

Proposition de stage de Master 2 ou Ingénieur **Année académique 2025 – 2026**

Responsable de stage : Ferréol Soulez (CRAL) & Jean-Philippe Berger (IPAG)

@ : ferreol.soulez@univ-lyon1.fr

☎ : +33 4 78 86 85 40

Adresse/Lieu du Stage : CRAL - site Charles André : 9 avenue C. André, St Genis Laval

Équipe de recherche d'accueil : AIRI

**Intitulé du stage : Exploration d'une nouvelle méthode
d'analyse d'images interférométriques appliquée à l'étude
de la formation planétaire**

Résumé du travail demandé :

Contexte scientifique:

L'étude de la morphologie des disques protoplanétaires à très haute résolution angulaire dans l'infrarouge apporte des informations essentielles à la compréhension des processus physiques menant à la formation d'un système exoplanétaire. L'imagerie coronagraphique à haut contraste permet de révéler les structures aux grandes échelles des disques révélant ainsi des structures dynamiques telles que des ondes spirales ou cavités ainsi que des planètes jeunes. Ceci se fait au prix du sacrifice de l'imagerie des unités astronomiques centrales cachées par le masque coronagraphique empêchant l'observation du disque interne et d'une possible zone d'habitabilité. Les observations par interférométrie à longues lignes de bases au Very Large Telescope Interferometer (VLTI) permettent à contrario de contraindre la morphologie des disques très près de l'étoile mais souffre d'un déficit d'information aux basses fréquences (c'est à dire aux grandes échelles spatiales).

La technique de masquage de pupille [1] associée à l'imagerie haut contraste a été conçue pour pousser les capacités des télescopes mono-pupilles en s'affranchissant du masque coronagraphique. Elle doit permettre, en théorie, de s'approcher à l'intérieur de la limite de résolution de Rayleigh de l'étoile (mieux que la coronagraphie) et fournir une information parfaitement complémentaire à la coronagraphie et à l'interférométrie longue base. De nombreux instruments imageurs à haut contraste possèdent des instruments à masque de pupille (VLT-SPHERE-SAM, JWST-NIRIS-AMI, MICADO-ELT)[2,3,4]. Néanmoins, les performances constatées en conditions réelles sont fortement limitées et montrent que les fondamentaux et facteurs limitants de ce type d'observations sont encore mal compris, en particulier pour l'instrumentation au sol qui est soumise aux aléas atmosphériques. Ils amènent à remettre en cause l'approche purement interférométrique classiquement utilisée pour le traitement de données.

Projet de recherche:

Dans ce projet nous souhaitons démontrer qu'en abordant le traitement de données de la technique de masquage de pupille comme une problématique de déconvolution d'image avec fonction d'étalement de point structurée on peut atteindre de plus haut contrastes qu'avec l'approche interférométrique classiquement adoptée. On se propose de modéliser le signal (flux cohérents, interférences) dans le plan image. Ceci devrait donc permettre de distinguer de manière plus efficace des compagnons planétaires ou des perturbations dynamiques de disques dans des systèmes étoiles jeunes.

Dans ce stage on s'intéressera aux données produites par l'instrument VLT-SPHERE-IRDIS-SAM lors de l'observation de disques jeunes dit en transition qui sont fortement soupçonnés d'abriter des planètes en formation.

Les travaux se structureront en plusieurs étapes:

1. Dans un premier temps on modélisera de manière analytique l'instrument en prenant en compte ses caractéristiques. Ceci nous amènera à évaluer, à partir de l'équation de formation de l'image, comment les différentes imperfections affectent la dynamique de l'image finale. Pour cela nous comparerons les résultats de la simulation aux données de calibration disponibles.
2. Dans une seconde étape on se servira des données de calibration d'IRDIS SAM pour établir des courbes de performances, exprimées sous la forme de profils de contrastes en fonction de la distance angulaire.
3. Dans la dernière étape on partira d'images produites par simulations astrophysiques de disques protoplanétaires en transition possédant des planètes enfouies altérées par le modèle de l'instrument afin de déterminer quelles caractéristiques astrophysiques peuvent être récupérées.

Outre l'intérêt immédiat sur notre connaissance de la structure des disques protoplanétaires cet effort de recherche et les outils qui en découleront devrait avoir un impact important dans le futur en particulier en prévision de la mise en opération de l'ELT (avec l'instrument MICADO) ou d'une meilleure exploitation du masque de pupille sur le JWST.

Le projet de recherche se déroulera dans le contexte d'une collaboration entre le CRAL, connaissance très approfondie de l'instrument SPHERE de ses données et une expertise sur le traitement des données interférométrique et l'IPAG qui développe depuis de nombreuses années un programme d'observation à très haute résolution angulaire d'environnements protoplanétaires par interférométrie (masque de pupille et longue base).

Références:

- [1] Lacour, Sylvestre, et al. "Sparse aperture masking on Paranal." *The Messenger* 146 (2011): 18-23.
- [2] Cheetham, Anthony C., et al. "Sparse aperture masking with SPHERE." *Optical and Infrared Interferometry and Imaging V*. Vol. 9907. SPIE, 2016.



