

PROPOSITION DE SUJET DE THESE

Intitulé : Correction d'aberrations par optique guidée pour l'imagerie rétinienne haute résolution

Référence : **PHY-DOTA-2025-11**
(à rappeler dans toute correspondance)

Début de la thèse : 10/2025

Date limite de candidature : 07/2025

Mots clés :

Recombinaison cohérente, Optique Adaptative ; Imagerie à Haute Résolution ; Milieux complexes, Rétine

Profil et compétences recherchées :

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

Présentation du projet doctoral, contexte et objectif :

Le vieillissement global de la population mondiale s'accompagne d'une augmentation substantielle des cas de déficience visuelle modérée à sévère d'ici 2050 (de 257,90 millions en 2020 à 474,12 millions en 2050) [1]. Parmi les causes de cécité visuelles, la dégénérescence maculaire liée à l'âge touche aujourd'hui environ 5,6% d'individus âgés de plus de 50 ans.

L'imagerie optique in-vivo à l'échelle de la cellule individuelle (μm) a démontré son efficacité pour approfondir la compréhension des mécanismes en jeu dans les altérations pathologiques de la rétine faisant suite aux modifications fonctionnelles et structurelles à l'échelle cellulaire, bien avant que des signes de dégradation visuelle ne soient perceptibles [2] [3].

Atteindre une telle résolution d'imagerie nécessite de corriger les aberrations optiques de l'œil, provenant du cristallin, de la cornée ou du film lacrymal. L'optique adaptative (OA) développée à l'origine pour corriger les déformations du front d'onde causées par la turbulence atmosphérique en astronomie a été adaptée à au domaine de l'imagerie rétinienne afin de corriger les aberrations oculaires et d'atteindre une résolution à la limite de la diffraction.

Pourtant, les techniques instrumentales généralement implantées en milieu clinique telles que l'imagerie du fond d'œil ou l'OCT n'intègrent pas d'OA. Par conséquent, elles ne permettent pas d'atteindre une résolution suffisante pour observer les cellules individuelles. En effet, l'encombrement, la complexité et le coût des composants rendent les systèmes assistés par OA inadaptés aux environnements hospitaliers. L'OA conventionnelle repose sur une approche en espace libre qui utilise divers relais optiques pour intégrer les composants du module de correction, ce qui limite la robustesse du système d'imagerie tout en augmentant sa taille. Par conséquent, le développement d'une nouvelle génération d'imageurs ophtalmiques haute résolution, déployable en milieu clinique, devient une priorité en matière de santé publique.

Le développement d'une méthode de correction par optique guidée, intégrable sur des circuits photoniques est envisagée comme une solution prometteuse pour miniaturiser les modules de correction d'aberrations de quelques ordres de grandeur. En effet, la technologie des circuits photoniques intégrés (PICs) [4] est en pleine expansion dans les domaines des télécommunications et de l'astronomie, car ces circuits permettent d'intégrer diverses fonctionnalités optiques sur une seule puce monolithique. Comparée à l'optique adaptative classique, qui repose sur un senseur de front d'onde utilisant une caméra (Shack-Hartmann) pour mesurer les aberrations et un miroir déformable pour les corriger, l'optique guidée offre de nouvelles perspectives. Cette approche permettrait de concevoir des dispositifs plus robustes, en éliminant les éléments mécaniques, tout en étant plus compacts et potentiellement moins coûteux grâce à un processus de production standardisé et adaptable à grande échelle.

La correction d'aberrations s'effectue dans le cas d'un PIC par recombinaison cohérente de faisceaux. Cette technique consiste à décomposer le champ complexe perturbé en N modes spatiaux avec un démultiplexeur (par exemple une matrice de micro-lentilles ou un dispositif de Conversion Multi-Plan de la Lumière ou MPLC) pour injecter chaque mode spatial dans des guides d'ondes. Les modes spatiaux sont propagés et recombinaisonnés de manière cohérente avec des déphaseurs et des coupleurs, afin de les concentrer dans un unique guide d'onde. Le flux de cette sortie est maximisé à partir d'une boucle de rétroaction qui exploite les informations sur les pertes mesurées sur les autres sorties du PIC (N-1 sorties) pour ajuster les phases appliquées par les déphaseurs.

Récemment, des preuves de concept de correction d'aberrations pour les télécommunications en espace libre par recombinaison cohérente avec un PIC [5], ainsi que l'intégration d'un OCT rétinien utilisant des interféromètres fabriqués en PICs [6], [7], incitent à envisager le transfert de ces technologies à l'imagerie rétinienne haute résolution.

