

Dossier



Imagerie en optique adaptative

Natacha Stolowy, Frédéric Matonti

L'optique adaptative (OA), utilisée depuis de nombreuses années dans le domaine de l'astronomie, est une technique nouvelle et prometteuse en ophtalmologie. Cette technique corrige les déformations complexes du front d'onde provenant du fond de l'œil grâce à un miroir déformable. Elle permet ainsi d'observer de manière fine les photorécepteurs rétiniens et leur densité avec un degré de précision et une résolution jamais obtenus auparavant, et d'apporter des éléments structurels nouveaux essentiels à une meilleure compréhension des anomalies cellulaires ou vasculaires rétinienne.

Principes physiques : rappels

La théorie ondulatoire de la lumière, par opposition à la théorie corpusculaire, définit la lumière comme une onde électromagnétique dont la longueur d'onde correspond au spectre visible, entre 400 et 800 nm. L'onde lumineuse est caractérisée par une fréquence invariante. Quand l'onde traverse un milieu d'indice de réfraction différent, sa vitesse de propagation et donc sa longueur d'onde seront modifiées.

Une source ponctuelle émet un front d'onde sphérique (figure 1). Le front d'onde ou la surface d'onde est tout simplement la surface (ou enveloppe) qui contient tous les points provenant d'une même source lumineuse de manière synchrone : ces points sont dits « en phase ». Ce front d'onde se déplace donc dans la même direction que les rayons provenant d'une source lumineuse (figure 1). De la même manière qu'on représente habituellement la lumière arrivant vers l'œil au moyen de rayons lumineux, on peut la représenter sous la forme d'un front d'onde qui se propage dans la même direction que ces rayons lumineux et va être dévié en traversant un milieu d'indice de réfraction différent, entraînant un déphasage des points du front d'onde (figure 1). L'œil contient des milieux d'indices différents et plus ou moins hétérogènes et mobiles (film lacrymal, humeur aqueuse, corps vitré). N'étant pas un système optique parfait, il présente un certain nombre d'aberrations optiques de différents degrés (astigmatisme, coma...) qui vont entraîner un déphasage du front d'onde arrivant sur la rétine. De même, ce front d'onde réfléchi va une nouvelle fois être déphasé lors de son trajet retour avant d'être capté par nos différents analyseurs (rétinographes non mydriatiques, OCT...).

Service d'ophtalmologie, hôpital Nord, Marseille

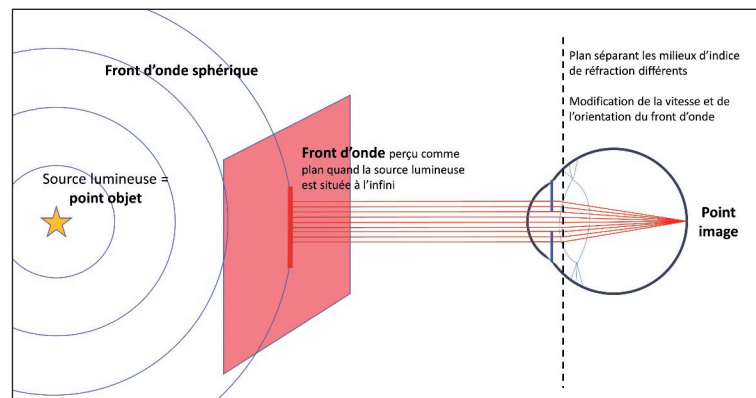


Figure 1. Représentation du front d'onde provenant d'une source lumineuse ponctuelle située à l'infini et se propageant jusqu'à un œil humain.

Origines

L'optique adaptative (OA) a été imaginée pour la première fois dans les années 1950 dans le domaine de l'astronomie, pour être finalement mise en application avec succès dans les années 1990. Les télescopes observent au sol à travers l'atmosphère terrestre qui est le lieu de mouvements turbulents de masses d'air à différents indices optiques, ce qui entraîne une déformation du front d'onde propagé et une dégradation de l'image observée. L'OA, en corrigeant en temps réel les déformations subies par le front d'onde, a permis de résoudre ce problème rencontré par les astronomes.

Appliquée au domaine de l'ophtalmologie, cette technique permet de corriger les aberrations optiques générées par l'œil [1]. Sa première utilisation en ophtalmologie date de la fin des années 1990, quand David Williams, chercheur à l'université de Rochester, visualise pour la

première fois les photorécepteurs humains en couplant l'OA à un *scanning laser ophtalmoscopy* (SLO) [2]. Quelques années plus tard, l'Observatoire de Paris met en place le projet ŒIL, qui réalise des instruments d'imagerie tridimensionnelle de la rétine à haute résolution *in vivo* et *in situ*, basés entre autres sur la technique astronomique de l'OA. Il faut attendre une dizaine d'années de plus avant que les premières applications cliniques apparaissent [3].

