
Contrôle et mise en forme du front d'onde couplé à de la coronographie à faible séparation angulaire (PIAACMC) pour du haut contraste avec des télescopes segmentés

L'objectif majeur de l'imagerie très haute dynamique (ITHD) est l'imagerie directe de planètes matures habitables en orbite autour d'étoiles du voisinage solaire. Il s'agit d'un défi majeur à la fois scientifique et technologique où les photons émis par les exoplanètes nous renseignent sur les éléments chimiques constituant leur atmosphère – avec en toile de fond la quête de bio-marqueurs – mais sont extrêmement difficiles à détecter, et ce d'autant plus que la planète est proche de son étoile. Imager des systèmes étoile-planète où les rapports de flux sont très défavorables à l'observation des compagnons (de l'ordre de 10^6 à 10^{10} suivant les cibles et longueurs d'onde d'observation) nécessite de combiner de puissants instruments optiques à des méthodes d'analyse de la lumière innovantes car pour un photon issu de la planète, un million de photons au moins proviennent de l'étoile. En 2013 nous avons démarré une R&D spécifique à l'implémentation de l'ITHD sur les très grands télescopes (type ELT), avec des visées également spatiales (post-JWST). Cette R&D, développée au sein du projet **SPEED** [Segmented Pupil Experiment for Exoplanet Detection, <https://lagrange.oca.eu/fr/accueil-speed>], vise à l'étude des méthodes d'observation en imagerie très haute dynamique avec un télescope segmenté orienté vers les très faibles séparations angulaires. L'accès aux faibles séparations angulaires ouvre la voie à une niche scientifique de première importance : les exoplanètes orbitant autour d'étoiles de type tardif (M). La très forte densité des étoiles de type M dans l'environnement proche de notre Soleil (~ 80%) en font d'excellentes candidates pour la détection d'exoplanètes en zone habitable. Parmi les systèmes innovants que nous développons, le **Phase Induced Amplitude Apodization Complex Mask Coronagraph (PIAACMC, Guyon et al. 2014)** est un coronographe qui permet d'approcher les limites théoriques de détection et qui peut s'accommoder d'une pupille complexe (télescope sur axe, obstruction centrale, segmentation du miroir primaire, etc.). L'obtention du haut contraste dans le champ d'observation reste cependant intimement lié (1) à la mesure du front d'onde idéalement sur l'image scientifique en aval du coronographe, (2) au contrôle et à la mise en forme du front d'onde par utilisation d'un ou plusieurs miroirs déformables. A cette fin, une architecture multi-miroir déformables (optique active) couplé au PIAACMC est implémentée sur SPEED. L'objectif de la thèse est de démontrer en conditions de laboratoire du très haut contraste proche de l'axe avec une télescope segmenté en combinant le PIAACMC au système d'optique active de mise en forme et de contrôle du front d'onde du banc.

Description du sujet de thèse

La détection et la caractérisation des planètes extrasolaires font partie des domaines de recherche les plus importants de l'astrophysique moderne. Parmi les différentes méthodes permettant la détection d'une exoplanète, l'imagerie directe est la technique la plus difficile mais également celle qui apporte le plus de retours scientifiques. Les coronographes sont utilisés pour permettre de rendre visible l'environnement proche d'une étoile pour détecter un compagnon, mais ils sont extrêmement sensibles à : (1) l'architecture du télescope et (2) aux aberrations optiques qui dégradent fortement l'obtention du haut contraste dans le champ d'observation.

(1) La prochaine génération de télescopes au sol actuellement en développement atteindra une résolution favorable à la détection d'exoplanètes mais va rajouter des contraintes architecturales et de stabilité additionnelles nouvelles défavorables à ces détections comme par exemple la nature segmentée de leur miroir primaire et les larges structures mécaniques de support du miroir secondaire qui font obstruction à l'obtention du haut contraste.

(2) Ces aberrations sont dites quasi-statiques, car évoluant lentement lors d'une observation, mais génèrent cependant de forts résidus lumineux appelés *speckles* dans le plan focal qui présentent des caractéristiques similaires au signal d'une planète et risquent ainsi de compromettre leur détection. Pour résoudre ce problème, des miroirs déformables sont utilisés pour corriger le champ et obtenir une zone de très fort contraste communément appelée *dark hole* en mesurant et corrigeant en temps réel l'évolution de ces aberrations. Le contrôle et la mise en forme du front d'onde est devenu un domaine de recherche incontournable depuis plusieurs années. D'importants efforts de recherche visent à définir des algorithmes et des méthodes optimales de mesure du champ électrique sur l'image scientifique, ainsi que d'étendre l'applicabilité de ceux-ci sur de larges bandes spectrales (pour permettre la caractérisation spectrale d'une planète).

