

PROPOSITION DE SUJET DE THESE

Intitulé : Apprentissage par renforcement pour la commande de surface d'onde en imagerie d'exoplanètes

Référence : **TIS-DTIS-2025-04**
(à rappeler dans toute correspondance)

Début de la thèse : automne 2025

Date limite de candidature : printemps 2025

Mots clés Intelligence Artificielle, Commande de front d'onde, Exoplanètes, Optique Active, Optique Spatiale, Instrumentation, Machine Learning, Apprentissage par renforcement, Astronomie

Profil et compétences recherchées

Connaissances (validées par un master ou diplôme d'ingénieur) parmi au moins un des quatre domaines suivants, et intérêt pour les autres :

Compétences principales : Apprentissage automatique, optique physique.

Compétences souhaitées : astronomie, traitement du signal.

Présentation du projet doctoral

Contexte

Des milliers d'exoplanètes ont été découvertes depuis la fin des années 1980, ce qui a ouvert un nouveau champ de l'astronomie. Il existe différentes méthodes de détection d'exoplanètes. La plupart sont des méthodes dites indirectes, où l'on détecte l'influence d'une planète sur son étoile. Au contraire, l'imagerie est une méthode de détection et de caractérisation directe d'exoplanètes qui permet une analyse spectroscopique, et donc qui permet d'espérer détecter des marqueurs de vie hors du système solaire.

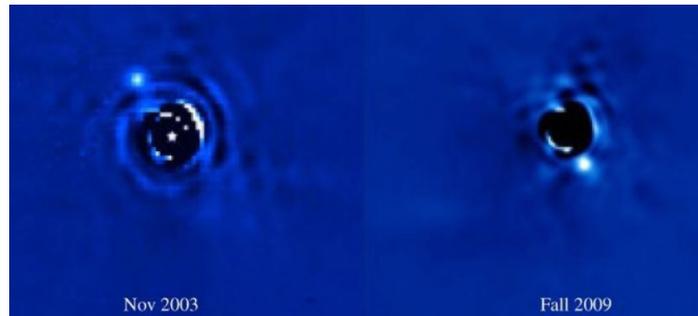


Figure 1 : β Pictoris b à six ans d'écart. Extrait de A.-M. Lagrange, <https://doi.org/10.1098/rsta.2013.0090>

L'imagerie d'exoplanètes souffre de deux difficultés principales : d'une part la séparation angulaire entre la planète et l'étoile est très faible vue depuis la Terre, et d'autre part l'étoile est beaucoup plus brillante que la planète. En effet, dans le cas d'une planète semblable à la Terre autour d'une étoile semblable au Soleil, la séparation est inférieure à une seconde d'arc, tandis que le contraste dans le visible est typiquement de l'ordre d'un photon émis par la planète pour dix milliards de photons émis par l'étoile.

Dans les images scientifiques, la planète a donc tendance à disparaître dans la tache de diffraction formée par l'étoile.

Pour régler ce problème, on utilise un coronographe, qui est un système physique qui filtre la lumière de l'étoile tout en laissant passer la lumière de la planète. Cependant, les inévitables aberrations dans le système optiques (dues par exemple à des défauts de polissage des miroirs ou à des déformations thermo-mécaniques) entraînent des déformations du front d'onde lumineuse incident, ce qui provoque

des fuites de lumière stellaire à travers le coronographe. Ces fuites se traduisent par des tavelures dans le plan focal, tavelures qui peuvent masquer une éventuelle planète. Il est donc nécessaire de commander finement (au moyen de miroirs déformables comportant plusieurs centaines d'actionneurs) le front d'onde incident de façon à créer dans les images scientifiques une zone où la lumière stellaire est particulièrement bien supprimée, ce qui permettra de détecter la lumière planétaire. Une telle zone est nommée un *dark hole*.

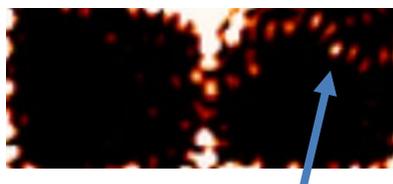


Figure 2 : Dark hole avec des résidus de diffraction visibles

Objectif

L'objectif de cette thèse est d'améliorer la création de dark hole en optimisant la commande des miroirs déformables par apprentissage par renforcement.

En effet, la plupart des méthodes de création de dark hole sont linéarisées et itératives, ce qui demande beaucoup de prises d'images, donc de temps. Or le temps d'observation est extrêmement précieux sur un télescope spatial comme le Nancy Grace Roman Space Telescope dont le lancement est prévu en 2027, qui sera équipé d'un coronographe, et qui se veut non seulement un instrument scientifique mais encore un démonstrateur technologique pour le projet de télescope spatial Habitable Worlds Observatory, dont le lancement est prévu à l'horizon 2040.

