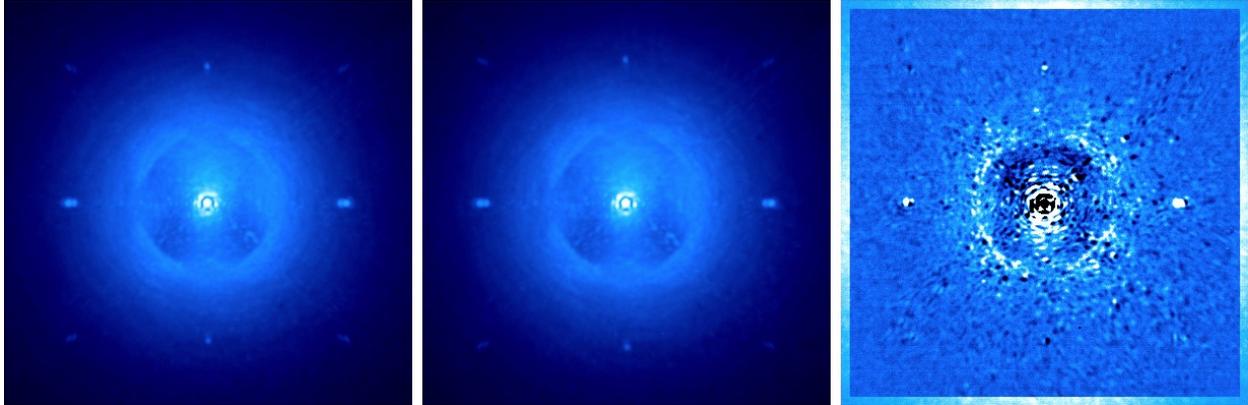


Figure 2 – Données IRDIS-DBI prises en laboratoire avec le simulateur de turbulence dans la paire de filtre H23 avec IRDIS (gauche et centre). L'image de droite montre le résultat de l'analyse SDI avec les deux longueurs d'onde qui permet de soustraire les speckles. Bien que prises simultanément, les images aux deux longueurs d'onde ne se soustraient pas parfaitement du fait de la présence d'aberrations différentielles entre les deux voies optiques de IRDIS, ainsi que d'aberrations chromatiques en amont de IRDIS (probablement dues à des effets de diffraction de Fresnel introduits par le simulateur de télescope utilisé à Grenoble durant les intégrations).

La Figure 3 présente des limites de détection obtenues en laboratoire lors de tests réalisés dans les meilleures conditions possibles en laboratoire. Le plot de gauche illustre les performances sur source interne, avec simulation d'une pseudo-séquence ADI dans laquelle le dérotateur a été tourné de 30° pour simuler l'ADI. Bien que non-réaliste du point de vue observationnel, cette séquence permet d'estimer le gain attendu en combinant des images prises à différents angles parallactiques. Ce test montre clairement qu'en SDI simple la spécification technique est atteinte, et qu'en SDI+ADI la performance finale se trouve entre le but ultime et la spécification, i.e. entre 10^{-7} et 10^{-6} à 0.5". En présence de turbulence atmosphérique (plot de droite), la performance en contraste est évidemment légèrement dégradée du fait de la présence des speckles atmosphériques résiduels, mais cette perte est relativement faible en mode SDI. Ce type de séquence a permis d'estimer que les performances finales sur le ciel, en mode SDI+ADI, permettrait d'atteindre au moins la spécification technique sur des étoiles brillantes.

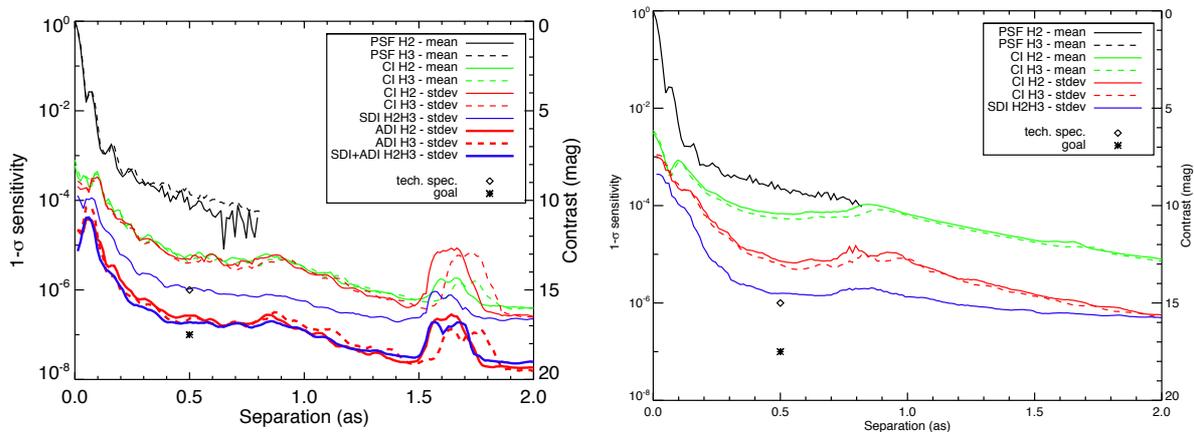


Figure 3 - Estimation des performances en détection du mode IRDIS-DBI sans (gauche) et avec (droite) simulation de turbulence (0.8"). Dans le cas sans turbulence, une pseudo-séquence ADI a été simulée en introduisant un offset de 30° sur le dérotateur de l'instrument. Les résultats de différentes analyses sont représentés, de même que le niveau de la spécification techniques (10^{-6}) et du but ultime (10^{-7}) à 0.5". Les résultats pre-commissioning de SPHERE sont présentés dans Vigan et al. (2014).

Les tests ont cependant montré que les simulations présentées dans Vigan et al. (2010) étaient relativement optimistes, d'un facteur entre 5 et 10. Cette constatation soulève donc la question de comprendre l'origine de cette différence, dans l'optique de futurs développements instrumentaux. Mon avis est que les simulations étaient sans doute trop idéales quant à la stabilité temporelle des aberrations, qui sont un paramètre essentiel de la performance finale. Les données ZELDA prises avec SPHERE (voir Sect. 1.1.3) devraient permettre de mieux comprendre cette variation temporelle et d'affiner notre modèle de l'instrument.

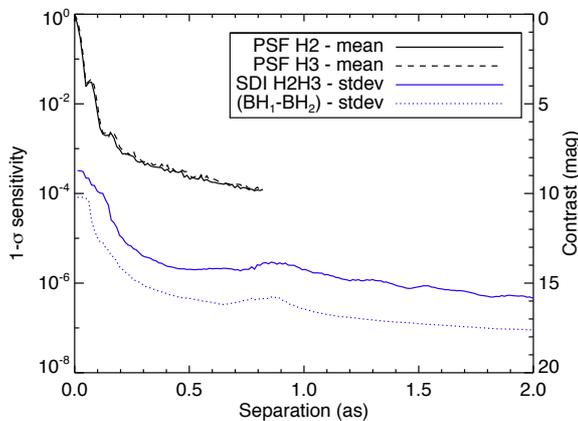


Figure 4 – Mesure de bruit résiduel dans une soustraction d'image H2-H3 comparée à une soustraction de deux images identiques prises avec le filtre large-bande BH. Cette deuxième mesure représente la limite absolue de performance fixée par les aberrations différentielles entre les deux voies de IRDIS (hors filtres de la roue dual-band). Le fait que la soustraction H23 n'atteigne pas cette limite démontre la présence d'aberrations chromatiques en amont de IRDIS qui vont limiter les performances absolues en détection.

Un autre point intéressant qui a été étudié en laboratoire est l'intérêt de l'échange (*swap*) des filtres DBI. En effet, il était à l'origine prévu d'échanger régulièrement les filtres H23 par une autre paire de filtres inversée H32. Le but était de permettre de mieux discriminer la composante purement instrumentale des aberrations par rapport à un objet réel. Cependant, les tests en laboratoire ont montré (Figure 4) que la soustraction des images H2-H3 ne permet pas d'atteindre la limite fondamentale de l'instrument, ici obtenue en soustrayant deux images identiques prises dans le filtre large-bande H. Ce résultat, jamais publié, est particulièrement intéressant car il démontre la présence d'aberrations chromatiques limitant la performance.

Performances du mode IRDIFS en laboratoire

- Zurlo, **Vigan**, Mesa, Gratton, Moutou, et al. ; 2014, A&A, 572, 85 : “*Performance of the VLT Planet Finder SPHERE. I. Photometry and astrometry precision with IRDIS and IFS in laboratory*”

SPHERE inclut deux modules scientifiques dans le proche infrarouge qui sont dédiés à la détection et la caractérisation des planètes géantes : l'IFS et IRDIS. Ces deux modules ont été conçus pour fonctionner en parallèle, l'IFS étant dédié à l'observation de la partie bleue du spectre (YH ou YJH), et IRDIS à la partie rouge du spectre (H ou K). Ce mode d'observation IRDIFS est un mode de relevé (*survey*) qui permet de gagner significativement en efficacité d'observation par rapport à d'autres instruments. Par exemple, l'instrument GPI (Macintosh et al. 2015) est équipé d'un IFS qui ne couvre qu'une seule bande spectrale à la fois. Les modules IFS et IRDIS ont été développés et testés indépendamment par l'INAF/OAPD et le LAM, avant d'être intégrés ensemble sur le banc SPHERE à l'IPAG en 2012.

Les performances techniques de l'IFS ont été explorées par les personnels de l'INAF/OAPD ayant développé l'IFS, et je n'ai pas été impliqué significativement dans cette validation. L'étudiante en thèse que j'ai largement co-encadré, A. Zurlo, s'est intéressée aux aspects de performance du mode IRDIFS directement reliés aux problématiques astrophysiques : la précision sur la photométrie et l'astrométrie des planètes détectées. Elle a pour cela effectué un travail considérable d'analyse sur des séquences IRDIFS prises en parallèles à l'IPAG en 2013 avec le simulateur de télescope. L'injection de fausses planètes dans les données, puis l'analyse des séquences au moyen des dernières techniques basée sur l'analyse en composantes principales (PCA), lui ont permis d'estimer les contrastes accessibles pour de la caractérisation, et de mesurer de manière quantitative les précisions astrométriques et photométriques attendues en mode IRDIFS en fonction du SNR des planètes (Zurlo et al. 2014). Une partie de cette analyse est présentée sur la Figure 5.

Les conclusions principales de son étude ont été que la précision astrométrique accessible à l'instrument SPHERE serait de l'ordre de 1 mas pour des planètes comme β Pic b ou les planètes du système HR8799, et les précisions photométriques sont de l'ordre de 0.2 mag pour ces planètes. Son étude reste optimiste car

elle est basée sur des données en laboratoires obtenues dans des conditions très stables (turbulence et vent constants), mais comme présenté plus haut, les performances en laboratoire étaient également biaisées par la qualité intrinsèque du simulateur de télescope, de même que par d'autres aspects de performance qui n'étaient pas représentatifs des conditions à Paranal (par exemple la température du banc, qui avait un impact direct sur les aberrations statiques introduites par le DM de l'instrument). Ces valeurs ont été par la suite largement validées sur le ciel, à un facteur 2 près dans le cas de β Pic b (voir Lagrange et al. 2019).

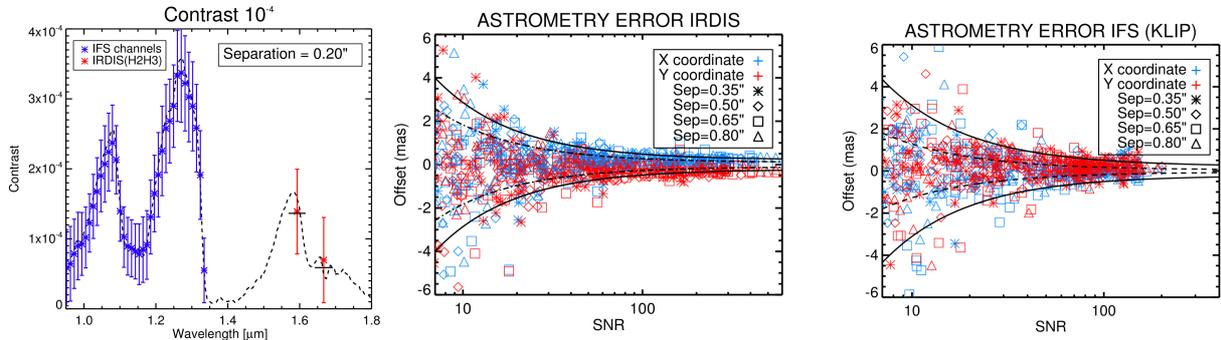


Figure 5 - Etude sur l'estimation des performances en photométrie et en astrométrie pour les observations IRDIFS. Cette étude, présentée dans Zurlo et al. (2014), est basée sur l'introduction de fausses planètes à différents niveaux de contraste dans des données obtenues en laboratoire avec turbulence simulée.

Validation de IRDIS sur le ciel

- Dohlen, **Vigan**, Mouillet, Wildi, et al. ; 2016, SPIE, 9908 : "*SPHERE on-sky performance compared with budget predictions*"

La réintégration de SPHERE à Paranal a eu lieu en mars-avril 2014, avec une première lumière de l'instrument le 4 mai 2014 (*May the fourth be with you...*). Les fonctionnalités de l'instrument ont été testées et validées (pour la plupart) au cours de 4 campagnes de commissioning s'étalant de mai à octobre 2014. De même que précédemment, je vais axer cette section sur la validation des performances plus que sur l'ensemble des autres aspects.

Le mode DBI de IRDIS a été entièrement validé grâce à de multiples séquences d'observation dans différents filtres et différentes conditions d'observation. La Figure 6 présente les performances en détection de IRDIS sur une étoile brillante (Altaïr, $H=0.2$) observée dans des conditions d'observation moyenne avec une rotation de champ de l'ordre de 30° . Le graphique montre les performances en ADI et en SDI+ADI. Contrairement au laboratoire où l'ADI était difficilement simulable, l'ADI devient sur le ciel l'option par défaut pour les observations à grand contraste, et les performances en SDI seul ne sont pas présentées. Ce jeu de données montre que IRDIS atteint pratiquement la spécification technique de 10^{-6} à $0.5''$ en ADI seul, et que cette spécification est dépassée lorsqu'on combine SDI et ADI. Il est cependant nécessaire de souligner que l'analyse SDI effectuée ici suppose un flux nul de la planète dans le second canal spectral, ce qui n'est pas le cas dans la réalité et va donc induire des biais dans la limite de détection et dans la photométrie (e.g. Vigan et al. 2010).

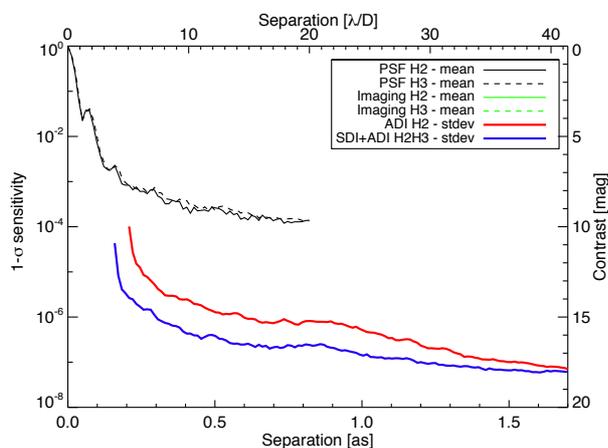


Figure 6 - Limites de détection obtenues sur l'étoile Altaïr lors du commissioning de SPHERE. Ces données obtenues dans des bonnes conditions d'observation sur une étoile brillante ($H=0.2$) et avec $\sim 30^\circ$ de rotation de champ permet une bonne estimation des performances de l'instrument. Il est intéressant de remarquer que la spécification (10^{-6}) à $0.5''$ est atteinte, ce qui valide la performance de SPHERE/IRDIS, mais le but ultime (10^{-7}) à cette séparation n'est pas atteint dans cette séquence.

Les performances en détection ont été explorées en fonction de la magnitude stellaire et des conditions d'observation. La performance en fonction de la magnitude est intimement liée aux performances de l'optique adaptative qui se dégradent également avec la magnitude. Cependant, dans la limite de performances quasi-optimales de l'OA ($V < 9$; Fusco et al. 2016), les performances en détection du mode DBI sont quasiment stables jusqu'à $H=4-5$ à $0.5''$, puis décroissent linéairement pour les magnitudes plus faibles où les bruits de photon et de *readout* commencent à dominer dans les images coronagraphiques. Les tests réalisés plus tard en 2015 ont montré que l'utilisation d'un coronographe n'est plus recommandé au-delà de $H=9-10$ car le gain apporté devient quasiment nul.

L'utilisation de l'ADI sur le ciel a permis d'explorer de manière plus détaillée les performances de cette stratégie d'observation. Les prédictions de la phase A montraient un gain significatif des performances autour du passage au méridien du fait de la faible variation des aberrations (faible rotation des optiques) dans cette zone. Cette prédiction n'a malheureusement pas pu être confirmée directement à partir des observations de commissioning, mais d'autres moyens basés sur l'analyse de surface d'onde (ASO) ZELDA permettront de vérifier ces prédictions prochainement (Sect. 1.1.3). Un autre point relié en partie au précédent concerne le gain en contraste en fonction de la rotation de champ. Il était attendu que l'utilisation de l'ADI apporterait un gain significatif pour des images peu séparées dans le temps du fait de la similitude des aberrations (à performances d'AO constantes), puis que le gain suivant serait proportionnel à la racine du nombre d'éléments de résolution couverts par la rotation. Cette supposition est un des points centraux de l'estimation des performances dans l'*Exposure Time Calculator* que j'ai contribué à calibrer.

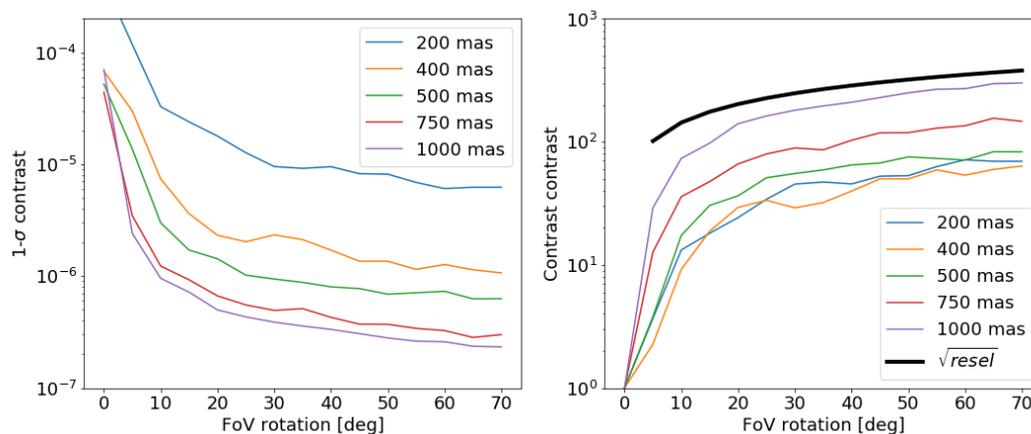


Figure 7 - Analyse de l'amélioration du contraste atteint à différentes séparations angulaires pour un jeu de données obtenues sur l'étoile tau Ceti dans des conditions standard d'observation (seeing $0.8-0.9''$). Après un gain significatif pour quelques degrés de rotation de champ, le gain suit ensuite une évolution en racine du nombre d'éléments de résolution couverts par la rotation.

La Figure 7 présente les résultats d'une analyse que j'ai effectué pour confirmer ces prédictions avec des données de commissioning : la figure montre le gain en contraste à différentes séparations angulaires en fonction de la rotation de champ couverte par l'observation. On observe deux régimes distincts : le premier, obtenu pour des faibles rotations de champ ($< 10^\circ$), montre un gain en contraste de l'ordre de facteurs 10 à 50 et correspond à la soustraction d'images proches dans le temps, et donc très fortement corrélées ; le second, lorsque la rotation de champ s'accroît, montre un gain en contraste proportionnel à la racine du nombre d'éléments de résolution couverts par la rotation, comme attendu. Il s'agit à ma connaissance de la première validation de cette propriété dans un instrument à haut-contraste.

Performances ultimes du mode IRDIFS sur le ciel

- **Vigan**, Gry, Salter, Mesa, Homeier, Moutou, Allard ; 2015, MNRAS, 454, 129 : "*High-contrast imaging of Sirius A with VLT/SPHERE: Looking for giant planets down to one astronomical unit*"

Depuis la mise en service de SPHERE en 2015, le mode IRDIFS est utilisé de manière routinière avec une gamme variée de performances dues à la grande variété d'étoiles observées et de conditions d'observation. La performance ultime de ce mode a cependant pu être explorée de manière concrète sur un jeu de données exceptionnel qui a été acquis pendant la phase de *Science Verification* de l'instrument en décembre 2014.

Ces données ont été obtenues dans un programme d'observation de 3 heures sur l'étoile Sirius proposé par le LAM, et ayant pour but la recherche d'un compagnon planétaire autour de cette étoile. En effet, des perturbations astrométriques dans le système Sirius A-B ont mené Benest & Duvent (1995) à prédire l'existence d'un compagnon de $\sim 50 M_{Jup}$ dans le système. Bien que les observations de Thalmann et al. (2011) aient permis d'exclure un compagnon aussi massif, leurs observations non-coronographiques étaient saturées en-dessous de $1''$, ce qui ne leur a pas permis d'explorer la partie la plus interne du système.

Les observations SPHERE que nous avons obtenu ont été prises dans des conditions exceptionnelles et sur l'étoile la plus brillante du ciel, ce qui a contribué à faire de ce jeu de données une référence pour l'estimation des performances absolues du mode IRDIFS. Sur l'ensemble des 2h30 d'observation, le seeing moyen a été de l'ordre de $0.4''$, ce qui constitue des valeurs relativement exceptionnelles pour Paranal ($<10\%$ du temps). Dans ces conditions, la magnitude extrême de l'étoile ($R=-1.46$) a permis au système d'OA de montrer tout son potentiel en assurant une correction quasi-parfaite tout au long des observations (rapport de Strehl $> 90\%$). De plus, la déclinaison de Sirius (-16°) a permis d'obtenir une rotation de champ de 106° , ce qui est très largement au-dessus de la moyenne obtenue pour la plupart des étoiles observées dans le GTO et dans les programmes en temps ouvert.

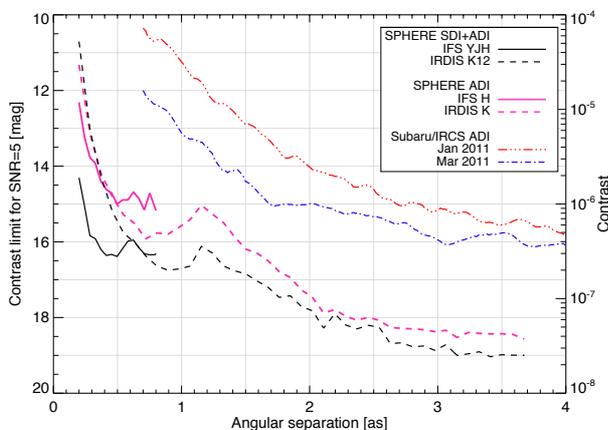


Figure 8 - Limites de détection obtenues sur Sirius avec SPHERE en mode IRDIFS, comparées à de précédentes données obtenues avec Subaru/IRCS. Les limites SPHERE sont présentées suivant deux analyses ADI-seul et SDI+ADI. L'utilisation de la diversité spectrale est essentielle pour atteindre les plus grands contrastes aux plus petites séparations angulaires, mais elle peut avoir un impact significatif sur la sensibilité aux très petites séparations comme le montre la limite IRDIS, à cause des effets d'auto-soustraction du signal planétaire. L'IFS est moins sensible à cet effet du fait de la large gamme spectrale couverte par l'instrument (ici YJH).

Les observations de Sirius ont été analysées au moyen d'un pipeline que j'ai développé pour l'exploitation des données IRDIFS de SPHERE (Vigan et al. 2015). En combinant SDI et ADI au moyen de la PCA, j'ai soustrait les speckles et j'ai utilisé l'injection de fausses planètes pour estimer les limites de détection (Figure 8). Ces limites représentent le plus grand contraste jamais atteint sur le ciel : quelques 10^{-7} à $0.5''$. Cette analyse a aussi montré toute l'importance de l'utilisation de la diversité spectrale pour la soustraction des speckles, puisque le gain en sensibilité est de l'ordre de 1.5 mag à $0.5''$ par rapport au cas ADI seul. Dans cette publication, j'ai également étudié l'impact de la conversion des limites de détection en masse en utilisant une injection de planètes avec spectre réaliste plutôt qu'une simple conversion du contraste moyen. Cet aspect est particulièrement important pour un IFS du fait des biais photométriques induits par l'analyse SDI (Vigan et al. 2010 ; Maire et al. 2014 ; Rameau et al. 2015). Mon étude a montré qu'au premier ordre, cette conversion est valide pour estimer la sensibilité en masse, mais une étude plus approfondie serait nécessaire car l'impact à l'échelle d'un grand relevé en imagerie directe est potentiellement considérable sur les résultats statistiques finaux.

1.1.2 Caractérisation des exoplanètes par spectroscopie longue-fente à haut-contraste

Spectroscopie longue-fente coronographique : un mode unique au monde

- **Vigan**, Langlois, Moutou, Dohlen ; 2008, A&A, 489, 1345 : "*Exoplanet characterization with long slit spectroscopy*"

La caractérisation des compagnons détectés avec SPHERE peut être effectuée au premier ordre avec les spectres de l'IFS et à partir des points de photométrie IRDIS. Cependant, ces données à basse résolution sont limitées car elles ne donnent accès qu'aux grandes bandes d'absorption moléculaires dans les bandes YJHK. Ce point avait été identifié très tôt dans la conception de IRDIS et il avait été proposé d'y remédier par l'ajout d'un mode de spectroscopie longue fente (LSS pour *Long-Slit Spectroscopy*) couplé à un coronographe de

Lyot (Vigan et al. 2008). Cependant, afin de simplifier le design optique, il a été proposé de fusionner le coronographe avec la fente dans le plan focal du masque coronographique, et de fusionner le stop de Lyot et l'élément dispersif dans le plan pupille relayé. Ce design élégant a permis d'inclure ce mode dans l'instrument et offrir des performances tout à fait intéressantes pour la caractérisation de compagnons de faible masse comme je l'ai démontré au cours de ma thèse dans Vigan et al. (2008).

