

PROPOSITION DE SUJET DE THESE

Intitulé : Système d'imagerie corrigée du tilt anisoplanétique assistée par la caméra SIRIS

Référence : **PHY-DOTA-2025-21**

(à rappeler dans toute correspondance)

Début de la thèse : Octobre 2026 à Janvier 2027
selon le type de financement

Date limite de candidature : 01/06/2026

Mots clés :

Optique Adaptative, Imagerie à Haute Résolution, Astronomie, Focalisation laser

Profil et compétences recherchées :

Master 2 recherche / école d'ingénieur avec une formation en physique

Présentation du projet doctoral, contexte et objectif :

Les variations spatiales de l'indice de réfraction au sein de l'atmosphère introduisent des avances et des retards de phase qui induisent principalement des fluctuations du mode de basculement (aussi appelé tip-tilt) de l'onde optique. Lors de la propagation d'un faisceau laser, le tip-tilt turbulent généré par la turbulence atmosphérique provoque des mouvements aléatoires du faisceau dans le plan de la cible (*beam wander* [1]) qui réduisent la densité d'énergie moyenne déposée sur cible, dégradant ainsi l'efficacité des systèmes à énergie dirigée. En imagerie, le basculement turbulent provoque un bougé d'image global qui réduit notablement la résolution. De plus, la répartition volumique de la turbulence le long de l'axe de visée fait que le basculement turbulent varie avec le champ, si bien qu'on ne peut plus considérer qu'il est constant dans l'image dès lors que le champ image est plus grand que le champ isoplanétique (typiquement de l'ordre de quelques microradians à quelques dizaines de microradians en fonction des conditions de propagation et des longueurs d'onde considérées). Ainsi, en imagerie grand champ comme par exemple l'observation du système solaire, le basculement différentiel (appelé aussi tilt anisoplanétique) introduit des distorsions locales dans l'image qui s'ajoutent à l'effet de tilt global. Ces pertes de qualité image sont pénalisantes pour l'exploitation des images en astronomie ou pour des missions de reconnaissance et d'identification d'objet. Par conséquent, il est nécessaire de corriger le tilt global et anisoplanétique induit par la turbulence atmosphérique, que ce soit pour atteindre la limite de résolution par diffraction des systèmes d'observation au sol pour l'astronomie ou la surveillance ; ou pour augmenter l'efficacité et la portée des systèmes à énergie dirigée.

Les systèmes de correction tip-tilt actuels mesurent généralement le mode de basculement global de l'onde optique par un calcul de centre de gravité ou de maximum de corrélation [2] à partir d'images plan focal de l'objet observé et corrigent des effets du tilt global à l'aide de miroirs de pointage rapide FSM (Fast Steering Mirror). Ces systèmes de correction présentent néanmoins des limitations. La première limitation est liée à l'anisoplanétisme, lequel n'est pas pris en compte. Ainsi, ces systèmes souffrent des effets induits par le tilt anisoplanétique et peinent à stabiliser la ligne de visée lorsque l'objet observé est de dimension plus grande que le domaine isoplanétique. Une autre limitation de ces systèmes est liée à la rapidité d'évolution de l'atmosphère. L'évolution rapide des perturbations atmosphériques impose l'utilisation de détecteur à courte pose pour la mesure du basculement turbulent avec des temps d'intégration typiques de l'ordre de la milliseconde, ce qui limite le flux reçu au sein d'une trame. Ainsi, le signal utilisé pour l'analyse de la turbulence atmosphérique présente un rapport signal-à-bruit limité (RSB). Il est donc nécessaire de recourir à des détecteurs à faible bruit pour réduire l'impact du bruit sur la mesure du basculement. De plus, la photométrie de la scène observée peut varier de manière conséquente durant l'observation, par exemple à cause de réflexions spéculaires intenses visibles à certains moments de l'observation, lesquelles peuvent provoquer des saturations du signal enregistré et biaiser la mesure. Il y a donc un défi technologique à relever sur la mesure des perturbations atmosphériques, laquelle nécessite d'avoir un détecteur à bas bruit et à grande dynamique.

