

Une nouvelle révolution de l'imagerie oculaire : l'holographie laser Doppler

RÉSUMÉ : L'holographie laser Doppler est la première technique d'imagerie quantitative du flux sanguin qui a été développée ces dix dernières années par l'institut Langevin et le Centre d'investigation clinique (CIC) des Quinze-Vingts. Cette technique non invasive et très robuste offre la possibilité de mesurer le flux sanguin rétinien et d'imager avec une grande précision la vascularisation choroïdienne, en distinguant veines et artères. Son champ d'application potentiel est vaste, il va du glaucome aux occlusions veineuses, en passant par la pachychoïde, la myopie, les tumeurs, les conséquences hémodynamiques des variations de pression intracrânienne, l'hypertension artérielle, ainsi que certaines pathologies du segment antérieur de l'œil, pour ne citer que les études en cours au CIC des Quinze-Vingts.

→ L. PUYO, M. PAQUES, J.-A. SAHEL, M. ATLAN

Paris Eye Imaging group, Centre d'investigation clinique 1423, CHNO des Quinze-Vingts, PARIS.

L'imagerie de la structure et du flux des vaisseaux oculaires est cruciale pour comprendre la physiopathologie de la perte de vision dans de nombreuses maladies et pour accompagner les thérapies. Les méthodes d'angiographie à base de colorants, qui ont longtemps été la référence pour l'exploration angiographique du fond de l'œil, ont été progressivement remplacées au cours de la dernière décennie par plusieurs méthodes d'imagerie non invasive du flux sanguin rétinien, en particulier l'OCT-A. Cependant, aucune d'entre elles n'a atteint une robustesse acceptable pour la quantification du débit sanguin, c'est encore plus vrai pour la choroïde. De plus, l'anatomie vasculaire choroïdienne n'est pas encore aussi bien connue que celle de la rétine.

Qu'est-ce que l'holographie laser Doppler ?

L'holographie laser Doppler (LDH) est une technologie qui repose sur l'holo-

graphie numérique pour mesurer les contrastes du flux sanguin de manière non invasive, à partir de l'interférence d'une lumière cohérente rétrodiffusée par l'œil avec un faisceau de référence (principe similaire à celui de l'OCT). Dans le cas du laser Doppler, les motifs d'interférence en 2D sont mesurés par les capteurs d'une caméra à haute fréquence d'images (67 kHz) et non par un simple photodétecteur comme pour l'OCT. De plus, l'image Doppler est calculée par analyse de Fourier sur une fenêtre de 512 images (correspondant à environ 7,6 ms). Le spectre des variations Doppler permet ensuite de calculer les variations de flux. Les variations

du débit sanguin rétinien au cours des cycles cardiaques peuvent être évaluées avec finesse, de manière non invasive.

Intérêts de cette technique

L'holographie Doppler laser à haute vitesse par interférométrie ultrarapide actuellement développée et utilisée à l'unité d'imagerie à haute résolution du Centre d'investigation clinique (CIC) de l'hôpital des Quinze-Vingts permet une imagerie non invasive du flux sanguin dans le proche infrarouge dans l'œil humain, avec une résolution temporelle inégalée (jusqu'à une

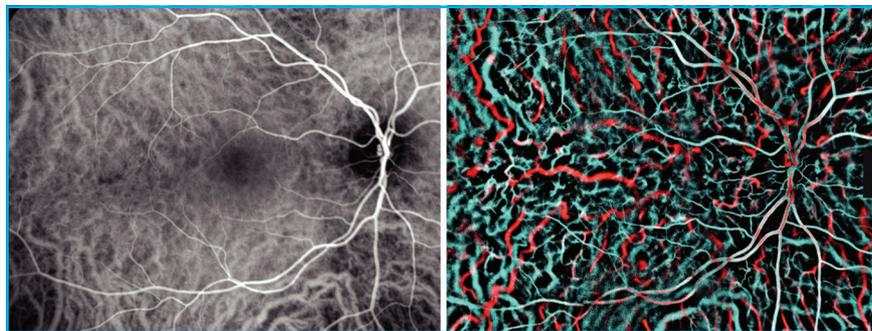


Fig. 1 : Angiographie au vert d'indocyanine (ICG, à gauche) et holographie Doppler laser proche infrarouge (à droite), avec en rouge les vaisseaux de flux élevés, c'est-à-dire les artères). Le Doppler révèle les réponses endoluminales du flux sanguin dans les vaisseaux rétiens et choroïdiens de manière non invasive, avec un contraste élevé.