Un point important de ce mode qui a été peu mis en avant dans la phase de design de l'instrument est la présence d'un mode à moyenne résolution, $R=350$. Cette résolution fait du mode LSS de IRDIS un mode unique au monde car tous les instruments d'imagerie à haut-contraste actuels n'offrent que des IFS avec des résolutions au maximum de $R=90-100$. Cet avantage en fait maintenant un des modes privilégiés de SPHERE pour la caractérisation de compagnons ayant un contraste moyen (Hinkley et al. 2015 ; Mesa et al. 2016 ; Bonavita et al. 2017 ; Cheetham et al. 2018).

Validation sur le ciel avec VLT/NaCo

- **Vigan**, Bonnefoy, Chauvin, Moutou, Montagnier ; 2012, A&A, 540, 131 : "[High-contrast spectroscopy of SCR J1845-6357 B](#)"

Mon étude sur le mode LSS (Vigan et al. 2008) a présenté non-seulement une estimation des performances, mais également une méthode d'analyse des données de ce mode. Celle-ci est basée sur la soustraction différentielle spectrale proposée par Thatte et al. (2007) mais adaptée aux spécificités du mode LSS. Afin de tester cette méthode d'analyse, j'ai proposé en 2009 d'observer un compagnon de faible masse avec VLT/NaCo, un instrument offrant une optique adaptative et un spectrographe à fente. Cependant NaCo n'offre pas de coronographe dans son mode LSS. Afin de se rapprocher au plus près de la configuration de IRDIS, j'ai donc proposé une configuration instrumentale particulière permettant de se retrouver avec des speckles se déplaçant quasi-radialement (Figure 9), ce qui permet leur estimation et leur soustraction avec la méthode que j'ai proposée pour IRDIS.

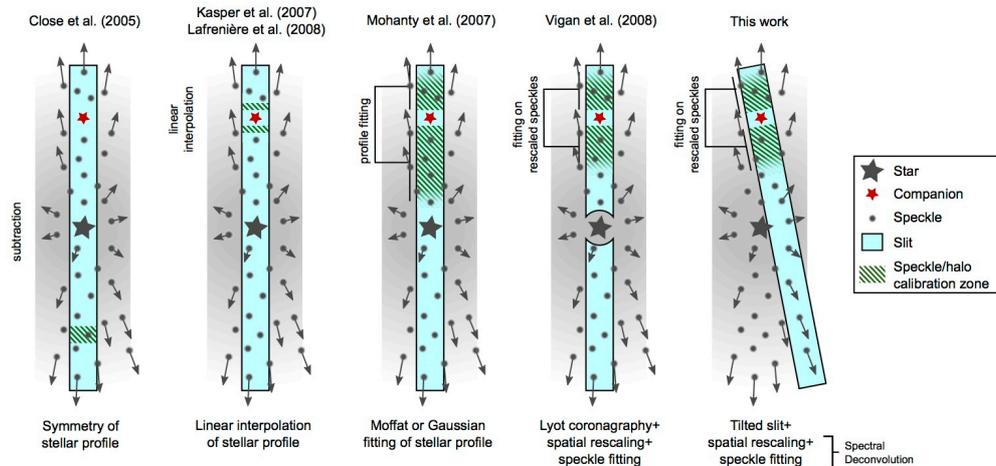


Figure 9 – Illustration des différentes méthodes d'estimation et de soustraction des speckles dans les données de spectroscopie à "haut-contraste" publiées dans la littérature. La méthode proposée à droite (Vigan et al. 2012a) permet de s'approcher au plus près de la configuration disponible dans SPHERE/IRDIS.

Des données ont été obtenues en octobre 2010 sur le compagnon naine brune en orbite autour de SCR J1845-6357 (Vigan et al. 2012a). Ces données ont permis de démontrer la validité de la méthode que j'ai proposé, mais elle a également mis en lumière les difficultés induites par l'auto-soustraction du signal du compagnon (Figure 10). Ce problème particulièrement important se rencontre également avec IRDIS, et j'ai proposé en 2016 des solutions pour y remédier (voir Sect. 1.1.3). Malgré la présence de ces biais, la méthode présente l'avantage de permettre de long temps d'exposition sans saturation du détecteur, ce qui permet d'augmenter la dynamique dans les données.

Les données obtenues sur le compagnon SCR J1845-6357 B présentent un rapport signal-à-bruit bien meilleur que les données précédemment obtenues par Kasper et al. (2007). Elles n'ont cependant pas permis d'apporter un gain significatif sur la caractérisation de ce compagnon. Nous avons pu confirmer son type spectral tardif (T5-6), sa température effective à $1000 \pm 100 \text{K}$, et obtenir une estimation semi-empirique de son rayon à $0.7 \pm 0.1 R_{\text{Jup}}$, ce qui est en accord avec les modèles évolutifs aux âges supérieurs à 1.5 Gyr.

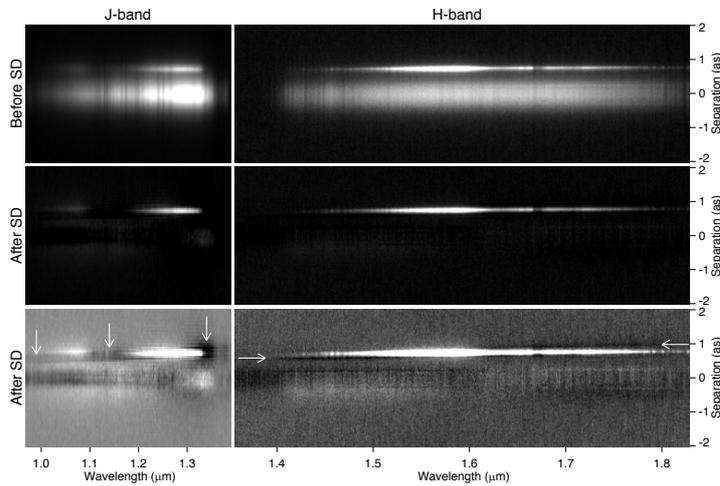


Figure 10 – Données avant et après soustraction des speckles et du halo par soustraction différentielle spectrale. Même dans une configuration non-optimale telle que celle adoptée dans VLT/NaCo, la méthode est efficace pour soustraire la majeure partie du halo et des speckles. Cependant les flèches blanches mettent en lumière les effets d'auto-soustraction qui biaisent l'estimation du spectre. Cette problématique se retrouve dans toutes les données d'imagerie et de spectroscopie à haut-contraste.

Spectroscopie longue-fente apodisée : un nouveau concept pour aller encore plus près

- **Vigan**, N'Diaye, Dohlen ; 2013, A&A, 555, 49 : “Apodization in high-contrast long-slit spectroscopy. Closer, deeper, fainter, cooler”
- **Vigan**, N'Diaye, Dohlen, Beuzit, Costille, et al. ; 2016, A&A, 586, 144 : “Apodization in high-contrast long-slit spectroscopy. II. Concept validation and first on-sky results with VLT/SPHERE”

L'implémentation d'un masque coronographique fusionné avec la fente dans le plan focal est un concept élégant mais qui souffre de performances dégradées du fait de la sous-optimisation du coronographe, notamment dans le plan pupille de Lyot. Les simulations numériques présentées dans Vigan et al. (2008) ont en effet montré qu'aux très petites séparations angulaires (0.2"-0.5"), le signal est dominé par des anneaux de diffraction résiduels particulièrement brillants (Figure 11 en haut à gauche, simulation LSC issue de Vigan et al. 2013) qui ont pour origine l'absence de masquage du miroir secondaire par le stop de Lyot. Une des contraintes de ce mode est que les observations doivent être effectuées en mode champ stabilisé pour maintenir la PSF du compagnon dans la fente. Il n'est donc pas possible de se baser sur de la diversité angulaire pour la soustraction des speckles, ce qui pousse dans deux directions complémentaires : 1) améliorer au maximum l'atténuation de la diffraction pour obtenir un contraste brut aussi grand que possible, et 2) améliorer la correction des aberrations internes non-communes pour diminuer le niveau des speckles quasi-statiques (voir Sect. 1.1.3).

Pour améliorer les performances du coronographe dans ce mode, j'ai démarré une collaboration avec Mamadou N'Diaye qui a proposé le *Stop-Less Lyot Coronagraph* (SLLC ; N'Diaye et al. 2007). Ce concept est basé sur un apodiseur gris qui permet une atténuation de la diffraction sans nécessité de stop de Lyot dans un plan pupille relais. Le masque coronographique dans le plan focal n'est alors plus utilisé que pour éviter la saturation du détecteur. J'ai proposé d'utiliser le SLLC pour améliorer les performances brutes en contraste du mode LSS (Vigan et al. 2013). En effet, les simulations ont montré que l'énergie résiduelle dans le plan du stop de Lyot pour le mode IRDIS-LSS devient négligeable avec le SLLC, ce qui diminue les résidus de diffraction, permet une meilleure soustraction des speckles et par conséquent améliore l'extraction des spectres d'exoplanètes (Figure 11).

Un prototype d'apodiseur SLLC a été réalisé en 2013 puis installé dans SPHERE en 2014 pendant la réintégration de SPHERE à Paranal (Vigan et al. 2016a). Le prototype a été fabriqué par dépôt d'un oxyde de chrome sous forme de masque binaire permettant de produire le motif de transmission attendu pour l'apodiseur SLLC (Figure 12). Cette technologie est la même que celle employée pour les apodiseurs utilisés pour les coronographes de Lyot apodisés implémentés dans SPHERE et GPI (Martinez et al. 2009). La transmission minimale de ce prototype, qui est un des points clé de la performance, étant en-dehors des spécifications, un second prototype produit par dépôt d'aluminium a également été fabriqué. En effet, l'oxyde de chrome s'est révélé être trop transparent dans le proche-infrarouge et n'a pas permis d'atteindre une transmission de 10^{-4} du champ dans les zones supposées être quasi-opaques (les *microdots*).

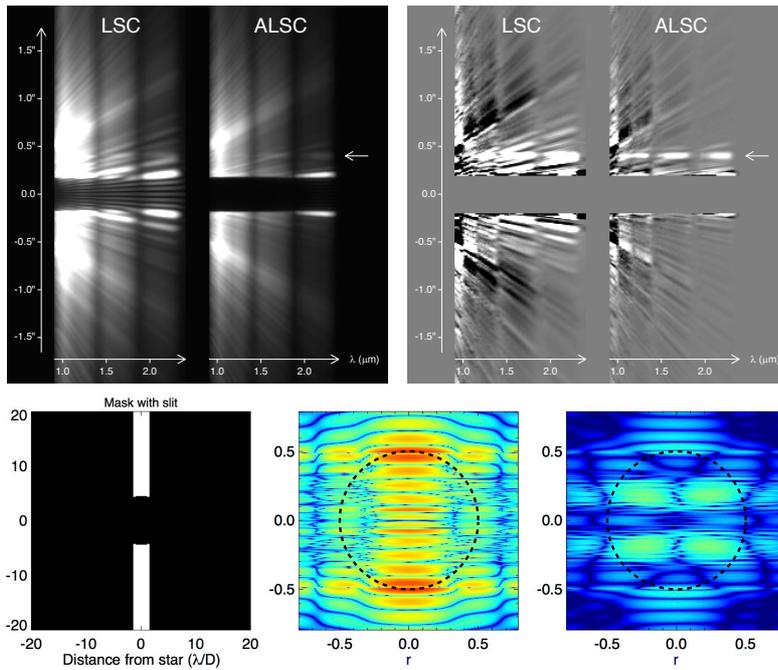


Figure 11 – Haut : résultats des simulations de données sans (LSC) et avec (ALSC) apodiseur avant soustraction des speckles (gauche) et après soustraction (droite) en utilisant la méthode décrite dans Vigan et al. (2008). L'utilisation de l'apodiseur SLLC permet un gain en contraste d'environ 2 mag aux petites séparations ($<0.3''$) en bande H. Bas : simulation de l'intensité dans le plan pupille post-coronographique dans le cas d'un masque+fente sans (centre) et avec (droit) apodiseur SLLC. Le cercle en tirets noirs représente la taille du stop de Lyot implémenté dans IRDIS. On voit que dans le cas masque+fente sans apodiseur, le stop de Lyot laisse passer une quantité non-négligeable d'énergie résiduelle. Cette énergie résiduelle et l'absence de stop pour l'obstruction centrale sont à l'origine de la diffraction résiduelle aux petites séparation

Le second prototype en aluminium s'est révélé bien meilleur en termes de transmission des *microdots*, avec des valeurs quasiment dans la spécification. C'est finalement celui-ci qui a été installé dans l'instrument de manière définitive. La transmission n'était cependant pas exactement dans les spécifications et a montré la difficulté à réaliser des apodiseurs avec une très faible transmission dans le proche infrarouge. Cette difficulté avait déjà été mise en évidence par Sivaramakrishnan et al. (2009) dans le cadre du projet GPI. Nos mesures sur cet apodiseur binaire ont permis de montrer que la théorie des apodiseurs binaires développée par Dorrer & Zuegel (2007) n'est pas satisfaite dans les zones où la transmission de l'amplitude du champ est inférieure à 15%. Il serait dès lors intéressant d'initier de nouveaux développements en termes de simulation et d'expérimentation dans ce domaine pour définir les domaines de validité de la théorie de Dorrer & Zuegel (2007), et éventuellement identifier les modifications nécessaires pour permettre la conception d'apodiseurs répondant exactement aux spécifications. Cette problématique est importante dans le cadre de futures missions spatiales dédiées au très grand contraste qui pourraient embarquer des coronographes de Lyot à pupille apodisée (N'Diaye et al. 2016b).

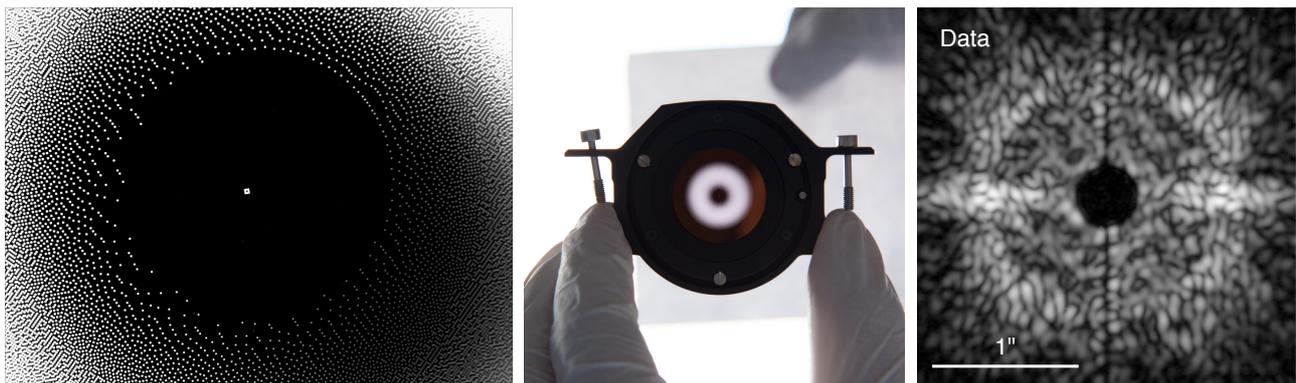


Figure 12 – Gauche et centre : photos du premier prototype d'apodiseur SLLC qui a été réalisé pour SPHERE. La transmission minimale de ce premier prototype réalisé par dépôt d'un oxyde de chrome ne s'étant pas révélée dans les spécifications, un second prototype réalisé par dépôt d'aluminium a été réalisé et finalement installé dans l'instrument. Droite : premières données prises en mode imagerie avec l'apodiseur SLLC dans SPHERE. Ces données ont été prises avec un coronographe de Lyot classique à masque suspendu.

Les premières données obtenues dans SPHERE en imagerie sont présentées à droite de la Figure 12, et les courbes de contraste associées sur la Figure 13. Les données en imagerie ont montré des performances sur source interne tout à fait en accord avec ce qui était attendu d'après les simulations pour un niveau d'aberrations statiques équivalent à celui de SPHERE. Nous avons ainsi démontré que sans avoir besoin d'un

stop de Lyot, l'apodiseur permet de supprimer complètement la partie cohérente du champ et d'atteindre le régime de contraste limité par les speckles à partir de $5\lambda/D$. Cette performance est cependant atteinte au prix d'une apodisation très « agressive » qui ne transmet que 30% du flux en intensité. De plus, au moyen de mesures de aberrations d'amplitude et de phase faites avec ZELDA, nous avons pu décomposer les sources d'erreur sur le contraste (Figure 13, droite) et montrer que la limitation principale constitue les aberrations de phase (~ 35 nm RMS dans SPHERE). Cette décomposition du budget d'erreur, effectuée pour la première fois, est particulièrement intéressante pour identifier les limitations fondamentales de l'instrument et les voies possibles d'amélioration : une diminution des aberrations de phase, par exemple via une compensation des NCPA, permettrait de manière quasi-immédiate un gain d'un facteur 10 dans la gamme 0.2-0.6".

En plus de données sur source interne avec le SLLC, j'ai obtenu en 2015 des données sur le ciel en mode LSS (Figure 14) qui ont permis de tester le mode SLLC apodisé en conditions réelles. Les données obtenues avec et sans SLLC montrent des différences identiques à celles observées dans les simulations de Vigan et al. (2013) et confirment le gain en contraste attendu pour le mode SLLC+LSS. La comparaison des données aux simulations dans ce mode a également permis d'identifier le gain potentiel d'une correction fine des NCPA, et mes travaux ont définitivement démontré que le mode LSS par défaut est fondamentalement limité en termes de performance par la sous-optimisation du coronographe de ce mode

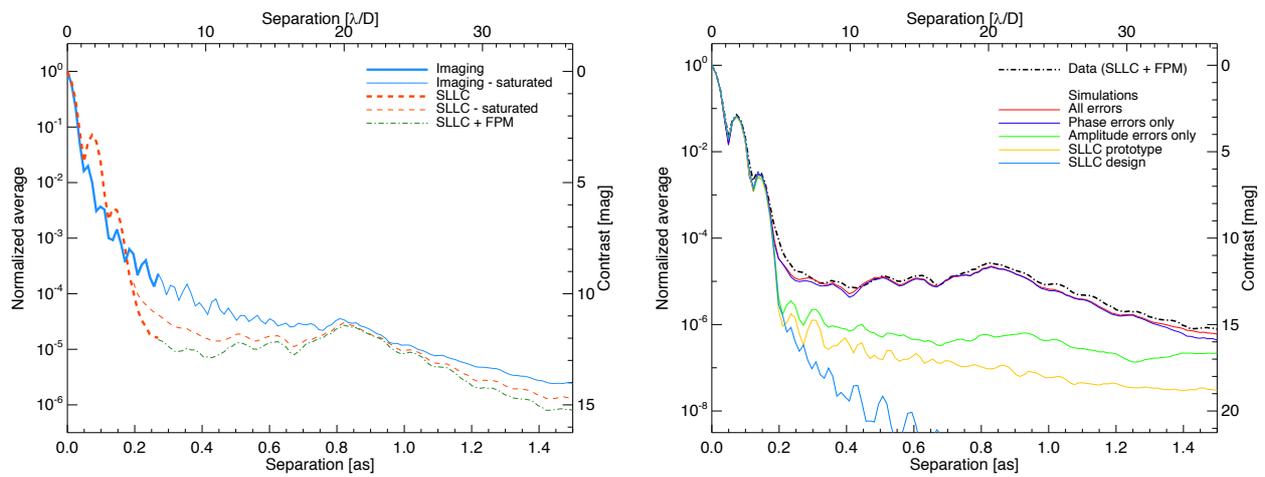


Figure 13 – Gauche : Courbes de contraste obtenues sur source interne en bande H avec et sans apodiseur SLLC. Droite : Comparaison des données à des simulations incluant différents termes d'erreur. La correspondance entre les simulations et les données est quasi-parfaite lorsqu'on prend en compte les aberrations de phase et d'amplitude.

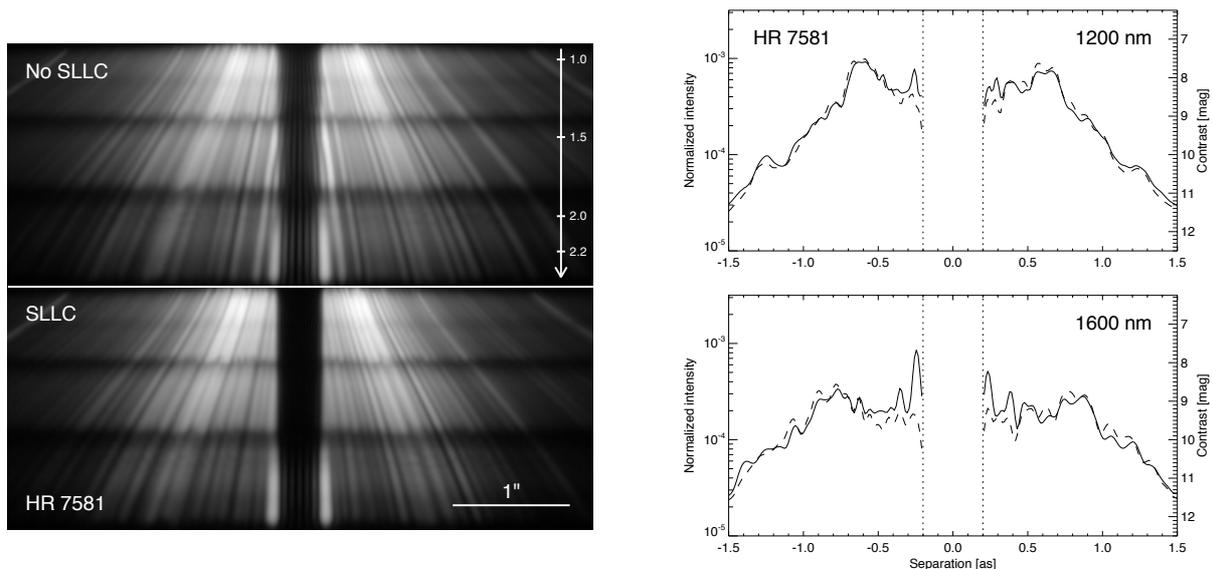


Figure 14 – Premières données en mode LSS+SLLC obtenues sur le ciel en septembre 2015 (gauche), et courbes de contraste en bande H correspondantes (droite). Le gain obtenu aux petites séparations angulaires est parfaitement visible sur les données et les courbes de contraste : les anneaux de diffraction résiduels sont complètement supprimés dans le cas avec apodiseur.

Les performances du mode LSS apodisé ont été démontrées, et j'ai travaillé en 2015 à l'ESO à proposer ce mode comme un mode officiel d'observation de SPHERE, ce qui a été fait pour la période P102. Cependant, bien que les performances soient démontrées, ce mode ne sera probablement réservé qu'à une poignée de compagnons autour d'étoiles brillantes du fait de la faible transmission globale de l'apodiseur SLLC (30% en intensité).

1.1.3 Contrôle du front d'onde pour la correction des aberrations non-communes

Validation sur source interne

- N'Diaye, **Vigan**, Dohlen, Sauvage, Caillat, et al. ; 2016, A&A, 592, 79 : "[Calibration of quasi-static aberrations in exoplanet direct-imaging instruments with a Zernike phase-mask sensor. II. Concept validation with ZELDA on VLT/SPHERE](#)"

La correction des aberrations non-communes (NCPA pour *Non-Common Path Aberrations*) est un point essentiel pour l'instrumentation haut-contraste car ce sont les niveaux d'aberrations internes non-corrigées (et leur variation temporelle) qui déterminent le niveau des speckles quasi-statiques dans les images coronographiques. Ces aberrations ont pour origine les optiques qui ne sont pas vues par l'ASO Shack-Hartmann (SHWFS) du système de XAO de l'instrument. Pour corriger ces aberrations, N'Diaye et al. (2013) ont proposé l'utilisation d'un senseur de Zernike basé sur un masque de phase qui serait placé immédiatement avant le coronographe, à la manière du senseur de tip-tilt différentiel (DTTS) actuellement implémenté dans SPHERE. Ce senseur serait alors utilisé pour mesurer et compenser via le système d'OA les NCPA afin d'optimiser le front d'onde au niveau du coronographe en parallèle des observations (*calibration on-line*).

Un prototype de cet ASO, baptisé ZELDA (*Zernike sensor for Extremely Low-level Differential Aberrations*), a été installé dans SPHERE en 2014 lors de la réintégration de l'instrument à Paranal. Le prototype se situe dans la roue coronographique, ce qui par conséquent empêche une utilisation en parallèle des observations, mais son utilisation pour une calibration *off-line* est envisageable. La stratégie initiale de correction des NCPA dans SPHERE était basée sur une calibration par diversité de phase (Sauvage et al. 2007), mais elle a été abandonnée pour 3 raisons à la fin des phases d'intégration. Premièrement l'instrument était déjà dans les spécifications en l'absence de correction, deuxièmement les tests réalisés n'ont pas montré de gain majeur du fait justement des faibles quantités de NCPA présentes, et troisièmement l'implémentation de cette méthode dans le logiciel de contrôle de l'instrument durant les phases finales d'intégration aurait demandé trop de ressources dans cette phase critique. Il a par conséquent été décidé de ne pas effectuer cette calibration journalière à la suite des commissionings de SPHERE.

