

Sujet de thèse :

L'imagerie d'exoplanètes avec le Roman Space Telescope

Johan Mazoyer, LIRA - Observatoire de Paris

Co-encadrants : Axel Potier / Pierre Baudoz

Résumé du projet de thèse :

L'imagerie haute-dynamique représente l'avenir de l'exploration des exoplanètes depuis l'espace. Tandis que les missions de transit développées par l'ESA, à l'image de TESS et CHEOPS, sont en cours ou en développement (PLATO prévu pour 2026, Ariel pour 2029), les futures missions exoplanétaires de la NASA se concentreront exclusivement sur l'imagerie. Cette technique est en effet la seule capable de distinguer directement la lumière émise par les exoplanètes de celle de leur étoile hôte, ouvrant ainsi la voie à une exploration et une caractérisation méthodique des zones habitables autour des étoiles voisines du Soleil. Après les avancées apportées par les instruments spatiaux à haut contraste développés pour Hubble et Webb, la première mission intégrant des optiques actives, le *Roman Space Telescope* (RST), sera lancée en 2027. Par ailleurs, le *Decadal Survey* de la communauté scientifique américaine a identifié comme priorité majeure le développement d'une mission « flagship », semblable à Hubble et Webb, désormais baptisée Habitable Worlds Observatory (HWO) dont le but premier est la détection d'exoplanètes terrestres dans la zone habitable de leurs étoiles.

Au niveau européen, l'équipe Très Haute Dynamique (THD2) du LIRA, à l'Observatoire de Paris à Meudon, est un acteur de premier plan dans ce domaine avec le développement du banc THD2, un banc expérimental destiné à tester de nouveaux composants, méthodes actives et algorithmes de post-traitement dans des conditions proches de celles de l'espace pour les instruments haut contraste dédiés à l'imagerie d'exoplanètes. Ce projet, soutenu par le CNES, l'ESA et Airbus Espace, a permis d'atteindre des performances de contraste inégalées en dehors des environnements sous vide disponibles exclusivement à NASA/JPL. Il donne lieu également à de nombreuses collaborations internationales.

Dans ce contexte, nous proposons une thèse pendant laquelle le candidat étudiera et optimisera des techniques novatrices appliquées au coronographe du RST par simulations numériques et en laboratoire sur le banc THD2. Le candidat exploitera également les premières données de l'instrument RST. L'ensemble des travaux permettra la mise au point de nouvelles stratégies d'observation pour préparer les missions futures comme HWO.



Summary of thesis project:

High-dynamic imaging represents the future of exoplanet exploration from space. While transit missions developed by ESA and NASA, such as TESS and CHEOPS, are underway or in development (PLATO scheduled for 2026, Ariel for 2029), NASA's future exoplanetary missions will focus exclusively on imaging. This is the only technique capable of directly distinguishing the light emitted by exoplanets from that of their host star, paving the way for methodical exploration and characterization of habitable zones around stars close to the Sun. Following the advances made by the high-contrast space instruments developed for Hubble and Webb, the first mission incorporating active optics, the Roman Space Telescope (RST), will be launched in 2027. In addition, the US scientific community's Decadal Survey has identified as a major priority the development of a flagship mission, similar to Hubble and Webb, now called the Habitable Worlds Observatory (HWO), whose primary aim is to detect terrestrial exoplanets in the habitable zone of their stars.

At European level, LIRA's Très Haute Dynamique (THD2) team at Paris Observatory in Meudon is a leading player in this field with the development of the THD2 bench, an experimental testbed designed to test new components, active methods and post-processing algorithms in near-space conditions for high-contrast instruments dedicated to exoplanet imaging. This project, supported by CNES, ESA and Airbus Espace, has achieved unrivaled contrast performance outside the vacuum environments available exclusively to NASA/JPL. It has also led to numerous international collaborations.

In this context, we are proposing a thesis ranging from the use of this experimental bench to optimize in-flight operations of the RST coronagraph, to the exploitation of the instrument's first data, via the development of new observing strategies with such instruments. The knowledge acquired will be essential for the preparation of the HWO mission.

Contexte:

L'imagerie directe pose des défis spécifiques, notamment l'observation d'objets dont le flux est jusqu'à 10 milliards de fois plus faible que celui de leur étoile (cas des planètes telluriques), et séparés par une fraction de seconde d'arc. Les instruments coronagraphiques ont pour but de relever ces défis en atténuant l'image de l'étoile (située sur l'axe optique) afin que seule la lumière des planètes (hors axe) subsiste. Les imperfections des optiques du télescope et de l'instrument sont la limitation principale des coronographes spatiaux. Ces défauts, qui apparaissent sous la forme de speckles dans l'image observée, réduisent considérablement les capacités de détection des exoplanètes. Ces « speckles » doivent être corrigés activement pendant l'observation grâce à des miroirs déformables (DM) spatiaux. La correction n'est cependant jamais parfaite et un étalonnage des résidus stellaires à l'aide d'algorithmes de post-traitement permet d'améliorer l'efficacité de l'instrument. Le projet proposé s'inscrit précisément à l'intersection de ces deux approches, combinant correction active et traitement a posteriori pour améliorer les performances des observations à haut contraste sur la prochaine mission flagship de la NASA : le Roman Space Telescope (RST).



