

Imagerie multimodale multi-échelle haute résolution de la rétine

RÉSUMÉ : Après une longue période d'incubation liée à des contraintes technologiques, l'imagerie à haute résolution de la rétine, dite aussi à haute précision, est devenue plus robuste et les indications médicales se développent dans différentes directions. Des systèmes novateurs sont en préparation par différents industriels, en particulier français. La tendance est au développement de systèmes multifonction, associant par exemple imagerie conventionnelle et à haute résolution, ou des systèmes permettant plusieurs modalités de haute précision. Le CIC Vision a été pionnier dans le développement de ces systèmes à l'échelle mondiale. Ceci témoigne du rôle important de la collaboration entre physiciens et médecins dès les stades de conception pour la réussite de ce transfert de technologie. La définition claire de l'amélioration du service médical rendu (ASMR) sera l'étape cruciale précédant l'adoption clinique à large échelle. Dans le contexte, l'imagerie à haute précision des capillaires et des axones, la mesure du flux sanguin et le suivi de la DMLA sèche apparaissent comme les applications cliniques les plus prometteuses.

→ **K. GOCHO, M. ATLAN, M. PAQUES**
Paris Eye Imaging Group, Centre d'Investigation
Clinique Vision, Hôpital des Quinze-Vingts, PARIS.

Imagerie SLO OCT corrigée par OA

Le système développé par la société ImagineEye, avec des fonds européens, intègre des modalités d'imagerie d'ophtalmoscopie laser à balayage (SLO), de

tomographie par cohérence optique (OCT) et d'angiographie OCT (OCTA) et offre des champs de vision multi-échelles. Pour la haute résolution, et en particulier la haute résolution latérale, la correction des aberrations par imagerie cellulaire par optique adaptative (AO) est utilisée [1, 2]. Le système est un prototype clinique commercial permettant d'examiner la rétine à l'aide de plusieurs modalités d'imagerie à deux échelles différentes. Il fournit des scans SLO, OCT et OCTA (*fig. 1 et 2*) sur de

larges champs de vision, ainsi que des images en gros plan capturées à l'aide des mêmes modalités améliorées par l'optique adaptative (AO). La combinaison de l'OCT à source balayée, du suivi de la pupille, du suivi rétinien ultrarapide et des technologies AO offre une résolution 3D microscopique.

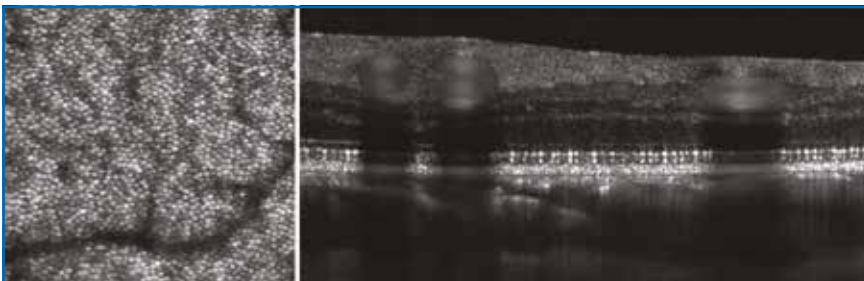


Fig. 1 : Exemple de mosaïque des photorécepteurs observée par SLO (à gauche) et de coupe OCT à ultrahaute résolution (à droite) avec le système Merlin.

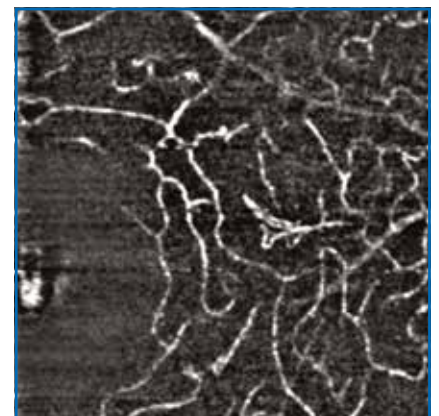


Fig. 2 : Exemple d'OCTA des capillaires périfovéolaires obtenue avec le système Merlin.

POINTS FORTS

- L'imagerie à haute résolution de la rétine, dite aussi à haute précision, se développe dans plusieurs directions et des systèmes novateurs sont en préparation par différents industriels, en particulier français.
- Un système combinant OCT, SLO corrigé tous deux par optique adaptative est en cours d'évaluation clinique dans plusieurs centres.
- Le laser Doppler holographique permet pour la première fois une mesure directe du flux sanguin rétinien, ainsi qu'une visualisation de l'architecture vasculaire rétinienne.
- L'holographie Doppler constitue un excellent exemple de transfert technologique réussi des laboratoires de recherche (CNRS, INSERM) vers les milieux cliniques.

L'ensemble de l'instrument a une conception compacte et la tête de numérisation est montée sur des platines de translation motorisées qui permettent un autoalignement 3D par rapport à l'œil du sujet, en suivant la position de la pupille. Les acquisitions sont pilotées

grâce à une interface intuitive à écran tactile et facilitées par le suivi robotisé des pupilles. Les capacités d'imagerie de l'instrument multimodal et multi-échelle ont été testées par l'imagerie de volontaires sains et de patients au CIC Vision [3].