La thèse proposée vise à démontrer en conditions de laboratoire que du haut contraste dans un *dark hole* à très faible séparation angulaire est possible avec un télescope segmenté. Le banc SPEED propose un simulateur de télescope ELT avec un miroir déformable de 163 segments, une voie visible dédiée au cophasage du miroir primaire, et une voie infrarouge haut contraste combinant deux miroirs déformables à membrane continue et un coronographe PIAACMC. Le projet SPEED est financé grâce aux soutiens de l'Observatoire de la Côte d'Azur, le laboratoire Lagrange, l'UNS, le CNES, l'ESO, Airbus Defense & Space, et supports européens (FEDER). Le projet bénéficie également de collaborations avec des laboratoires Français (LESIA, LAM) et étranger (NAOJ - télescope du Subaru).

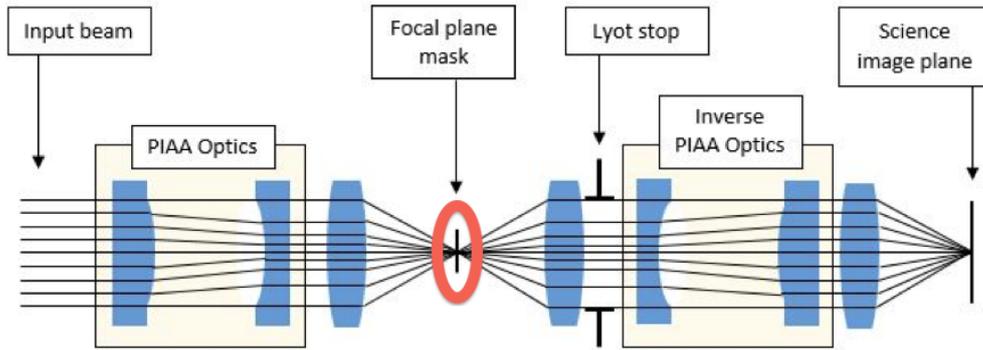


FIGURE 1 – Principe de fonctionnement du PIAACMC (image extraite de Newman 2016). Le masque focal est encadré en rouge. Le PIAACMC du banc SPEED n'a pas nécessité le développement d'un étage "inverse PIAA optics" : la réduction du champ isoplanétique introduit par l'étage "PIAA optics" n'a pas d'impact aux faibles séparations angulaires.

