



# Analyse et correction de surface d'onde post-coronographique pour l'imagerie d'exoplanètes

Olivier HERSCOVICI-SCHILLER

Le jeudi 11 octobre 2018 à 16h00

À l'Observatoire de Paris  
Salle du Conseil

77, avenue Denfert-Rochereau, 75014 Paris

## Devant le jury composé de :

M. Kjetil DOHLEN	Laboratoire d'Astrophysique de Marseille	Examineur
M. Raphaël GALICHER	Université Paris VII– Denis Diderot / Observatoire de Paris	Examineur
M. Frantz MARTINACHE	Observatoire de la Côte d'Azur	Rapporteur
M. Dimitri MAWET	California Institute of Technology / Jet Propulsion Laboratory	Rapporteur
M. Laurent MUGNIER	Onera	Directeur de thèse
M <sup>me</sup> Karine PERRAUT	Institut de Planétologie et d'Astrophysique de Grenoble	Examinatrice
M. Daniel ROUAN	Observatoire de Paris / Académie des Sciences	Examineur
M. Jean-François SAUVAGE	Onera / Laboratoire d'Astrophysique de Marseille	Co-encadrant

\*\*\*

## Résumé :

La recherche de planètes autour d'autres étoiles que le Soleil est une discipline très active depuis 1995 avec la première découverte d'une planète autour d'une étoile de la séquence principale. Plusieurs milliers d'exoplanètes ont été découvertes depuis. Cependant, la quasi-totalité a été détectée de manière indirecte ; seules quelques dizaines ont été imagées. Or, l'imagerie permet de détecter des planètes loin de leur étoile, qui passeraient inaperçues par d'autres méthodes. De plus, un imageur permet d'analyser le spectre de la planète, et donc de détecter d'éventuels marqueurs de vie extraterrestre.

Le rapport de flux entre l'étoile et la planète, qui peut dépasser un milliard, constitue une difficulté majeure. Il faut donc éteindre la lumière issue de l'étoile afin de détecter la planète. Pour cela, il convient d'utiliser un télescope de très grand diamètre, muni d'un imageur coronographique. Après utilisation d'un coronographe et éventuellement, depuis le sol, d'une optique adaptative, l'extinction de l'étoile par le coronographe n'est toutefois pas parfaite, du fait d'aberrations résiduelles. Celles-ci proviennent des déformations thermo-mécaniques des optiques, ainsi que des défauts de fabrication, d'intégration ou d'alignement. Ces aberrations engendrent des fuites qui se traduisent par des tavelures, qui à leur tour masquent les planètes que l'on cherche à détecter dans les images scientifiques.

L'objectif de ce travail est d'améliorer la correction des aberrations dans le cadre de la détection directe d'exoplanètes. Plus précisément, on souhaite améliorer les capacités de détection des instruments actuels, lesquels sont limités à des contrastes de l'ordre d'un million, afin de pouvoir à terme détecter des planètes telluriques telles les exoterras, qui sont extrêmement peu lumineuses, avec des contrastes de l'ordre de dix milliards. Pour cela, il faut analyser les aberrations optiques de la surface d'onde incidente. Pour atteindre de tels contrastes, il est de plus nécessaire d'utiliser le capteur scientifique directement comme analyseur de surface d'onde, par exemple en étendant la méthode de la diversité de phase à l'imagerie coronographique. C'est le principe de la méthode COFFEE (coronagraphic focal-plane wavefront estimation for exoplanet detection) développée par Baptiste Paul pendant sa thèse, que prolonge le travail présenté ici.

Il y a deux volets principaux à cette thèse, que l'on peut séparer selon la perspective dans laquelle on se place : d'une part l'observation depuis le sol, avec des contraintes dues à la turbulence atmosphérique, d'autre part l'observation depuis l'espace, avec des objectifs très ambitieux en termes de précision.

Dans le cadre d'une observation depuis le sol d'exoplanètes géantes gazeuses, qui sont typiquement cherchées par l'instrument SPHERE, les aberrations évoluent au cours d'une observation, et dégradent fortement la capacité d'imagerie haut contraste. Actuellement, la calibration des aberrations est faite entre les observations. Pour gagner en contraste, il faudrait pouvoir calibrer directement ces aberrations sur le ciel pendant les observations, en utilisant l'étoile observée comme source de calibration, afin de pouvoir corriger ces aberrations en continu et ainsi obtenir la meilleure performance possible des instruments.

