ONERA
THE FRENCH AEROSPACE LAB

www.onera.fr

PROPOSITION DE SUJET DE THESE

Title: Ultrafast phase conjugation for laser beam focusing through dynamic complex media

Référence : **PHY-DOTA-2023-12**
(à rappeler dans toute correspondance)

Début de la thèse : 01/11/2023	**Date limite de candidature :** 01/05/2023

Keywords :

Time reversal, photonic integrated circuit, Optique adaptative, Milieux complexes, Télécommunications, Brouillard, Nuage

Profile et compétences recherchées :

Engineering school of Optics, Master in Physics, Optics

Présentation du projet doctoral, contexte et objectif :

La capacité à focaliser un faisceau Laser à travers un milieu complexe dynamique est un enjeu majeur, qu'il s'agisse de télécommunications, d'alimentation de drones en énergie (power beaming) ou de destruction de ces drones par des faisceaux optiques ou d'imagerie. Selon les cas d'application, le milieu complexe peut être la turbulence atmosphérique (y compris dans des régimes saturés où l'amplitude du champ est affectée), des tissus biologiques, de l'eau turbide (télécommunications sous-marines), voire du brouillard.

Les phénomènes physiques à l'œuvre dans tous ces cas sont les mêmes : une onde électromagnétique se propage à travers un milieu dont la permittivité (ou l'indice optique) varie dans le temps et dans l'espace. Lorsque la variation dans l'espace est lente, on parle d'aberrations, et l'une des solutions éprouvées depuis les années 90 est l'optique adaptative qui permet de compenser des aberrations évoluant au KHz. A l'inverse, lorsque la variation dans l'espace est rapide (de l'ordre de la longueur d'onde), on parle de diffusion, et la plupart des solutions technologiques éprouvées s'appuient sur le filtrage spatial ou temporel du champ (pour en sélectionner principalement la composante balistique).

Une autre famille de techniques, dans la lignée des travaux de Mosk *et. al* [1] et Popoff *et. al* [2][3] s'appuie sur le concept de retournement temporel [4] de l'onde, plus précisément sur un retournement partiel de l'onde nommé « conjugaison de phase » (et éventuellement d'amplitude), ou seules les évolutions rapides de l'onde sont « retournées » (mais pas l'enveloppe du train d'onde). Ces techniques constituent d'ailleurs un trait d'union entre la correction d'aberrations et la correction de la diffusion, car elles ont été mises en œuvre dans les deux domaines, sous le nom d'optique adaptative pour les aberrations (une optique adaptative réalise une conjugaison de phase) ou de « wavefront shaping » pour la diffusion [5][6][7]. En particulier, la conjugaison de phase itérative de part et d'autre d'un milieu fortement perturbé a été étudié théoriquement par les deux communautés.

Cependant, l'application de cette méthode à des milieux complexes dynamiques achoppe sur une limitation technologique : les constantes de temps d'évolution des milieux passent de la seconde ou la milliseconde (pour des milieux biologiques, l'eau claire et calme ou de la turbulence moyenne) à la micro voire la nanoseconde pour des milieux plus chaotiques (eau agitée, brouillard dense, turbulence défilant rapidement). Or les techniques classiques d'optique adaptative parviennent à atteindre 10KHz pour une centaine de modes corrigés, soit 1M de modes par seconde, alors qu'il faudrait atteindre le Gigamode/s voire le Teramode/s.

Deux options sont susceptibles d'ouvrir ce verrou technologique : l'acquisition en imagerie cohérente avec une caméra rapide (Gpixel/seconde) associée à un traitement hors ligne, mais cette technique est plus adaptée à une application d'imagerie que de focalisation d'un faisceau Laser ; l'utilisation de PIC (photonic integrated circuit) actifs [8][9], permettant théoriquement de réaliser une conjugaison de phase pour plusieurs Gigamodes/s, cette valeur augmentant linéairement avec le nombre d'entrées des PICs.