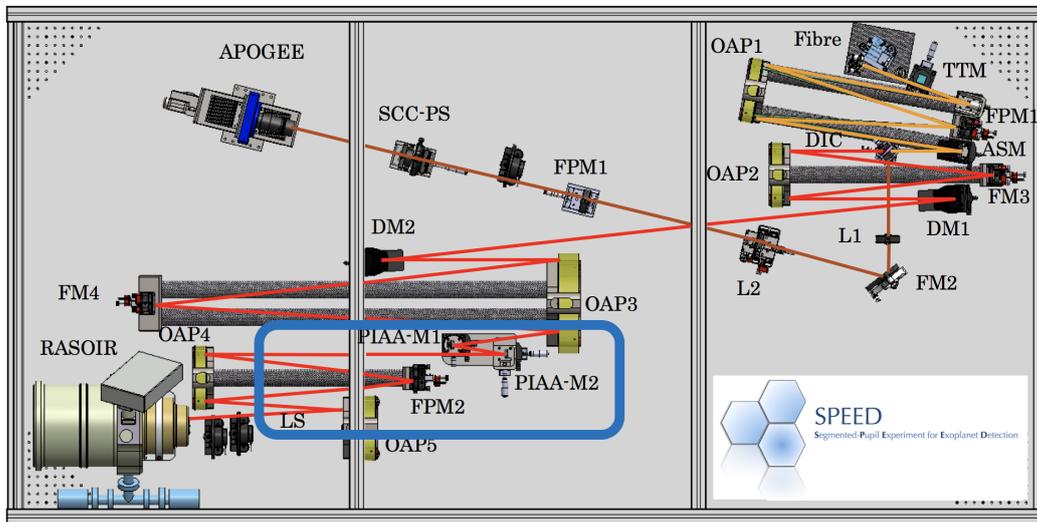


FIGURE 2 – Vue CAO 3D de SPEED. Code couleur : simulateur de télescope (orange), domaine visible (marron) et domaine proche infrarouge (rouge). Acronymes : miroir tip/tilt (TTM - tip/tilt mirror), paraboles hors axe (OAP - off-axis parabola), miroir segmenté (ASM - active segmented mirror), miroir déformable à membrane continue (DM - deformable mirror), miroir plat (FM - flat mirror), dichroïque (DIC), analyseur de cophasage (SCC-PS - self-coherent camera-phasing sensor), composant optique plan focal (FPM - focal plan mask), coronographe (PIAA-M1 & PIAA-M2 - phase induced amplitude apodization mirror 1 & 2), Lyot stop (LS), caméra visible (APOGEE), et caméra proche infrarouge (RASOIR).

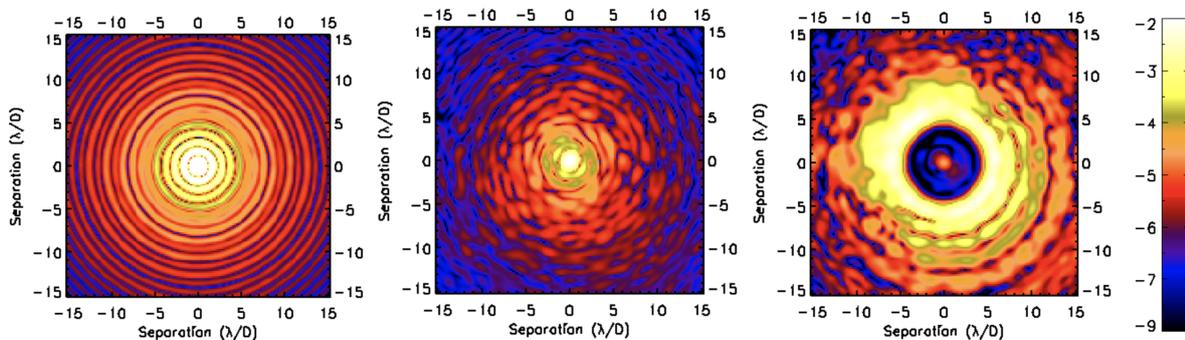


FIGURE 3 – Images de simulation en échelle logarithmique : PSF sans coronographe (gauche), PSF coronographique (milieu), et PSF coronographique après action de l'optique active avec 2 miroirs déformables (droite) permettant l'obtention d'un *dark hole*. Images extraites de Beaulieu et al. MNRAS 2017.

Le principe de la SCC est de permettre une mesure efficace du champ complexe sur l'image coronographique en tirant profit de l'incohérence entre lumières stellaire et planétaire pour moduler spatialement les *speckles*. Combinée à de l'optique active, la SCC a permis de nombreuses démonstrations haut contraste (*dark hole*) en conditions de laboratoire (e.g., Galicher et al. 2010, Mazoyer et al. 2014, Delorme et al. 2016). La Self-Coherent Camera-Phasing Sensor (SCC-PS, Janin-Potiron et al. 2016) un avatar de la SCC développée dans le cadre de SPEED, est aussi un analyseur de front d'onde plan focal, qui permet en plus le phasage d'une pupille segmentée. Par analyse sur image coronographique, la SCC/SCC-PS permet une mesure champ complexe pour l'optique active (*dark hole*) et pour l'optique de cophasage pour un contrôle et une correction fine des positions des segments en cours d'observation.

Le principe du PIAACMC (voir Fig. 1) est de supprimer les forts effets de diffraction introduits par la segmentation du miroir primaire, la diffraction de l'obstruction centrale et les « araignées » (supports mécaniques du miroir secondaire), et de réduire de manière significative le flux stellaire sur l'image scientifique. Le PIAACMC associe deux composants fondamentaux : (1) une paire d'optiques asphériques (PIAA-M1 et PIAA-M2, voir Fig. 2) dont la forme en surface est localement modifiée pour redistribuer géométriquement les faisceaux optiques et créer une apodisation de la pupille sans perte en transmission, (2) un masque focal complexe à modulation de phase (identifié FPM2 dans la Fig. 2), qui combiné aux miroirs permet d'obtenir du très haut contraste à très faible séparation angulaire avec une pupille à géométrie complexe (Guyon et al. 2014). Le PIAACMC utilise également, comme la majorité des coronographes, un masque de Lyot (masque pupillaire pour filtrer les hautes fréquences, identifié LS dans la Fig. 2). Etant constitué d'un masque de Lyot, une SCC peut donc être associée au PIAACMC à la condition que le masque focal du PIAACMC diffracte suffisamment d'énergie en plan pupille où la référence est placée. Dans le cadre du projet SPEED, un premier prototype PIAACMC a fait l'objet d'une R&T CNES pour son étude de design en collaboration avec O. Guyon (NAOJ) et sa réalisation par SILIOS Technologies, et une SCC/SCC-PS est développée sous financement Airbus Defense & Space et Région PACA.