Durant l'année 2015, j'ai profité de ma présence à Paranal pour réaliser en collaboration avec M. N'Diaye un nombre important de tests de ZELDA dans SPHERE afin de valider ses performances et éventuellement en faire le moyen privilégié de correction des NCPA. Notre étude s'est basée d'abord sur l'introduction et la mesure de modes de Zernike et de mode de Fourier sur le DM de l'instrument via une modification des pentes de référence de l'ASO hauts-ordres (N'Diaye et al. 2016). Cette partie de l'étude a montré la bonne précision (inférieure au nm) du senseur dans la zone linéaire proche de zéro, ce qui confirme son intérêt pour la mesure fine des NCPA.

La seconde partie de notre étude, illustrée sur la Figure 15, a consisté en la mesure et la compensation des NCPA de l'instrument avec ZELDA. Les mesures avant et après correction des NCPA montrent un gain visible à l'œil de la quantité d'aberrations, passant de 30 à 16 nm RMS pour les fréquences spatiales inférieures à $20\lambda/D$. Cette valeur inclut ~ 10 nm RMS de tip-tilt résiduel dus à la procédure d'acquisition qui seront de toute façon supprimés par la procédure de centrage du coronographe et par l'utilisation du DTTS en parallèle des observations. Les images coronographiques obtenues sur source interne avant et après correction des NCPA sont aussi très parlantes, avec une réduction visible des speckles quasi-statiques dans la zone corrigée, en particulier aux très petites séparations angulaires proches du bord du masque coronographique. En termes de contraste, le gain obtenu est d'un facteur >10 à $0.2''$, ce qui permet d'atteindre la limite de performance théorique de l'APLC implémenté dans l'instrument. Ce gain considérable est une validation de la nécessité de mesurer et compenser les NCPA dans SPHERE afin d'atteindre les performances maximales.

En mars 2017 j'ai finalisé et validé sur SPHERE une procédure de mesure et compensation des NCPA. Cette nouvelle procédure visait en priorité à définir la méthode optimale de compensation des NCPA. En effet, ZELDA est sensible à des fréquences spatiales (192 cycle/pupille) largement supérieurs à ce que le DM peut effectivement corriger (20 cycle/pupille). Il est donc nécessaire de projeter la carte d'OPD mesurée par ZELDA sur les modes propres effectivement mesurables et compensables par le système d'OA. De plus, le tip-tilt différentiel infrarouge étant compensé par le DTTS, il est donc nécessaire d'envoyer la correction du tip-tilt vers les pentes de référence du DTTS, et le reste des corrections sur les pentes de référence du SHWFS. La procédure complète a pu être testée et traduite sous la forme d'un *template* de calibration de l'instrument. Ce *template* est à présent exécuté de manière journalière pour suivre l'évolution temporelle des aberrations de SPHERE (Vigan et al 2018b).

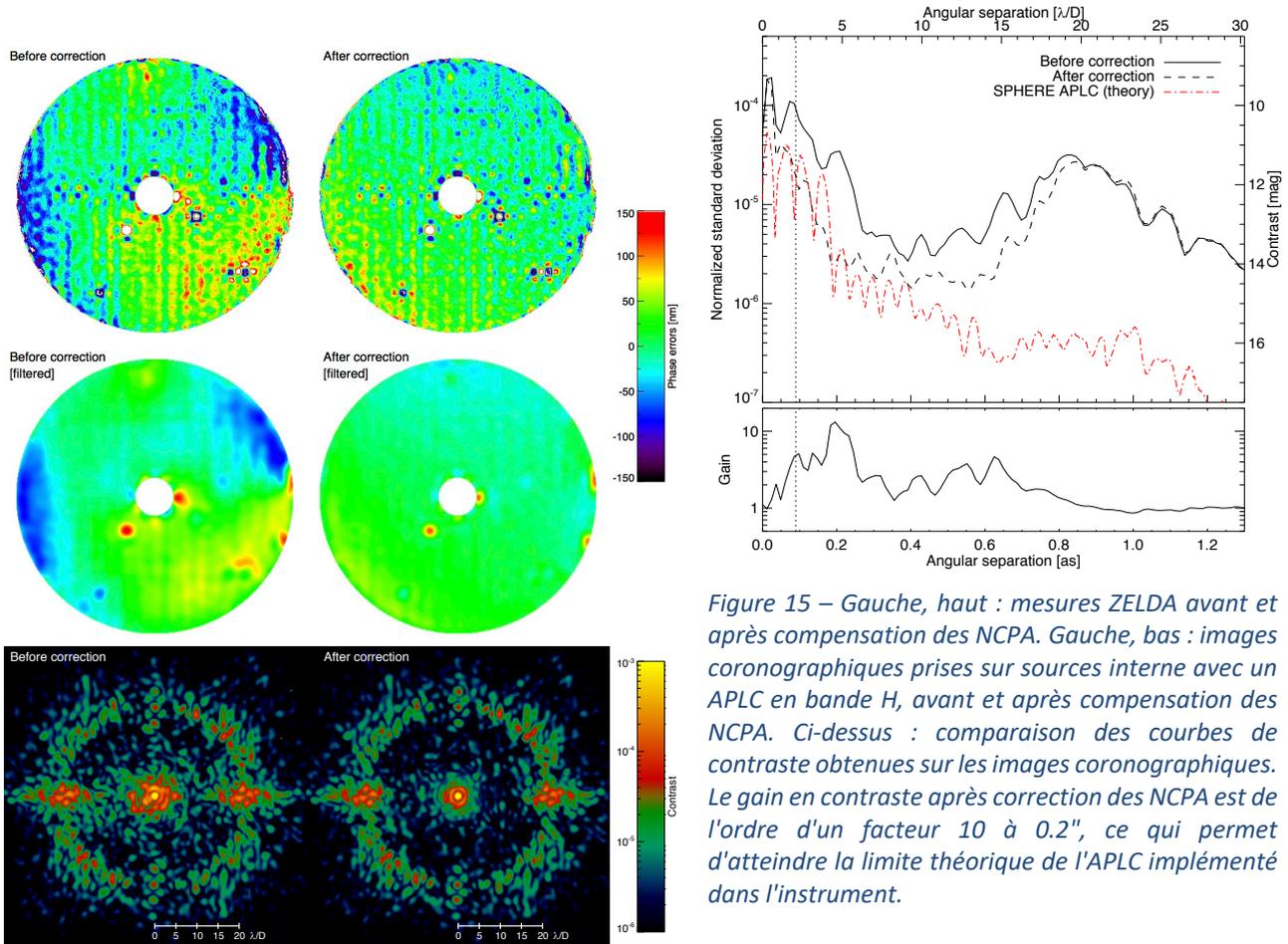


Figure 15 – Gauche, haut : mesures ZELDA avant et après compensation des NCPA. Gauche, bas : images coronographiques prises sur sources interne avec un APLC en bande H, avant et après compensation des NCPA. Ci-dessus : comparaison des courbes de contraste obtenues sur les images coronographiques. Le gain en contraste après correction des NCPA est de l'ordre d'un facteur 10 à 0.2", ce qui permet d'atteindre la limite théorique de l'APLC implémenté dans l'instrument.

Premiers tests sur le ciel

- **Vigan**, N'Diaye, Dohlen, et al. ; 2017, AO4ELT5 : “ZELDA, a Zernike sensor for accurate calibration of aberrations in coronagraphic instruments : first on-sky results in VLT/SPHERE”

Toujours en mars 2017, j'ai eu l'opportunité de faire un premier test sur le ciel pour mesurer le gain en contraste obtenu avec la compensation des NCPA. Au cours de ce tests, les NCPA ont été calibrées sur source interne (Figure 16, gauche), puis les pentes de référence de l'ASO hauts-ordres qui prennent en compte la correction ont ensuite été appliquées sur le ciel (Figure 16, droite). Ces premiers résultats sont décevants car aucun gain en contraste brut n'est observé lorsqu'on applique les pentes de référence corrigeant les NCPA, contrairement à ce qu'on obtient sur la source interne.

Il existe plusieurs explications possibles. La première est que le niveau des résidus turbulents couvrent les aberrations statiques de l'instrument. Bien que ce soit sans doute le cas dans certaines parties de l'image, les speckles quasi-statiques sont cependant visibles dans les images. Une autre possibilité est qu'il existe une différence de configuration instrumentale entre la source interne et le ciel. Sur le ciel, le dérotateur et les ADCs sont dans des positions variables, ce qui peut clairement induire des différences. De plus, le décalage spectral du faisceau (qui fait que toutes les longueurs d'onde ne voient pas exactement les mêmes

aberrations) a aussi une influence qu'il faudrait quantifier. Enfin, la présence d'aberrations d'amplitudes dues aux optiques du télescopes a également un rôle. Ces différentes hypothèses sont importantes à vérifier pour une future implémentation *on-line* de ZELDA. De nouveaux tests ont été effectués à Paranal en avril 2018 (Vigan et al. 2018b) et seront prochainement décrits dans une publication.

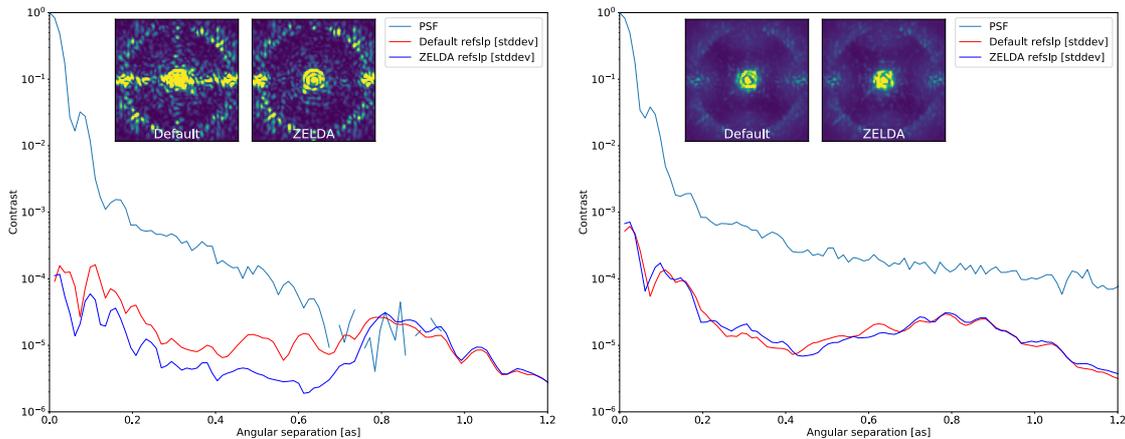


Figure 16 – Comparaison des contrastes bruts avec (bleu) et sans (rouge) compensation des NCPA, sur source interne (gauche) et sur le ciel (droite). Contrairement à la source interne, les données sur le ciel ne montrent pas de gain lorsqu'on applique les pentes de référence corrigeant (en théorie) les NCPA.

Variation temporelle des NCPA

En parallèle de ce travail sur la compensation des NCPA, j'ai également profité de mon statut à Paranal en 2015 pour faire l'acquisition de longues séquences de mesures ZELDA sur source interne : typiquement 2 à 3 heures, avec une image prise toutes les secondes, dans le but d'étudier la stabilité temporelle des aberrations de l'instrument. En effet, la variation des NCPA est une des causes de la perte de contraste avec le temps (Martinez et al. 2013) car les méthodes de réduction basées sur l'ADI reposent sur la stabilité temporelle des speckles. En se basant sur des mesures prises avec l'instrument à Grenoble, Martinez et al. (2013) ont montré que la décorrélation des speckles de SPHERE en plan focal suit une loi linéaire correspondant à une variation du front d'onde de l'ordre de 0.7 Angströms/min. Cependant, une étude par Milli et al. (2016) a mis en doute la validité de ce chiffre et a de plus mis en évidence une décorrélation rapide (de l'ordre de quelques secondes) des speckles aussi bien sur le ciel que sur source interne.

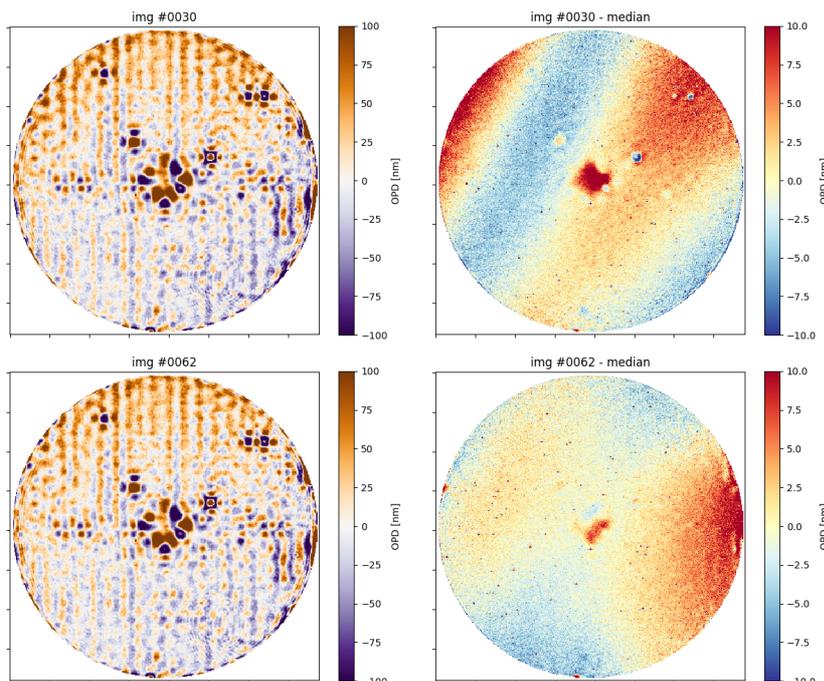


Figure 17 – Analyse d'une longue séquence temporelle prise avec ZELDA dans SPHERE. Les images de gauche montrent une carte d'OPD de la séquence, alors que les images de droite montrent cette même carte à laquelle a été soustraite la carte médiane de la séquence. Les images du haut et du bas montrent des mesures prises à quelques secondes d'intervalle. Cette analyse a permis de mettre en évidence l'existence de turbulence interne dans l'instrument qui varie avec une échelle de temps caractéristique de l'ordre de 5 secondes.

Les séquences temporelles ZELDA qui ont été analysées par un stagiaire sous ma direction au LAM en juillet 2016 ont permis d'identifier la source de cette décorrélation comme étant le résultat de turbulence interne, probablement dans la voie infrarouge en amont du coronographe. Les mesures ont permis de définir un temps caractéristique de l'ordre de 5 secondes, et une variation d'une amplitude de ± 10 nm. L'exploitation de ces séquences est encore en cours et donnera prochainement lieu à une publication (Vigan et al. in prep.).

Variation des NCPA et réduction des speckles en mode IRDIS/LSS

- **Vigan**, N'Diaye, Dohlen, Beuzit, et al. ; 2016, SPIE, 9912 : *“Stop-less Lyot coronagraph for exoplanet characterization : first on-sky validation in VLT/ SPHERE”*

Une autre voie de travail ouverte par les mesures ZELDA concerne la soustraction des speckles quasi-statiques pour atteindre de plus grands contrastes. Cette problématique est importante pour tous les modes d'observation, mais plus particulièrement pour le mode IRDIS-LSS (voir Sect. 1.1.2) où il n'est pas possible d'introduire de la diversité angulaire dans les données. En effet, ce mode observe nécessairement en champ stabilisé afin de maintenir la PSF du compagnon à caractériser dans la fente.

Etant donné la grande qualité des optiques de SPHERE, une possibilité pourrait être d'induire un léger offset sur le dérotateur qui permettrait de sortir la PSF du compagnon de la fente tout en gardant des aberrations quasi-identiques. Les images obtenues sans signal du compagnon peuvent alors être utilisées comme référence pour estimer et soustraire les speckles (Vigan et al. 2016c). Cette hypothèse n'est évidemment valide que si les aberrations sont effectivement quasi-identiques aux deux orientations du dérotateur. Pour vérifier cela, j'ai effectué en 2015 des mesures ZELDA à différentes orientations de dérotateur que j'ai soustrait par rapport à une référence (Figure 18) afin de faire ressortir la similarité des aberrations à différentes orientations du dérotateur.

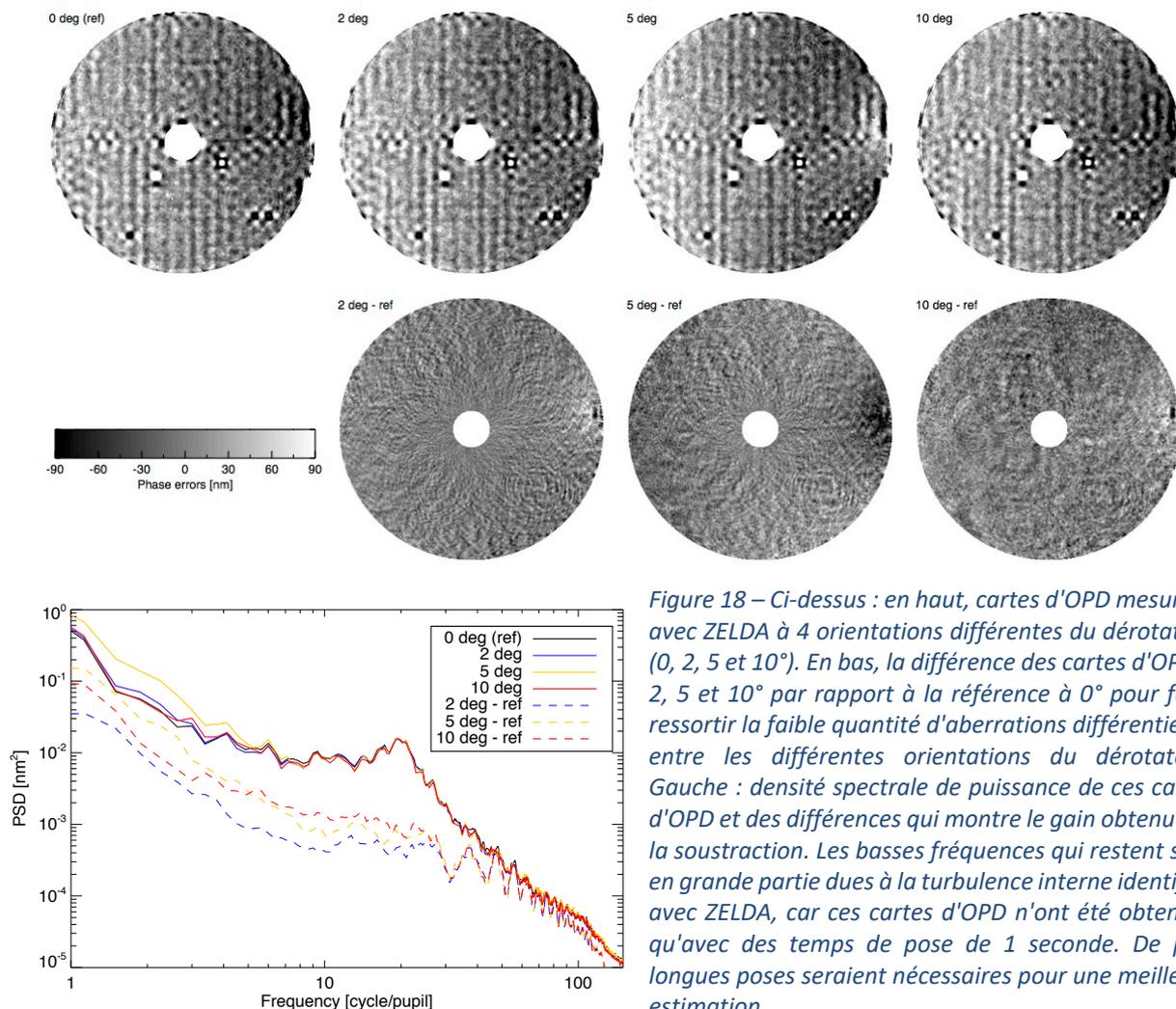


Figure 18 – Ci-dessus : en haut, cartes d'OPD mesurées avec ZELDA à 4 orientations différentes du dérotateur (0, 2, 5 et 10°). En bas, la différence des cartes d'OPD à 2, 5 et 10° par rapport à la référence à 0° pour faire ressortir la faible quantité d'aberrations différentielles entre les différentes orientations du dérotateur. Gauche : densité spectrale de puissance de ces cartes d'OPD et des différences qui montre le gain obtenu par la soustraction. Les basses fréquences qui restent sont en grande partie dues à la turbulence interne identifiée avec ZELDA, car ces cartes d'OPD n'ont été obtenues qu'avec des temps de pose de 1 seconde. De plus longues poses seraient nécessaires pour une meilleure estimation.

Avec ces tests, j'ai pu montrer qu'il y a ~ 45 nm RMS d'aberrations jusqu'au coronographe. Après soustraction, la quantité mesurée d'aberrations différentielles est de l'ordre de ~ 20 nm RMS. Le gain majeur se trouve dans les basses fréquences (< 40 cycle/pupille), ce qui correspond en plan focal aux séparations auxquelles on veut chercher et caractériser des compagnons. On note cependant que les basses fréquences ne disparaissent pas complètement. Il est possible que les données de ce test soient limitées par la turbulence interne de l'instrument (voir section précédente) car les poses étaient particulièrement courtes (1 sec). Avec de plus long temps de pose (comme sur le ciel), il est probable que l'atténuation des basses fréquences serait plus importante.

Cependant même avec les données actuelles on peut tirer la conclusion qu'en appliquant un offset sur le dérotateur les speckles aux petites séparations angulaires ne vont a priori pas varier significativement et on pourra donc les soustraire de manière efficace. Cette affirmation reste à quantifier de manière précise, mais les premiers tests effectués dans le cadre du GTO SPHERE sont très prometteurs et ont déjà permis de caractériser des compagnons avec cette stratégie d'observation (Mesa et al. 2016 ; Bonavita et al. 2017 ; Cheetham et al. 2018.).

1.1.4 Vers le haut-contraste sur les grands télescopes segmentés : étape 1 – le cophasage

Le développement de l'imagerie à très haut-contraste sur les futurs *Extremely Large Telescopes* (ELT) est actuellement dans une phase intermédiaire entre l'attente du retour d'expérience sur les instruments d'imagerie à haut-contraste dédiés sur les télescopes monolithiques (VLT, Gemini, Subaru) et le développement de la première génération d'instruments pour les ELTs dont la plupart incluent le cas scientifique de l'imagerie et de la caractérisation des exoplanètes détectées par SPHERE et GPI.

Les problématiques liées au très haut-contraste sur les ELTs sont nombreuses et couvrent à la fois le télescope, le design des instruments, les composants, les stratégies d'observation et d'analyse, et même les stratégies de confirmation des candidats. Dans cette longue liste de problématiques, j'ai commencé dès 2006 à contribuer à celle située en tout début de chaîne : le télescope, et plus particulièrement les problématiques du cophasage du miroir segmenté primaire. En effet, plus les aberrations introduites par le télescope seront faibles, plus un instrument à haut-contraste pourra être efficace dans la suppression de la diffraction et l'atténuation des speckles. Cette problématique est d'autant plus importante que la pupille de ces télescopes géants ne sera pas forcément adaptée à la coronagraphie : forte obstruction centrale (30% pour l'ELT de l'ESO), géométrie des araignées, segments manquants, etc. Il est donc primordial que le télescope fournisse un miroir cophasé à des niveaux de l'ordre de quelques nanomètres RMS. Une question importante reste cependant de savoir si les très grands contrastes (10^{-9} - 10^{-10}) peuvent être atteints même sans disposer d'un télescope parfaitement cophasé.

Projet APE

- **Vigan**, Dohlen, Mazzanti ; 2011, Applied Optics, 50, 2708 : "*On-sky multi-wavelength phasing of segmented telescopes with the Zernike phase contrast sensor*"

Dans le contexte du cophasage des très grands télescopes, j'ai participé dès 2005 au projet *Active Phasing Experiment* (APE ; Gonté et al. 2008) qui a permis de tester en laboratoire puis sur le ciel au VLT 4 analyseurs de surface d'onde dédiés au cophasage. En plus des analyseurs, le banc comportait un miroir segmenté entièrement contrôlable en piston-tip-tilt et une métrologie interne servant de référence absolue aux analyseurs.

Dans le cadre de l'expérience APE, le Laboratoire d'Astrophysique de Marseille a proposé l'analyseur ZEUS (Dohlen et al. 2006) basé sur un masque de Zernike ayant un diamètre de l'ordre de la taille de la tache de *seeing*. Ce masque agit alors comme un filtre spatial faisant ressortir les hautes-fréquences spatiales qui correspondent aux sauts de phase en bordure des segments. Durant mon stage de fin d'étude puis ma thèse, j'ai été responsable de la validation en laboratoire de ZEUS après son intégration à l'IAC (Espagne). ZEUS a ensuite été testé sur le ciel au VLT avec les autres analyseurs et il s'est révélé capable d'atteindre une précision finale sous les 15 nm RMS pour des étoiles jusqu'à des magnitudes de $R=15.7$ (Surdej et al. 2010).

Une des limitations de la quasi-totalité des analyseurs concerne leur zone de linéarité et leur gamme dynamique. Pour ZEUS, la réponse de l'analyseur étant sinusoïdale en fonction de l'erreur de phase (piston) d'entrée, la zone linéaire est faible et centrée autour de zéro ($\pm \lambda/6$; Figure 19, gauche). Il est possible

d'étendre la gamme dynamique jusqu'à $\pm\lambda/3$ en fonctionnant en boucle fermée ($\pm\lambda/2$ en théorie, mais avec les erreurs de mesure la vraie gamme dynamique est plutôt $\pm\lambda/3$). Bien que légèrement améliorée, la gamme dynamique reste donc relativement faible, faisant de ZEUS un analyseur idéal pour le cophasage fin mais mal adapté aux très grandes erreurs qui peuvent survenir par exemple lorsque des segments sont remplacés.

