

PROPOSITION DE SUJET DE THESE

Intitulé : Mesure du champ complexe pour l'optique adaptative en fortes perturbations

Référence : **PHY-DOTA-2026-26**

(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, turbulence atmosphérique, propagation optique, forte scintillation

Profil et compétences recherchées :

Master d'optique, de traitement du signal physique, physique généraliste

Sujet :

Présentation du projet doctoral, contexte et objectif :

Une onde optique se propageant dans un milieu inhomogène, comme la turbulence atmosphérique par exemple, subi des perturbations de phase qui, en se propageant, causent des perturbations de phase et d'amplitude. Dans l'instrument optique de réception la perte de cohérence spatiale de l'onde peut être rétablie par optique adaptative, une méthode de correction en temps réel des aberrations de la phase de l'onde.

Le composant clé qui mesure les perturbations, l'analyseur de front d'onde, suppose des perturbations d'amplitude faible en fonctionnement nominal. Toutefois, pour un certain nombre d'applications la perturbation ne peut être réduite à une perturbation de phase seule. C'est le cas par exemple pour des liaisons optiques de communication horizontales ou encore pour la focalisation sur cible à très basse élévation. Dans ces conditions, les analyseurs qui reposent sur une évaluation de la pente du front d'onde, comme l'analyseur de front d'onde Shack-Hartmann, atteignent leurs limites. La prise en compte de l'amplitude dans le processus de mesure de la phase, voire de l'amplitude complexe du front d'onde devient nécessaire. Des analyseurs interférométriques, comme l'analyseur par courbure[1], le masque de Zernike[2], l'interféromètre à trois ondes[3] peuvent être envisagés mais ils présentent des dynamiques de mesure limitées.

Pour pallier cette limitation plusieurs concepts d'analyseurs de front d'onde opérant en fortes perturbations ont émergé récemment [4-7]. Ils reposent tous sur la résolution numérique de l'équation de propagation reliant les perturbations (phase et amplitude) dans un plan d'intérêt à une mesure d'intensité bidimensionnelle effectuée dans un ou plusieurs plans successifs. Le nombre de degrés de liberté pouvant être estimé correspond au nombre de mesures indépendantes disponibles. La rapidité de la convergence du processus d'estimation et sa précision sont conditionnées par le rapport signal à bruit des mesures et leur décorrélation spatiale. Une méthodologie pour comparer différents concepts d'analyseurs de front d'onde robustes à la scintillation a récemment été proposée [4]. Parmi les concepts proposés, certains présentent des perspectives particulièrement intéressantes pour les conditions de propagation rencontrées dans les liaisons de communication optique, qui se caractérisent par des rapports signaux à bruit importants, et des dynamiques de variations de la puissance optique reçue significatives.

L'objectif de ces travaux de thèse est d'explorer ces différents types d'analyseurs pour le cas d'emploi des liaisons optiques de communication, d'étudier leurs propriétés, leur dynamique, leur sensibilité et leur contrainte d'étalonnage, pour parvenir à l'issue de la thèse à démontrer en laboratoire l'opération d'une boucle d'Optique Adaptative en régime de forte perturbation. Après une phase d'analyse bibliographique qui permettra de sélectionner plusieurs concepts parmi les plus prometteurs, l'étudiant comparera par modélisation sur un modèle de canal de référence les propriétés de ces méthodes de mesure en s'appuyant sur la méthodologie décrite dans [7]. L'utilisation de ces méthodes pour des mesures en boucle ouverte et en boucle fermée sera investiguée. Cette démarche aboutira à la sélection d'une méthode privilégiée qui sera mise en œuvre expérimentalement. Les résultats issus de la modélisation pourront alors être validés grâce au banc PICOLO [8] de l'ONERA, un émulateur de canal de propagation qui reproduit fidèlement les propriétés des perturbations de l'onde optique pour des liaisons optiques proches de l'horizontale.

[1] F. Roddier, « Curvature sensing and compensation: a new concept in adaptive optics », *Appl. Opt.*, vol. 27, p. 1223-1225, 1988.

[2] F. Zernike, F.J.M. Stratton, Diffraction Theory of the Knife-Edge Test and its Improved Form, The Phase-Contrast Method, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 94, Issue 5, March 1934, Pages 377–384, <https://doi.org/10.1093/mnras/94.5.377>.

- [3] J. Primot, "Three-wave lateral shearing interferometer", *Appl. Opt.*, 32, pp. 6242-6249, 1993
- [4] N. Védrenne, L. M. Mugnier, V. Michau, M.-T. Velluet, et R. Bierent, « Laser beam complex amplitude measurement by phase diversity », *Opt. Express*, vol. 22, no 4, Art. no 4, févr. 2014, doi: 10.1364/OE.22.004575.
- [5] Pascal Berto, Hervé Rigneault, and Marc Guillon, "Wavefront sensing with a thin diffuser," *Opt. Lett.* 42, 5117-5120 (2017).
- [6] Bordbar, B.; Vorontsov, M.A. Complex Field Sensing in Strong Scintillations with Multi-Aperture Phase Contrast Techniques, *J. Opt.* 2020, 22, 10LT01.
- [7] Vorontsov, M.A.; Polnau, E. A Framework for Iterative Phase Retrieval Technique Integration into Atmospheric Adaptive Optics—Part I: Wavefront Sensing in Strong Scintillations. *Photonics* 2024, 11, 786. <https://doi.org/10.3390/photonics11090786>.
- [8] Robles, P., "Emulating and characterizing strong turbulence conditions for space-to-ground optical links: the PICOL0 bench", *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, vol. 9, Art. no. 049002, 2023. doi:10.1117/1.JATIS.9.4.049002.

Collaborations envisagées :

Université du Maryland

Laboratoire d'accueil à l'ONERA :

Département : Optique et Techniques Associées

Lieu (centre ONERA) : Châtillon

Contact : Nicolas Védrenne

Tél. : 01 46 73 47 57 Email : nicolas.vedrenne@onera.fr

Directeur de thèse :

Nom : Thierry Fusco

Laboratoire : DOTA

Tél. : 01 46 73 47 80

Email : thierry.fusco@onera.fr

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