La thèse proposée, qui s'inscrit dans le cadre de l'ANR ASTRID DFC (Distortion Free Camera), a pour but de dépasser ces limitations et **de développer un système novateur d'optique stabilisée permettant de mesurer et corriger non seulement le basculement global mais aussi les effets de distorsion locale induits par le tilt anisoplanétique**. Pour y parvenir, nous proposons de combiner des développements récents autour des circuits de lecture de caméra SWIR rapides ([3], [4]), des approches d'analyse d'images multi-directionnelles [5] et des approches de reconstruction tomographique inspirées de l'optique adaptative multiconjuguée [6]. L'architecture envisagée présente de plus l'avantage de n'utiliser qu'**un seul et même détecteur pour la mesure du basculement et pour l'imagerie à haute résolution**, ce qui permet un gain

en compacité par rapport aux systèmes d'imagerie corrigés usuels qui ont recours à un premier détecteur pour la mesure des perturbations à corriger et un second pour l'imagerie haute résolution.

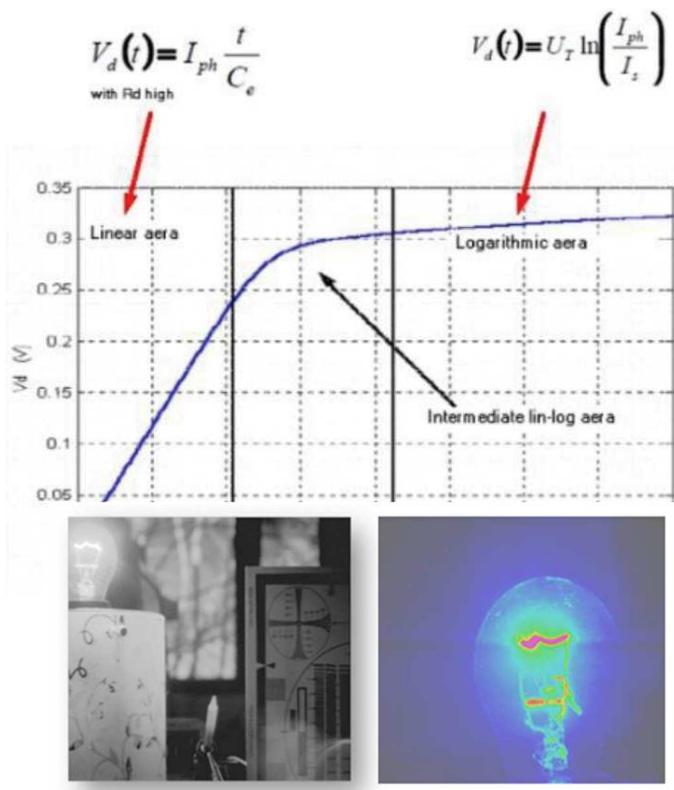


Figure 1 : Réponse typique de la caméra SIRIS en fonction du photo-courant et exemples d'images en mode lin/log

Dans ce cadre, la caméra SWIR SIRIS [4] développée par le Laboratoire de Physique de l'Ecole Normale Supérieure (LPENS) est un élément clé. Nous proposons d'exploiter ces spécificités, à savoir un bruit de lecture très faible, sa réponse linéaire-logarithmique à très grande dynamique ainsi que son mode de lecture NDRO (Non Destructive Read-Out). L'idée consiste à lire les pixels du détecteur pendant une même pose sans en détruire la charge, et ainsi de suivre l'évolution de la charge au sein de chaque pixel à une cadence élevée, typiquement 200 Hz en pleine trame et jusqu'à la dizaine de kHz sur un champ réduit, soit une valeur bien plus grande que la cadence image de l'ordre du Hz. Via ce mode de lecture, nous proposons d'utiliser d'une part le signal d'évolution des charges au cours du temps de pose afin de mesurer localement les déplacements induits par la turbulence et par les instabilités mécaniques, et d'autre part l'image acquise à l'issue du temps de pose comme image finale. La mesure des déplacements locaux viendra alimenter une boucle de stabilisation de la ligne de visée en temps réel qui permettra d'obtenir des images finales stabilisées, à haute résolution et à RSB élevé.

La première étape de cette thèse consistera à prendre en main la caméra SIRIS et à caractériser sa réponse et ses différents modes de lecture en tenant compte des spécificités des concepts optiques envisagés pour la mesure et la correction du tilt anisoplanétique (tilt global + distorsions locales). A l'issue de cette première phase, un travail de modélisation et de simulation d'images en présence de turbulence atmosphérique intégrant les modes de lectures de la caméra SIRIS sera mené. Ce travail permettra d'étudier des méthodes de mesure du tilt global et des distorsions locales et des méthodes de correction de ces effets s'appuyant sur des concepts existants ou développés au cours de la thèse.