Dans le cas d'un miroir complètement déphasé, les segments vont converger vers une position multiple de la longueur d'onde λ utilisée pour l'analyse, et rester bloqués dans cette position tout en apparaissant cophasés du point de vue de l'analyseur. Pour remédier à ce problème, j'ai proposé d'utiliser une stratégie de cophasage à deux longueurs d'onde pour ôter les ambiguïtés de $n\lambda$ (Vigan et al. 2011). La séquence est particulièrement simple : le miroir est d'abord phasé à λ_0 jusqu'à atteindre la convergence, puis le miroir est ensuite phasé à λ_1 ($<\lambda_0$) jusqu'à atteindre la convergence. Au cours de la procédure, on enregistre de quelle valeur de piston $\Delta\pi$ chacun des segments a été déplacé (Figure 19, droite), et l'ambiguïté $n\lambda$ est déterminée par $n = \Delta\pi/\Delta\lambda$. La procédure permet d'étendre la gamme dynamique jusqu'à $\pm\Lambda/2$, avec $\Lambda = (\lambda_0 + \lambda_1)^2 / (4\Delta\lambda)$, ce qui représente plusieurs microns pour deux longueurs d'onde espacées de 100 nm dans le visible.

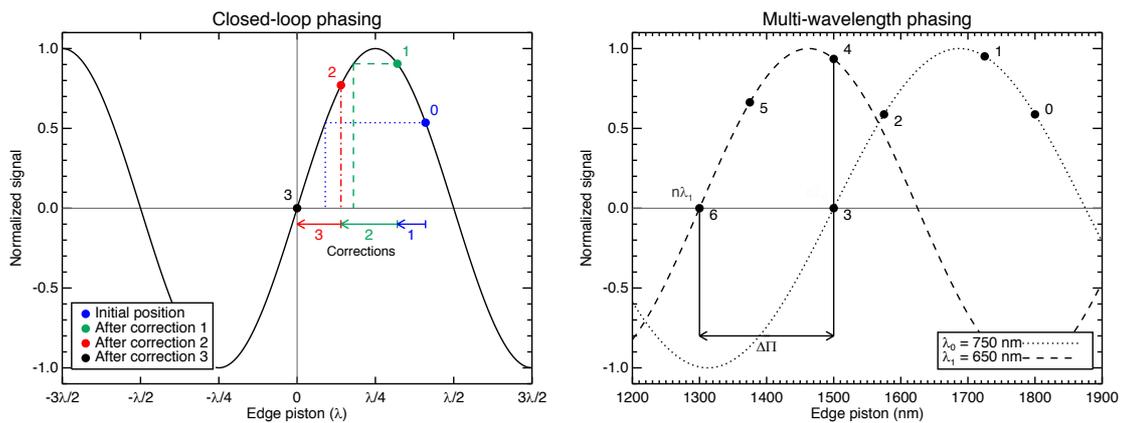


Figure 19 – Gauche : illustration du cophasage en boucle fermée pour une erreur de piston située dans $\pm\lambda/2$. Dans cette gamme (en fait $\pm\lambda/3$ en pratique), le segment convergera toujours vers zéro. Pour de plus grandes erreurs de piston, le segment convergera vers le plus proche multiple de λ ($n\lambda$ avec n un entier). Droite : illustration du cophasage à 2 longueurs d'onde proposé dans Vigan et al. (2011). La connaissance des deux longueurs d'onde (λ_0 et λ_1) et de la différence de piston appliquée entre les phasages aux deux longueurs d'ondes ($\Delta\pi$) permet de déterminer l'ambiguïté n .

Cette stratégie a été validée en 2009-2010 lors des campagnes de tests de APE sur le ciel. La Figure 20 présente un exemple de cophasage à deux longueurs d'ondes avec un miroir présentant au départ des pistons aléatoires dans une gamme de 2000 nm PtV. Après la convergence à $\lambda_0 = 750$ nm et la convergence à $\lambda_1 = 650$ nm, l'ambiguïté est déterminée et tous les segments sont ramenés dans $\pm\lambda_0/2$. A la fin, un segment diverge du fait de l'absence de dérotateur dans APE qui crée des problèmes de référence pour la calibration des données. Si la pupille du télescope restait fixe par rapport à ZEUS, ce problème ne surviendrait pas et le miroir finirait parfaitement cophasé.

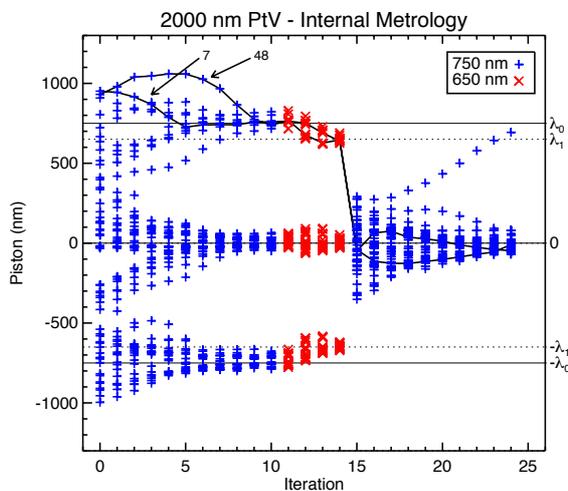


Figure 20 – Exemple de cophasage en boucle fermée à deux longueurs d'onde avec ZEUS effectué sur le ciel au VLT en 2009. Le miroir segmenté est réglé au départ avec des pistons aléatoires dans une gamme de 2000 nm PtV (mesurés par la métrologie interne). Une première convergence est effectuée en boucle fermée à $\lambda_0=750$ nm jusqu'à satisfaire le critère de convergence (écart type des valeurs de piston résiduels), puis une seconde convergence est effectuée à $\lambda_1=650$ nm. C'est la différence de piston entre les deux convergences qui permet de déterminer l'ambiguïté de 2π et finalement de converger vers zéro. Du fait de la présence des araignées qui tournent dans la pupille du télescope, la convergence n'est pas parfaite et un des segments finit par diverger. Il s'agit cependant d'un problème spécifique à APE qui ne remet pas en cause la méthode multi-longueur d'onde.

L'expérience APE a été une réussite du point de vue de la validation de ZEUS et de certains des autres analyseurs (Gonté et al. 2011), mais elle n'a pas eu de suite directe à l'ESO. Cependant, depuis 2016 le banc APE est en cours de résurrection afin d'étudier les problématiques de cophasage fin pour l'ELT en prenant en compte le couplage avec l'optique adaptative. C'est le sujet d'une thèse à l'ESO (voir Sect. 4) que je co-encadre et qui va explorer des alternatives à la baseline de cophasage de l'ELT.

Cophasage fin avec ZELDA

- **Vigan**, Postnikova, Caillat, Sauvage, Dohlen, et al. ; 2016, SPIE, 9909 : *“Characterisation of a turbulent module for the MITHIC high-contrast imaging testbed”*

Le banc d'imagerie à haut-contraste MITHIC du LAM a été initialement développé en 2012-2013 par M. Diaye pour la validation en laboratoire du senseur ZELDA (N'Diaye et al. 2012b) et du coronographe de Roddier apodisé (N'Diaye et al. 2012a). Ce banc a depuis été utilisé dans la thèse de B. Paul qui a permis de développer et valider les techniques de diversité de phase coronographique (COFFEE ; Paul et al. 2013). Dans la perspective d'améliorer les techniques d'analyse et de contrôle du front d'onde pour le très grand contraste, j'ai obtenu en 2014 un financement de la Région PACA de 60k€ pour la mise à jour du banc MITHIC. La mise à jour complète du banc a été réalisée en 2016-2017 avec une stagiaire (M. Postnikova) puis avec un apprenti élève-ingénieur de l'Institut d'Optique *Graduate School* (R. Pourcelot ; voir Sect. 4).

Dans une étude publiée récemment par un étudiant du Laboratoire Lagrange, nous avons démontré en simulation l'utilisation de ZELDA pour le cophasage fin des miroirs segmentés (Janin-Potiron et al. 2017). Cette voie est maintenant en cours d'exploration sur MITHIC avec des premiers résultats particulièrement encourageants (Figure 21) obtenues en corrigeant des écrans de phase statiques avec notre SLM (*spatial light modulator*). Ces premiers tests montrent qu'il est possible de descendre sous les 5 nm RMS en quelques itérations. Nous sommes actuellement en train d'améliorer la procédure et de quantifier le gain, avec comme objectif d'étudier le cophasage très fin en présence de résidus de turbulence post-OA que nous pouvons simuler sur le banc (voir Sect. 2.3).

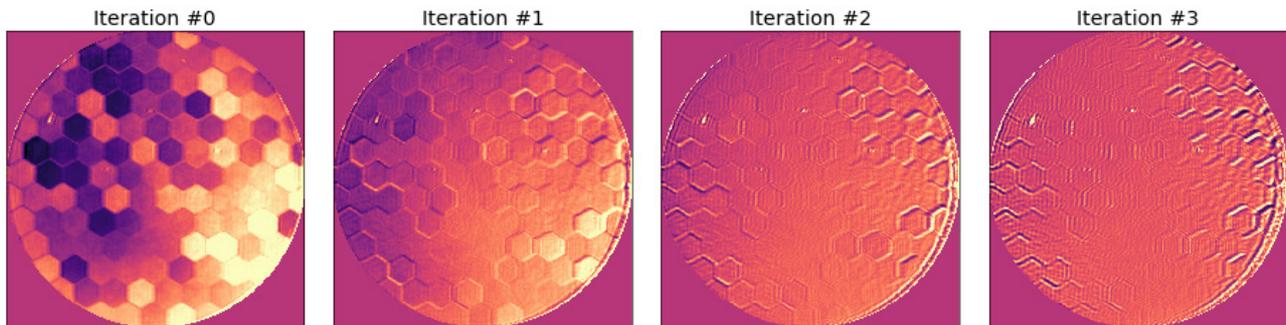


Figure 21 – Exemple de cophasage avec ZELDA obtenu en juillet 2017 sur MITHIC. En quelques itérations les résidus de cophasage tombent sous les 5 nm RMS. Un astigmatisme pupillaire et de la distorsion étaient présents dans ces mesures et limitent la précision ultime sur les bords de la pupille. Une calibration de ces aberrations a depuis été effectuée pour améliorer encore la précision de cophasage.

1.2 Recherche et études de systèmes planétaires par imagerie directe

Au cours de la dernière décennie, le domaine de l'imagerie directe a fait d'énormes progrès instrumentaux qui se sont traduits par des résultats astrophysiques de premier plan comme la première détection d'un objet de masse planétaire (Chauvin et al. 2005), la première image d'un système planétaire multiple (Marois et al. 2008, 2010), la confirmation d'une planète géante prédite par la morphologie du disque circumstellaire de β Pictoris (Lagrange et al. 2010), les premières mesures de spectres de ce type d'objets (Janson et al. 2010 ; Bonnefoy et al. 2012), ou encore les multiples images de disques de débris (Smith & Terrile 1984 ; voir Choquet et al. 2016 pour une brève revue).

Les résultats clés dans ce domaine peuvent être organisés en trois grandes catégories :

- 1) Physique des planètes géantes : la photométrie et la spectroscopie obtenues sur les planètes géantes permet de mesurer ou déduire la composition et les propriétés physiques de ces planètes. En particulier, des analogies fortes peuvent être faite avec les naines brunes du champ qui partagent a priori certaines propriétés avec les planètes géantes jeunes (Bowler et al. 2010 ; Patience et al. 2012 ; Bonnefoy et al. 2013 ; ...). Les relations âge/masse/luminosité sont également en lien direct avec les propriétés de ces planètes (Burrow et al. 1997 ; Baraffe et al. 2003 ; Marley et al. 2007 ; Mordasini et al. 2012 ; Spiegel & Burrow 2012 ; ...)
- 2) Architecture et stabilité des systèmes planétaires : les mesures astrométriques dans le temps des exoplanètes et la position des planètes par rapport à d'éventuels disques de débris nous renseignent sur leurs orbites, les phénomènes de résonance et d'interactions dynamiques, ainsi que sur l'évolution à long terme de ces systèmes comportant une ou plusieurs planètes géantes (Wyatt et al 1999 ; Chauvin et al. 2012a ; Lagrange et al. 2012 ; Goździewski & Migaszewski 2014 ; ...),
- 3) Fréquence des planètes et scénarios de formation : la statistique sur la fréquence de planètes géantes jeunes détectées en fonction des propriétés des étoiles hôtes et/ou de leur disque nous renseigne de manière générale sur la fréquence de ce type d'objets (Lafrenière et al. 2007b ; Chauvin et al. 2010 ; Nielsen & Close 2010 ; Biller et al. 2013 ; ...), mais aussi de manière beaucoup plus spécifique sur les scénarios de formation qui peuvent leur donner naissance. Ce point est en lien direct avec le point 1) car il est maintenant bien établi de manière théorique que la luminosité intrinsèque des planètes géantes est étroitement liée à la manière dont elles se sont formées, et notamment à la manière dont le gaz est accrété par la planète.

Chacun des points précédents constituent un domaine de recherche à part entière qui se développe maintenant de manière presque exponentielle avec l'arrivée des nouveaux instruments dédiés à l'imagerie directe. Ceux-ci fournissent une vue sans précédents des systèmes planétaires jeunes et proches. Les références indiquées pour ces points le sont à titre indicatif et sont loin d'être exhaustives, mais elles constituent un bon point de départ.

Dans le domaine de la recherche, détection et caractérisation de compagnons planétaires, j'ai apporté une contribution notable sur :

(1) La détermination de la fréquence des planètes géantes

(2) La caractérisation de plusieurs compagnons sub-stellaires

J'ai également contribué à plusieurs résultats de caractérisation de disques circumstellaires avec VLT/SPHERE et j'ai travaillé sur la complémentarité des autres méthodes de détection avec l'imagerie. Cependant je ne détaillerais pas ces dernières contributions qui sont mineures par rapport au reste de mon travail.

1.2.1 Contraintes sur la population des planètes géantes jeunes

Fréquence des planètes autour des étoiles A

- **Vigan**, Patience, Marois, Bonavita, De Rosa, et al. ; 2012, A&A, 544, 9 : “*The International Deep Planet Survey. I. The frequency of wide-orbit massive planets around A-stars*”

Parmi les quelques dizaines de compagnons de masse planétaire déjà imagés, on distingue généralement deux catégories : ceux situés à plusieurs centaines d’unités astronomiques (AU) et avec un rapport de masse relativement élevé par rapport à leur étoile ($q > 2-20\%$), et ceux situés à des séparations beaucoup plus proches (< 100 AU) et dont le rapport de masse avec la primaire est $< 1\%$. Il est intéressant de constater que toutes les détections tombant dans la seconde catégorie sont des compagnons autour d’étoile de type précoce, entre A0 et F5 : β Pic b (Lagrange et al. 2010), HR8799bcde (Marois et al. 2010), HD95086b (Rameau et al. 2013), et plus récemment 51 Eri b (Macintosh et al. 2015) et HIP65426b (Chauvin et al. 2017).

Cette tendance à privilégier la découverte de planètes géantes autour des étoiles plus précoces et donc plus massives est également en accord avec les fréquences de compagnons mesurée par les relevés en RV autour des étoiles A évoluées (Johnson et al. 2010a, 2010b, 2011 ; Bowler et al. 2010). De plus, la présence de disque protoplanétaires plus massifs autour d’étoiles plus massives tendrait également à favoriser la formation de planètes géantes autour de ces étoiles (Vorobyov & Basu 2010).

Ces constatations ont déclenché en 2009 le démarrage d’un relevé dédié, le *International Deep Planet Survey* (IDPS), par un consortium regroupant des collaborateurs en Amérique du nord et au Royaume-Uni, notamment à l’université d’Exeter où j’ai effectué un postdoctorat. Le but de l’IDPS était d’observer environ 300 étoiles couvrant des types spectraux, des âges et des distances variées (Galicher et al. 2016). J’ai, pour ma part, contribué à la publication des premiers résultats de l’IDPS en me focalisant sur l’analyse d’un sous-échantillon d’étoiles A-F observées avec VLT/NaCo et Gemini-N/NIRI entre 2007 et 2012. En plus de la sélection sur leurs types spectraux, ces étoiles ont été sélectionnées sur leur âge (< 300 Myr) et leur distance (< 90 pc). Dans l’échantillon final se trouvaient donc HR8799 et β Pictoris.

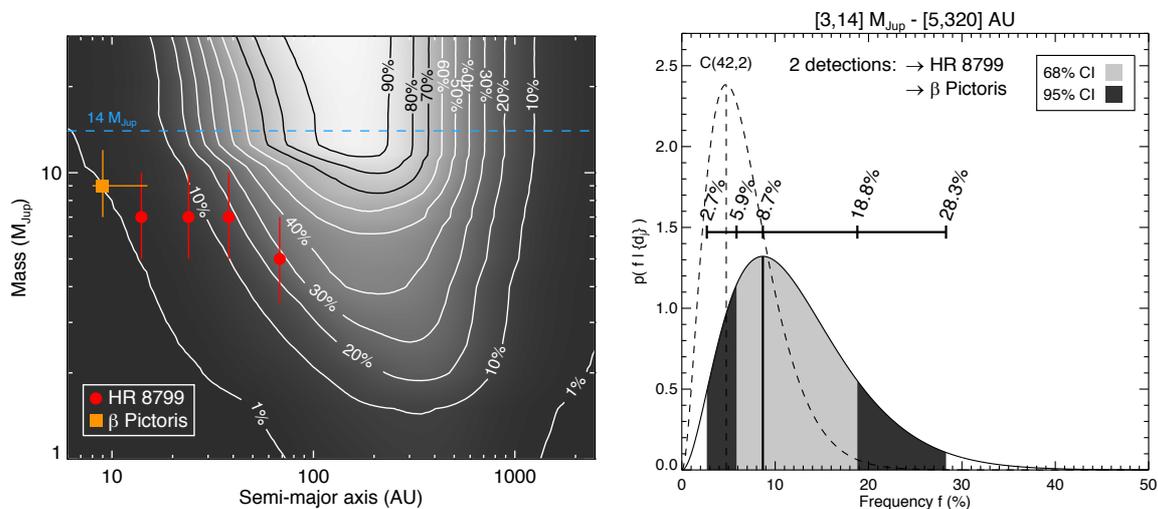


Figure 22 - Gauche : Carte de probabilité moyenne de détection du relevé IDPS-I dans l'espace masse—demi-grand axe. Les planètes du système HR8799 et β Pictoris b sont représentées. Droite : Fonction de densité de probabilité de f , la fréquence des systèmes planétaires à grande séparation orbitale autour des étoiles A, estimée pour 2 détections dans l'intervalle de masse 3-14 M_{Jup} et l'intervalle de demi-grand axe 5-320 AU.

L'analyse des données a été effectuée avec la méthode LOCI (Lafrenière et al. 2007a) au moyen d'un pipeline que j'ai entièrement développé, ce qui a permis d'obtenir des limites de détection pour l'ensemble des étoiles du relevé. Des observations complémentaires ont également été obtenues au VLT pour confirmer le statut d'un certain nombre de candidats intéressants. L'analyse statistique que j'ai ensuite effectuée à partir de simulation Monte Carlo est présentée dans la Figure 22. Les lignes de contour sur la gauche présentent la probabilité de détection moyenne de l'ensemble du relevé comparée aux détections obtenues autour de β Pictoris et HR8799. A partir de cette analyse, et en supposant des distributions de masse et demi-grand axe de planètes, j'ai déduit à partir d'une analyse bayésienne que la fréquence des planètes géantes jeunes dans

les intervalles 3–14 M_{Jup} et 5–320 AU est dans l'intervalle 5.9%–18.8 % avec un niveau de confiance de 68% (Vigan et al. 2012b). Cette valeur est la première estimation jamais effectuée de la fréquence des planètes géantes, et elle a depuis été confirmée et affinée par plusieurs études (Rameau et al. 2013b ; Nielsen et al. 2013 ; Galicher et al. 2016).

En plus de présenter une première estimation quantitative de la fréquence des planètes géantes, cette étude a également montré la nécessité d'aller vers de plus petites séparations angulaires et de plus grands contrastes (donc de plus petites masses) : les lignes de contour de probabilité moyenne de détection présentées dans la Figure 22 montrent en effet que les détections effectivement obtenues autour des étoiles A se situent vraiment en limite des capacités de détection des instruments d'OA de première génération. Des simulations que j'ai réalisées dans le cadre de cette étude ont alors clairement montré que les performances prédites à l'époque pour SPHERE et GPI permettrait de sonder de manière direct l'espace de paramètres où ont été détectés le système HR8799 et β Pictoris b (Figure 23).

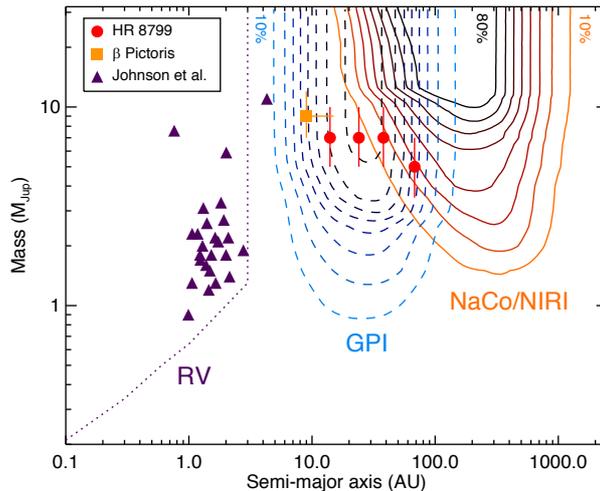


Figure 23 – Comparaison des niveaux moyens de détection du relevé IDPS I avec des simulations réalisées sur le même échantillon d'étoiles mais en supposant les limites de détections prévues en 2012 pour l'instrument Gemini/GPI. Cette simulation montre clairement le gain en termes de sensibilité aux masses planétaires dans la gamme de séparation 5-100 UA pour la nouvelle génération d'instruments.

Fréquence des planètes autour des étoiles de type solaire

- Chauvin, **Vigan**, Bonnefoy, Desidera, Bonavita, et al. ; 2015, A&A, 573, 127 : “The VLT/NaCo large program to probe the occurrence of exoplanets and brown dwarfs at wide orbits. II. Survey description, results, and performances”
- Reggiani, Meyer, Chauvin, **Vigan**, et al. ; 2016, A&A, 586, A147 : The VLT/NaCo large program to probe the occurrence of exoplanets and brown dwarfs at wide orbits. III. The frequency of brown dwarfs and giant planets as companions to solar-type stars”
- **Vigan**, Bonavita, Biller, Forgan, Rice, et al. ; 2017, A&A, 603, 3 : “The VLT/NaCo large program to probe the occurrence of exoplanets and brown dwarfs at wide orbits. IV. Gravitational instability rarely forms wide, giant planets”

Mon étude autour des étoiles A a été une première avancée dans le domaine, mais elle présente certaines simplifications au niveau des hypothèses concernant les distributions de masse et demi-grand axe des planètes. En effet, dans Vigan et al. (2012b) j'ai supposé des distributions uniformes en masse et demi-grand axe, ce qui est particulièrement optimiste pour les planètes massives et/ou à grande séparation. Les deux grands modèles de formation généralement considérés, le modèle d'instabilité gravitationnelle (Boss 1998) et le modèle d'accrétion sur cœur (Pollack et al. 1996), expliquent difficilement la présence de planètes géantes massives à des séparations de plusieurs dizaines d'AU sans invoquer des interactions disque-planète (Kley & Nelson 2012) ou du *scattering* planète-planète (Veras et al. 2009 ; Dawson & Murray-Clay 2013). Le scénario d'accrétion de *pebbles* (Lambrechts & Johansen 2012) pourrait potentiellement palier à certaines limitations des autres modèles, mais ce modèle est moins mature que les deux précédents et des simulations récentes montre que la probabilité de former des planètes massives à grande séparation reste très faible (Bitsch et al. 2015).

Une étape importante pour l'étude de la fréquence des exoplanètes est donc la prise en compte de la physique des scénarios de formation afin de leur apporter des contraintes physiques et ainsi faire le lien entre

théorie et observations. Cette approche, basée sur les modèles de populations de synthèse (voir la revue par Benz et al. 2014), est employée depuis de nombreuses années dans le domaine des détections par RV et a permis de fournir une vue cohérente de la distribution des exoplanètes dans l'espace de paramètres masse—demi-grand axe de l'orbite (Ida & Lin 2004 ; Mordasini et al. 2009). A l'inverse, dans le domaine de l'imagerie directe, cette approche n'a jamais été utilisée à l'échelle d'un relevé complet. C'est cette approche que j'ai proposé d'utiliser dans l'analyse statistique du relevé NaCo-LP (Vigan et al. 2017).

Le "VLT/NaCo large program to probe the occurrence of exoplanets and brown dwarfs at wide orbits" (NaCo-LP ; Chauvin et al. 2015) est un large programme d'observation sur VLT/NaCo qui a démarré en 2009 dans le cadre de la préparation scientifique de SPHERE. Ce programme est basé sur un échantillon de ~ 200 étoiles jeunes (< 300 Myr) et proches (< 100 pc) dont une centaine n'avaient jamais été observées à haut-contraste (Desidera et al. 2015). L'ensemble des observations ont été réduites au moyen du pipeline que j'ai développé pour le relevé IDPS, et les résultats de l'échantillon observé ont été présentés dans Chauvin et al. (2015).