Le programme de travail de la thèse est multiple : il s'agira d'optimiser les performances de la méthode prototype en cours de développement sur des données simulées, puis de l'adapter au banc d'observation en prenant en compte les conditions d'acquisition des données expérimentales. Il s'agira entre autres d'optimiser à la fois le nombre de corrections nécessaires et l'efficacité de celles-ci.

L'approche par renforcement permettra de pallier les défauts des méthodes itératives, ainsi que ceux des méthodes non linéaires usuelles qui souffrent du décalage entre le modèle numérique de l'instrument et l'instrument réel. Nous envisageons une correction directe depuis les données d'entrées vers la commande des miroirs sans connaissance a priori, et également d'autres approches prenant en compte la physique de l'environnement.

Travail envisagé

Cette thèse est particulièrement multi-disciplinaire. Son objectif est évidemment l'**astronomie**, et elle s'appuiera avant tout sur des méthodes d'**informatique** pour l'entraînement de l'agent par apprentissage par renforcement, mais aussi de **physique** numérique pour la description de la propagation optique dans l'instrument, d'**optique expérimentale** pour la validation expérimentale, et de **traitement du signal** pour l'utilisation optimale de l'information et la stratégie de commande.

Les travaux au cours de cette thèse pourront s'appuyer sur la riche expérience des membres de l'équipe en matière de commande de surface d'onde et d'apprentissage automatique. Le doctorant pourra également se fonder sur les résultats obtenus dans le cadre d'une thèse actuellement en cours utilisant l'apprentissage par renforcement et dont la soutenance est prévue en novembre 2025, ainsi que sur les travaux effectués par l'équipe dans le cadre d'une approche par apprentissage supervisé.

Le but est de partir en début de thèse d'un algorithme prototype de l'équipe pour atteindre en fin de thèse un haut degré de performance validé expérimentalement.

Le programme de travail prévisionnel est le suivant :

- Comparaison des performances de l'algorithme actuellement utilisé sur ce problème, PPO, avec d'autres algorithmes d'apprentissage de l'état de l'art.

- Passage du contrôle d'un à deux miroirs déformables (pour le contrôle de la phase et de l'amplitude de l'onde).
- Passage du monochromatique à une bande spectrale élargie.
- Adaptation de la structure du réseau, en intégrant des évolutions récentes de l'état de l'art.
- Amélioration de la vitesse de convergence par un travail sur la récompense de l'agent et l'optimisation des hyper-paramètres.
- Transfert de connaissances pour passer du simulateur à un instrument réel.
- Combinaison de l'apprentissage automatique avec des connaissances physiques
- Validation sur banc d'optique tout au long de la thèse.

Bibliographie

- Pour le contexte et les enjeux, vous pouvez lire la récente revue disponible librement à l'adresse <https://doi.org/10.5802/crphys.133> : Raphaël Galicher; Johan Mazoyer. Imaging exoplanets with coronagraphic instruments. Comptes Rendus. Physique, Volume 24 (2023) no. S2, pp. 69-113.
- Pour un exemple récent de travaux de l'équipe sur le sujet, vous pouvez lire notre publication disponible librement à l'adresse <https://doi.org/10.48550/arXiv.2406.18143> : Gutierrez, Y., Mazoyer, J., Mugnier, L. M., Herscovici-Schiller, O., & Abeloos, B. (2024). Image-based wavefront correction using model-free Reinforcement Learning. Optics Express, 2024.

Collaborations envisagées

La collaboration ONERA/Observatoire de Paris est centrale pour cette thèse. L'équipe d'encadrement, constituée d'Olivier Herscovici-Schiller (ONERA/DTIS), Johan Mazoyer (CNRS/Observatoire de Paris/LESIA), Baptiste Abeloos (ONERA/DTIS) et Laurent Mugnier (ONERA/DOTA), regroupe des spécialistes dans tous les domaines qui seront explorés durant cette thèse, et qui ont l'habitude de travailler ensemble.

Laboratoire d'accueil à l'ONERA

Département : Traitement de l'information et Systèmes

Lieu (centre ONERA) : Palaiseau

Contact : Olivier Herscovici-Schiller et Baptiste Abeloos

Tél. : 01 80 38 66 94 Email :

olivier.herscovici@onera.fr

baptiste.abeloos@onera.fr

Directeurs de thèse

Nom : Laurent Mugnier et Johan Mazoyer

Laboratoire : ONERA/DOTA et Observatoire de Paris/LESIA

Tél. :

Email : laurent.mugnier@onera.fr ,

johan.mazoyer@obspm.fr

Pour plus d'informations : <https://www.onera.fr/rejoindre-onera/la-formation-par-la-recherche>