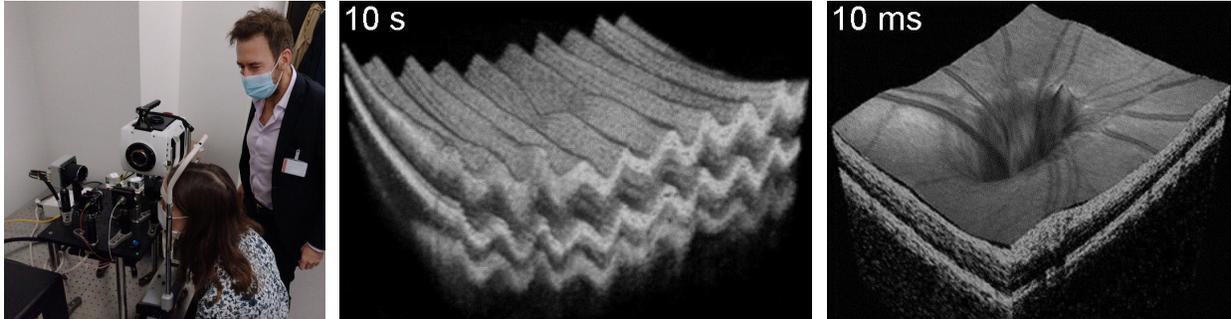


Proposition de stage

LIDAR holographique ultra rapide pour l'ophtalmologie



La dernière révolution de l'imagerie ophtalmologique s'est produite il y a trois décennies avec la tomographie par cohérence optique (OCT) qui a permis d'améliorer l'analyse de la structure de la rétine. L'OCT est actuellement l'un des outils d'ophtalmologie non invasive les plus utilisés dans le monde, mais sa capacité à observer certaines fonctions rétiniennes telles que l'activité cellulaire, le flux sanguin ou l'élasticité locale est actuellement entravée par le faible débit d'acquisition de données; la technologie OCT de l'état de l'art est basée sur le balayage spatial d'un point focal associé à un balayage de longueur d'onde pour former une image tridimensionnelle de la rétine. Cette imagerie a amélioré la compréhension des maladies de la rétine et du nerf optique et a grandement contribué à leur suivi thérapeutique et est devenu un examen complémentaire pour le traitement de la dégénérescence maculaire liée à l'âge.

La technologie de détection LIDAR holographique [\[Charpentier2020\]](#) répondra au besoin d'imagerie 3D ultrarapide de l'oeil humain. Cette approche permet d'accélérer d'un facteur 1000 l'imagerie d'un volume 3D par rapport aux approches OCT de l'état de l'art à balayage spatial et en longueur d'onde, en exploitant une mesure sur capteur de caméra à la place d'une mesure sur photodétecteur rapide et ainsi éviter le balayage spatial. Une fois le grand volume de données interférométriques acquises (plusieurs centaines de giga-octets en quelques secondes), la construction d'images LIDAR 3D se fait par calcul numérique. Les étapes de ce calcul incluent notamment de la propagation d'ondes optiques pour former l'image, du filtrage spatial et temporel par transformée de Fourier ou décomposition en valeurs singulières, ainsi qu'un rephasage pour compenser les mouvements et les aberrations de l'oeil. Nous avons développé un logiciel composé d'un ensemble de scripts Matlab qui permettent aujourd'hui de réaliser ces opérations. Ce logiciel est supporté et maintenu par l'organisation GitHub www.digitalholography.org, qui en fera un logiciel libre (open-source, GPL) à court terme.

Le LIDAR holographique ultra rapide permettra une mesure quantitative fiable de contrastes fonctionnels tels que l'hémodynamique oculaire locale [\[Puyo2021a\]](#) [\[Puyo2021b\]](#), l'élasticité artérielle et l'activité neuronale. Les enregistrements optiques de l'activité des neurones différenciés de l'œil n'ont été rendus possibles que récemment par la technique unique d'OCT à balayage de longueur d'onde holographique sur caméra [\[Pfäffle2020\]](#). Cette technique

d'opto-rétinographie devrait concurrencer et étendre la gamme des possibilités offertes par les tests d'électro-rétinographie en permettant une mesure simultanée de la réponse des cellules neuronales de la rétine afin d'évaluer la fonction de la voie visuelle des photorécepteurs de la rétine au cortex visuel du cerveau. Les informations obtenues à partir de ces tests aideront à diagnostiquer une variété de maladies de la rétine et du nerf optique et à surveiller les traitements. L'OCT à balayage de longueur d'onde sur caméra holographique fournit des biomarqueurs de l'hémodynamique locale jusqu'à la couche choriocapillaire [\[Auksorius2021\]](#), difficile à mesurer avec les OCT de l'état de l'art. Ces technologies de détection à très haut débit sur caméra nécessitent des cadences d'acquisition d'au moins 60,000 images par seconde, la contrainte étant d'acquérir environ 600 images consécutives en moins de 10 ms, la durée typique au delà de laquelle la phase de la lumière rétrodiffusée n'est pas assez stable pour la tomographie à balayage de longueur d'onde.