Le principe de la mise en forme du front d'onde (optique active) est de créer une zone spatiale de très fort contraste localement dans l'image scientifique (voir Fig. 3), communément appelée *dark hole* et originellement proposé par Malbet et al. 1995. Les images coronographiques (sol ou espace) sont limitées par les aberrations optiques internes à l'instrument, qui créent des *speckles* dans le plan focal. Pour réduire leur effet, il est possible d'utiliser soit le miroir déformable du système d'optique adaptative corrigeant la turbulence atmosphérique (sol), soit un système d'optique active dédié associant un ou plusieurs miroirs déformables (sol ou espace) pour donner au front d'onde une forme adéquate et ainsi compenser les aberrations de l'instrument. Un contrôle avancé du front d'onde permet de réduire les *speckles* dans une zone spécifique et spatialement limitée du plan focal dans le but d'améliorer la mesure du signal pour détecter une exoplanète. L'optique active présente de nombreuses alternatives d'implémentation optique et architecturale pour obtenir des corrections conséquentes et adaptées aux besoins observationnels. Dans le cadre du projet SPEED, un système d'optique active à deux miroirs déformables à haut nombre d'actionneurs est disponible pour être utilisé en association avec le PIAACMC. Le développement des techniques les plus avancées pour créer un *dark hole* pour obtenir un grand contraste est visé, tenant compte des spécificités et contraintes du PIAACMC et de la nature segmentée de la pupille du banc SPEED.

Contexte international

Etat de l'art du PIAACMC – Dans sa forme originelle, le PIAA a bénéficié de plus de 15 ans de développements (e.g., Guyon et al. 2003 ; Galicher et al. 2005 ; Guyon et al. 2006 ; Pulzchnik et al. 2006 ; Lozi et al. 2009 ; Guyon et al. 2010 ; Martinache et al. 2012, 2013 ; Guyon et al. 2013, 2014, Kern et al. 2016, Newman et al. 2016) aux USA soutenus par la NASA (TDEM, *Technology Demonstration for Exoplanet Mission*, APRA, *Astrophysics Research and Analysis Program*) dans le cadre de projets au JPL, NASA Ames, et dans le cadre de l'instrument SCExAO au télescope Subaru. La version la plus récente et la plus aboutie, le PIAACMC (Guyon et al. 2014), est envisagée pour la mission WFIRST-AFTA (Kern et al. 2016) et est soutenu par un financement NASA-AFTA. Il fait également partie des concepts en étude pour le TMT (Thirty Meter Telescope), et pour le futur télescope spatial LUVOIR de la NASA pour lequel une contribution française est engagée (**action soutenue par le CNES**). Le niveau de maturité (TRL, Technology Readiness Level) du PIAACMC est TRL 3 pour pupille segmentée (TRL 5 pour pupille monolithique). Les travaux que nous menons dans le cadre du projet SPEED avec le PIAACMC visent à élever le niveau de maturité à TRL 5 (pupille segmentée, voir Martinez et al. 2017 ; Beaulieu et al. 2017). Au delà des applications ELT, notre objectif est de développer des compétences et une expertise sur des domaines de haute technologie pour une éventuelle participation opportuniste à une mission spatiale à visée généraliste, ou une mission spatiale coronographique (LUVOIR, ou équivalent). Les développements type PIAACMC sont identifiés de difficulté et d'urgence prioritaires pour le télescope NASA-LUVOIR, voir : <http://asd.gsfc.nasa.gov/luvoir/tech/>.

