

PROPOSITION DE SUJET DE THESE

Intitulé : Façonnage du front d'onde à la nanoseconde par composants telecom pour la propagation et l'imagerie à travers l'eau turbide, la neige et le brouillard - Nanosecond wavefront shaping with telecom-grade components for optical propagation and imaging through turbid water, snow and fog

Référence : **PHY-DOTA-2026-25**

(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 :

Wavefront shaping ; Conjugaison de phase ; Photonique télécom ; Milieux diffusants dynamiques ; Imagerie optique en milieux diffusants ; Optique adaptative ; Eau, neige, brouillard

Profil et compétences recherchées :

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

Sujet :

Présentation du projet doctoral, contexte et objectif

La propagation de la lumière dans des milieux diffusants dynamiques tels que l'eau turbide, le brouillard dense ou les tempêtes de neige représente aujourd'hui un verrou fondamental pour l'optique. Dans ces environnements, les photons sont rapidement redistribués par diffusion multiple : après seulement quelques centimètres, le front d'onde est brouillé et perd toute cohérence spatiale exploitable. À ces distances, le flux balistique devient négligeable face au flux diffus, et le champ optique se décorrèle en quelques centaines de nanosecondes. Ces deux effets conjugués – perte de flux utile et instabilité temporelle – constituent une « barrière de diffusion dynamique ». Dans ces conditions, les approches classiques d'imagerie (gating temporel ou cohérent **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, filtrage spatial [2]) échouent car elles reposent sur l'exploitation des photons balistiques, lesquels disparaissent trop vite pour être isolés ou détectés.

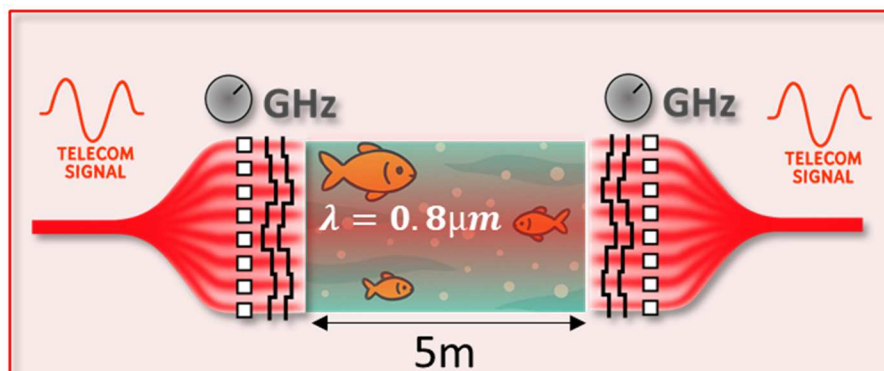
Les stratégies de correction optique connues atteignent également leurs limites. L'optique adaptative classique, très efficace en astronomie ou en observation atmosphérique, corrige rapidement mais seulement dans des milieux encore corrélés spatialement [3]. Le façonnage du front d'onde (wavefront shaping), introduit par Vellekoop et Mosk en 2007 [4], a démontré qu'il était possible de concentrer la lumière dans un point focal à travers des milieux opaques. Mais les temps de correction restent de l'ordre de la milliseconde, soit trois ordres de grandeur trop lents par rapport aux temps de cohérence typiques des milieux dynamiques réels ($\approx 1 \mu s$). Même les dispositifs les plus rapides, tels que certains MEMS [5] ou cristaux photoréfractifs [6], plafonnent autour de $10 \mu s$ de temps de réponse, ce qui reste largement insuffisant. En pratique, aucune architecture optique existante ne parvient aujourd'hui à maintenir une focalisation ou une imagerie robuste dans de l'eau agitée, un nuage de neige soufflée ou du brouillard en mouvement.

Pour franchir ce verrou, notre équipe explore une approche radicalement nouvelle : associer des composants fibrés et des circuits photoniques intégrés issus de la photonique télécom – modulateurs électro-optiques à temps de montée nanoseconde [7], multiplexeurs fibrés, électronique de contrôle FPGA – pour construire un correcteur guidé, le « nsWFShaper », capable de fonctionner en boucle fermée à l'échelle de la centaine de nanosecondes. Cette architecture présente deux avantages majeurs : (i) une vitesse intrinsèque compatible avec les temps de cohérence des milieux dynamiques réels, et (ii) une efficacité photonique maximale, car la démodulation interférométrique monomode extrait toute l'information disponible sur chaque photon reçu.