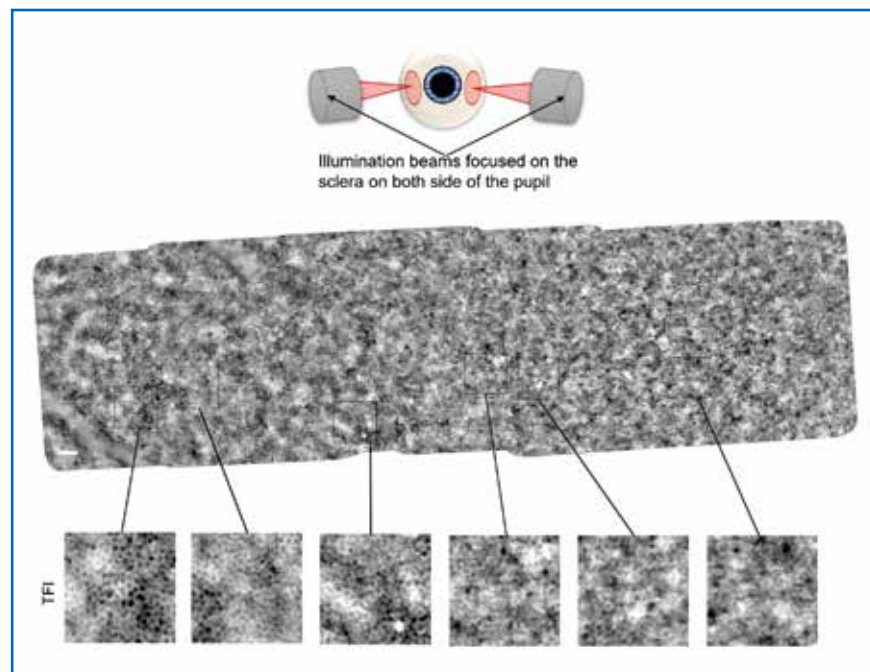


Fig 3 : En haut, principe de l'illumination transclérale. En bas, exemple de montage d'images de l'épithélium pigmentaire (d'après [6])

AO Flood Illuminated System (RTX1™) et système Transscleral Fundus Imager

Cette caméra de fond d'œil a été développée il y a une quinzaine d'années dans le cadre d'un projet européen dirigé par une entreprise française. Il est utilisé dans de nombreux centres de recherche en ophtalmologie, notamment pour l'observation des cellules photoréceptrices dans les maladies dégénératives de la rétine, les modifications pathologiques des parois des vaisseaux sanguins rétinien (modifications hypertensives) et l'observation des rétines animales [4, 5]. La résolution est d'environ 3 microns, la taille de l'image est de 4×4 degrés (soit environ 1 mm^2 au fond d'œil) et utilise des rayons infrarouges lointains, permettant d'observer de fines structures au niveau cellulaire tout en supprimant la photophobie. De nombreux articles ont été publiés démontrant sa puissance dans l'observation de suivi des structures rétinien *in vivo*, l'observation non invasive et l'observation longitudinale des maladies dégénératives rétinien et la détection précoce.

Sur cette base a été récemment ajouté un système d'illumination transclérale (Transscleral illuminated, TFI, AO Fundus Camera, RTX1-TFI™), utilisant la technique transclérale rapportée par l'équipe de Laforest [6, 7]. En projetant la lumière obliquement vers le fond de l'œil, ce TFI supprime la réflexion directe des cellules photoréceptrices, permettant ainsi d'observer les cellules épithéliales pigmentaires de la rétine (**fig. 2 et 3**). Un article comparant l'autofluorescence AO avec SLO a prouvé que presque les mêmes cellules peuvent être observées.

Le laser Doppler holographique : état des lieux

Initialement installés au CIC Vision, plusieurs systèmes sont maintenant implantés à travers le monde. Les progrès constants de la technologie laser Doppler

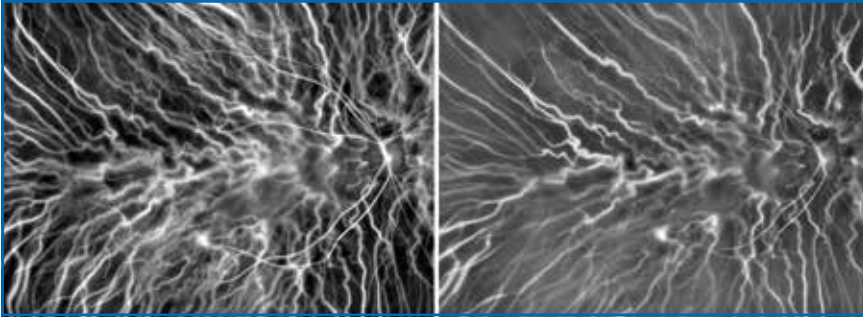


Fig. 4: Images du fond d'œil utilisant une caméra à fréquence d'images ultrarapide de 67 kHz à basse (6-33 kHz, à gauche) et haute fréquence (10-33 kHz, à droite). Il distingue les artères et les veines, exposant les artères choroïdiennes proches du nerf optique et les branches non visibles par les méthodes conventionnelles.

permettent maintenant d'extraire des paramètres quantitatifs tels que le flux sanguin, ainsi qu'un angiogramme choroïdien de haute précision [8].

