



D. GATINEL
Hôpital Bichat Claude Bernard,
Fondation A. de Rothschild,
PARIS.

L'optique adaptative est, en ophtalmologie, une technique sophistiquée qui permet de corriger ou moduler le taux d'aberrations optiques de haut degré du front d'onde oculaire.

Si elle est pour l'instant confinée à la recherche clinique, son vaste champ d'application laisse entrevoir de nombreuses possibilités diagnostiques et thérapeutiques dans le domaine de l'optique visuelle.

L'optique adaptative pour l'étude et la correction des défauts optiques de l'œil humain

L'aberrométrie offre au clinicien la possibilité d'objectiver, de qualifier et de quantifier certains défauts optiques oculaires complexes et non corrigibles par lunettes. Autrefois regroupés sous le vocable d'astigmatisme irrégulier, ces défauts peuvent aujourd'hui être scindés et classés parmi l'ensemble des aberrations dites de haut degré.

Appliquée à l'ophtalmologie, l'optique adaptative est une technologie qui offre la possibilité de corriger, voire de moduler ces aberrations de haut degré pour mieux en comprendre les effets sur la vision humaine.

En plus de l'imagerie rétinienne, l'étude et la correction des défauts visuels d'origine optique fournissent à l'optique adaptative un vaste champ d'applications. Cet article y est principalement consacré et en présente les principes généraux.

■ HISTORIQUE DES MOYENS DE CORRECTIONS OPTIQUES DE L'ŒIL HUMAIN

1. – Correction par verre de lunette

Alors que les lunettes de vue correctrices sont une des inventions médicales les plus importantes dans l'histoire de l'humanité, il est difficile d'en dater précisément l'origine, qui remonterait à la fin du XIII^e siècle et se situerait en Italie. Les lunettes sont probablement nées de l'observation empirique de l'effet sur la vue de lentilles de verre taillées pour d'autres motifs, car elles précèdent d'au moins trois siècles les premières descriptions précises des mécanismes de la vision rétinienne.

C'est en effet l'astronome allemand Kepler qui énonça au début du XVII^e siècle que l'image rétinienne est inversée, et décrivit l'effet bénéfique des verres concaves et convexes pour les corrections myopiques et hypermétropiques. Cette époque est marquée par d'importantes avancées dans le domaine de l'optique et ses applications, dont les deux principales sont l'astronomie et l'optique physiologique.

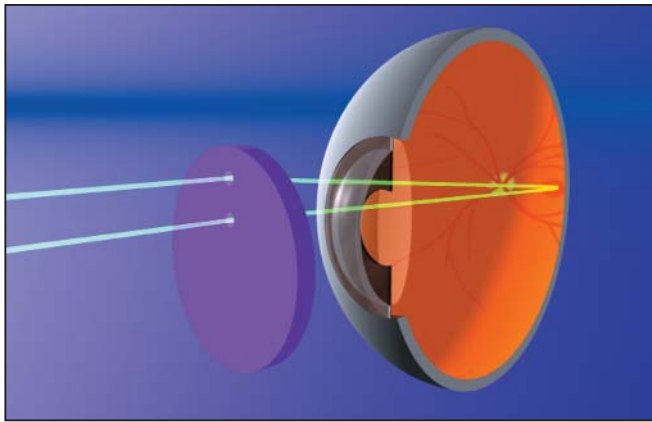


Fig. 1 : Principe du disque de Scheiner: en cas d'œil dépourvu d'aberration optique, le chemin optique emprunté par les différents rayons lumineux est identique et l'image d'un point de lumière est un point unique sur la rétine. Dans le cas contraire, les rayons ne focalisent pas au même endroit et la perception lumineuse est dédoublée. (Illustration: D. Gatinel)

A l'instar de Kepler, l'astronome Scheiner s'intéresse également aux propriétés optiques de l'œil. C'est à ce savant que l'on doit l'invention du premier aberromètre, le disque de Scheiner, qui permet de révéler l'image parasite d'un point observé par un œil pourvu d'aberrations optiques (**fig. 1**).

Il faudra toutefois attendre deux siècles avant que Thomas Young établisse une description précise de la deuxième aberration optique par ordre d'importance de l'œil humain : l'astigmatisme [1]. C'est encore à un astronome, Sir George Bidell Airy, que l'on doit la réalisation du premier verre sphéro-cylindrique destiné à la correction de l'astigmatisme.

2. – Mesures modernes des aberrations et de la qualité optique de l'œil

L'étude moderne des aberrations optiques de l'œil débute au XX^e siècle avec Smirnov, qui utilise une mire de Vernier pour mettre en évidence la déviation de l'image rétinienne de rayons lumineux réfractés au travers de la pupille irienne, et caractérise ainsi les aberrations d'ordre 3 et 4 au prix de laborieuses techniques de calcul [2].

Ses travaux, antérieurs à l'ère de l'informatique, furent suivis par ceux de Walsh, Charman et Howland qui les perfectionnèrent sans en développer d'applications cliniques majeures [3].