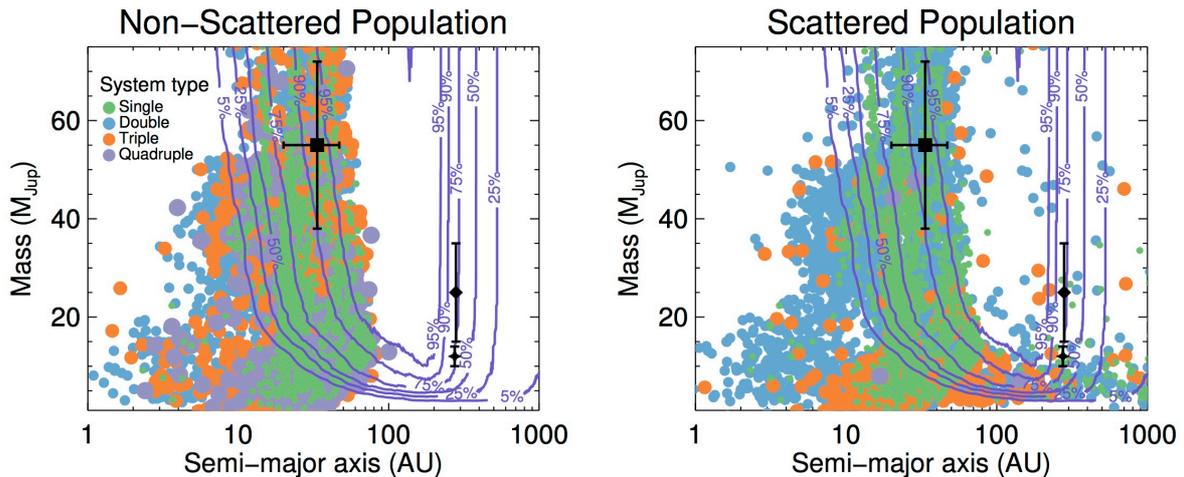


Figure 24 – Modèles de population sans scattering (Forgan & Rice 2013) et avec scattering (Forgan et al. 2015) comparés à la probabilité moyenne de détection de l'ensemble des étoiles du NaCo-LP. Les points noirs correspondent aux 3 compagnons détectés dans l'échantillon considéré.

Nous avons présenté une première analyse statistique des résultats du relevé complet (200 étoiles) dans Reggiani et al. (2016) pour étudier la compatibilité des résultats avec une fonction de masse des compagnons spécifique, mais l'étude principale que nous avons publié en 2017 est basée sur les modèles de populations de synthèse de Forgan & Rice (2013) et Forgan et al. (2015). Ce modèle constitue l'état de l'art des modèles de populations de synthèse basé sur le scénario d'instabilité gravitationnelle. Il a de plus l'avantage d'implémenter le *scattering* dans les systèmes multiples, qui a pour effet principale de repousser certains compagnons vers les grandes séparations orbitales.

Notre étude a eu pour but principal de tester la validité de ce modèle, et dans le domaine où il peut être considéré comme valide de mesurer la fréquence des planètes qui se seraient formées par instabilité gravitationnelle. Les résultats principaux sont représentés sur la Figure 25. En comparant nos observations aux prédictions du modèle, nous estimons que la fréquence des étoiles avec au moins une planète géante formée par instabilité gravitationnelle est dans l'intervalle 0.5—5% avec un niveau de confiance de 95%. Une autre conclusion tout aussi importante est que bien que l'instabilité gravitationnelle soit peu fréquente, elle prédit une distribution en masse des planètes à grande séparation qui est beaucoup plus proche de ce qui est observé que ce qui est prédit par le scénario d'accrétion sur cœur. En effet, les compagnons détectés dans le NaCo-LP ont $\sim 600\,000$ fois plus de chance de s'être formés par instabilité gravitationnelle que par accrétion sur cœur.

Cette étude novatrice ouvre des perspectives importantes pour les futures études à partir des résultats de SPHERE et GPI. En effet, le gain en sensibilité de ces instruments leur permet de sonder un régime de masse/séparation où les différents scénarios de formation commencent à avoir des chances similaires de former des planètes géantes. La comparaison des observations aux modèles physiques va par conséquent devenir plus intéressante et plus riche dans les années à venir, notamment dans le cadre du relevé SHINE que nous effectuons actuellement avec SPHERE.

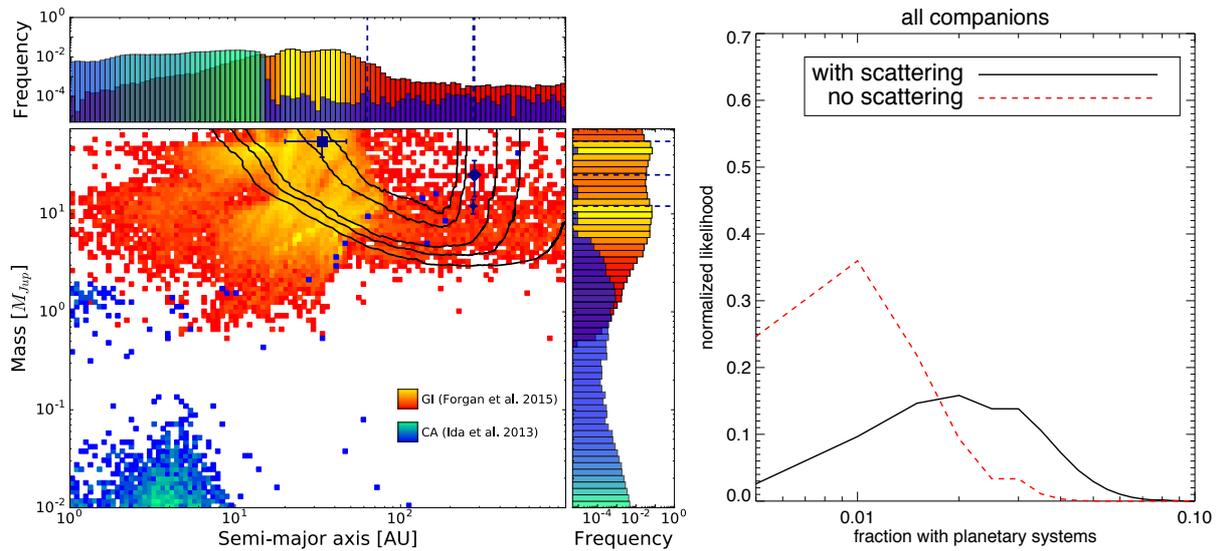


Figure 25 – Gauche : courbes de probabilité moyenne de détection (5%, 25%, 50%, 90% et 95%) comparées aux modèles de synthèse de population avec scattering de Forgan et al. (2015) et Ida et al. (2013). Notre étude montre que les compagnons détectés dans l'échantillon NaCo-LP ont ~ 600000 fois plus de chance d'être issus d'une formation par instabilité gravitationnelle que d'une formation par accrétion sur cœur. Droite : Fonction de densité de probabilité de la fraction d'étoiles avec un système planétaire, estimée par une comparaison entre les limites de détection du NaCo-LP avec les modèles de population avec scattering de Forgan et al. (2015).

1.2.2 Etude de compagnons substellaires

Faux-positif en imagerie directe : le cas HD8049 B

- Zurlo, **Vigan**, Hagelberg, Desidera, Chauvin, et al. ; 2013, A&A, 554, 21 : *"Astrophysical false positives in direct imaging for exoplanets: a white dwarf close to a rejuvenated star"*

La détection d'exoplanètes par imagerie directe est généralement biaisée vers les étoiles jeunes car on cherche à détecter le signal intrinsèque de la planète. Les modèles d'évolution pour les étoiles de faible masse et les compagnons substellaires (e.g. Burrows et al. 1997 ; Baraffe et al. 2003, 2015), bien que connus pour être biaisés pour les âges les plus jeunes et les faibles masses, prédisent tous une décroissance de la magnitude de ces objets avec le temps au fur et à mesure de leur refroidissement. Le contraste entre une étoile et une planète est par conséquent plus favorable à la détection pour des âges plus jeunes.

Dans le cadre de relevés de grande ampleur comme le NaCo-LP ou SHINE, la sélection des cibles se base donc avant tout sur leur âge et leur distance. Dans le cas des étoiles appartenants à des amas ouverts ou des groupes jeunes, la datation de l'âge est facilitée par le fait que ces ensembles d'étoiles ont un âge commun et échantillonnent un ensemble de masses distinctes. Dans le cas des étoiles isolées, la datation est beaucoup plus complexe et d'autant plus incertaine que l'âge augmente (e.g. Soderblom 2010). Il devient alors nécessaire de déterminer l'âge à partir d'indicateurs basés sur la période de rotation, l'activité stellaire, la teneur de l'atmosphère en lithium ou la gyrochronologie.

Pour un âge stellaire donné, la masse des candidats détectés en imagerie est estimée par comparaison de leur magnitude absolue avec les prédictions des modèles d'évolution. Si l'âge est erroné, un candidat peut alors perdre ou gagner en intérêt pas rapport à sa nature réelle et créer un "faux positif" ou un "vrai négatif". Le compagnon détecté autour de HD8049 dans le NaCo-LP est à cet égard un exemple intéressant de faux positif en imagerie directe. En effet, l'âge initial estimé pour l'étoile à partir de l'activité stellaire et de sa période de rotation était < 100 Myr, faisant du candidat détecté en bande H avec NaCo (Figure 26 ; gauche) une naine brune de $\sim 35 M_{\text{Jup}}$ (Zurlo, Vigan et al. 2013). Cependant un certain nombre d'incohérences sont rapidement apparues avec les autres indicateurs d'âge dont l'absence totale de lithium qui indique un âge nécessairement > 500 Myr.

La combinaison de nos données NaCo avec des données d'archive en RV (Figure 26 ; droite) a permis de commencer à lever le voile en montrant que la masse du compagnon ne pouvait pas être sub-stellaire. Et finalement ce sont de nouvelles observations avec SINFONI qui ont révélées la vraie nature du compagnon :

une naine blanche, probablement issue d'un progéniteur de 1.2-1.5 M_{Sun} . Notre interprétation est que l'accrétion par la primaire de matériel éjecté par le progéniteur pourrait avoir accéléré sa rotation et son activité magnétique, faisant apparaître l'étoile comme plus jeune qu'elle ne l'est réellement.

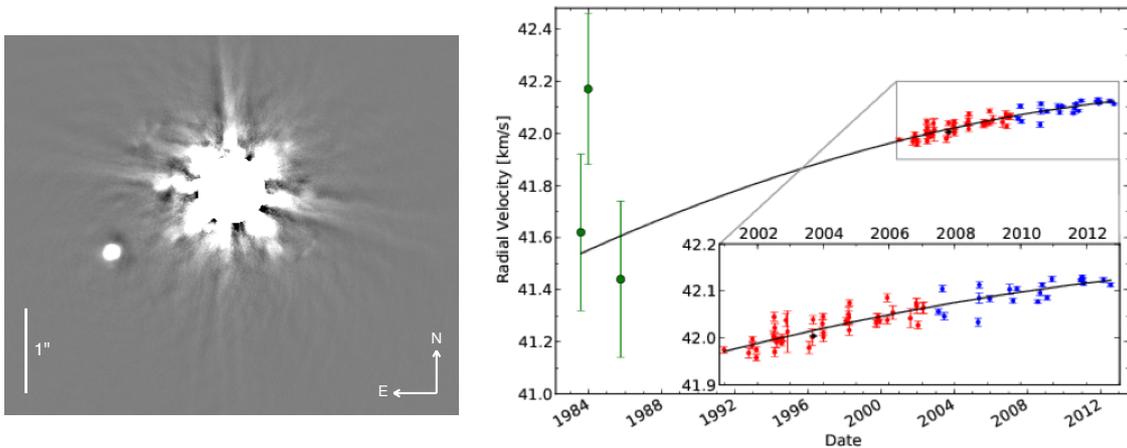


Figure 26 - Gauche : Image de HD8049 B obtenue avec VLT/NaCo en bande H en 2010. Droite : spectre en bande H+K obtenu avec VLT/SINFONI qui a permis de confirmer que HD8049 B est une naine blanche issue d'un progéniteur de 1.2-1.5 M_{Sun} . Cette étude est présentée dans Zurlo, Vigan et al. (2013)

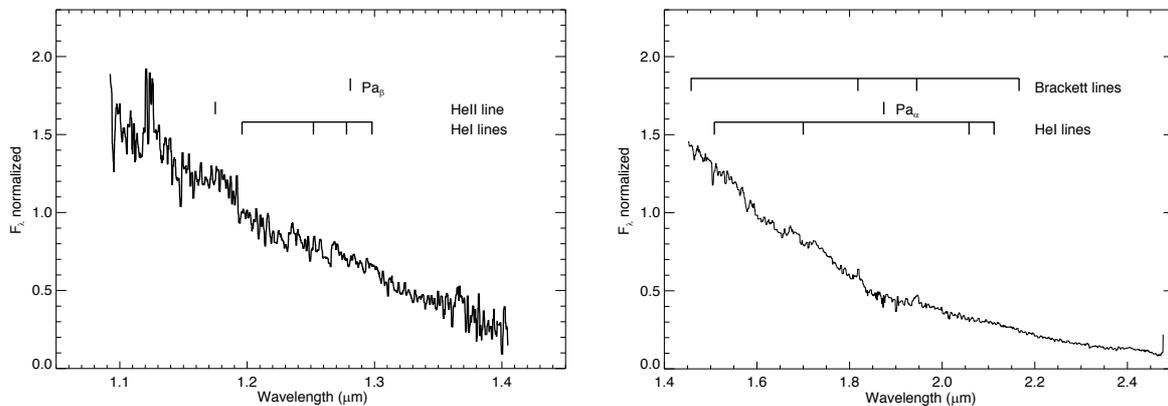


Figure 27 – Données VLT/SINFONI en bande J et H+K qui montre un spectre typique de naine blanche avec des raies d'absorption de l'hélium et l'émission de raies Paschen α et β .

Cet exemple rejoint la liste d'autres exemples de faux positif en imagerie directe qui sont en général dus à une détermination incertaine de la distance et/ou du mouvement propre de la primaire (Metchev & Hillenbrand 2009 ; Mawet et al. 2012 ; Nielsen et al. 2017). Avec l'accroissement des tailles des échantillons de relevés en imagerie il est important de garder cette problématique à l'esprit et si possible de multiplier les moyens de confirmation de la nature des compagnons détectés.

Premiers résultats du mode IRDIS-LSS : caractérisation de 2MASS 0122-2439 B

- Hinkley, Bowler, **Vigan**, et al. ; 2015, ApJ, 805, 10 : “Early Results from VLT SPHERE: Long-slit Spectroscopy of 2MASS 0122-2439 B, a Young Companion Near the Deuterium Burning Limit”

La spectroscopie des compagnons de faible masse est essentielle pour la détermination de leurs propriétés physiques. En particulier, l'étude des compagnons à la transition entre les naines L et T s'est révélée d'un intérêt essentiel au cours de la dernière décennie du fait de la forte dépendance du type spectral à la gravité de surface de ces objets (Metchev & Hillenbrand 2006), qui met en évidence la complexité des processus physico-chimiques qui ont lieu dans les atmosphères relativement froides de ces objets (Barman et al. 2011 ; Baraffe et al. 2014). Dans ce contexte, le mode de spectroscopie longue fente (*long-slit spectroscopy*, LSS) de IRDIS (Vigan et al. 2008) est un outil particulièrement attractif car il offre jusqu'à une résolution de $R=350$, ce qui permet de commencer à détecter certaines raies d'absorption atomiques.

2MASS J01225093–2439505 B est un compagnon de 12-27 M_{Jup} détecté par Bowler et al. (2013) autour d'une étoile M3.5V de ~ 120 Myr, et pour lequel seulement de la spectroscopie en bande K a pu être obtenue avec

Keck/OSIRIS. Cet objet est particulièrement intéressant car la plupart des compagnons de type L connus ont été détectés dans des groupes beaucoup plus jeunes (10-30 Myr). Cet objet a été observé avec SPHERE en mode MRS durant la phase de vérification scientifique de l'instrument en décembre 2014, sur proposition d'un de mes collaborateurs de l'université d'Exeter, Sasha Hinkley.

Mon analyse des données IRDIS-LSS a permis d'extraire un spectre du compagnon dans les bandes YJH (Figure 28) qui a ensuite été comparé aux grilles de modèles d'atmosphère BT-Settl (Allard et al. 2013) ainsi qu'à un certain nombre d'objets empiriques. Ces nouvelles données ont permis de confirmer la faible gravité de surface du compagnon, notamment par la mise en évidence de faibles raies d'absorption du sodium en bande J. Les données ont cependant mis en évidence la nécessité d'avoir accès à une résolution spectrale plus élevée que ce que peut proposer l'instrumentation actuelle pour une caractérisation plus fine des propriétés physiques des compagnons de faible masse.

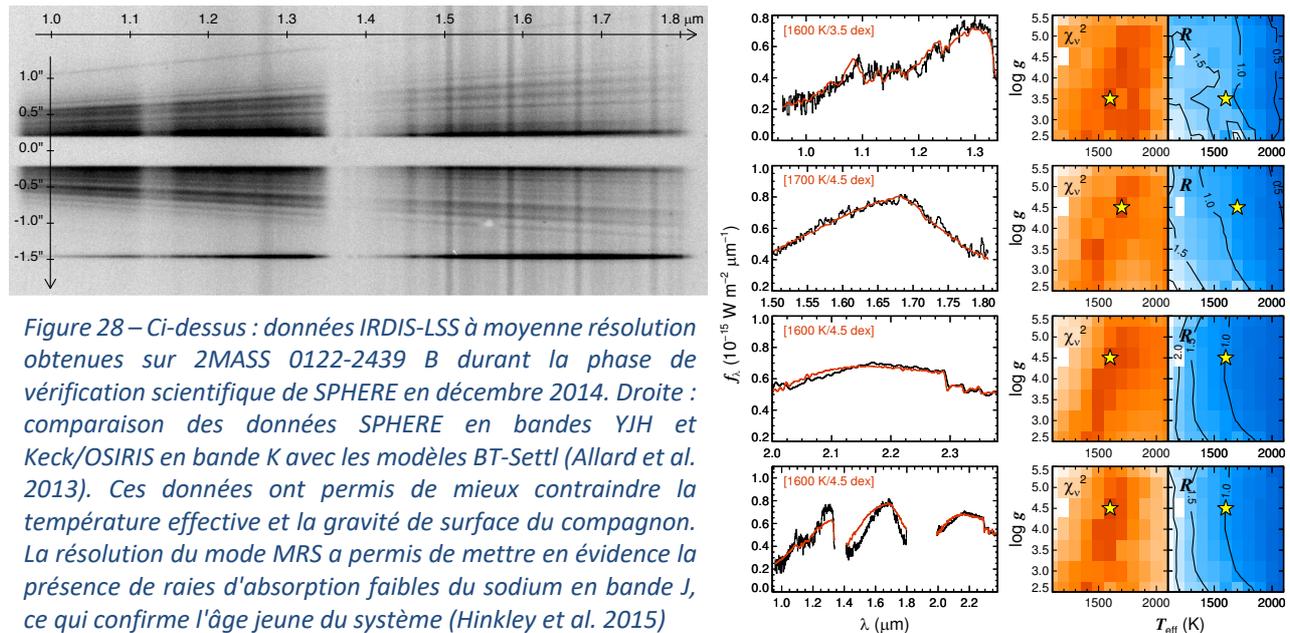


Figure 28 – Ci-dessus : données IRDIS-LSS à moyenne résolution obtenues sur 2MASS 0122-2439 B durant la phase de vérification scientifique de SPHERE en décembre 2014. Droite : comparaison des données SPHERE en bandes YJH et Keck/OSIRIS en bande K avec les modèles BT-Settl (Allard et al. 2013). Ces données ont permis de mieux contraindre la température effective et la gravité de surface du compagnon. La résolution du mode MRS a permis de mettre en évidence la présence de raies d'absorption faibles du sodium en bande J, ce qui confirme l'âge jeune du système (Hinkley et al. 2015)

Caractérisation du compagnon naine-brune GJ758 B avec IRDIS

- **Vigan**, Bonnefoy, Ginski, Beust, Galicher, et al. ; 2015, A&A, 587, 55 : “*First light of the VLT planet finder SPHERE. I. Detection and characterization of the sub-stellar companion GJ 758 B*”

Le lent refroidissement des compagnons de masse substellaires induit une décroissance de leur luminosité globale avec le temps. A mesure que leur température diminue, l'apparition et la disparition de molécules et/ou de nuages de poussière va se traduire par une variation progressive de la forme de leur spectre et donc de leur couleur dans le proche infrarouge (e.g. Burrows et al. 2006). A des âges avancés, de l'ordre de quelques Gyr, l'imagerie directe devient sensible à des compagnons naine-brunes massives qui peuvent avoir des températures effectives relativement faibles (quelques centaines de Kelvin).

La naine brune autour de l'étoile G9V GJ758 découverte par Thalmann et al. (2009) fait partie de ces objets. Avec une température de ~ 600 K et un type spectral T9, elle est parmi les compagnons les plus froids jamais détectés. Durant le commissioning de SPHERE, ce système a été observé à de multiples reprises avec IRDIS dans différentes paires de filtres DBI pour des tests de performance. A partir de ces mesures dans les bandes Y, J, H et Ks j'ai effectué une analyse complète des propriétés physiques du compagnon, et plus généralement une étude du système GJ758 (Vigan et al. 2016b). En effet, l'étude a révélé la présence d'un candidat plus interne que GJ758 B qui n'a pas encore été confirmé. Si on exclut ce candidat, qui pourrait être compatible avec une étoile d'arrière-plan, nos observations ont permis de mettre des contraintes fortes sur la présence de compagnons plus internes dans le système. Ces observations sont également intéressantes car elles démontrent l'intérêt du mode DBI pour la détection de compagnons comme GJ758 B qui présentent de fortes bandes d'absorption (Figure 29).

Les points de photométrie obtenus sur GJ758 B, combinés à la photométrie obtenue précédemment par Thalmann et al. (2009), Currie et al. (2010) et Janson et al. (2011), nous a permis une étude approfondie de

ses propriétés physiques. La comparaison de la photométrie à des objets empiriques isolés connus et à différentes familles de modèles d'atmosphère a confirmé le type spectral très tardif du compagnon. Elle a également mis en évidence la difficulté à reproduire les caractéristiques spectrales de cet objet (Figure 29), ce qui selon nous pointe vers une métallicité non-solaire pour cet objet. Il reste cependant difficile de conclure sur ce point car le nombre d'objets substellaires avec de bonnes contraintes sur la métallicité est très faible, et la plupart des grilles de modèles d'atmosphère n'explorent pas les métallicités non-solaires.

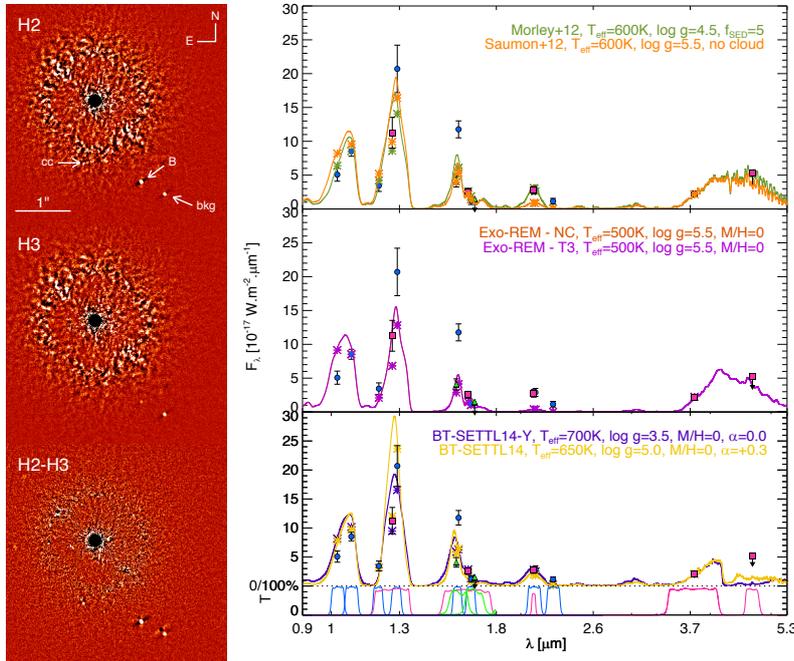


Figure 29 – Gauche : Images du système GJ758 obtenues en mode IRDIS-DBI avec la paire de filtres H23. Ces images montrent le résultat de l'analyse PCA en H2, H3 et en mode SDI. Le compagnon et une étoile de fond déjà connue sont mis en évidence, ainsi qu'un nouveau candidat identifié dans le système. Des observations de commissioning sur ce système ont été prises dans toutes les paires de filtres DBI. Droite : Comparaison des données DBI obtenues dans les 4 bandes YJHK avec différentes familles de modèles d'atmosphères. Cette comparaison, ainsi que la comparaison à des objets empiriques, a mis en évidence la difficulté à reproduire les caractéristiques spectrales de ces objets. Une des hypothèses envisagées est la probable métallicité sur-solaire du compagnon (Vigan et al. 2016b)

Pour finir, nous avons effectué une analyse astrométrique du mouvement orbitale du compagnon au moyen de différents outils Monte Carlo. Cette analyse a permis de mieux contraindre les orbites possibles du compagnon, mais le large demi-grand axe de son orbite se traduit en pratique par un mouvement relativement faible depuis sa découverte en 2009. Les données favorisent toutefois une excentricité élevée (>0.5) dont la cause reste à déterminer. Nous avons toutefois exclu la présence d'un compagnon interne non-résolu qui pourrait induire un mouvement astrométrique de la primaire qui créerait l'illusion d'une orbite excentrique (Pearce et al. 2014).

Etudes du système HR8799 avec SPHERE

- Zurlo, **Vigan**, Galicher, Maire, et al. ; 2015, A&A, 587, 57 : “First light of the VLT planet finder SPHERE. III. New spectrophotometry and astrometry of the HR8799 exoplanetary system”

Le système de 4 planètes géantes autour de l'étoile HR8799 de ~ 30 Myr est emblématique de l'imagerie directe et représente à lui seul une source quasi-inépuisable de sujets de recherche depuis sa découverte (Marois et al. 2008). Il a par conséquent été l'une des cibles privilégiées de SPHERE lors du commissioning puis dans le cadre du relevé SHINE.

Bien qu'étant connu depuis de nombreuses années et ayant été la cible de plusieurs études avec différents instruments, ce système n'a pas pu être étudié en détail avant l'arrivée de SPHERE et GPI du fait du grand contraste et de la petite séparation angulaire des planètes. En particulier, les deux planètes les plus internes du système (Figure 30) n'avaient pas de spectres publiés de bonne qualité avant l'étude que nous avons menée avec mon étudiante Alice Zurlo (Zurlo et al. 2016). L'étude précédente par Oppenheimer et al. (2013) avait en effet observé ce système au moyen de Palomar/P1640, mais les spectres extraits pour les planètes d et e étaient de mauvaise qualité du fait d'un SNR extrêmement faible. Les mesures faites avec l'IFS et IRDIS ont démontré tout le potentiel de la nouvelle génération d'instruments à haut-contraste, et nous avons été en mesure d'extraire et de publier les premiers spectres exploitables pour les deux planètes internes, ainsi que les premières valeurs de photométrie en bande J. Nos observations ont de plus permis d'exclure la présence d'une autre planète géante dans le système, dont l'existence avait été suspectée par de précédentes observations.

