

PROPOSITION DE SUJET DE THESE

Intitulé : Développement et test d'un senseur de champ complexe par diversité de phase pour le diagnostic d'optiques adaptatives en fortes perturbations

Référence : **PHY-DOTA-2022-20**
 (à rappeler dans toute correspondance)

Début de la thèse : Octobre 2022

Date limite de candidature : Mai 2022

Mots clés :

Analyse de front d'onde, optique adaptative, traitement du signal, turbulence atmosphérique

Profil et compétences recherchées :

Ecole d'ingénieur, master en physique

Présentation du projet doctoral, contexte et objectif :

L'optique adaptative consiste en la mesure et la compensation temps réel des aberrations de la phase d'une onde. Développée initialement pour l'astronomie, cette technique équipe actuellement les très grands télescopes mais également les lignes de lasers intenses. Cette technologie est aujourd'hui clé pour le développement des futurs réseaux de communication satellitaires très haut débit. Plus généralement, les perspectives d'application dans le domaine du contrôle de faisceau laser sont nombreuses [Puent-17, Salter-19]. Dans ces nouvelles applications, les perturbations du champ ne se limitent plus à celles de la phase. La mesure du champ complexe - phase et amplitude - doit être envisagée. En présence de perturbations de l'amplitude de l'onde, la relation linéaire entre la phase appliquée par le miroir déformable et la mesure produite par les analyseurs de front d'onde conventionnels devient caduque avec pour conséquence une réduction des performances de la correction.

La diversité de phase en champ complexe permet de s'affranchir de ce problème en donnant directement accès à l'amplitude complexe du champ électrique [Gonsalves-82, Bierent-13, Védrenne-14, Védrenne-15]. Cette technique repose sur la simple mesure de cartes d'intensité dans des plans près du foyer du système optique. La résolution numérique du problème inverse est effectuée en général par minimisation itérative d'un critère non linéaire ce qui compromet en l'état son utilisation comme senseur principal d'une boucle d'optique adaptative. L'objectif de la thèse est donc d'étudier les limites de son modèle de mesure en vue de faire évoluer pour simplifier son inversion (linéarisation, inconnues, auto-étalonnage des paramètres ...), de proposer une démarche plus rapide pour l'inversion et de tester le tout expérimentalement dans une boucle d'optique adaptative.

Le premier défi de la thèse sera l'analyse des limitations intrinsèques de la méthode de mesure (modèle et inversion). Cette analyse sera menée du point de vue théorique et par simulation numérique. Elle portera en particulier sur l'impact des contraintes imposées par la mesure des répartitions d'intensité, de la propagation du bruit, et de la robustesse aux erreurs de modèle.

Le second défi portera sur l'accélération du traitement des mesures. Pour y parvenir plusieurs possibilités peuvent être envisagées, seules ou combinées, en fonction des principales limitations identifiées. Lorsque la boucle d'OA est fermée, l'évolution du champ corrigé est limitée d'une mesure à la suivante. Une approche perturbative en champ, permettrait d'établir une relation linéaire entre la mesure et les perturbations. Des travaux précédents menés dans l'équipe Haute Résolution Angulaire ont montré la pertinence d'une telle approche [Mocoeur-09]. Des améliorations de l'implantation de l'algorithme existant ou l'exploitation d'a priori sur les perturbations pour contraindre la résolution du problème inverse pourraient également être considérées. Le recours à des méthodes issues du machine learning aux différentes étapes du processus de résolution du problème inverse (description du modèle direct, calcul des gradients, initialisation [Paine-18], voire minimisation du critère d'erreur [Wang-21, Shpakovych-21, Vera-21]) montrent également des résultats très encourageants en particulier lorsque les résidus de phase à corriger sont limités. Un gain de plusieurs ordres de grandeur sur la rapidité de la mesure doit être réalisé pour envisager son application à la correction des effets de la turbulence atmosphérique. Pour les chaînes laser, l'exigence est plus limitée.

Le troisième défi de ce travail de thèse réside en la mise en œuvre expérimentale de la mesure par diversité de phase au foyer d'une boucle d'optique adaptative en présence de perturbations représentatives d'un lien satellite-sol effectué à basse élévation. En s'appuyant sur les réalisations expérimentales antérieures le doctorant développera une implantation et la testera en conditions maîtrisées sur les moyens de laboratoire

développés dans l'équipe Haute Résolution Angulaire. En fonction de l'avancement des travaux des tests sur le signal fourni par un satellite au foyer de la station sol optique en cours de réalisation à l'Onera pourrait être envisagée.

[Bierent-13] R. Biérent, M.-T. Velluet, N. Védrenne, et V. Michau, « Experimental demonstration of the full-wave iterative compensation in free space optical communications », *Opt. Lett.*, vol. 38, no 13, Art. no 13, juill. 2013, doi: 10.1364/OL.38.002367.

[Gonsalves-82] R. A. Gonsalves, "Phase retrieval and diversity in adaptive optics," *Opt. Eng.* 21, 829–832 (1982).

[Mocoeur-09]. Mocœur, L. M. Mugnier, et F. Cassaing, « Analytical solution to the phase-diversity problem for real-time wavefront sensing », *Opt. Lett.*, OL, vol. 34, no 22, p. 3487-3489, nov. 2009, doi: 10.1364/OL.34.003487.

[Salter-19] P. S. Salter et M. J. Booth, « Adaptive optics in laser processing », *Light Sci Appl*, vol. 8, no 1, p. 110, déc. 2019, doi: 10.1038/s41377-019-0215-1.

[Védrenne-14] 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.

[Védrenne-15] N. Védrenne et al., « Design and performance of an integrated phase and amplitude diversity sensor », in *CLEO: 2015* (2015), paper STu2N.2, mai 2015, p. STu2N.2. doi: 10.1364/CLEO_SI.2015.STu2N.2.

[Puent-17] D. Puent, « Integration of Adaptive Optics into High Energy Laser Modeling and Simulation », Naval Postgraduate School, Master's Thesis, 2017.

[Paine-18] Scott W. Paine and James R. Fienup, "Machine learning for improved image-based wavefront sensing," *Opt. Lett.* 43, 1235-1238 (2018).

[Shpakovych-21] Maksym Shpakovych, Geoffrey Maulion, Vincent Kermene, Alexandre Boju, Paul Armand, Agnès Desfarges-Berthelemot, and Alain Barthélemy, "Experimental phase control of a 100 laser beam array with quasi-reinforcement learning of a neural network in an error reduction loop," *Opt. Express* 29, 12307-12318 (2021).

[Wang-21] D. Wang, Q. Du, T. Zhou, D. Li, and R. Wilcox, "Stabilization of the 81-channel coherent beam combination using machine learning," *Opt. Express* 29(4), 5694–5709 (2021).

[Vera-21] E. Vera, F. Guzmán, et C. Weinberger, « Boosting the deep learning wavefront sensor for real-time applications [Invited] », *Appl. Opt.*, AO, vol. 60, no 10, p. B119-B124, avr. 2021, doi: 10.1364/AO.417574.

Collaborations envisagées :

Gilles Chériaux (Institut de Physique de Nice)

Laboratoire d'accueil à l'ONERA :

Département : Département d'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 : Vincent Michau

Laboratoire : DOTA/MOTA

Tél. : 0146734780

Email : vincent.michau@onera.fr

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