Pour obtenir une image précise de la rétine grâce à l'OA, celle-ci doit être couplée à un système d'imagerie. Son fonctionnement est représenté en *figure 2*. Un faisceau lumineux est tout d'abord envoyé dans l'œil. Une petite partie de ce faisceau est réfléchi et ressort sous la forme d'un front d'onde dévié par les aberrations optiques de l'œil. Le front d'onde sortant est capté par un analyseur de front d'onde qui analyse les aberrations. Le système de contrôle reçoit les informations de l'analyseur et envoie un signal au miroir déformable qui adapte sa forme afin de corriger les déformations complexes du front d'onde. Le miroir renvoie un front d'onde corrigé qui est capté par le système d'imagerie en place, qui peut être une caméra, un SLO ou un OCT. C'est grâce à ce système de correction des déformations du front d'onde qu'une image extrêmement précise de la rétine peut être obtenue.

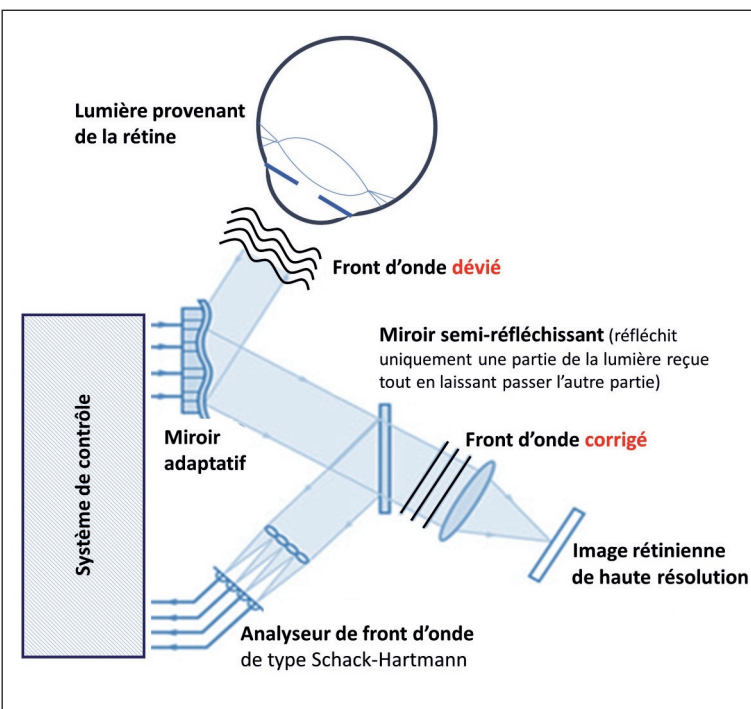


Figure 2. Fonctionnement de l'optique adaptative couplée à un système d'imagerie rétinienne, modifié d'après Carroll et al. [16].

Applications en ophtalmologie : imagerie rétinienne

Une des principales applications de l'OA en ophtalmologie est l'imagerie de la rétine. Elle a présenté des avancées technologiques majeures ces dernières années et n'est plus uniquement réservée au domaine de la recherche fondamentale, mais est de plus en plus utilisée en recherche clinique. Le seul appareil commercialisé à l'heure actuelle est le rtx1™ (Imagine Eyes, Orsay, France) qui couple un système d'OA à une caméra infrarouge. Sa résolution permet d'analyser des détails mesurant quelques microns.

L'imagerie en OA permet une analyse microscopique de la rétine à l'échelle cellulaire, donnant accès à la visualisation des photorécepteurs, de l'épithélium pigmentaire et des cellules ganglionnaires, ainsi que des parois vasculaires et des globules blancs [4]. La réflectivité des photorécepteurs, à la jonction segment externe-segment interne, permet leur visualisation. Par ailleurs, un phénomène optique, l'effet de Stiles-Crawford, va influencer sur notre capacité à visualiser les photorécepteurs selon qu'ils sont bien agencés ou désorganisés [5]. Ce phénomène repose sur un modèle optique physiologique pour lequel les photorécepteurs rétiens agissent individuellement comme de véritables « fibres optiques » unitaires. La probabilité de capturer des photons incidents est plus élevée si leur angle d'incidence est plus faible, et donc maximale si les photons ont un trajet parallèle à l'axe des photorécepteurs. Au-delà d'un certain angle d'incidence, la probabilité de capture s'amenuise. Ainsi, en cas de désorganisation des photorécepteurs (perte de leur parallélisme), notre capacité à les observer sera fortement altérée [6].