La choroïde, un tissu densément vascularisé essentiel à l'alimentation de l'épithélium pigmentaire et des photorécepteurs rétiniens, est de plus en plus étudiée dans la recherche sur les maladies de la rétine. Les méthodes traditionnelles permettant d'explorer son anatomie complexe et sa dynamique d'écoulement se sont toutefois heurtées à des défis importants. Le laser Doppler

holographique permet d'obtenir une imagerie à contraste élevé des vaisseaux choroïdiens chez l'homme, correspondant ou dépassant les méthodes de pointe telles que l'angiographie au vert d'indocyanine (ICG-A) et la tomographie par cohérence optique (OCT). Il différencie efficacement les artères et les veines choroïdiennes et découvre des structures auparavant invisibles telles que les artères choroïdiennes proches du nerf optique et les artères ciliaires postérieures courtes paraoptiques se ramifiant dans la choroïde (**fig. 4**). Les capacités d'imagerie à grand champ de la technologie fournissent des informations sans précédent sur l'anatomie et la physiologie de la choroïde, notamment la visualisation des veines vortex au-delà du pôle postérieur. Le flux sanguin rétinien (de l'ordre de 60 $\mu\text{L}/\text{min}$), mesuré par la somme des flux dans les gros vaisseaux rétiniens superficiels (allant de 50 à 100 micromètres) contribue à un élargissement symétrique supplémentaire (**fig. 5**). Dans l'ensemble, l'holographie Doppler fournit, de manière non invasive, des informations essentielles sur le réseau vasculaire oculaire, faisant ainsi progresser considérablement notre compréhension de ce tissu complexe et de son rôle dans la santé oculaire. Des développements industriels sont en cours.

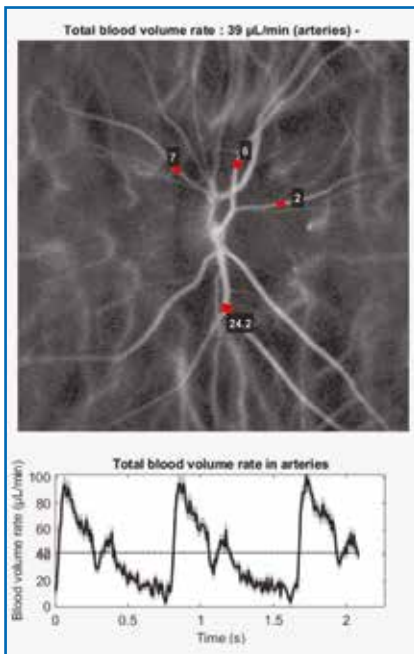


Fig. 5: Exemple de mesure du flux sanguin rétinien par laser Doppler.

tive optics. *J Opt Soc Am*, 1997;14: 2884-2892.

- MORGAN JIW, CHUI TYP, GRIEVE K. Twenty-five years of clinical applications using adaptive optics ophthalmoscopy [Invited]. *Biomed Opt Express*, 2022;14:387-428.
- SHIRAZI MF, ANDILLA J, LEFAUDEX N *et al*. Multi-modal and multi-scale clinical retinal imaging system with pupil and retinal tracking. *Sci Rep*, 2022;12:9577.
- GOCHO K, SARDA V, FALAH S *et al*. Adaptive optics imaging of geographic atrophy. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2013;54:3673-3680.
- DENTEL A, BRAZHNIKOVA E, NORBERG N *et al*. Adaptive optics flood illumination ophthalmoscopy in nonhuman primates: findings in normal and short-term induced detached retinae. *Ophthalmol Sci*, 2023;3:100316.
- KOWALCZUK L, DORNIER R, KUNZI M *et al*. In vivo retinal pigment epithelium imaging using transscleral optical imaging in healthy eyes. *Ophthalmol Sci*, 2022;3:100234.
- GOFAS-SALAS E, LEE DMW, RONDEAU C *et al*. Comparison between two adaptive optics methods for imaging of individual retinal pigmented epithelial cells. *Diagnostics (Basel)*, 2024;14:768.
- PUYO L, PAQUES M, FINK M *et al*. Waveform analysis of human retinal and choroidal blood flow with laser Doppler holography. *Biomed Opt Express*, 2019;10:49424963.



K. GOCHO, M. ATLAN, M. PAQUES

Paris Eye Imaging Group, Centre d'investigation Clinique Vision, Hôpital des Quinze-Vingts, PARIS.

BIBLIOGRAPHIE

- LIANG J, WILLIAMS DR, MILLER DT. Supernormal vision and high-resolution retinal imaging through adap-

Les auteurs ont déclaré ne pas avoir de liens d'intérêts concernant les données publiées dans cet article.