POINTS FORTS

- L'holographie Doppler est une technique d'imagerie quantitative non invasive de la circulation rétinienne et choroïdienne.
- Cette technique est robuste, rapide et bien tolérée car utilisant l'infrarouge.
- Sa résolution temporelle de quelques millisecondes permet une analyse fine de l'onde de pouls dans les vaisseaux rétinien.
- Ses applications ophtalmologiques et médicales sont en cours d'exploration.

milliseconde) [1-3] (**fig. 1**). La résolution spatiale du LDH est actuellement de l'ordre de 30 μm .

Les signaux Doppler locaux révèlent des ondes de pouls provenant des variations du flux systolique-diastolique, y compris l'onde dicrote, dans les artères rétinien, les artères choroïdienne et les artéoles péripapillaires. Dans la rétine, les artères et les veines peuvent donc être différenciées sur la base de leurs ondes Doppler et le caractère pic systolique est facilement visualisé. Ce pic est un peu moins marqué dans

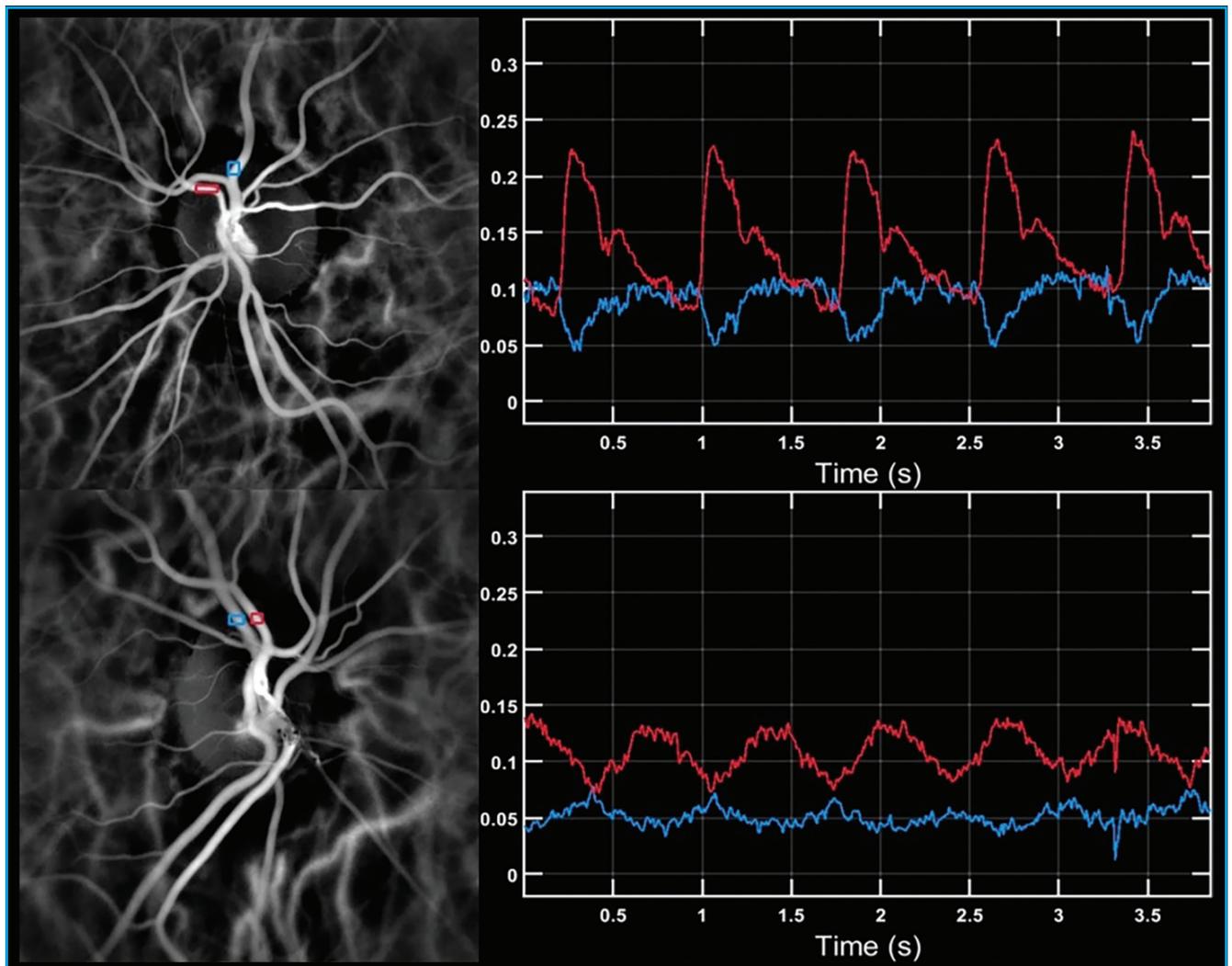


Fig. 2 : Images Doppler (à gauche) et variations temporelles du signal moyenné spatialement dans les artères et les veines rétinien (à droite) dans les régions d'intérêt délimitées en rouge et bleu chez un volontaire sain (en haut) et chez un patient atteint d'un bas débit oculaire par maladie de Takayasu (en bas).

la choroïde, néanmoins les artères et veines choroïdiennes peuvent être différenciées en séparant les images Doppler de basse et haute fréquence pour révéler des images de flux sanguin faible et élevé, respectivement, correspondant donc aux veines et aux artères (**fig. 1**).