Le bénéfice principal attendu est le diagnostic précoce de certaines maladies rétiennes ou la détection d'anomalies jusqu'alors considérées comme cryptogéniques. Son intérêt est notable dans l'analyse et la compréhension d'anomalies neuro-rétiennes, notamment grâce à l'analyse de la densité des photorécepteurs et du suivi évolutif de cette densité qui permet la détection et le suivi de pathologies telles que les toxicités aux antipaludéens de synthèse (*figure 3*) [7-9].

En situation physiologique, l'aspect de la région maculaire centrale en OA se présente sous la forme d'une fine mosaïque dont chaque point correspond à un photorécepteur (son article externe) (*figure 4*). En cas de disparition ou de désorganisation de cette structure, l'image en OA s'en trouve perturbée. Ainsi, la résolution de ce mode d'imagerie permet de mettre en évidence des désorganisations cryptogéniques séquellaires des photorécepteurs au niveau de la fovéa, comme dans la maculopathie

Dossier

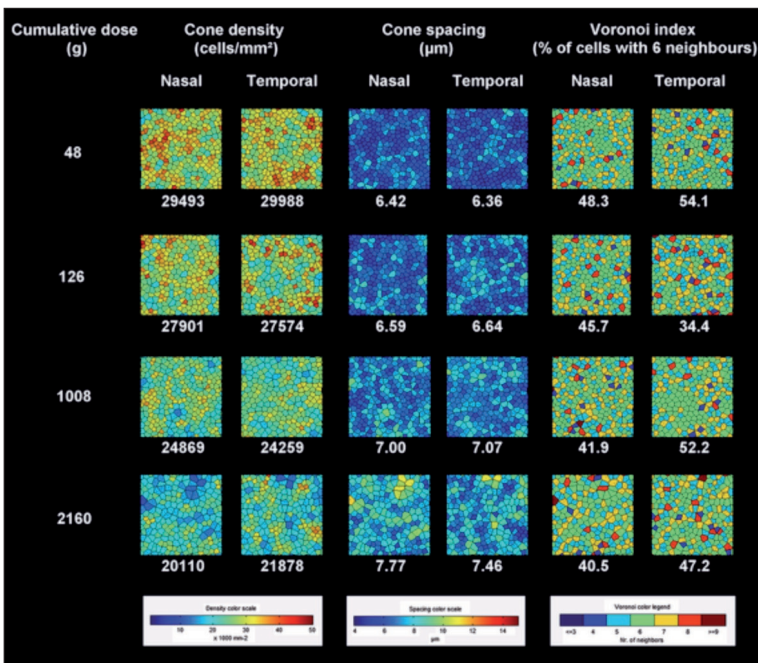


Figure 3. Exemples de cartes de densités de cônes et d'espace-ment intercônes chez des patients avec différentes doses cumulées d'hydroxychloroquine. Une perte en cônes et une augmentation de l'espace-ment avec une conservation relative de la mosaïque des cônes sont observées à mesure que la dose cumulée augmente [9].

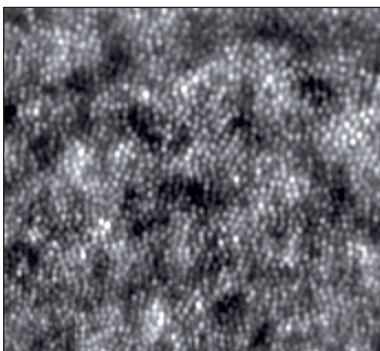


Figure 4. Aspect normal de la mosaïque des photorécepteurs dans la région fovéale.

aux poppers dans laquelle la libération de monoxyde d'azote entraîne un stress oxydatif à l'origine d'une destruction des segments externes des photorécepteurs (figure 5). L'OA peut aussi être utile dans l'analyse de zones d'atrophie de l'épithélium pigmentaire [10], dans l'évaluation des décollements de rétine macula-on ou macula-off (figure 6) [11,12], ou encore dans le suivi et la classification des trous maculaires pour lesquels la taille du trou peut être mesurée avec une grande précision [13].