Les algorithmes de correction active des speckles prévus sur le RST datent d'une dizaine d'années et ne prennent pas en compte les dernières avancées. Le planning du RST prévoit du temps d'exploration technologique pour de nouveaux algorithmes, auquel notre équipe aura accès comme membres du Roman CPP. Cette opportunité unique nous permettra de déployer des algorithmes de correction active des speckles nouvellement mis en place sur le banc THD2, dont les composants optiques simulent assez précisément la charge utile du RST (Laginja, Baudoz et al, soumis). Ces algorithmes pourraient accélérer la correction et l'étalonnage des speckles et ainsi, augmenter le temps utile pour l'enregistrement de données astrophysiques. Les techniques de post-traitement prévues pour le RST se basent sur l'observation d'une image de référence à proximité de l'étoile étudiée. En soustrayant l'image de l'étoile de référence de celle de l'étoile cible, les *speckles* sont atténués, révélant ainsi la planète. Les performances de cette solution sont limitées par les variations des *speckles* au fil du temps. Nous proposons d'utiliser une méthode plus robuste appelée imagerie différentielle cohérente (CDI en anglais), qui utilise le miroir déformable à bord du télescope pour identifier les speckles et les soustraire en post traitement. En 2022, notre équipe a obtenu pour la première fois une validation de principe du CDI sur un instrument haut contraste au sol, SPHERE, sur le Very Large Telescope [Potier, Mazoyer et al. 2022]. Cette méthode encore peu explorée est très prometteuse et pourra être mise en place sur le RST, après une étude paramétrique poussée sur le THD2. Enfin, notre participation au CPP nous ouvre les portes des pipelines de réduction de données RST. Ces données étant publiques dès la mise en service de l'instrument, nous serons capables d'obtenir des images inédites de systèmes exoplanétaires à des contrastes de $1e-8$ - $1e-9$ que l'on sera capables de traiter. L'expérience de Johan Mazoyer sur l'étude des disques circumstellaires et de Pierre Baudoz concernant les opérations avec le coronographe JWST/MIRI seront des atouts essentiels pour l'analyse des premières images du RST.

Objectifs de la thèse :

L'objectif de cette thèse est de proposer des solutions novatrices pour optimiser la détection directe de planètes extrasolaires à bord du *Roman Space Telescope* (RST) qui sera lancé en 2027. L'étudiant(e) développera ces nouvelles solutions de correction des aberrations et de traitement des données de l'instrument coronographique du RST en s'appuyant sur les algorithmes récemment développés dans notre équipe.

Description du travail de thèse:

L'étudiant(e) s'appuiera sur des simulations numériques et des tests sur le banc THD2 pour démontrer la faisabilité de ces deux nouveaux modes d'observation de l'instrument coronographique du RST. Une fois optimisées et validées, l'étudiant en thèse se chargera de leur implémentation sur la mission flagship RST avant son programme de démonstration technologique fin 2027. Il pourra ensuite réduire les données du RST qui seront immédiatement publiques. Cette recherche devrait aboutir à deux publications soumises (une par algorithme) à la fin de la deuxième année. À plus long terme, cette méthode a le potentiel pour devenir la technique par défaut des coronographes spatiaux, dont HWO. Le temps



restant sera consacré au retour d'opérations avec le RST et au traitement des premières images scientifiques obtenues avec l'instrument. Là encore, une publication premier ou deuxième auteur sur l'étude d'un nouvel objet astrophysique (planète ou disque) peut être envisagée.

Ouverture Internationale et collaborations :

Quatre membres de l'équipe participent activement au *Community Participation Program* (CPP) du RST et Johan Mazoyer est le représentant adjoint du CNES au CPP. La thèse aura donc une ouverture internationale très large (USA, Europe, Japon). Nous collaborons avec la NASA et JPL sur le RST et nous avons également des collaborations en cours avec SRON, l'université de Leiden et le STScI qui devraient se poursuivre pendant cette thèse.

Profil et compétences :

Les notions suivantes seraient utiles :

- Exoplanète
- Codage Python

Un intérêt et/ou des notions en instrumentation seraient un plus, notamment en :

- Optique ondulatoire, optique de Fourier,
- optique adaptative, miroirs déformables
- traitement du signal

Financement :

Plusieurs sources de financement ont été demandées. Les retours sur ces financements devraient arriver d'ici avril-mai 2025.

Références bibliographiques :

Correction active des speckles : Potier, A., Baudoz P. et al., "Comparing focal plane wavefront control techniques: Numerical simulations and laboratory experiments", 2020, A&A, vol. 635, A192

Stratégie de post-traitement : Potier, A. Mazoyer, J et al., "Increasing the raw contrast of VLT/SPHERE with the dark hole technique. II. On-sky wavefront correction and coherent differential imaging", 2020, A&A, vol. 665, A136

Bibliographie générale sur le banc THD2: <https://thd-bench.lesia.obspm.fr/publications-16/>