L'interprétation des données issues du laser Doppler est toujours en développement et peut s'intéresser aussi bien aux valeurs de flux qu'à l'anatomie des vaisseaux choroïdiens, voire même à la forme des courbes de flux. L'intérêt sémiologique de la forme des courbes au cours du cycle cardiaque est certainement un des éléments les plus intéressants, au même titre que les valeurs absolues du signal Doppler. En particulier, les formes d'onde de pouls chez les patients ayant un bas débit oculaire diffèrent considérablement des sujets sains (**fig. 2**).

La principale limite actuelle de cette technologie est la fiabilité incertaine des

mesures de flux choroïdien, en particulier pour les vaisseaux les plus profonds. Les facteurs optiques modulant les valeurs de flux rétinien (par exemple la taille de la pupille, la puissance optique d'illumination ou les propriétés optiques de l'épithélium pigmentaire) sont en cours d'exploration. Les opacités des milieux n'altèrent que peu le signal, il est tout à fait possible de faire une mesure fiable du flux sanguin rétinien derrière une cataracte modérée. L'effet de l'hémorragie intravitréenne sur les mesures est aussi en cours d'exploration.

■ Conclusion

Le LDH a deux intérêts bien distincts : l'analyse du flux sanguin dans la rétine et l'imagerie vasculaire choroïdienne, avec en particulier la distinction entre artères et veines. Les études sont toujours en cours pour élucider tout le potentiel de cette technique très prometteuse.

BIBLIOGRAPHIE

1. PUYO L, PAQUES M, FINK M *et al.* In vivo laser Doppler holography of the human retina. *Biomed Opt Express*, 2018;9: 4113-4129.
2. PUYO L, PAQUES M, FINK M *et al.* Choroidal vasculature imaging with laser Doppler holography. *Biomed Opt Express*, 2019;10:995-1012.
3. 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; 10:4942-4963.



L. PUYO, M. PAQUES, J.-A. SAHEL, M. ATLAN
Paris Eye Imaging group,
Centre d'investigation
clinique 1423, CHNO des
Quinze-Vingts, PARIS.

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