L'étude des spectres et de la photométrie des planètes les plus internes nous a montré leur similarité avec des naines L6-L8, mais avec des couleurs légèrement plus rouges que prédites par les modèles et par la comparaison à des naines brunes plus âgées. Les planètes b et c sont pour leur part mal reproduites par les modèles et les autres objets connus, mais nous avons montré dans une seconde étude que la SED de ces deux planètes peut être reproduite par des objets connus rougis par des grains de corindon, de fer, d'enstatite ou de fosterite (Bonnefoy et al. 2016). De leur côté, les modèles ne parviennent toujours pas à reproduire correctement ces deux planètes. Nos conclusions montrent que HR8799b et c auraient un type spectral légèrement plus tardif que HR8799d et e, et auraient par conséquent des masses plus faibles.

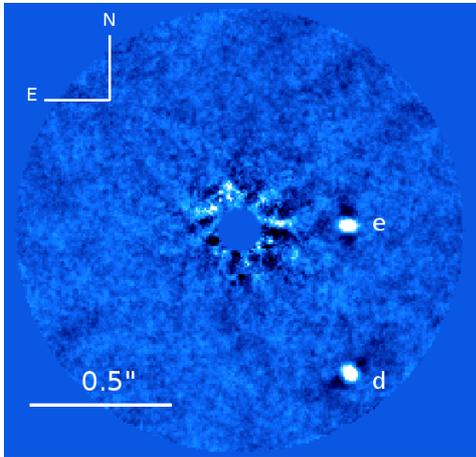
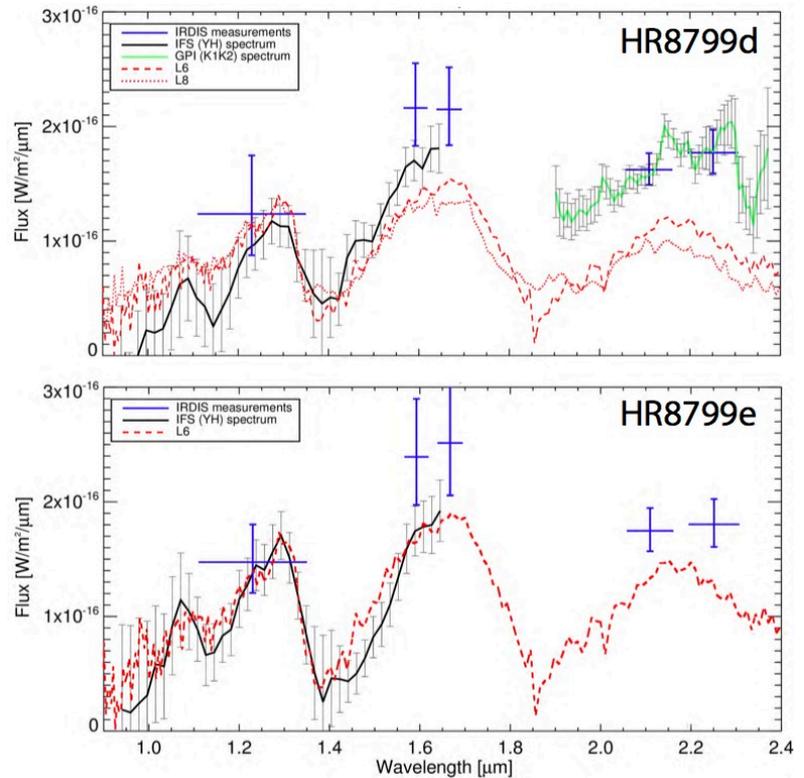


Figure 30 - Haut : Image de la partie interne du système HR8799 obtenue avec l'IFS de SPHERE. Nos observations ont permis d'écarter l'existence d'une autre planète géante ($>5 M_{Jup}$) dans le système jusqu'à des séparations de 5 UA. Droite : spectre des planètes d et e obtenus avec l'IFS. Ces spectres sont les premiers jamais obtenus pour ces planètes (Zurlo, Vigan et al. 2016 ; Bonnefoy et al. 2016)



Enfin, l'analyse astrométrique effectuée par A. Zurlo a également montré que les orbites des planètes d et e sont compatibles avec une résonance de type 2d:1e ou 3d:2e. Un monitoring des orbites de ces planètes est en cours durant l'ensemble de la durée du relevé SHINE afin d'apporter des contraintes fortes d'ici la fin du relevé en 2019 ou 2020.

HD169142 a-t-elle vraiment un compagnon planétaire en formation ?

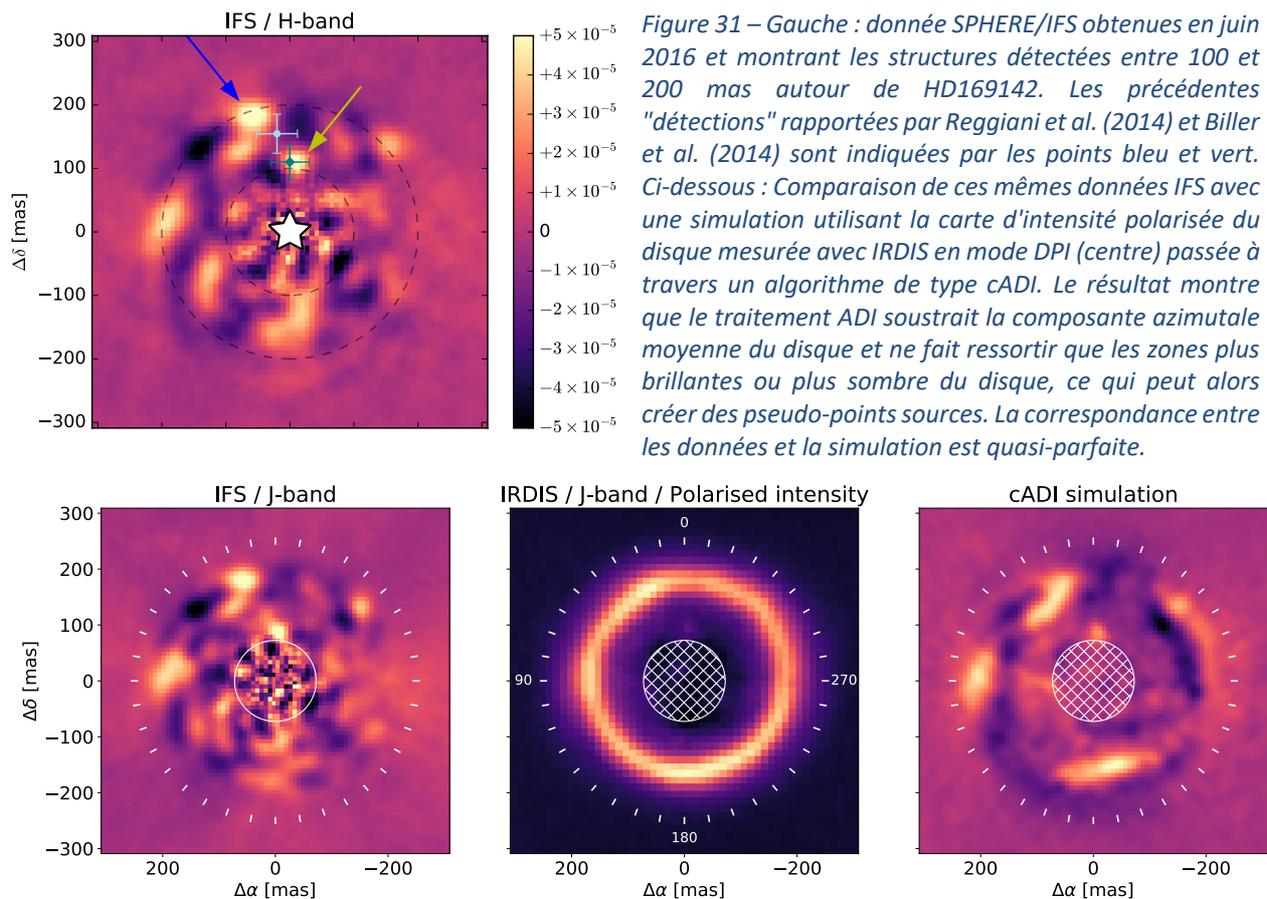
- Ligi, [Vigan](#), Gratton, et al. ; 2018, MNRAS, 473, 1774 : "[Investigation of the inner structures around HD169142 with VLT/SPHERE](#)"

HD169142 est une étoile de type Herbig Ae située à 117 pc qui est entourée d'un disque pré-transitionnel vu pratiquement de face et qui présente plusieurs ouvertures (Quanz et al. 2013 ; Osorio et al. 2014 ; Wagner et al. 2015). La présence de ces ouvertures a été interprétée comme une indication forte de la présence de planètes en formation autour de l'étoile. En 2014, deux observations indépendantes de cette étoile avec VLT/NaCo ont révélé la présence de possibles points sources à des séparations entre 100 et 200 mas (Reggiani et al. 2014 ; Biller et al. 2014) que les auteurs respectifs ont considéré être une proto-planète. Cependant la très faible séparation orbitale et le grand contraste de ce point source ont rendu toute confirmation particulièrement difficile.

Entre 2015 et 2017, de nouvelles données ont été obtenues avec l'instrument SPHERE en mode IRDIFS avec un coronographe et en imagerie saturée, avec l'espoir de reconfirmer cette planète en formation. L'étude de ces données a été réalisée par Roxanne Ligi, la postdoctorante que j'ai encadré au LAM entre 2015 et 2017 (Ligi, Vigan et al. 2018a). L'analyse des données en imagerie saturée qu'elle a effectuée a montré la présence de plusieurs structures plus ou moins étendues dans les données, dont deux localisées pratiquement aux positions de la possible proto-planète identifiée précédemment (Figure 31).

Cependant, elle a démontré au moyen d'une méthode que j'ai développé qu'une partie de ces structures correspond en fait à un anneau du disque situés à 180 mas et dont la luminosité de surface n'est pas uniforme. Après passage au travers des algorithmes de type ADI, la composante azimutale moyenne est soustraite, faisant ainsi ressortir les zones les plus brillantes comme des pseudo-points sources (Figure 31). Cette analyse se base sur des données obtenues en mode IRDIS/DPI qui permettent d'avoir une mesure de l'intensité polarisée par le disque. Les différentes mesures effectuées entre 2015 et 2017 ont montré que ces structures se déplacent avec un mouvement Képlérien, ce qui confirme qu'il s'agit de structures réelles et non d'artefacts dus à la réduction des données.

Enfin, l'étude de Roxanne a révélé un possible point source à 90 mas au nord de l'étoile. La réalité de cette structure reste douteuse, et de nouvelles observations sont nécessaires mais la séparation et le contraste de cette structure rendent toute confirmation très difficile. Compte tenu de l'historique de cette source, la possibilité que cette structure soit une structure d'un disque plus interne reste une hypothèse crédible.



La première planète SHINE : HIP65426b

- Chauvin, Desidera, Lagrange, **Vigan**, et al. ; 2017, A&A, 605, L9 : "Discovery of a warm, dusty giant planet around HIP65426"

Le relevé SHINE que nous effectuons sur le temps d'observation garanti (GTO) SPHERE a pour but d'observer entre 400 et 600 étoiles jeunes (<500 Myr) et proches (<150 pc) pour contraindre la population des planètes géantes aux séparations de 5 à 50 UA et éventuellement découvrir et caractériser de nouveaux compagnons de faible masse. Ce relevé est déjà à l'origine de plus d'une trentaine de publications auxquelles j'ai contribué soit de manière spécifique par des analyses dédiées, soit de manière plus générale par mon implication dans l'équipe dirigeante du relevé. Dans le cadre de SHINE, je suis en effet responsable du *work-package* d'identification, classification et caractérisation des candidats détectés dans les données. Après 3 ans de relevé, plus de 2000 candidats ont été détectés dans les données IRDIS autour de 132 étoiles. La détermination de leur statut (étoile d'arrière-plan ou compagnon) constitue une activité complexe (et chronophage !) faisant appel aux données d'archives, aux diagrammes magnitude-couleur et au suivi multi-époque des candidats.

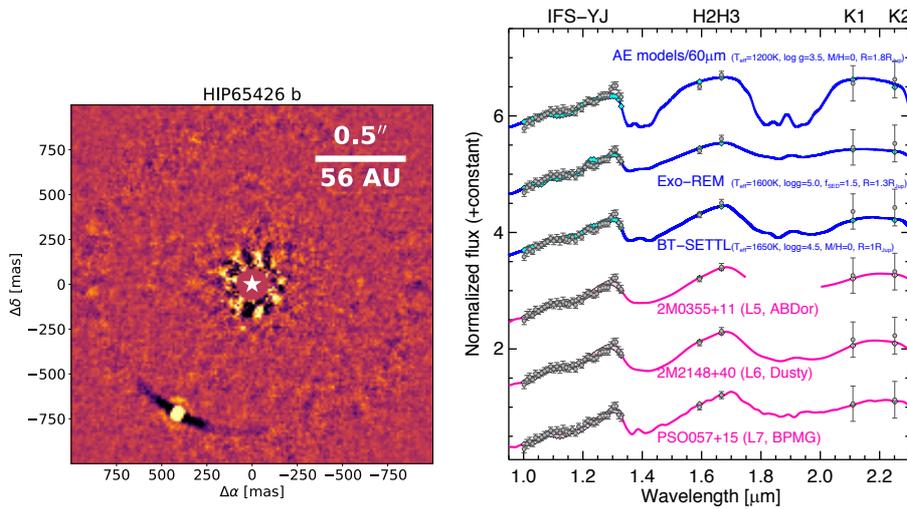


Figure 32 – Gauche : image de HIP65426b obtenue dans le filtre K1 avec IRDIS en février 2017. Droite : comparaison des données IRDIFS sur la planète avec différents modèles et objets empiriques qui confirme que la planète est de type L5-L7 et qui permet de contraindre la température effective à 1300-1600K. La gravité de surface n'est quant à elle pas bien contrainte par ces premières observations.

Au cours de l'été 2016, un candidat intéressant a été détecté dans les données IFS autour de HIP65426, une étoile de type A2 à 111 pc membre de Sco-Cen. Le spectre IFS et la photométrie IRDIS du candidat présentant des traits caractéristiques des naines L, l'étoile a été réobservée dès février 2017, ce qui a permis de confirmer qu'il s'agit bien d'un compagnon en orbite autour de l'étoile (Figure 32). Notre analyse spectrale des données a permis de confirmer un type spectral entre L5 et L7, et de contraindre la température effective à 1300-1600K. Les données disponibles n'ont cependant pas permis de bien contraindre la gravité de surface. Une analyse de type MCMC que j'ai effectué sur le modèle de Rice et al. (2015) a en effet montré que suivant la grille de modèles utilisée (avec ou sans nuages, en particulier), la gravité de surface la plus probable est entre 3.5 dex et 4.5 dex, ce qui est compatible respectivement avec un objet jeune ou un objet beaucoup plus âgé. Les indicateurs d'âge de l'étoile étant par ailleurs robustes pour indiquer un âge du système de 14 ± 4 Myr, nous avons donc conclu que le compagnon est bien de masse planétaire. De nouvelles données couvrant une gamme spectrale plus étendue devraient permettre de mieux contraindre la gravité de surface.

Une autre analyse que j'ai effectué sur le modèle de mon étude sur Sirius (Vigan et al. 2015) a été de déterminer les limites de détection des observations en utilisant des spectres réalistes de compagnons de différents types spectraux (Figure 33). Cette analyse a permis d'exclure des compagnons de masse $< 10 M_{\text{Jup}}$ jusqu'à des séparations de ~ 20 UA dans le système. L'étude de ce système va être poursuivie dans les années à venir, notamment pour contraindre l'orbite de la planète.

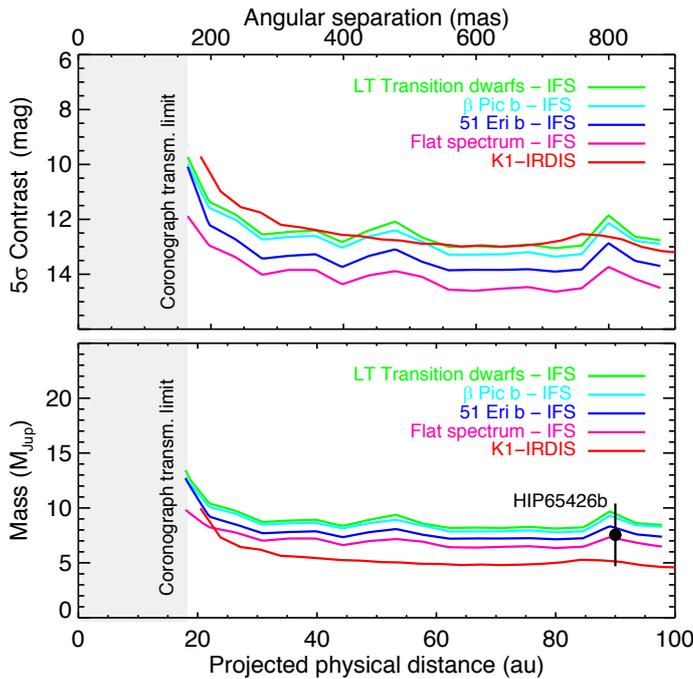


Figure 33 – Limites de détection déterminées pour différents types de compagnons avec des spectres similaires à β Pictoris b, à 51 Eri b et à un objet à la transition L-T. Cette analyse a permis de montrer l'influence du spectre du compagnon sur les limites de détection et ainsi d'exclure différents types de compagnons additionnels dans le système jusqu'à des séparations de ~ 20 UA.

2 RETOUR VERS LE FUTUR

Les axes de recherche que je souhaite explorer dans les années à venir sont détaillés dans les sections suivantes. De manière intéressante, les problématiques restent très similaires aux axes de recherche que j'ai développé jusqu'à maintenant, avec la poursuite des grandes questions énoncées en début de manuscrit : Comment détecter des planètes plus faibles et plus proches de leur étoile ? Comment les caractériser de manière plus précise ? Et comment aller plus loin avec une prochaine génération d'instruments ?

Il s'agit donc d'un retour vers le futur qui va guider mes recherches dans les années à venir.

2.1 Validation des modèles de formation planétaires

Un des principaux objectifs de la nouvelle génération d'imagers d'exoplanète est d'apporter des contraintes sur la population des planètes géantes gazeuses dans la gamme de séparation 5-50 UA, où la précédente génération d'instruments n'était pas suffisamment sensible pour fournir des résultats probants. Ces contraintes peuvent se regrouper selon deux catégories : 1) les contraintes statistiques sur la fréquence de ces planètes autour de l'ensemble des étoiles, et 2) les contraintes plus spécifiques issues de détections individuelles. Dans les deux cas, un des objectifs importants dans les années à venir sera de faire le lien entre les résultats observationnels et les modèles physiques de formation planétaire.

Dans le cas des contraintes statistiques globales, mes travaux initiés dans le cadre du relevé NaCo-LP sont une première étape pour mettre des contraintes sur la formation planétaire par instabilité gravitationnelle (Vigan et al. 2017 ; voir Sect. 1.2.1), qui est le mode de formation généralement privilégié aux grandes séparations orbitales. Je projette dans les années à venir d'utiliser une approche similaire sur les résultats du relevé SHINE et/ou d'autres relevés effectués avec la nouvelle génération d'instruments. L'intérêt principal de ces nouvelles observations est qu'elles permettent de sonder des domaines de masse et de séparation orbitale où les scénarios de formation par instabilité gravitationnelle et par accrétion sur cœur commencent à avoir des probabilités similaires de former des planètes géantes, en particulier si on prend en compte les phénomènes de *scattering* dans la formation de systèmes multiples. De plus, l'apparition relativement récente de nouvelles idées comme l'accrétion de *pebbles* rend cette approche encore plus importante pour tenter de discriminer les différents scénarios de formation.

Les détections individuelles sont essentielles pour étudier la formation, l'évolution et la composition des planètes géantes. De plus, l'étude de ces objets dans le contexte de "système planétaire" (étoile, disque de débris, autre compagnons) est également un point clé pour comprendre ces objets. Dans les années à venir, je souhaite continuer le travail que j'ai entamé d'étude de compagnons et de systèmes spécifiques au moyen d'observations SPHERE ou d'autres instruments. Des avancées intéressantes sur le lien entre SED de compagnons et scénario de formation ont déjà été effectuées sur quelques objets spécifiques (e.g. β Pictoris b, Bonnefoy et al. 2014 ; Marleau & Cumming 2014), et je souhaite m'orienter dans cette direction pour les détections SPHERE.

L'étude des paramètres physiques et atmosphériques des planètes géantes est généralement effectuée par une comparaison à des modèles d'atmosphères pré-générées sur des grilles de paramètres physiques (Teff, $\log(g)$, métallicités, tailles et composition des grains de poussière, etc). Cette approche directe est facile à mettre en œuvre car elle permet la comparaison directe des observables aux grilles de modèles, mais elle comporte un certain nombre de paramètres cachés ou arbitrairement fixés (profils de température-pression, abondances). Grâce à grande quantité de données maintenant issues de l'imagerie directe, il devient possible d'appliquer des méthodes d'inversion (*atmospheric retrieval*) qui couplent un modèle d'atmosphère avec des outils bayésiens pour contraindre un ensemble de paramètres physiques défini au départ (voir e.g. Line 2013). Ces techniques sont employées dans l'études des planètes du système solaire depuis de nombreuses années, et leur application à l'imagerie directe commence à prendre de l'ampleur. Dans ce contexte, je suis collaborateur associé à une demande ANR visant à développer ces techniques qui sera redéposée à l'appel ANR 2019 (PI Bonnefoy). Ce projet a pour but principal le développement d'un outil de *retrieval* sur la base du modèle d'atmosphère ExoREM (Baudino et al. 2015).

2.2 Haut-contraste et haute-résolution spectrale : projet HiRISE

Cet axe de recherche est l'objet du projet ERC StG HiRISE que j'ai obtenu en 2017

Les instruments d'imagerie à haut-contraste offrent de nouvelles capacités pour la détection de planètes grâce à la combinaison de l'optique adaptative extrême et de la coronagraphie, mais l'ensemble des instruments actuellement en service n'offrent que des capacités limitées en termes de résolution spectrale : tous les spectrographes à intégrale de champ sont limités à des résolutions de $R=100$, et le mode LSS de IRDIS est pour sa part limité à une résolution de $R=350$. Ces résolutions sont intéressantes pour la caractérisation, notamment pour la détermination des propriétés atmosphériques principales des planètes (e.g. Morzinski et al. 2015) comme la température effective ou la gravité de surface, mais elles entraînent généralement des dégénérescences dans l'ajustement des modèles (e.g. Bonnefoy et al. 2016). De plus, ces résolutions ne donnent pas accès à des mesures focalisées comme les abondances du carbone et de l'oxygène qui sont reliées aux mécanismes de formation des planètes (Öberg et al. 2011), à des mesures de vitesses radiales directement sur les planètes qui permettraient d'avoir des mesures de masses indépendantes (e.g. Crepp et al. 2012a) ou à la mesure de leur variabilité atmosphérique qui permet de sonder l'existence de nuages dans les atmosphères (Buenzli et al. 2012 ; Crossfield et al. 2014). Pour accéder à ce type de mesures et améliorer de façon significative la compréhension des planètes géantes gazeuses, un saut d'un à deux ordres de grandeur en résolution spectrale est nécessaire.

De hautes résolutions spectrales ne peuvent être atteinte qu'avec de la spectroscopie à haute dispersion. Cette technique a déjà fait ses preuves dans l'infrarouge pour étudier le mouvement orbital, la masse, les vents de haute altitude, la composition et l'albédo d'une poignée de géantes gazeuses (Snellen et al. 2010 ; Crossfield et al. 2012 ; Martins et al. 2015). La puissance de cette technique réside dans sa capacité à différencier les signaux de l'étoile et de la planète du fait de la composante en vitesse radiale distincte de la planète et/ou de son spectre différent de celui de l'étoile. Cependant, cette technique ne peut être utilisée qu'en s'affranchissant du contraste entre l'étoile et la planète, ce qui a limité son utilisation à des planètes à très faible séparation orbitale ($\ll 0.1$ AU) fortement irradiées par leur étoile et réémettant une part non-négligeable de cette énergie.

Les planètes géantes gazeuses jeunes constituent potentiellement des cibles idéales pour cette technique du fait de leur luminosité intrinsèque, comme l'a montré l'étude novatrice de Snellen et al. (2014) sur β Pictoris b. Malheureusement, d'autres études de ce type ne sont pas réalisables car les spectrographes à haute dispersion actuellement en service ne sont pas équipés de coronagraphes qui permettraient d'atteindre de plus grands contrastes à de plus petites séparations angulaires. Pour réaliser la caractérisation fine des planètes géantes à haute résolution spectrales, il est donc nécessaire de combiner haute résolution spatiale, imagerie à haut contraste, et spectroscopie à haute dispersion.

Le développement et la construction d'un nouvel instrument dédié n'est pas à l'ordre du jour, mais l'idée commence à gagner du terrain et des expériences ont été tentés à Subaru (Jovanovic et al. 2016) et des évolutions d'instruments existants sont en cours au Keck (Mawet et al. 2016). En Europe, nous avons une opportunité unique pour développer ces méthodes de détection et caractérisation avec SPHERE et CRIRES+, deux instruments installés sur l'UT3 du VLT.