Il s'agit de la première partie de mon travail de thèse. J'ai d'abord développé une modélisation mathématique physiquement interprétable et numériquement efficace de l'imagerie coronographique en présence de turbulence résiduelle. Une fois ce modèle disponible, je l'ai utilisé pour étendre COFFEE à l'analyse de surface d'onde post-coronographique, en présence de turbulence résiduelle. J'ai vérifié par simulation que l'analyseur de surface d'onde COFFEE turbulent ainsi obtenu soit utilisable même sans une connaissance parfaite des conditions d'observations, et en un temps raisonnable. J'ai également vérifié la résilience de la méthode à la présence d'une planète non détectée dans les données. Enfin, j'ai validé expérimentalement la méthode sur le banc MITHiC du Laboratoire d'Astrophysique de Marseille. Ce banc, équipé d'un coronographe et d'un module d'écrans de phase qui simule la turbulence résiduelle post-optique adaptative de l'instrument SPHERE, m'a permis de prendre des images représentatives d'un instrument d'imagerie à haut contraste. J'ai montré qu'on peut correctement estimer grâce à COFFEE des aberrations connues à partir de ces images.

Ces travaux ouvrent la voie à la compensation des aberrations quasi-statiques des instrument d'imagerie à haut contraste au sol pendant les observations.

Dans le cas de l'imagerie à haut contraste depuis l'espace, les contrastes visés peuvent atteindre un pour plusieurs milliards dans le cas des planètes telluriques. Les objectifs de réduction des tavelures sont donc encore plus ambitieux, car les contraintes de précision sur la correction du front d'onde sont draconiennes. En particulier, les variations d'amplitude dans la pupille ont un impact qui n'est plus négligeable et la précision recherchée dans l'évaluation du front d'onde devient subnanométrique. Il est donc nécessaire d'estimer conjointement l'amplitude et la phase du front d'onde à très haute précision, puis d'utiliser cette information pour éteindre le champ électrique issu de l'étoile dans une zone donnée de l'image.

La seconde partie de mon travail de thèse a d'abord consisté à valider l'extension de COFFEE à l'estimation non seulement de la phase, mais aussi de l'amplitude de l'onde incidente. Dans ce but, j'ai été accueilli par l'équipe du banc Très Haute Dynamique du LÉSIA (Observatoire de Paris). Ce banc atteint le plus haut contraste en Europe. De plus, il est équipé d'un analyseur de surface d'onde post-coronographique différent de COFFEE dans son principe, la *self-coherent camera* (SCC). Le traitement des données que j'ai contribué à acquérir sur ce banc m'a permis de valider COFFEE pour l'estimation conjointe de la phase et de l'amplitude, ainsi que de pratiquer la première comparaison entre deux analyseurs de surface d'onde post-coronographiques. À l'occasion de ces traitements, j'ai réalisé des développements théoriques qui permettent de mieux comprendre le comportement des coronographes à quatre quadrants tels que celui qui est utilisé sur le banc THD, ou encore les caractéristiques du champ diffracté par des miroirs déformables segmentés.

Enfin, pour aller encore plus loin dans la capacité de détection, on peut utiliser un ou plusieurs miroirs déformables non pas pour compenser la déformation de la surface d'onde incidente, mais au contraire pour créer une déformation qui minimise la lumière parasite dans une zone donnée du plan focal, appelée *dark hole*. Les méthodes de *dark hole* sont généralement itératives. Au contraire de ces méthodes, la méthode de *non-linear dark hole* proposée par mon prédécesseur n'est pas itérative, ce qui permettrait un gain de temps considérable pour les missions spatiales. Après une démonstration de principe sur MITHiC, j'ai validé la méthode sur le banc THD. J'ai étudié par simulation les causes des limites de performance rencontrées, et notamment le fort impact d'une mauvaise connaissance des caractéristiques du miroir déformable.

Ces travaux ont validé expérimentalement l'analyseur COFFEE complexe à une précision subnanométrique. Cet analyseur n'implique pas de modification matériel de l'instrument, il est directement extensible au cas de large bande spectrale. J'ai également validé expérimentalement le principe et la rapidité du *dark hole* non linéaire, qui est prometteuse pour les futures missions spatiales.

**Mots clés :**

Exoplanètes, Analyse de surface d'onde, Coronographie, Imagerie à haut contraste.