Etat de l'art de l'optique active pour la génération de *dark hole* – L'obtention d'un *dark hole* passe par l'utilisation d'un système d'optique active présentant de nombreuses variantes architecturales qui ont évolué depuis plus de 20

ans : par l'utilisation d'un miroir déformable unique (Bordé & Traub 2006; Give'on et al. 2007) ou par association de plusieurs miroirs (e.g., Pueyo et al. 2009; Riggs et al. 2013; Riggs et al. 2013). L'optique active présente également de nombreuses alternatives d'implémentation optique : miroir(s) déformable(s) placé(s) en plan pupille ou hors plan pupille, en faisceau collimaté ou faisceau convergent, ainsi que des types de correction variées (correction des erreurs de phase uniquement, des erreurs de phase et d'amplitude, correction sur un demi-champ ou sur le champ entier). De nombreux résultats ont été obtenus ces dernières années en conditions de laboratoire (e.g., Trauger & Traub 2007; Kay et al. 2009; Pueyo et al. 2009; Guyon et al. 2010; Belikov et al. 2010; Riggs et al. 2013; Mazoyer et al. 2014; Delorme et al. 2016) et font un appel du pied à une implémentation et démonstration sur ciel. Bien que ce type de système ait bénéficié de plus de 20 ans d'efforts, il reste essentiellement orienté sur l'optimisation de *dark hole* localisé à des séparations angulaires modérées (relativement éloignées du coeur de la PSF) et sous conditions architecturales bien souvent favorables (télescope monolithique). L'objectif de SPEED et d'orienter les efforts vers l'obtention d'un *dark hole* à faibles séparations angulaires avec une pupille complexe. Des travaux en ce sens sont déjà engagés par voie de simulations numériques (Beaulieu et al. 2017) et restent à démontrer expérimentalement.

Travail de thèse, résultats attendus, et perspectives

L'étudiant(e) travaillera sur le projet SPEED avec le but de compenser les aberrations optiques du banc et d'avancer progressivement vers des techniques les plus avancées pour créer un *dark hole* de très haut contraste. L'objectif du banc SPEED étant de démontrer un contraste de 10^8 en bande *H* proche de l'axe. Le travail de thèse consistera en deux volets : (1) simulations numériques et (2) démonstration sur le banc SPEED. Le travail comprend une phase exploratrice de simulations pour définir de nouvelles voies d'optimisation et une phase d'implémentation, de tests et de validation sur le banc SPEED. Le travail de thèse s'appuiera de manière récurrente sur le simulateur end-to-end du banc SPEED (Beaulieu et al. 2016) développé pour analyser les résultats expérimentaux et estimer le contraste ultime accessible. Les perspectives de la thèse sont multiples :

- à court terme, il s'agit de démontrer l'efficacité du couplage PIAACMC + SCC/SCC-PS (mesure champ complexe et cophasage fin sur image coronographique) + optique active (*dark hole*) sur le banc SPEED ;
- à moyen terme, il s'agit d'acquérir de l'expérience sur des aspects critiques qui sont nécessaires à l'obtention des performances ultimes des instruments au sol actuels et à venir (ELT-PCS) ;
- à long terme, il s'agit de participer aux efforts prospectifs pour définir des briques instrumentales pour l'instrumentation spatiale coronographique future.

Dans ce contexte, le banc SPEED peut être considéré comme une plateforme de test à double visées, ayant vocation à permettre des avancées significatives tant dans le domaine de l'instrumentation au sol que spatiale, où une forte synergie et complémentarité existent dans les besoins, les concepts, et solutions architecturales pour la détection directe d'exoplanètes.

Projet SPEED

Une présentation exhaustive du projet SPEED (description du banc, liste de publications, dernières nouvelles, équipe, et collaborations) est présentée sur le site du projet hébergé par le site web du laboratoire Lagrange à l'adresse suivante : <https://lagrange.oca.eu/fr/accueil-speed>.

Lieu de la thèse et financement

La thèse se déroulera au sein du Laboratoire Lagrange situé sur le campus Universitaire Valrose (Sciences) de l'Université Nice Sophia-Antipolis ; lieu d'exploitation du banc SPEED. Des demandes de co-financement sont en cours (CNRS – Airbus Defense and Space – Observatoire de la Côte d'Azur – Région PACA – UCA).

Profil du candidat

Ecole d'ingénieur physique ou optique ou signal, Master 2 traitement du signal ou optique ou astronomie/astrophysique. Connaissances en IDL, Matlab ou équivalent. Connaissances en optique de Fourier, Fresnel, et électromagnétisme.

Encadrement au laboratoire Lagrange

Directeur de thèse : Patrice Martinez (Maitre de Conférences - HDR)

☎ +33 (0)4 92 07 63 39

✉ patrice.martinez@oca.eu

Co-directrice de thèse : Mathilde Beaulieu (Ingénieur de recherche)

☎ +33 (0)4 92 07 63 39

✉ mathilde.beaulieu@oca.eu