Dans le cadre des travaux de thèse d'Hugo Lassiette, en co-direction avec l'Institut Langevin (Sebastien Popoff), une première expérience a démontré qu'un nsWFShaper, construit à partir de composants télécom, pouvait corriger un milieu diffusant dynamique centimétrique lorsque le retour d'information était directement collecté par la fibre de réception. Ce résultat établit qu'il est possible de travailler au régime sub- μs avec un dispositif entièrement guidé. Cependant, cette démonstration reste une preuve de concept, pas totalement représentative des cas applicatifs (un seul correcteur, un milieu compact, et une mesure directe au point de focalisation). L'étape suivante – qui constitue précisément l'objet de la présente thèse – est de mettre en œuvre ce principe dans un schéma **itératif aller-retour** à travers des milieux représentatifs.

L'objectif de la thèse est ainsi triple. Premièrement, **simuler les performances attendues** (vitesse de correction, stabilité, portée) dans les environnements dynamiques ciblés : eau turbide dans le visible, brouillard et neige dans l'infrarouge. Ces simulations permettront d'établir un prédicteur de performances, en tenant compte à la fois du budget photométrique (nombre de photons par mode et par temps de cohérence), de l'algorithme de contrôle et de la dynamique du milieu. Deuxièmement, **construire et mettre en regard**

un **second nsWFSshaper**, de manière à former une boucle aller-retour permettant une conjugaison de phase itérative. Cette étape est indispensable pour transposer la preuve de concept initiale vers un scénario réaliste de transmission et de correction. Troisièmement, **mettre en œuvre une séparation spectrale** entre le signal de mesure et le signal corrigé, afin de filtrer efficacement la lumière renvoyée depuis l'autre extrémité et d'éliminer les réflexions parasites (en plus d'un filtrage par polarisation).



Ces étapes permettront de répondre à un verrou scientifique central : la **fidélité du retour d'information** en régime itératif. Toute erreur dans la mesure du champ (due au bruit, aux fluctuations du milieu ou aux artefacts spectraux) risque en effet de se propager au fil des itérations et de compromettre la convergence. La thèse visera donc à quantifier précisément ce domaine de convergence et à identifier les paramètres critiques (vitesse de correction, puissance source, choix spectral) qui garantissent la robustesse du schéma itératif.

Au-delà des télécommunications optiques, cette thèse ouvre vers des applications directes en **imagerie dans les milieux troubles**, un objectif majeur de notre équipe. La mise en place d'un schéma itératif nanoseconde constituera un socle expérimental sur lequel d'autres développements pourront s'appuyer. En particulier, elle sera menée en synergie avec la thèse de Léa Testé, qui explore les conditions de fidélité du retour d'information et les stratégies de balayage dans des milieux biologiques.

Références :

- [1] Huang, D., Swanson, E. A., Lin, C. P., et al. "Optical coherence tomography." *Science* **254**, 1178–1181 (1991).
- [2] Minsky, M. "United States patent US3013467." (1957).
- [3] Poyneer, L. A., Ammons, S. M., Kim, M. K., Bauman, B., Terrel-Perez, J., Lemmer, A. J., & Nguyen, J. "Prediction of wind-blown turbulence by adaptive optics at 8 kHz using LQG control." *Appl. Opt.* **62**, 1871–1885 (2023).
- [4] Vellekoop, I. M., & Mosk, A. P. "Focusing coherent light through opaque strongly scattering media." *Opt. Lett.* **32**, 2309–2311 (2007).
- [5] Tzang, O., Niv, E., Singh, S., Labouesse, S., Myatt, G., & Piestun, R. "Wavefront shaping in complex media with a 350 kHz modulator via a 1D-to-2D transform." *Nat. Photonics* **13**, 788–793 (2019).
- [6] Cheng, Z., Li, C., Khadria, A., Zhang, Y., & Wang, L. V. "High-gain and high-speed wavefront shaping through scattering media." *Nat. Photonics* **17**, 299–305 (2023).
- [7] Wang, C., Zhang, M., Chen, X., Bertrand, M., Shams-Ansari, A., Chandrasekhar, S., ... & Lončar, M. "Integrated lithium niobate electro-optic modulators operating at CMOS-compatible voltages." *Nature* **562**, 101–104 (2018).

Collaborations envisagées :

Institut Langevin, TeCip, COPS (Univ Twente)

Laboratoire d'accueil à l'ONERA

Département : Optique et Techniques Associées

Lieu (centre ONERA) : Châtillon

Contact : Geoffrey Maulion

Tél. : 0146734783 Email : geoffrey.maulion@onera.fr

Directeurs de thèse

Nom : Serge Meimon & Sébastien Popoff

Laboratoire : ONERA/Institut Langevin

Tél. : 0146734783

Email : serge.meimon@onera.fr

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