Dans le domaine vasculaire, cette imagerie permet une analyse très précise de la taille des vaisseaux réti-

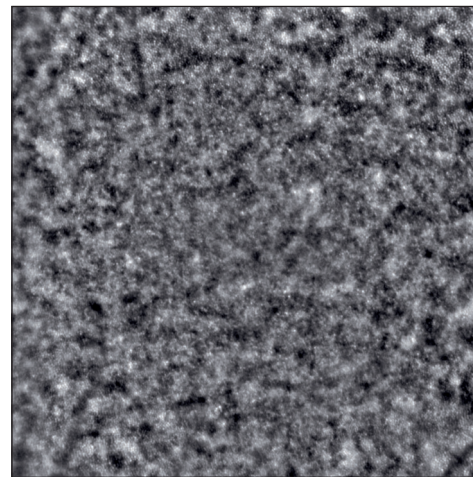


Figure 5. Maculopathie aux poppers : au stade tardif (1 an), on retrouve une désorganisation de la mosaïque des photorécepteurs fovéaux.

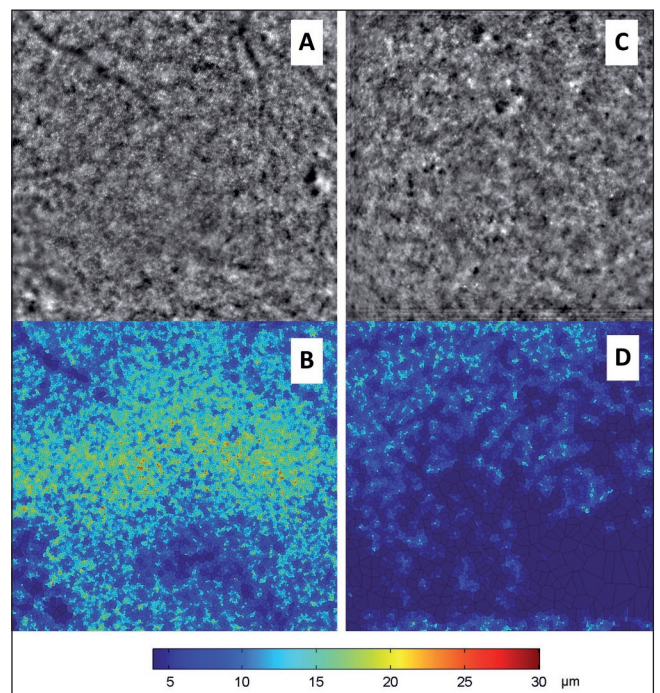


Figure 6. Décollement de rétine macula-off : une densité en cône élevée en postopératoire (A, B) est prédictive d'une bonne récupération visuelle ; une densité en cône faible (C, D) prédit une mauvaise récupération visuelle [12].

niens et de la paroi des artères rétinienues. Elle nous donne par ailleurs accès à la visualisation directe des capillaires rétinienues. Cette imagerie semble intéressante dans l'analyse de pathologies systémiques à retentissement vasculaire, comme l'hypertension artérielle [14], avec une artériolosclérose induite, à l'origine d'une modification des calibres des parois artérielles rétinienues et du microenvironnement, ou dans l'occlusion veineuse rétinienne [15].

Enfin, l'OA est utile dans l'analyse multimodale et la compréhension de maladies rares comme la dystrophie annulaire concentrique (figure 7) ou la maculopathie placoïde persistante (figure 8).

Conclusion

Cette technologie reste pour l'heure limitée dans son utilisation en pratique clinique quotidienne du fait d'un coût important des dispositifs commerciaux, de l'absence de consensus quant à son intérêt et sa place dans les arbres diagnostiques et thérapeutiques, et de ses limites techniques (impossibilité de la réaliser en cas de troubles des milieux, champ réduit de l'image, aspect chronophage).