Dans le projet HiRISE financé par l'ERC (grant agreement #757561), je vais développer et construire un démonstrateur de module d'injection à fibre qui sera installé dans SPHERE et permettra un couplage avec CRIRES+ afin de faire la caractérisation à très haute résolution spectrale des planètes directement imagées connues ou à venir. Cette possibilité a été évoqué en 2016 au *VLT AO Community Days* et a reçu un intérêt de l'ESO et de la communauté. Il est en particulier ressorti de ce meeting que SPHERE est probablement l'instrument le plus performant dans le monde de l'imagerie directe et qu'il serait plus intéressant de le faire évoluer plutôt que d'initier le développement d'un nouvel instrument imageur d'exoplanètes pour le VLT.

Les études que nous avons commencé à réaliser dans le cadre de HiRISE montrent que la plupart des exoplanètes déjà imagées pourraient être caractérisées avec un système combiné SPHERE/CRIRES+ en quelques heures d'observations. La limitation principale reste cependant la transmission globale du système qui va fortement limiter le nombre de photons scientifiques qui atteignent du détecteur du spectrographe.

Des premiers résultats sont présentés dans Vigan et al. (2018a), mais la transmission globale anticipée pour le système est présentée dans la Figure 34. D'autres résultats seront prochainement présentés dans Otten et al. (en préparation) et Vigan et al. (en préparation).

Les possibilités offertes par le haut-contraste et la haute résolution spectrale sont nombreuses et le développement d'un prototype en Europe sur SPHERE, même avec des performances limitées, sera un premier pas essentiel vers l'étude à haute résolution spectrale des exoplanètes géantes jeunes.

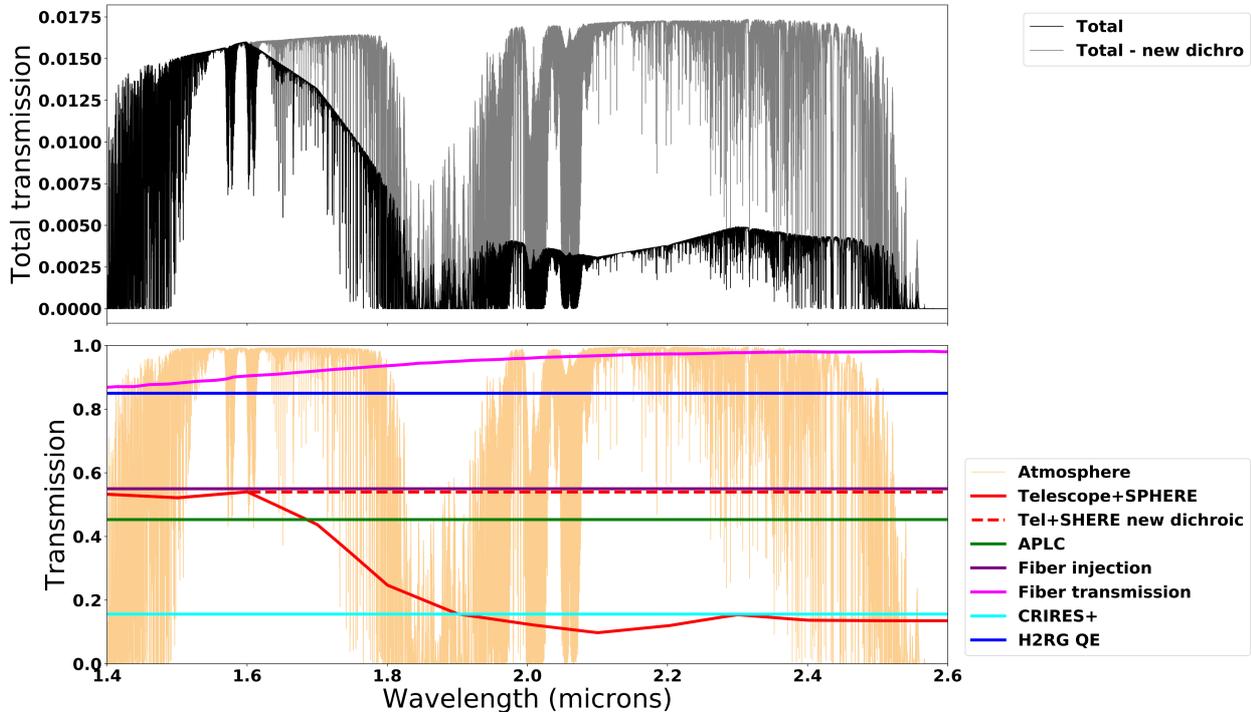


Figure 34 – Transmission anticipée pour un système SPHERE/CRIDES+. La transmission totale est inférieure à 2%, ce qui est la principale limitation pour les cas scientifiques accessibles à un tel système.

2.3 Haut-contraste sur les grands télescopes segmentés

Enfin, le futur de la détection des exoplanètes passera nécessairement par les *extremely large telescopes* (ELTs). C'est un sujet d'actualité puisque les études de phase A des deux instruments de première lumière de l'ELT, MICADO et HARMONI, sont extrêmement avancées. HARMONI a en effet passé sa *Preliminary Design Review* (PDR) fin 2018. A plus long terme, le développement d'un imageur d'exoplanètes dédié sur l'E-ELT reste un objectif important qui nécessite une part importante de R&D pour identifier les concepts qui permettront peut-être de détecter des super-Terre de manière directe.

Sans nécessairement se rattacher à un projet spécifique d'instrument, la problématique du haut-contraste sur les télescopes segmentés peut être considérée à différents niveaux de performance. Au premier ordre, le cophasage fin du télescope est une étape indispensable pour ensuite atteindre de plus grands contrastes. Dans ce cadre-là, l'expérience *Active Phasing Experiment* (APE ; Gonté et al. 2006) à laquelle j'ai participé entre 2006 et 2009 a été un précurseur dans ce domaine pour la préparation des ELTs (e.g. Vigan et al. 2011). Bien que cette expérience sur le VLT n'ait pas eu de suite directe en 2009, le banc APE a maintenant été remis en place à l'ESO et mise à niveau pour inclure un système d'optique adaptative. Je co-encadre à présent une thèse avec E. Hugot (LAM/CNRS) et S. Lévêque (ESO) qui a pour but d'étudier les techniques de cophasage et leur couplage avec l'OA. La thèse étudiera différentes techniques pour étendre la gamme de mesure et de capture de différents analyseurs de surface d'onde, effectuer le cophasage sur étoile laser, et étudier des moyens de cophasage locaux qui seront utilisés lors du changement d'un segment. Cette thèse constitue une étape importante pour développer une implication dans le développement de l'ELT en collaboration avec l'ESO. Elle est également dans la continuité de travaux engagés il y a plus de 10 ans et qui sont en lien avec les techniques de mesure et de contrôle de front d'onde que nous avons implémenté dans SPHERE.

Ce premier étage de cophasage du télescope est essentiel pour les capacités haut-contraste des deux instruments de première lumière MICADO et HARMONI. En collaboration avec nos collègues de l'IPAG, nous explorons actuellement les capacités de HARMONI pour la détection et la caractérisation des planètes géantes. Un modèle de simulation de l'instrument a été développé pour le mode HARMONI haut-contraste (HARMONI-HC) par Alexis Carlotti (IPAG/AA). En me basant sur ces simulations, j'ai développé un modèle photométrique qui permet de créer des données réalistes en termes de photométrie et qui sont maintenant utilisées par mon nouvel étudiant en thèse, Mathis Houllé, pour explorer les limites de détection pour le mode HARMONI-HC. Un aspect important que nous explorons à présent est d'inclure la dimension multi-spectrale dans l'analyse puisque les données pourront être obtenues à des résolutions entre 3500 et 18000. Dans ce contexte, le travail que je vais effectuer dans le projet HiRISE sera une brique essentielle pour fournir des outils et stratégies d'analyse.

Au-delà de la problématique du cophasage, la question du très grand contraste sur les télescopes segmentés, que ce soit au sol ou dans l'espace, est un domaine très actif de recherche. Un des axes que je souhaite développer dans les années à venir correspond à l'étude du cophasage ultra fin avec ZELDA en présence de résidus atmosphériques filtrés par XAO, et les possibilités de faire du contrôle de front d'onde au moyen de télescopes segments ou en présence de segmentation. Ces grandes thématiques de recherche seront affinées dans l'année à venir après la remise à niveau de MITHIC, le banc à haut-contraste du LAM.

3 PERSPECTIVES GÉNÉRALES

La détection et la caractérisation des exoplanètes par imagerie directe se cantonne pour le moment aux planètes géantes à relativement grande séparation orbitale, mais clairement l'avenir de ce domaine est à la détection et la caractérisation de planètes de plus faible masse et à plus faible séparation. La détection de super-Terres et de mini-Neptunes va cependant nécessiter le développement d'une instrumentation ultra-optimisée sur des télescopes à la complexité encore difficile à concevoir.

En effet, les deux options qui se profilent dans les 10 à 20 années à venir sont d'une part les ELTs au sol et d'autre part les grands observatoires post-JWST dans l'espace. Les uns comme les autres présentent des avantages et des inconvénients en ce qui concerne l'imagerie de systèmes exoplanétaires. Les ELTs ont l'immense bénéfice de leur diamètre 2 à 3 fois supérieur à ce qui semble envisageable d'envoyer dans l'espace à l'horizon 2035 et ils offrent une « facilité » d'accès nettement supérieure, ce qui peut ouvrir la voie à des instruments construits de manière incrémentale avec une évolution progressive de leurs capacités et leurs performances. Ils ont cependant l'inconvénient d'être des télescopes segmentés avec des structures mécaniques gigantesques qui peuvent être problématiques en termes de stabilité temporelle des aberrations. Ils nécessitent de plus d'avoir des systèmes d'OA à très grand nombre de degrés de liberté pour compenser la turbulence atmosphérique. À l'inverse, les télescopes spatiaux offrent des avantages indéniables en termes de stabilité, qui permettent d'envisager des temps d'exposition de plusieurs jours ou semaines pour atteindre la limitation fondamentale du bruit de photon. Cet environnement spatial impose cependant des contraintes qui rendent les observatoires spatiaux extrêmement complexes et coûteux. De plus la taille des télescopes pouvant être placés en orbites est nécessairement plus limitée que ce qui est faisable au sol. Ce bref aperçu de quelques-uns des avantages et inconvénients des deux approches est loin d'être exhaustif mais montre qu'aucune solution n'est parfaite.

Dans ce contexte, il me semble difficile, au jour d'aujourd'hui, d'appréhender quelles seront les performances réelles de ces futurs grands observatoires pour la détection directe d'exoplanètes de faible masse. Cette considération m'a récemment amenée à me poser deux questions importantes pour le futur de l'instrumentation dédiées à l'imagerie des systèmes exoplanétaires.

La première question est la suivante : *peut-être ne parviendrons-nous jamais à imager des super-Terres avec un ELT ?* Une des raisons qui me pousse à ce questionnement est illustrée dans la Figure 35. Elle présente d'une part les courbes de contraste issues de l'analyse avec l'algorithme T-LOCI des données SPHERE d'un échantillon d'environ 150 étoiles observées dans SHINE, et d'autre part une courbe de contraste issue des simulations réalistes effectuées durant la phase A de SPHERE en vue d'estimer au mieux les performances attendues de l'instrument en amont des intégrations (Vigan et al. 2010). Cette simulation représente une observation de ~1h30 avec ~30° de rotation de champ, ce qui représente une observation représentative du point de vue de SHINE. La simulation a été analysée avec un algorithme PCA. Dans les deux cas (données réelles et simulations), les courbes de contraste prennent en compte les effets d'atténuation des algorithmes de traitement ADI.

Le point crucial de cette figure est la disparité entre les performances attendues proche de l'axe à partir des simulations et celles effectivement obtenues sur le ciel. Bien qu'un effort conséquent de réalisme ait été mis dans la préparation et l'exécution des simulations pour obtenir un jeu de données aussi représentatif que possible de la (future) réalité, il semble qu'une disparité d'un facteur 10 à 100 existe. Une partie de cet écart entre simulations et réalité provient, par exemple, du *Low Wind Effect* qui a été détecté durant les commissionings de SPHERE et qui n'a finalement été corrigé qu'en 2018 (Sauvage et al. 2015 ; Milli et al. 2018). Un autre aspect concerne la mesure et la correction des NCPA qui n'est pas effectuée : bien que la qualité de l'instrument ait été estimée dans les spécifications sans cette correction en amont des commissionings, il semble qu'a posteriori cette correction soit nécessaire. Ces deux exemples illustrent que malgré tous nos efforts pour mettre au point des instruments de grande qualité aux performances exceptionnelles, il restera toujours une part souvent non-négligeable d'incertitude qui viendra impacter (en général négativement) les performances. Cet aspect me semble d'autant plus important à garder en tête que la prochaine génération d'instruments capables d'imager des exoplanètes sera mise au point pour des télescopes *qui n'existent pas encore !* Il y aura donc une part d'incertitude inhérente au télescope lui-même

en plus de celle inhérente aux instruments. Cela pousse également à considérer le télescope et ses instruments comme un « tout », un ensemble à considérer de bout en bout depuis le design jusqu'à l'analyse des données en passant par la stratégie d'observation.

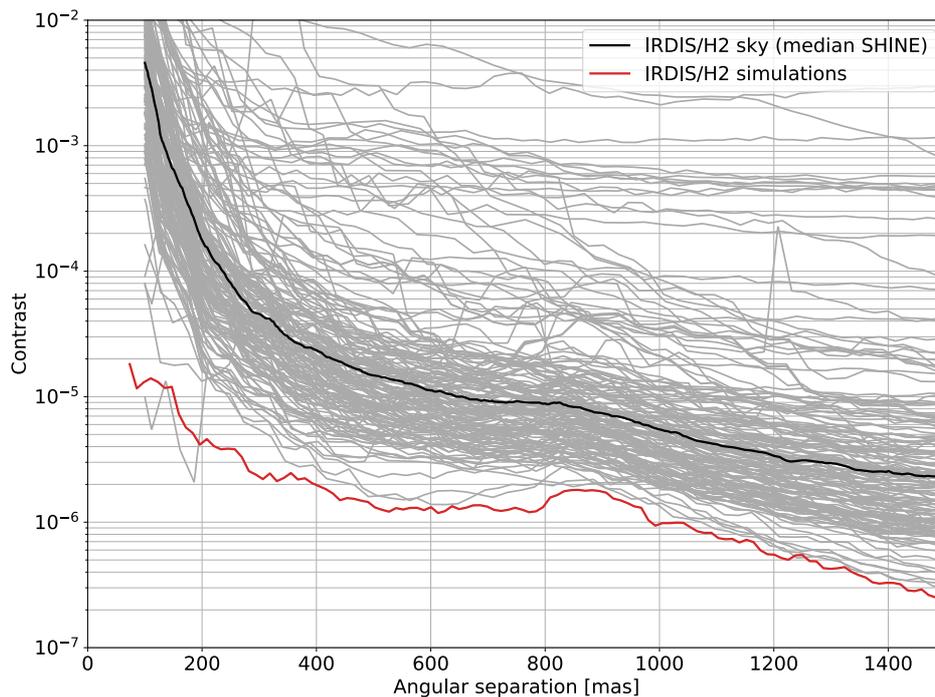


Figure 35 - Comparaison entre les courbes de contraste obtenues sur l'échantillon F150 de SHINE analysé avec T-LOCI (courbes grises) et une courbe de contraste obtenue pour mes simulations IRDIS-DBI analysées par PCA. La simulation représente une durée de ~1h30 d'observation avec ~30° de rotation de champ, ce qui est une bonne représentation des observations SHINE.

La seconde question est la suivante : *peut-être faut-il oublier le concept même « d'image » d'un système exoplanétaire ?* La perspective d'une image comme celle présentée sur la Figure 36 est certes particulièrement attrayante, car elle représente tout ce dont un astronome expert en imagerie d'exoplanète peut rêver : un système de planètes de compositions visiblement différentes, le tout baigné dans un nuage de poussière exo-zodiacale. Cependant, arriver à une telle image nécessite de réunir un ensemble de conditions exceptionnelles : un grand télescope dans l'espace, un coronographe quasi-parfait, un contrôle et une correction de front d'onde à des niveaux picométriques, une soustraction parfaite des speckles statiques, etc. Satisfaire toutes ces conditions de manière systématique n'est peut-être pas réaliste, et il devient utile de se poser la question de savoir quelle information scientifique on souhaite retirer des données. Si l'information de la présence ou non d'une exoplanète et de sa signature spectrale sont suffisantes, alors il est possible qu'un concept très différent de celui d'un imageur soit envisageable.

Un exemple récent est celui du *Vortex Fiber Nuller* proposé par Ruane et al. (2018). Dans ce concept, l'utilisation d'un coronographe de type Vortex couplé à une fibre monomode en plan focal va permettre d'aller sonder à l'intérieur de la limite de diffraction pour aller détecter et caractériser des planètes à très faible séparation angulaire. Dans ce régime, un coronographe classique dont le but est de supprimer la diffraction pour former une image dans le plan focal sera inopérant, alors que la combinaison avec la fibre permettra non-seulement d'aller sonder l'environnement proche de l'étoile mais également de caractériser une ou des planètes s'y trouvant. Une autre approche également basée sur des fibres optiques est celle du concept SCAR (Por & Haffert 2018) qui propose de paver le plan focal d'une matrice de micro-lentilles couplées à des fibres monomodes et combiné à une apodisation en phase permettant de s'assurer que le couplage du champ électrique dans les fibres hors-axe est quasi-nul. Ceci permet une réjection optimale des speckles de l'étoile et améliore significativement les capacités de détection et de caractérisation du système. Bien que ce concept se rapproche plus d'un IFU classique, « l'image » formée n'est pas une image au sens classique du terme.

Ces deux exemples sont récents mais pas nécessairement uniques. Ils illustrent le fait qu'il devient peut-être nécessaire de s'éloigner de la coronographie classique et du concept d'image si cher à nos yeux à partir du

moment où nous sommes en mesure d'extraire l'information astrophysique d'intérêt. Cette vision est décevante du point de vue visuel, mais elle pousse à se poser la question de l'information qu'on souhaite réellement retirer des observations.

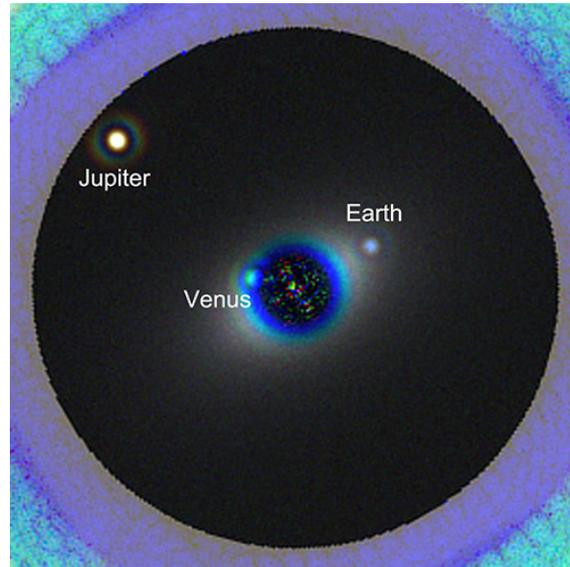


Figure 36 – Simulation du système solaire observé à 13.5 pc et observé avec un télescope spatial de 12 m équipé d'un instrument coronographique utilisant un APLC. Figure extraite de N'Diaye et al. (2016b).

Il s'agit bien évidemment d'un point de vue personnel qui, je l'espère, ne se vérifiera pas ou en tout cas pas de manière aussi extrême. En effet, on peut tout à fait imaginer disposer de plusieurs modes d'observation au sein d'un même instrument ou entre différents instruments d'un même observatoire. Cela permettra sans aucun doute de bénéficier à la fois de concepts hautement optimisés qui se focaliseront sur la mesure d'un signal spécifique, et des concepts plus familiers et plus polyvalents comme un mode d'imagerie avec un coronographe dédié. De plus on peut s'imaginer que si des agences publiques internationales sont prêtes à dépenser des sommes considérables pour faire fonctionner des imageurs d'exoplanètes sur des ELTs ou des télescopes spatiaux, il y aura une nécessité de rendre ces résultats compréhensibles, et donc visibles, à un large public non-expert. Dans un tel contexte, l'importance d'obtenir des images qui pourront être montrées et servir de justification auprès d'un public qui, *in fine*, finance nos grands équipements scientifiques, sera d'autant plus justifiée. Et dans tous les cas, même pour nous astronomes professionnels, le plaisir d'obtenir une belle image surpassera toujours toute autre forme de mesure astrophysique !

4 ENCADREMENT

Thèse : Alice Zurlo – 2012-2015 – co-tutelle LAM-Obs. de Padoue – encadrement : 30%

La thèse d'Alice Zurlo s'est inscrite dans la préparation de l'instrument VLT/SPHERE, avec une implication dans les programmes scientifiques pré-SPHERE, la validation en laboratoire et sur le ciel du mode IRDIFS de l'instrument, et finalement la publication de résultats de première lumière. La thèse a été réalisée en co-tutelle entre le LAM (C. Moutou, A. Vigan) et l'Observatoire de Padoue (R. Gratton). J'ai eu un rôle important dans la co-direction de cette thèse, comme le reflètent les 3 premiers articles d'Alice où je suis 2^{ème} auteur.

Alice a démarré sa thèse par une participation active au programme d'observation NaCo-LP. Elle a pris en charge l'analyse d'un compagnon détecté autour de HD8049 qui s'est révélé être une naine blanche et constitue donc un cas intéressant de faux positif en imagerie directe (Zurlo, Vigan et al. 2013). Ensuite, une partie significative du travail de thèse d'Alice a été son travail sur la validation en laboratoire des opérations et performances du mode IRDIFS de SPHERE. Sa participation répétée aux runs de tests à Grenoble lui ont permis de développer une connaissance pointue de l'instrument et d'en extrapoler les performances astrophotométriques attendues sur le ciel (Zurlo, Vigan et al. 2014). Finalement, la dernière partie de sa thèse a été consacrée à l'exploitation de données de commissioning de SPHERE sur le système planétaire autour de HR8799. Elle a publié les premiers spectres jamais obtenus pour les deux planètes les plus internes de ce système (Zurlo, Vigan et al. 2016).

Alice Zurlo a enchaîné par un postdoctorat de 2 ans la *Universidad de Chile* à Santiago du Chili pour travailler sur les disques circumstellaires en imagerie directe (SPHERE, GPI) et en millimétrique (ALMA). Elle a depuis obtenu une bourse de recherche nominative de la CONICYT (équivalent chilien de l'ANR en France) et un poste de Professeure associée à l'université Diego Portales. Elle participe activement au relevé SHINE et est chercheuse associée au LAM.

Thèse : Anne-Laure Cheffot – 2016-2019 – co-tutelle ESO-LAM – encadrement : 30%

La thèse d'Anne-Laure s'inscrit dans la préparation de l'ELT et notamment du cophasage des segments de son miroir primaire. La thèse est réalisée sur un financement ESO en co-tutelle entre l'ESO (S. Lévêque) et le LAM (E. Hugot, A. Vigan).

Son travail s'oriente sur deux axes principaux. Tout d'abord, la validation sur l'*ELT facility* de l'ESO d'un concept de *phasing gun*, un dispositif permettant de réaligner localement un segment du miroir par rapport à ses voisins immédiats (suite à un remplacement par exemple). Un premier prototype a été testé à l'ESO, mais le concept doit être amélioré et rendu plus robuste afin d'être utilisé sur l'ELT. Le second axe concerne la remise en route du banc APE (Gonté et al. 2008 ; renommé PEACE depuis 2012) dédié à la validation en laboratoire et sur le ciel de senseurs de cophasage (notamment ZEUS, développé au LAM, Dohlen et al. 2006). Elle travaille actuellement à refaire fonctionner le banc pour ensuite tester différents senseurs de manière plus approfondie que ce qui avait été fait dans APE. Le banc PEACE inclut notamment un système d'optique adaptative qui permettra donc d'étudier les interactions entre cophasage et correction par optique adaptative.

Le cadre de travail défini actuellement sont des téléconférences régulières entre les co-encadrants côté ESO et côté LAM, une réunion hebdomadaire entre Anne-Laure et moi, et des visites régulières (2 à 3 par an) de Anne-Laure Cheffot au LAM pour travailler avec ses co-encadrants.

Postdoc : Graeme Salter – 2014-2015 – financement ANR – encadrement : 100%

Graeme Salter a été embauché au LAM en 2014 pour travailler sur les premières données sur le ciel de SPHERE et le début du relevé SHINE. Il a bénéficié d'un reliquat de financement dans le cadre de l'ANR GUEPARD (ANR10-BLANC0504-01 ; PI Chauvin, CNRS/IPAG ; Co-I Claire Moutou, CNRS/LAM) qui a financé mon post-doctorat au LAM en 2012-2013 avant mon recrutement au CNRS.

Le travail de Graeme a été orienté sur l'analyse et l'interprétation des données de première lumière de l'instrument SPHERE obtenues pendant les commissionings en 2014, en utilisant des outils développés au LAM. Il s'est ensuite investi dans l'analyse des premiers résultats obtenus dans le relevé SHINE que nous effectuons sur le GTO SPHERE. Son implication dans la réalisation des observations et dans l'analyse des

données du relevé lui ont permis de contribuer à une dizaine de publications SHINE, avec notamment une contribution majeure sur l'analyse de disques multiples détectés autour de l'étoile à disque de transition RX J1615.3-3255 (de Boer, Salter et al. 2016). Graeme a également effectué une contribution importante à mon étude sur l'environnement proche de l'étoile Sirius (Vigan, Gry, Salter et al. 2015).

L'absence de résultats publiés par Graeme Salter en premier auteur s'explique par deux considérations. La première est la faible durée du contrat qui lui a été proposé (1 an), qui lui a laissé peu de temps pour initier de nouveaux projets au LAM. La seconde est que pour des raisons personnelles, Graeme a décidé de quitter la recherche à l'issue de son post-doctorat, et n'a donc pas pu valoriser le travail qu'il a commencé durant son année au LAM.