Le stagiaire développera la partie instrumentale et logicielle (scripts Matlab) de prototypes d'OCT holographique 3D à balayage de longueur d'onde et d'imagerie Doppler holographique quantitative de l'œil, en réalisant en particulier :

- des montages expérimentaux de pré-prototypes [\[Charpentier2020\]](#);
- le filtrage par analyse en composantes principales [\[Puyo2020a\]](#);
- des algorithmes de réaffectation temps-fréquence pour affiner les tomogrammes obtenus par transformée de Fourier aux temps courts, et contrebalancer les éventuelles dérives de phase dues à un échantillonnage suboptimal.
- une comparaison de phase entre des motifs de speckle potentiellement décorrélés afin de permettre l'OCT sensible à la phase. La moyenne des signaux sur plusieurs speckles après avoir calculé les différences de phase et avant d'intégrer à nouveau ces différences, comme le fait la méthode de Knox-Thompson pour révéler l'activité des photorécepteurs dans la rétine [\[Spahr2019\]](#);
- la correction d'aberrations estimées par analyse d'images reconstruites dans des sous-ouvertures afin d'augmenter la qualité d'image [\[Kumar2013\]](#);
- le rephasage total des données interférométriques par toutes les méthodes décrites précédemment pour éliminer les mouvements axiaux et latéraux, ainsi que les aberrations de l'œil et révéler les contrastes de fluctuations de phase et d'intensité optique, dus à l'activité cellulaire locale.
- des algorithmes d'élastographie passive [\[Catheline2013\]](#) seront testés sur les images 3D reconstruites à haute vitesse (résolution temporelle inférieure à 10 ms)

Ce stage sera dirigé par Michael Atlan (CNRS) et co-encadré par Pedro Mecê (ONERA). Il se déroulera à l'institut Langevin à Paris et à l'ONERA Châtillon. Certaines expériences pourront être réalisées sur patient, au centre d'investigation clinique de l'hôpital des Quinze Vingts à Paris et à l'hôpital Fondation Adolphe de Rothschild à Paris. Le stage pourra être suivi par une thèse et faire l'objet d'interactions avec les groupes d'OCT ophtalmologique de MM. Gereon Huettmann à Luebeck, Allemagne et Maciej Wojtkowski à Varsovie, Pologne, ainsi qu'avec les groupes européens émergents de MM. Egidijus Auksorius à Vilnius, Lituanie et Dierck Hillmann, à Amsterdam, Pays-Bas.

Références

- [\[Auksorius2021\]](#) Auksorius, E, et al. arXiv preprint arXiv:2107.10672 (2021).
- [\[Catheline2013\]](#) Catheline S. et al. Appl. Phys. Lett. 103, 014101 (2013)
- [\[Charpentier2020\]](#) E. Charpentier et al. (2020). arXiv:2003.08960
- [\[Kumar2013\]](#) Kumar, et al. Optics Express Vol. 21, Issue 9, pp. 10850-10866 (2013)
- [\[Pfäffle2020\]](#) Pfäffle, C. et al. Opt. Lett., 44, 5671-5674 (2019).
- [\[Puyo2020a\]](#) Puyo, L. et al. Biomedical Optics Express 11.6 (2020): 3274-3287.
- [\[Puyo2021a\]](#) Puyo, L. et al. Scientific Reports volume 11, 17828 (2021)
- [\[Puyo2021b\]](#) Puyo, L. et al. Biom. Optics Express Vol. 12, Issue 7, pp. 4478-4495 (2021)
- [\[Spahr2019\]](#) Spahr, H. et al. Sci Rep 9, 11748 (2019).

Contact

Institut Langevin CNRS UMR 7587, Michael Atlan. michael.atlan@espci.fr

ONERA. Pedro Mece. pedro.mece@onera.fr

Discord : <https://discord.gg/KU8CD2qX3Z>