Références bibliographiques

- [1] Williams D, Yoon GY, Porter J *et al.* Visual benefit of correcting higher order aberrations of the eye. *J Refract Surg.* 2000;16(5):S554-9.
- [2] Liang J, Williams DR, Miller DT. Supernormal vision and high-resolution retinal imaging through adaptive optics. *J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis.* 1997;14(11):2884-92.
- [3] Godara P, Dubis AM, Roorda A *et al.* Adaptive optics retinal imaging: emerging clinical applications. *Optom Vis Sci.* 2010;87(12):930-41.
- [4] Porter J, Queener H, Lin J *et al.* Adaptive optics for vision science: principles, practices, design and applications. John Wiley & Sons; 2006.
- [5] Gao W, Cense B, Zhang Y *et al.* Measuring retinal contributions to the optical Stiles-Crawford effect with optical coherence tomography. *Opt Express.* 2008;16(9):6486-501.
- [6] Miloudi C, Rossant F, Bloch I *et al.* The negative cone mosaic: a new manifestation of the optical Stiles-Crawford effect in normal eyes. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* 2015;56(12):7043-50.
- [7] Bae EJ, Kim KR, Tsang SH *et al.* Retinal damage in chloroquine maculopathy, revealed by high resolution imaging: a case report utilizing adaptive optics scanning laser ophthalmoscopy. *Korean J Ophthalmol.* 2014;28(1):100-7.
- [8] Stepien KE, Han DP, Schell J *et al.* Spectral-domain optical coherence tomography and adaptive optics may detect hydroxychloroquine retinal toxicity before symptomatic vision loss. *Trans Am Ophthalmol Soc.* 2009;107:28-33.
- [9] Debellemannièr G, Flores M, Tumahai P *et al.* Assessment of parafoveal cone density in patients taking hydroxychloroquine in the absence of clinically documented retinal toxicity. *Acta Ophthalmol.* 2015;93(7):e534-40.
- [10] Gocho K, Sarda V, Falah S *et al.* Adaptive optics imaging of geographic atrophy. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* 2013;54(5):3673-80.
- [11] Saleh M, Debellemannièr G, Meillat M *et al.* Quantification of cone loss after surgery for retinal detachment involving the macula using adaptive optics. *Br J Ophthalmol.* 2014;98(10):1343-8.
- [12] Hugo J, Sampo M, Hoffart L, Matonti F. Analyse comparative de la meilleure acuité visuelle post-opératoire et de la densité en cônes évaluée par optique adaptative après chirurgie de décollement de rétine macula-OFF. Congrès de la Société française d'ophtalmologie 2017.
- [13] Debellemannièr G, Koehl A, Delbosc B, Saleh M. Imagerie à haute définition d'un trou maculaire de pleine épaisseur par caméra réti-

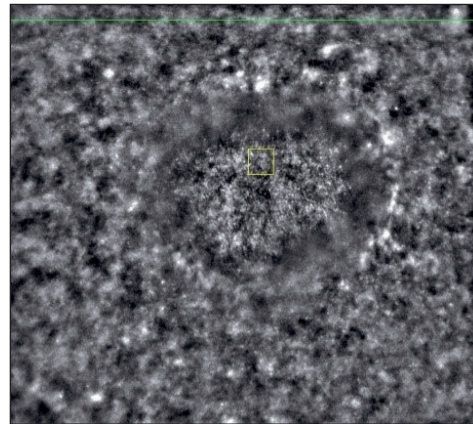


Figure 7. Dystrophie annulaire concentrique : mise en évidence d'un anneau de désorganisation de la mosaïque des photorécepteurs périphériques chez un enfant de 10 ans avec une acuité visuelle à 9/10 et présentant un aspect en « œil de bœuf » en angiographie.

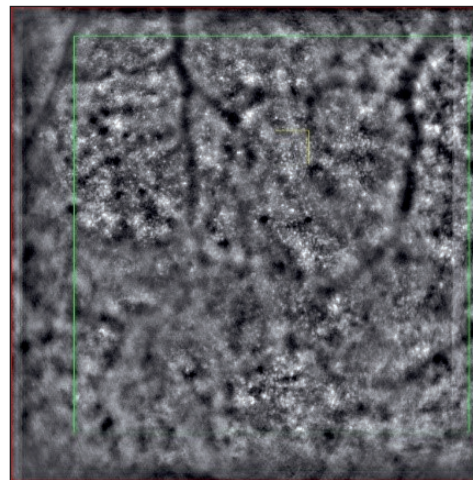


Figure 8. Maculopathie placoïde persistante : vastes zones de désorganisation et disparition de la mosaïque des photorécepteurs chez un patient présentant une récupération visuelle à 10/10 mais se plaignant de troubles de la vision, des couleurs et des contrastes. Cette gêne est facilement expliquée par ces lésions maculaires multifocales épargnant la fovéola.

- nienne à optique adaptative. *J Fr Ophtalmol.* 2014;37(6):502-3.
- [14] Koch E, Rosenbaum D, Brolly A *et al.* Morphometric analysis of small arteries in the human retina using adaptive optics imaging: relationship with blood pressure and focal vascular changes. *J Hypertens.* 2014;32(4):890-8.
- [15] Sarda V, Nakashima K, Wolff B *et al.* Topography of patchy retinal whitening during acute perfused retinal vein occlusion by optical coherence tomography and adaptive optics fundus imaging. *Eur J Ophthalmol.* 2011;21(5):653-6.
- [16] Carroll J, Gray DC, Roorda A, Williams DR. Recent advances in retinal imaging with adaptive optics. *Opt Photonics News.* 2005;16(1):36-42.