Les développements autour de la caméra SIRIS et l'étude des méthodes de mesure et de correction du tilt anisoplanétique seront menés dans une démarche de co-conception : des allers-retours seront effectués entre la modification des modes de lecture de la caméra et l'adaptation des concepts optiques pour la mesure et la correction du tilt anisoplanétique afin que la caméra réponde au mieux aux exigences de la mesure et de la correction et que les concepts optiques exploitent au mieux les spécificités du détecteur. En particulier, cette démarche de co-conception pourra s'appuyer sur le LPENS qui, en tant que concepteur de la caméra dans son ensemble, peut agir sur tous les éléments de la caméra SIRIS qu'il s'agisse de l'électronique, du firmware, du software ou de la mécanique.

Le/la doctorant(e) sera amené(e) à comparer les performances de différentes méthodes de mesure et de correction du basculement turbulent par simulation numérique. Cette étude comparative lui permettra d'identifier une ou deux méthodes offrant les meilleures performances à tester expérimentalement. L'étudiant(e) participera ensuite à la définition de l'implantation expérimentale et à la réalisation de l'expérience de démonstration en laboratoire sur un banc émulateur de turbulence développé à l'ONERA [7]. Enfin, le/la doctorant(e) pourra participer à la démonstration sur ciel du système d'imagerie stabilisée développé sur le télescope T1M de l'Observatoire du Pic du Midi en collaboration avec le Laboratoire Temps Espace (LTE) de l'Observatoire de Paris.

Tout au long du projet de thèse, l'étudiant(e) pourra s'appuyer sur les codes de simulation de propagation optique en présence de turbulence atmosphérique et sur les bancs de laboratoire disponibles à l'ONERA, ainsi que sur l'expertise du LPENS autour de la caméra SIRIS et de sa conception.

Références :

- [1] R. L. Fante, « Electromagnetic beam propagation in turbulent media », Proc. IEEE, vol. 63, n° 12, p. 1669-1692, déc. 1975, doi: 10.1109/PROC.1975.10035.

- [2] V. Michau *et al.*, « Shack-Hartmann wavefront sensing with extended sources », in *Atmospheric Optical Modeling, Measurement, and Simulation II*, SPIE, sept. 2006, p. 103-113. doi: 10.1117/12.682728.
- [3] D. Darson *et al.*, « Real-time High Dynamic Range based on Multiple Non Destructive ReadOut during a Single Exposure: application to IR imaging », in *Proceedings of the 11th International Conference on Distributed Smart Cameras*, in ICDSC 2017. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, sept. 2017, p. 21-28. doi: 10.1145/3131885.3131910.
- [4] J. Dubouil, M. Lebreton, F. Colas, et D. Darson, « SIRIS: a new, fast, high dynamic, and very low noise SWIR camera », in *X-Ray, Optical, and Infrared Detectors for Astronomy XI*, SPIE, août 2024, p. 23-30. doi: 10.1117/12.3018145.
- [5] A. Plyer, G. Le Besnerais, et F. Champagnat, « Massively parallel Lucas Kanade optical flow for real-time video processing applications », *J. Real-Time Image Process.*, vol. 11, n° 4, p. 713-730, avr. 2016, doi: 10.1007/s11554-014-0423-0.
- [6] T. Fusco, J.-M. Conan, V. Michau, L. M. Mugnier, et G. Rousset, « Efficient phase estimation for large-field-of-view adaptive optics », *Opt. Lett.*, vol. 24, n° 21, p. 1472-1474, nov. 1999, doi: 10.1364/OL.24.001472.
- [7] P. Robles *et al.*, « Emulating and characterizing strong turbulence conditions for space-to-ground optical links: the PICOLe bench », *J. Astron. Telesc. Instrum. Syst.*, vol. 9, n° 4, p. 049002, déc. 2023, doi: 10.1117/1.JATIS.9.4.049002.

Collaborations envisagées :

LPENS (concepteur de la caméra SIRIS), Observatoire de Paris (LTE)

Laboratoire d'accueil à l'ONERA :	Directeur de thèse :
--	-----------------------------

Département : Optique et Techniques Associées

Lieu (centre ONERA) : Châtillon

Contact : Yann Lai-Tim

Tél. : 0146734383

Email : yann.lai-tim@onera.fr

 Directeur de thèse : |

Nom : Pierre Bourdon

Co-directeur : David Darson, LPENS

Laboratoire : DOTA

Tél. : 86382

Email : pierre.bourdon@onera.fr

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