Postdoc : Roxanne Ligi – 2015-2017 – financement CNES – encadrement : 100%

Roxanne a été employée au LAM sur la base d'un projet que nous avons proposé conjointement au CNES, et qui visait à étudier les complémentarités entre les méthodes d'imagerie directe et de transit planétaire pour la validation statistique de planètes détectée par la mission K2 de la NASA. Pour ces systèmes, les observations à haut-contraste permettent d'écarter la présence de binaires d'arrière-plan pouvant mimer un transit planétaire (e.g. Santerne et al. 2013), créant ainsi des faux positifs (jusqu'à 55% dans certains cas ; Santerne et al. 2016).

Au cours de ses deux ans au LAM, Roxanne a travaillé sur le projet proposé au CNES ainsi que sur l'exploitation du relevé SHINE. Dans SHINE, Roxanne a participé aux observations et à la réduction des données. Elle a pris en charge la publication des résultats obtenus sur HD169142, où un candidat planétaire a été détecté en 2014 par Reggiani et al. (2014) et Biller et al. (2014). Les nouvelles observations avec SPHERE n'ont pas confirmé la présence de ce potentiel compagnon, mais elles ont révélé la présence de nombreuses structures du disque de poussière entourant l'étoile (e.g. Quanz et al. 2013) à des séparations jusqu'avant inaccessibles (Ligi, Vigan et al. 2018a). Pour le projet qu'elle a proposé au CNES, Roxanne s'est impliquée dans un large programme sur HARPS (PI Santerne) qui vise à obtenir des mesures en vitesse radiale sur un échantillon d'une vingtaine d'étoile où des très faibles transits ont été détectés avec K2. Roxanne a proposé et obtenu des observations avec SPHERE sur ces étoiles pour écarter la présence de binaires d'arrière-plan. Elle travaille actuellement à la publication des résultats obtenus (Ligi et al. 2018b).

Roxanne est à présent en post-doctorat à Milan pour travailler sur des observations interférométriques sur des étoiles à planètes et sur le relevé SHINE.

Apprenti : Raphaël Pourcelot – 2016-2017 – encadrement : 30%

Depuis 2016, je co-encadre Raphaël Pourcelot, élève ingénieur à l'Institut d'Optique *Graduate School* qui effectue son apprentissage au LAM. Il passe des périodes régulières au LAM, qui correspondent aux vacances scolaires et périodes de projets des élèves n'étant pas en apprentissage. Au cours de sa première année, Raphaël a travaillé à la mise à jour du banc haut-contraste du LAM (MITHIC) grâce au financement de la Région PACA que j'ai obtenu. Il a pris en charge la majeure partie des commandes de matériel, leur installation sur le banc et le réaligement complet du banc. Un travail important qu'il a effectué a été l'ajout de deux plan pupille dans le banc afin de pouvoir placer des masques de phase en transmission pour simuler de la turbulence atmosphérique filtrée et un miroir segmenté contrôlable IrisAO qui permettra de tester le cophasage fin des segments en présence de résidus de turbulence. Il travaille actuellement à la mise en place d'un système d'injection de fibre dans le cadre du projet HiRISE pour tester la stratégie de centrage de la planète sur la fibre.

Stages de Licence, stage de Master, TIPE

J'encadre régulièrement (~1 par an) des stages de Licence et de Master en instrumentation astronomique ou en astrophysique. J'accepte également régulièrement de rencontrer des étudiants en classe préparatoire aux grandes écoles pour la réalisation de leur TIPE.

5 ENSEIGNEMENT ET DIFFUSION DES CONNAISSANCES

Master 2, Aix-Marseille Université, depuis 2010 : TD+TP sur la coronographie stellaire

Dans le cadre du Master *Europhotonics*, dispensé à Aix-Marseille Université, j'anime une séance de travaux dirigés et de travaux pratiques sur la coronographie stellaire et ses applications pour la détection directe des exoplanètes. J'ai entièrement créé ce projet en 2009 sur demande du responsable du Master « Instrumentation Optique et Lasers ». Le volume annuel est de l'ordre d'une quinzaine d'heures.

Cet enseignement se veut extrêmement pédagogique pour introduire le concept de coronographe, la théorie optique sur laquelle il repose et sur ses applications astronomiques. Il comporte une partie théorique dans laquelle les étudiants sont amenés à écrire l'expression analytique générique d'une image en présence d'un coronographe, une partie simulation avec des programmes pré-écrits où les étudiants peuvent tester l'influence de différents paramètres sur des images simulées, et enfin une partie pratique sur un banc au LAM (entièrement rénové en 2016, Figure 1) où les étudiants testent un coronographe de Roddier.

Une évolution de ce TP est en cours d'étude pour faire travailler les étudiants non plus sur ce banc simplifié mais sur le banc de recherche MITHIC qui permet des études plus poussées que ce que ne permet le banc de TP actuel.

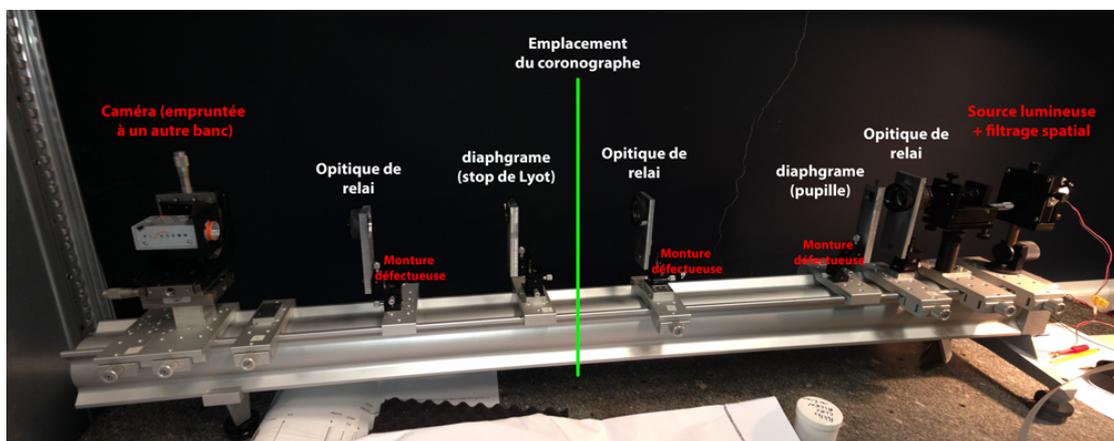


Figure 37 – Banc de coronographie que j'ai mis en place dans le cadre des travaux pratiques du Master 2 de Aix-Marseille Université à partir de 2010 (Master « Instrumentation Photonique et Laser », devenu *Europhotonics*). Le banc est présenté ici avant sa rénovation qui a eu lieu en 2016 et durant laquelle la table optique, la source lumineuse et la caméra ont été changées.

License 3, Université d'Exeter, 2011—2012 : bases réduction de données astronomiques

Durant mon postdoctorat à l'Université d'Exeter entre 2010 et 2012 j'ai eu l'opportunité d'encadrer des travaux dirigés dédiés aux bases de la réduction de données astronomiques en utilisant l'environnement IRAF. Le travail se concentrait sur de la photométrie différentielle basée sur des données acquises avec le télescope de l'université.

Les étudiants ont notamment eu l'opportunité d'analyser des données photométriques obtenues sur la supernova SN2011fe survenue dans la galaxie M101 en août 2011. Au moyen de mesures prises régulièrement au cours du mois de septembre, ils ont pu obtenir la courbe de lumière de la supernova et la comparer de manière qualitative à des *templates* pour déterminer sa classe spectrale.

ESO, 2015 : cours d'optique adaptative

Au cours de mon séjour comme *Operation Staff Astronomer* à l'ESO au Chili en 2015, j'ai participé à des activités de formation des personnels de l'ESO (ingénieurs, opérateurs de télescope) :

- Formation des personnels de l'ESO sur les opérations et les calibrations de SPHERE
- Cours sur l'optique adaptative, principalement à destination des personnels ingénieurs de l'ESO. Ce cours, étalé sur plusieurs jours, comprenait à la fois des parties théoriques et de parties simulations avec des outils simples comme yao ou des scripts en python. Le cours couvrait les différents types

d'optique adaptative, et j'ai animé conjointement avec Julien Milli la session sur les applications de l'optique adaptative pour le haut-contraste

Diffusion des connaissances

Je participe régulièrement à des activités de diffusion des connaissances auprès du grand public de ma propre initiative ou dans le cadre d'animation organisées par l'OSU Pythéas :

- Intervention dans des écoles ou des lycées
- Interventions à la Fête de la Science
- Conférences grand public dans des associations ou des rencontres d'astronomes amateurs
- Participations à des reportages pour le grand public

6 SELECTION DE PUBLICATIONS

Cette partie contient mes publications les plus significatives, ainsi que celles des étudiants et post-doctorants que j'ai encadré. Les références ainsi qu'un lien vers le texte complet sont reportées dans la liste ci-dessous :

1. **Vigan**, Moutou, Langlois, Allard, Boccaletti, Carillet, Mouillet, Smith ; 2010, MNRAS, 407, 71 : "Photometric characterization of exoplanets using angular and spectral differential imaging" <https://arxiv.org/abs/1004.4825>
2. **Vigan**, Dohlen, Mazzanti ; 2011, Applied Optics, 50, 2708 : "On-sky multiwavelength phasing of segmented telescopes with the Zernike phase contrast sensor" <https://arxiv.org/abs/1104.3859>
3. **Vigan**, Patience, Marois, Bonavita, De Rosa, Macintosh, et al. ; 2012, A&A, 544, A9 : "The International Deep Planet Survey. I. The frequency of wide-orbit massive planets around A-stars" <https://arxiv.org/abs/1206.4048>
4. **Vigan**, N'Diaye, Dohlen ; 2013, A&A, 555, A49 : "Apodization in high-contrast long-slit spectroscopy. Closer, deeper, fainter, cooler" <https://arxiv.org/abs/1305.5142>
5. Zurlo, **Vigan**, Mesa, Gratton, Moutou, et al. ; 2014, A&A, 572, A85 : "Performance of the VLT Planet Finder SPHERE. I. Photometry and astrometry precision with IRDIS and IFS in laboratory" <https://arxiv.org/abs/1410.1754>
6. **Vigan**, Gry, Salter, Mesa, Homeier, Moutou, Allard ; 2015, MNRAS, 454, 129 : "High-contrast imaging of Sirius A with VLT/SPHERE: looking for giant planets down to one astronomical unit" <https://arxiv.org/abs/1509.00015>
7. **Vigan**, N'Diaye, Dohlen, Beuzit, Costille, Caillat, et al. ; 2016, A&A, 586, A144 : "Apodization in high-contrast long-slit spectroscopy. II. Concept validation and first on-sky results with VLT/SPHERE" <https://arxiv.org/abs/1512.05378>
8. **Vigan**, Bonnefoy, Ginski, Beust, Galicher, Janson, Baudino, Buenzli, Hagelberg, et al. ; 2016, A&A, 587, A55 : "First light of the VLT planet finder SPHERE. I. Detection and characterization of the substellar companion GJ 758 B" <https://arxiv.org/abs/1511.04076>
9. Zurlo, **Vigan**, Galicher, Maire, Mesa, Gratton, Chauvin, Kasper, Moutou, et al. ; 2016, A&A, 587, A57 : "First light of the VLT planet finder SPHERE. III. New spectrophotometry and astrometry of the HR 8799 exoplanetary system" <https://arxiv.org/abs/1511.04083>
10. N'Diaye, **Vigan**, Dohlen, Sauvage, Caillat, Costille, Girard, Beuzit, Fusco, et al. ; 2016, A&A, 592, A79 : "Calibration of quasi-static aberrations in exoplanet direct-imaging instruments with a Zernike phase-mask sensor. II. Concept validation with ZELDA on VLT/SPHERE" <https://arxiv.org/abs/1606.01895>
11. **Vigan**, Bonavita, Biller, Forgan, Rice, Chauvin, Desidera, Meunier, Delorme et al. ; 2017, A&A, 603, A3 : "The VLT/NaCo large program to probe the occurrence of exoplanets and brown dwarfs at wide orbits. IV. Gravitational instability rarely forms wide, giant planets" <https://arxiv.org/abs/1703.05322>
12. Ligi, **Vigan**, Gratton, de Boer, Benisty, Boccaletti, et al. ; 2017, accepté dans MNRAS, sous presse : "Investigation of the inner structures around HD169142 with VLT/SPHERE" <https://arxiv.org/abs/1709.01734>

7 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Allard, Homeier, Freytag, et al. 2013, MSAIS, 24, 128
- Apai, Kasper, Skemer, et al. 2016, ApJ, 820, 40
- Baraffe, 2014, ASSL, 401, 141
- Baraffe, Chabrier, Barman, et al. 2003, A&A, 402, 701
- Baraffe, Homeier, Allard, et al. 2015, A&A, 577, A42
- Barman, Macintosh, et al. 2011, ApJ, 733, 65
- Baudino, Bézard, et al. 2015, A&A, 582, A83
- Benest & Duvent. 1995, A&A, 299, 621
- Benz, Ida, Alibert, Lin, & Mordasini. 2014, PPVI, 691
- Beuzit, Feldt, Dohlen, et al. 2008, SPIE, 7014
- Biller, Liu, Wahhaj, et al. 2013, ApJ, 777, 160
- Biller, et al. 2014, ApJ, 792, L22
- Bitsch, Lambrechts, et al. 2015, A&A, 582, A112
- Boccaletti, Abe, Baudrand, et al. 2008, SPIE, 7015
- Bonavita, D'Orazi, Mesa, et al. 2017, in press
- Bonnefoy, Boccaletti, et al. 2013, A&A, 555, A107
- Bonnefoy, Marleau, et al. 2014, A&A, 567, L9
- Bonnefoy, Zurlo, Baudino, et al. 2016, A&A, 587, A58
- Bowler, Johnson, Marcy, et al. 2010a, ApJ, 709, 396
- Bowler, Liu, Dupuy, et al. 2010b, ApJ, 723, 850
- Bowler, Liu, Shkolnik, & Dupuy. 2013, ApJ, 774, 55
- Buenzli, Apai, et al. 2012, ApJ Letter, 760, L31
- Burrows, Marley, Hubbard, et al. 1997, ApJ, 491, 856
- Burrows, Sudarsky, & Hubeny. 2006, ApJ, 640, 1063
- Carbillet, Bendjoya, et al. 2011, Exp. Astr., 30, 39
- Carbillet, Verinaud, et al. 2004, SPIE, 5490
- Carlotti, 2013, A&A, 551, A10
- Carlotti, Pueyo, & Mawet. 2014, A&A, 566, A31
- Chauvin, Desidera, et al. 2017, arXiv:1707.01413
- Chauvin, Lagrange, Dumas, et al. 2005, A&A, 438, L25
- Chauvin, Lagrange, et al. 2010, A&A, 509, A52
- Chauvin, Lagrange, Beust, et al. 2012, A&A, 542, A41
- Chauvin, Vigan, et al. 2015, A&A, 573, A127
- Cheetham, Bonnefoy, et al. 2018, A&A, 615, 160
- Choquet, Perrin, Chen, et al. 2016, ApJ Letter, 817, L2
- Choquet, Pueyo, Soummer, et al. 2015, SPIE, 9605
- Claudi, Turatto, Gratton, et al. 2008, SPIE, 7014
- Crepp, Johnson, Fischer, et al. 2012, ApJ, 751, 97
- Crossfield, Biller, et al. 2014, Nature, 505, 654
- Crossfield, Hansen, & Barman. 2012, ApJ, 746, 46
- Currie, Bailey, et al. 2010, ApJ Letter, 721, L177
- Dawson & Murray-Clay. 2013, ApJ Letter, 767, L24
- Desidera, Covino, et al. 2015, A&A, 573, A126
- Dohlen, Langlois, Lanzoni, et al. 2006, SPIE, 6267
- Dohlen, Langlois, Saisse, et al. 2008a, SPIE, 7014
- Dohlen, Saisse, Origine, et al. 2008b, SPIE, 7018
- Dorrer & Zuegel. 2007, JOSA B, 24, 1268
- Forgan, Parker, & Rice. 2015, MNRAS, 447, 836
- Forgan & Rice. 2013, MNRAS, 432, 3168
- Fusco, Rousset, et al. 2006, Optics Express, 14, 7515
- Fusco, Sauvage, Mouillet, et al. 2016, SPIE, 9909
- Galicher, Marois, et al. 2016, A&A, 594, A63
- Gonte, Araujo, Bourtembourg, et al. 2008, SPIE, 7012
- Gonte, et al. 2011, Applied Optics, 50, 1660
- Goździewski & Migaszewski 2014, MNRAS, 440, 3140
- Guerri, Daban, et al. 2011, Exp. Astr., 30, 59
- Guyon, Pluzhnik, Kuchner, et al. 2006, ApJ, 167, 81
- Hinkley, Bowler, et al. 2015, ApJ Letter, 805, L10
- Hugot, Ferrari, El Hadi, et al. 2012, A&A, 538, A139
- Ida & Lin. 2004, ApJ, 604, 388
- Janin-Potiron, N'Diaye, et al. 2017, A&A, 603, A23
- Janson, Bergfors, et al. 2010, ApJ Letter, 710, L35
- Janson, Carson, Thalmann, et al. 2011, ApJ, 728, 85
- Johnson, Aller, Howard, et al. 2010a, PASP, 122, 905
- Johnson, Clanton, Howard, et al. 2011, ApJ, 197, 26
- Johnson, Howard, et al. 2010b, PASP, 122, 701
- Jovanovic, Schwab, et al. 2017, A&A, 604, A122
- Kasdin, Vanderbei, & Belikov. 2007, CRP, 8, 312
- Kasper, Biller, Burrows, et al. 2007, A&A, 471, 655
- Kenworthy, Codona, Hinz, et al. 2007, ApJ, 660, 762
- Kley & Nelson. 2012, ARAA, 50, 211
- Lafrenière, Doyon, et al. 2007a, ApJ, 661, 1208
- Lafrenière, Doyon, et al. 2007b, ApJ, 670, 1367
- Lagrange, Bonnefoy, et al. 2010, Science, 329, 57
- Lagrange, Boccaletti, Milli, et al. 2012, A&A, 542, A40
- Lagrange, Boccaletti, et al., 2019, arXiv:1809.08354
- Lambrechts & Johansen. 2012, A&A, 544, A32
- Ligi, Vigan, Gratton, et al. 2018a, MNRAS, 473, 1774
- Ligi, Demangeon, Barros, et al. 2018b, AJ, 156, 182
- Lyot, 1930, Bulletin Astronomique, 6, 305
- Macintosh, Graham, et al. 2015, Science, 350, 64
- Macintosh, Graham, et al. 2014, PNAS, 111, 12661
- Maire, Boccaletti, et al. 2014, A&A, 566, A126
- Marleau & Cumming. 2014, MNRAS, 437, 1378
- Marley, Fortney, Hubickyj, et al. 2007, ApJ, 655, 541
- Marois, Doyon, Racine, et al. 2000, PASP, 112, 91
- Marois, Lafrenière, Doyon, et al. 2006, ApJ, 641, 556
- Marois, Macintosh, et al. 2008b, Science, 322, 1348
- Marois, Zuckerman, et al. 2010, Nature, 468, 1080
- Martinez, Dorrer, et al. 2009a, A&A, 495, 363
- Martinez, Dorrer, et al. 2009b, A&A, 500, 1281
- Martinez, Kasper, Costille, et al. 2013, A&A, 554, A41
- Martinez, Preis, et al. 2015, The Messenger, 159, 19
- Martins, Santos, et al. 2015, A&A, 576, A134
- Mawet, Absil, et al. 2012, A&A, 544, A131
- Mawet, Ruane, Xuan, et al. 2017, ApJ, 838, 92
- Mawet, et al. 2009, Optics Express, 17, 1902
- Mayor & Queloz. 1995, Nature, 378, 355
- Mesa, Vigan, D'Orazi, et al. 2016, A&A, 593, 119
- Metchev & Hillenbrand. 2006, ApJ, 651, 1166

- Metchev & Hillenbrand. 2009, ApJ, 181, 62
 Milli, Mouillet, Lagrange, et al. 2012, A&A, 545, A111
 Milli, Banas, Mouillet, et al. 2016, SPIE, 9909
 Milli, Kasper, Bourget, et al. 2018, SPIE, 10703
 Mordasini, Alibert, & Benz. 2009a, A&A, 501, 1139
 Mordasini, Alibert, et al. 2009b, A&A, 501, 1161
 Mordasini, Alibert, et al. 2012, A&A, 541, A97
 Morzinski, Males, Skemer, et al. 2015, ApJ, 815, 108
 Mugnier, Cornia, et al. 2009, JOSA A, 26, 1326
 N'Diaye, et al. 2007, In the Spirit of Bernard Lyot
 N'Diaye, Dohlen, Cuevas, et al. 2012a, A&A, 538, A55
 N'Diaye, Dohlen, Cuevas, et al. 2012b, A&A, 538, A55
 N'Diaye, Dohlen, Fusco, et al. 2012, SPIE, 8450
 N'Diaye, Dohlen, Fusco, & Paul. 2013, A&A, 555, A94
 N'Diaye, Pueyo, & Soummer. 2015, ApJ, 799, 225
 N'Diaye, Soummer, et al. 2016a, ApJ, 818, 163
 N'Diaye, Vigan, Dohlen, et al. 2016b, A&A, 592, A79
 Nielsen & Close 2010, ApJ, 717, 878
 Nielsen, Liu, Wahhaj, et al. 2013, ApJ, 776, 4
 Öberg, et al. 2011, ApJ Letter, 743, L16
 Oppenheimer, Baranec, et al. 2013, ApJ, 768, 24
 Osorio, et al. 2014, ApJ, 791, L36
 Patience, King, de Rosa et al. 2012, A&A, 540, A85
 Paul, Sauvage, & Mugnier. 2013, A&A, 552, A48
 Pearce, Wyatt, & Kennedy. 2014, MNRAS, 437, 2686
 Petit, Sauvage, Fusco, et al. 2014, SPIE, 9148
 Pollack, Hubickyj, et al. 1996, Icarus, 124, 62
 Por & Haffert, 2018, arXiv:1803.10691
 Quanz, Avenhaus, Buenzli et al. 2013, ApJ, 766, L2
 Racine, Walker, Nadeau, et al. 1999, PASP, 111, 587
 Rameau, Chauvin, et al. 2013a, ApJ Letter, 772, L15
 Rameau, Chauvin, et al. 2013b, A&A, 553, A60
 Rameau, Chauvin, et al. 2015, A&A, 581, A80
 Rameau, Chauvin, et al. 2013c, ApJ Letter, 779, L26
 Reggiani, et al. 2014, ApJ, 792, L23
 Reggiani, Meyer, et al. 2016, A&A, 586, A147
 Rice, Oppenheimer, et al. 2015, PASP, 127, 479
 Ruan, Wang, Mawet, et al. 2018, ApJ, 867, 143
 Sauvage, Fusco, et al. 2007, JOSA A, 24, 2334
 Sauvage, Chaniel, Durand, et al. 2014, SPIE, 9143
 Sauvage, Fusco, Guesalaga, et al. 2015, AO4ELT
 Sivaramakrishnan, Soummer, et al. 2009, SPIE, 7440
 Smith & Terrile. 1984, Science, 226, 1421
 Snellen, Brandl, de Kok, et al. 2014, Nature, 509, 63
 Snellen, de Kok, et al. 2010, Nature, 465, 1049
 Soummer, Ferrari, et al. 2007, ApJ, 669, 642
 Soummer, Perrin, et al. 2014, ApJ Letter, 786, L23
 Soummer, et al. 2012, ApJ Letter, 755, L28
 Sparks & Ford 2002, ApJ, 578, 543
 Spiegel & Burrows 2012, ApJ, 745, 174
 Surdej, et al. 2010, Applied Optics, 49, 4052
 Thalmann, Carson, et al. 2009, ApJ Letter, 707, L123
 Thalmann, Schmid, Boccaletti, et al. 2008, SPIE, 7014
 Thalmann, Usuda, et al. 2011, ApJ Letter, 732, L34
 Thatte, Abuter, Tecza, et al. 2007, MNRAS, 378, 1229
 Veras, Crepp, & Ford. 2009, ApJ, 696, 1600
 Vigan, Bonavita, Biller, et al. 2017, A&A, 603, A3
 Vigan, et al. 2011, Applied Optics, 50, 2708
 Vigan, Gry, Salter, et al. 2015, MNRAS, 454, 129
 Vigan, Langlois, Dohlen, et al. 2014, SPIE, 9147
 Vigan, Langlois, et al. 2008, A&A, 489, 1345
 Vigan, Moutou, Langlois, et al. 2010, MNRAS, 407, 71
 Vigan, Bonnefoy, et al. 2012a, A&A, 540, A131
 Vigan, Patience, Marois, et al. 2012b, A&A, 544, A9
 Vigan, N'Diaye, & Dohlen. 2013, A&A, 555, A49
 Vigan, Langlois, Dohlen, et al. 2014, SPIE, 9147
 Vigan, N'Diaye, Dohlen et al. 2016a, A&A, 586, A144
 Vigan, Bonnefoy, Ginski, et al. 2016b, A&A, 587, A55
 Vigan, N'Diaye, Dohlen, et al. 2016c, SPIE, 9912
 Vigan, Otten, Muslimov, et al. 2018a, SPIE, 10702
 Vigan, N'Diaye, Dohlen, et al. 2018b, SPIE, 10703
 Vogt, Penrod, & Hatzes. 1987, ApJ, 321, 496
 Vorobyov & Basu. 2010, ApJ Letter, 714, L133
 Wagner, et al. 2015, ApJ, 798, 94
 Wagner, Apai, Kasper, et al. 2016, Science, 353, 673
 Wyatt, Dermott, telesco, et al. 1999, A&A, 527, 918
 Zurlo, Vigan, Galicher, et al. 2016, A&A, 587, A57
 Zurlo, Vigan, Hagelberg, et al. 2013, A&A, 554, A21
 Zurlo, Vigan, Mesa, et al. 2014, A&A, 572, A85