La thèse vise à réaliser une preuve de concept de cette dernière solution sur quelques modes (entre 10 et 100). Elle capitalisera sur la thèse de Yann Lucas (qui chevauchera pendant un an la thèse présentée ici), qui vise à proposer une stratégie de commande rapide du PIC et de la tester sur plusieurs dispositifs expérimentaux, et sur un simulateur d'eau turbide dynamique construit dans l'ANR AQUAMAT. L'équipe d'encadrement et l'environnement collaboratif compte des experts issus de l'ONERA (pionnier de l'Optique Adaptative et de l'imagerie à travers des milieux turbulents) et de l'Institut Langevin (pionnier du retournement temporel et de l'imagerie à travers des milieux diffusants).

Le premier objectif consistera à préciser analytiquement les performances d'un tel système dans différents contextes (brouillard, eau turbide, turbulence forte) en fonction de la cinétique des diffuseurs dans ces milieux et de la capacité ou non à filtrer les photons multidiffusés. En parallèle, les moyens de test existants seront adaptés pour pouvoir tester le concept dans un environnement dont l'évolution spatiotemporelle de l'indice optique est maitrisée.
Dans un second objectif, il s'agira de bâtir une architecture permettant de réaliser cette conjugaison de phase itérative. Elle inclut notamment la boucle de rétroaction entre les mesures en sortie de PIC et les modulateurs de phase.
Enfin, le dernier objectif consistera à tester le dispositif expérimentalement.

Bibliography :

[1] Vellekoop, I. M., & Mosk, A. P. (2007). Focusing coherent light through opaque strongly scattering media. Optics letters, 32(16), 2309-2311.
[2] Popoff, S. M., Lerosey, G., Carminati, R., Fink, M., Boccara, A. C., & Gigan, S. (2010). Measuring the transmission matrix in optics: an approach to the study and control of light propagation in disordered media. Physical review letters, 104(10), 100601.
[3] Popoff, S. M., Aubry, A., Lerosey, G., Fink, M., Boccara, A. C., & Gigan, S. (2011). Exploiting the time-reversal operator for adaptive optics, selective focusing, and scattering pattern analysis. Physical review letters, 107(26), 263901.
[4] M. Fink, "Time reversal of ultrasonic fields. I. Basic principles ", *IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control*, vol. 39, nº 5, p. 555-566, 1992, doi: 10.1109/58.156174.
[5] Barchers, J. D., & Fried, D. L. (2002). Optimal control of laser beams for propagation through a turbulent medium. JOSA A, 19(9), 1779-1793.
[6] N. Schwartz, Précompensation des effets de la turbulence par optique adaptative : application aux liaisons optiques en espace libre, 2009.
[7] Gigan, S., Katz, O., de Aguiar, H. B., Andresen, E., Aubry, A., Bertolotti, J., ... & Yılmaz, H. (2022). Roadmap on Wavefront Shaping and deep imaging in complex media. Journal of Physics: Photonics.
[8] Wilmart Q, El Dirani H, Tyler N, Fowler D, Malhouitre S, Garcia S, et al. A Versatile Silicon-Silicon Nitride Photonics Platform for Enhanced Functionalities and Applications. Applied Sciences. janv 2019;9(2):255.
[9] Wooten EL, Kissa KM, Yi-Yan A, Murphy EJ, Lafaw DA, Hallemeier PF, et al. A review of lithium niobate modulators for fiber-optic communications systems. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. janv 2000;6(1):69 82.

Collaborations :

Institut Langevin (S. Popoff, R. Pierrat), Femto ST (Nadège Courjal), Institut Fresnel (J. Fade)

Laboratoire d'accueil à l'ONERA :	**Co-Directeur de thèse :**
Département : Département d'Optique et Techniques Associées	Nom : Sébastien Popoff
Lieu (centre ONERA) : Châtillon	Laboratoire : Institut Langevin
Contact : Serge Meimon	Tél. :
Email : serge.meimon@onera.fr	Email :

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