CENTRE DE RECHERCHE ASTROPHYSIQUE DE LYON

Centre de Recherche Astrophysique de Lyon UMR 5574



[3] Artigau, Étienne, et al. "NIRISS aperture masking interferometry: an overview of science opportunities." Space Telescopes and Instrumentation 2014: Optical, Infrared, and Millimeter Wave 9143 (2014): 1185-1194.

[4] Huby, Elsa, et al. "The MICADO first light imager for the ELT: sparse aperture masks, design, and simulations." Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy X. Vol. 13096. SPIE, 2024.

Type de financement envisagé pour le stage : PEPR Origin ou financement d'équipe

Indication éventuelle d'ouverture vers un sujet de thèse : Oui

Master 2 Research internship offer **Academic year 2024 – 2025**

Internship supervisor: Ferréol Soulez

@ : ferreol.soulez@univ-lyon1.fr

☎ : +33 4 78 86 85 40

Address/Workplace: CRAL - site Charles André : 9 avenue C. André, St Genis Laval

Hosting research team: AIRI

Internship title: Exploration of a new method for analyzing interferometric images applied to the study of planetary formation.

Scientific context:

The study of the morphology of protoplanetary disks at very high angular resolution in the infrared provides essential information for understanding the physical processes leading to the formation of an exoplanetary system. High-contrast coronagraphic imaging reveals large-scale structures in the disks, revealing dynamic structures such as spiral waves or cavities, as well as young planets. This comes at the cost of sacrificing imaging of the central astronomical units hidden by the coronagraphic mask, preventing observation of the inner disk and a possible habitable zone. Long baseline interferometry observations at the Very Large Telescope Interferometer (VLTI) allow us to constrain the morphology of disks very close to the star, but suffer from a lack of information at low frequencies (i.e., at large spatial scales). Pupil masking technique [1], combined with high-contrast imaging, has been developed to enhance the capabilities of single-aperture telescopes by removing the need for a coronagraphic mask. Theoretically, it allows us to image within the Rayleigh resolution limit of the star (surpassing coronagraphy) and provides data that is perfectly complementary to both coronagraphy and long-baseline interferometry. Many high-contrast imaging instruments include a pupil mask (e.g., VLT-SPHERE-SAM, JWST-NIRISS-AMI, MICADO-ELT) [2,3,4]. However, real-world performance remains limited, and fundamental aspects and limiting factors of this technique are still poorly understood—especially for ground-based instruments, which are affected by atmospheric disturbances. This calls into question the purely interferometric approach typically used for data processing.

Research Project

In this project, we aim to demonstrate that by treating pupil masking data processing as an image deconvolution problem with a structured point spread function (PSF), it is possible to achieve higher contrast than with the standard interferometric approach. We propose to model the signal (coherent flux, interference patterns) directly in the image plane. This should allow more effective detection of planetary companions or dynamic disk disturbances in young stellar systems. During

the internship, we will work with data from the VLT-SPHERE-IRDIS-SAM instrument, focusing on young transitional disks, which are strongly suspected of hosting forming planets.

The work will be structured in several phases:

1. Analytical modeling of the instrument, taking into account its characteristics. Starting from the image formation equation, we will assess how various imperfections affect the final image dynamics. To do this, we will compare simulation results with available calibration data.
2. Using IRDIS-SAM calibration data, we will establish performance curves, expressed as contrast profiles as a function of angular separation.
3. Finally, we will simulate astrophysical images of transitional protoplanetary disks with embedded planets, degraded by the instrument model, to determine what astrophysical features can be recovered.

In addition to its immediate impact on our understanding of protoplanetary disk structure, this research effort and the tools developed could have a significant future impact—particularly in preparation for the commissioning of the ELT (with the MICADO instrument) or for better exploitation of the pupil mask on the JWST.

The research project is a collaboration between:

- CRAL, with deep expertise in the SPHERE instrument and interferometric data processing
- IPAG, which has led a long-standing program of very high angular resolution observations of protoplanetary environments using both pupil masking and long-baseline interferometry

References:

- [1] Lacour, Sylvestre, et al. “Sparse aperture masking on Paranal.” *The Messenger* 146 (2011): 18-23.
- [2] Cheetham, Anthony C., et al. “Sparse aperture masking with SPHERE.” *Optical and Infrared Interferometry and Imaging V*. Vol. 9907. SPIE, 2016.
- [3] Artigau, Étienne, et al. “NIRISS aperture masking interferometry: an overview of science opportunities.” *Space Telescopes and Instrumentation 2014: Optical, Infrared, and Millimeter Wave* 9143 (2014): 1185-1194.
- [4] Huby, Elsa, et al. “The MICADO first light imager for the ELT: sparse aperture masks, design, and simulations.” *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy X*. Vol. 13096. SPIE, 2024.

Nature of the financial support for the internship: PEPR Origin or team funding

Potential for a follow-up as a PhD thesis: Yes