Cette thèse se situe à l'interface entre les domaines de l'ophtalmologie, de la microscopie optique et de l'optique fibrée. Elle a pour objectif le développement d'un système novateur d'imagerie rétinienne haute résolution qui intègre un module de correction des aberrations oculaires basé sur l'optique guidée.

Dans ce cadre, le travail de thèse consistera tout d'abord à étudier et adapter la décomposition en modes spatiaux du champ aberré pour permettre sa correction pour des applications ophtalmologiques. Cette étude sera conduite sur la base de travaux de modélisation.

L'amplitude de déphasage ainsi que la cadence optimale pour garantir une correction efficace dans cette approche seront étudiés. Ce travail permettra incidemment d'identifier les composants les mieux adaptés pour le démultiplexeur, la correction par les déphaseurs et la recombinaison des modes. Ces travaux contribueront au développement d'un modèle de performance de la correction, tenant compte des difficultés propres à l'imagerie rétinienne.

Il s'agira ensuite en exploitant les développements menés au laboratoire sur la correction active de la phase par recombinaison cohérente [8], d'intégrer un dispositif de recombinaison cohérente à un système exploratoire de correction pour l'imagerie ophtalmique. Le ou la candidat(e) aura l'opportunité de collaborer étroitement avec les étudiants(es) en thèse du laboratoire, dont les travaux portent également sur la mise en œuvre de techniques de correction de phase par optique guidée.

Par la suite, le module de correction sera intégré à un système d'imagerie conventionnel de type microscope confocal à balayage (SLO) ou tomographie par cohérence optique (OCT).

Tout au long du projet de thèse, la plateforme d'imagerie rétinienne assistée par OA ECUROeil, située à l'hôpital des Quinze-Vingts sera mise à disposition du ou de la candidat(e). Elle lui permettra de se familiariser à l'imagerie rétinienne et à la notion de correction des aberrations. Le module d'OA pourra éventuellement être utilisé pour acquérir des données supplémentaires d'aberrométrie sur œil afin d'alimenter le modèle de performance de correction qui sera développé.

References :

- [1] M. J. Burton et al. "The Lancet Global Health Commission on Global Eye Health: vision beyond 2020," *The Lancet Global Health* 9(4), e489–e551 (2021).
- [2] Roorda A, Duncan JL. *Adaptive optics ophthalmoscopy*. *Annu Rev Vis Sci*. 2015; 1: 19–50.
- [3] Burns SA, Elsner AE, Sapoznik KA, Warner RL, Gast TJ. *Adaptive optics imaging of the human retina*. *Prog Retin Eye Res*. 2019; 68: 1–30.
- [4] Bogaerts, W., Pérez, D., Capmany, J. et al. *Programmable photonic circuits*. *Nature* 586, 207–216 (2020).
- [5] V. Billault, J. Bourderionnet, J. P. Mazellier et al., « Free space optical communication receiver based on a spatial demultiplexer and a photonic integrated coherent combining circuit », *Optics Express*, t. 29, no 21, p. 33 134-33 143, oct. 2021.
- [6] E. A. Rank, *In vivo retinal swept source optical coherence tomography using photonic integrated circuits centered at 840 nm, San Francisco, California, United States, mars 2022*.
- [7] R. Hainberger, P. Müllner, M. Eggeling et al., « Silicon nitride photonic integrated circuits for optical coherence tomography », in *Smart Photonic and Optoelectronic Integrated Circuits 2024*, t. 12890, SPIE, mars 2024, p. 32-44.
- [8] L. De Marinis, P. S. Kincaid, Y. Lucas et al., *A Silicon Photonic 32-Input Coherent Combiner for Turbulence Mitigation in Free Space Optics Links*, arXiv :2406.02076 [physics], (2024).

Collaborations envisagées :

Institut Langevin ; Hôpital d'Ophtalmologie des Quinze-Vingts ; Institut de la Vision

Laboratoire d'accueil à l'ONERA :

Département : Optique et Techniques Associées

Lieu (centre ONERA) : Châtillon

Contact : Léa Krafft

Tél. : +33 1 46 73 47 86

Email : lea.krafft@onera.fr

Directeur de thèse :

Nom : Serge Meimon

Laboratoire : DOTA/HRA

Tél. :

Email : serge.meimon@onera.fr