

Invitation à la soutenance de thèse

ANALYSE DE FRONT D'ONDE POUR LES TÉLESCOPES GEANTS :
ETUDES DE PERFORMANCE ET DEVELOPPEMENT DE NOUVEAUX
MODELES DE CAPTEURS

*WAVEFRONT SENSING FOR EXTREMELY LARGE TELESCOPES:
PERFORMANCE STUDIES AND THE DEVELOPMENT OF NEW SENSOR
DESIGNS*

Francisco OYARZUN LIRA

Lundi 15 décembre 2025 à 14h00

Laboratoire d'Astrophysique de Marseille
38 Rue Frédéric Joliot Curie, 13013 Marseille

Devant le jury composé de :

Mme. Annie Zavagno	Aix-Marseille Université, LAM	Présidente
M. Roberto Ragazzoni	INAF, Université de Padoue	Rapporteur
M. David Mouillet	Université Grenoble Alpes, IPAG	Rapporteur
M. Christophe Vérinaud	ESO, Garching bei München	Examinateur
M. Maaïke -Van Kooten	NRC-CNRC, Canada	Examinatrice
M. Benoît Neichel	CNRS, LAM	Directeur de thèse
M. Thierry Fusco	ONERA, DOTA	Co-directeur de thèse
Mme Pauline Trouvé-Peloux	ONERA, DTIS	Membre invité

Résumé :

La nouvelle génération de télescopes extrêmement grands (ELTs) offrira à la communauté scientifique une capacité inédite pour étudier les cibles les plus petites et les plus faibles de l'Univers, afin de mieux comprendre les processus physiques qui façonnent aussi bien les plus grandes structures, comme les amas de galaxies, que les plus petites, comme la formation planétaire et les exoplanètes. Grâce à leur pouvoir de résolution, il sera possible d'analyser directement la lumière d'exoplanètes, fournissant des informations uniques sur la chimie de leur atmosphère et ouvrant la voie à l'une des plus grandes découvertes de l'humanité : la détection de biosignatures et de vie extraterrestre. Malheureusement, la résolution des télescopes au sol est fortement limitée par la turbulence atmosphérique. Sans correction, cette dégradation réduit la performance d'un facteur de plusieurs centaines. Dans ces conditions, il devient presque impossible de séparer la lumière d'une exoplanète de celle de son étoile hôte. Les systèmes d'optique adaptative (OA) corrigent en temps réel ces distorsions, mais leur performance dépend de manière critique du choix de l'analyseur de surface d'onde (ASO) et de la source de référence. Cette thèse étudie les performances des ASO existants utilisant des étoiles guides laser (LGS) et explore de nouveaux concepts d'analyseurs ainsi que des stratégies de reconstruction pour améliorer la sensibilité et la robustesse des futurs ELTs.

Le manuscrit commence par l'introduction de la turbulence atmosphérique et de ses effets sur l'imagerie, de l'OA et de l'analyse de surface d'onde, avec un accent sur l'ASO de Shack–Hartmann (SHWFS) et la famille des analyseurs à filtrage de Fourier, en particulier la pyramide (PWFS) et Zernike (ZWFS). Un critère de sensibilité est présenté pour évaluer leur robustesse au bruit.

Les performances du PWFS avec LGS sont étudiées pour des télescopes de 8 à 40m. Pour contourner le coût des simulations bout-en-bout, plusieurs stratégies sont validées : propagation accélérée, gains optiques et modèle convolutionnel. Grâce à ces outils, la sensibilité du PWFS avec LGS est calculée et la performance attendue pour les ELTs estimée. La conclusion principale est que la largeur de la tache LGS, plutôt que son altitude, constitue le facteur limitant essentiel.

Le formalisme de sensibilité est ensuite étendu au SHWFS. Un formalisme matriciel est introduit pour décrire l'algorithme de centroïde, permettant de calculer les sensibilités comme pour le PWFS et d'obtenir une comparaison équitable. Les résultats montrent que, pour une seule LGS, le PWFS surpasse le SHWFS d'environ une magnitude, mais qu'avec plusieurs LGS et en combinant leurs signaux, les deux analyseurs atteignent des performances comparables.

Enfin, de nouveaux concepts d'ASO sont explorés. En combinant différents analyseurs dans un chemin optique commun, il est montré que leurs propriétés complémentaires peuvent être exploitées pour obtenir à la fois une grande sensibilité et une bonne linéarité. L'étude se concentre ensuite sur l'optimisation des ASO à filtrage de Fourier et l'utilisation de réseaux de neurones (RN) comme reconstruteurs non linéaires. Un jumeau numérique de l'instrument Papyrus est développé pour entraîner et valider sur le ciel les reconstruteurs neuronaux. Enfin, l'optimisation conjointe du masque et du réseau de reconstruction est explorée, donnant des résultats intéressants pour des ASO connus comme pour de nouveaux concepts.

Dans l'ensemble, cette thèse propose une analyse des performances du SHWFS et du PWFS avec LGS sur les ELTs et suggère de nouveaux principes de conception pour les analyseurs de surface d'onde de prochaine génération, tirant parti de la reconstruction non linéaire et de l'optimisation conjointe. Ces résultats ouvrent vers des systèmes d'optique adaptative plus sensibles et plus robustes pour l'ère des télescopes extrêmement grands.

Mots clés :

Optique adaptative, Analyseur de surface d'onde, Étoile guide laser, Optimisation, Réseaux de neurones