Il faut attendre le début des années 90 pour que l'étude des aberrations optiques de l'œil connaisse un nouvel essor grâce à l'adaptation pour la mesure des aberrations oculaires de

l'analyseur de front d'onde Shack-Hartman par Bille et Liang. Grâce à cet instrument, la mesure reproductible des aberrations optiques de haut degré jusqu'à des ordres élevés devint possible.

La production de nombreuses publications, émanant principalement des équipes de Williams (université de Rochester, NY, USA) et Artal (université de Murcia, Espagne), attestent, depuis, des possibilités offertes par cet instrument pour l'étude des propriétés optiques de l'œil humain. En particulier, il est devenu possible de mesurer les aberrations optiques de façon dynamique et montrer que les fluctuations principales du front d'onde oculaire étaient dues à des variations de focus associées à des microfluctuations de l'accommodation.

II CORRECTION DES ABERRATIONS PAR L'OPTIQUE ADAPTATIVE

On ne s'étonnera guère que la correction par optique adaptative des aberrations optiques de l'œil tire ses racines de l'astronomie, plus précisément du problème posé par la dégradation des images des corps célestes recueillies après la traversée de l'atmosphère (dont les fluctuations sont responsables du scintillement des étoiles observées depuis la surface terrestre).

Dans les années 50, l'astronome Babcock fut le premier à proposer l'interposition d'un dispositif dynamique pour la correction de ces aberrations optiques perpétuellement changeantes [4]. A cette époque, de nombreux obstacles technologiques empêchent la réalisation pratique d'un dispositif de mesure performant et d'un miroir optique doté de propriété de déformations. Ce n'est qu'une vingtaine d'années plus tard que la mise en pratique du concept d'optique adaptative de Babcock devint possible, avant de se généraliser à la majorité des télescopes terrestres en activité.

L'optique adaptative a permis un bond sans précédent dans la qualité des images astronomiques, et les images obtenues avec les télescopes terrestres qui en sont équipés égalent ou surpassent en résolution celles du télescope spatial Hubble.

L'utilisation de l'optique adaptative pour la correction des aberrations optiques de l'œil est certainement l'illustration la plus récente des liens féconds qui unissent l'astronomie et l'ophtalmologie au fil des siècles !

L'intégration en boucle d'un dispositif de correction s'adaptant aux mesures fournies par un aberromètre fut accomplie pour la



première fois par Williams, Liang et Don Miller au milieu des années 90 [5]. Cette prouesse fut réalisée grâce au concours de la société Xinetics pour la réalisation du miroir déformable. Le prototype réalisé, intégrant le miroir, l'aberromètre et les éléments du trajet optique occupait alors une surface équivalente à une grande table de bureau. Il est aujourd'hui possible d'intégrer ces éléments dans un volume compatible avec la réalisation d'un instrument d'usage clinique. Le prix d'un miroir déformable représente une limitation importante pour la diffusion de cette technologie, qui demeure actuellement restreinte à la recherche pour les domaines de l'étude et de la correction des aberrations optiques de l'œil.

La *figure 2* fournit une représentation schématique d'une boucle correctrice d'optique adaptative. Le maintien d'un alignement optimal du miroir avec la pupille est un élément essentiel pour obtenir la correction des anomalies de haut degré du front d'onde. Cette contrainte d'alignement explique qu'il n'est pas possible d'effectuer la correction statique des aberrations de haut degré avec un verre de lunettes. La capacité de déformation du miroir souple n'étant pas extensible à l'infini, il existe une limite supérieure pour le degré de correction des aberrations de haut degré avec l'optique adaptative. Ce seuil limite n'est toutefois franchi que pour des aberrations à taux très élevé (ex. : kératocône avancé). Invité au laboratoire d'optique de l'université de Rochester (NY, USA), j'ai pu observer l'effet de la correction optique des aberrations de degré 3 et 5 chez un patient atteint de kératocône avancé. Un gain de 3 lignes d'acuité visuelle à contraste maximal et de 5 lignes à contraste réduit de 50 % fut obtenu par la correction par optique adaptative d'un fort taux de coma et de trefoil induit par la déformation cornéenne.

A l'inverse, il fut également intéressant de constater que la suppression de certaines aberrations de haut degré présentes à l'état naturel chez des sujets sains induisait une sensation subjective de réduction de la qualité optique, cela faisant suspecter la présence de mécanismes d'adaptation neuronale.

En utilisant le même miroir d'optique adaptative pour induire des aberrations de haut degré, nous avons pu tester l'effet de certaines aberrations optiques sur l'acuité visuelle à contraste maximal et à contraste réduit. A taux égal et pour un même diamètre pupillaire, l'aberration sphérique était plus délétère que le coma et que le trefoil, cette dernière aberration n'ayant qu'un effet minime sur l'acuité visuelle à contraste maximal. Nous avons également pu vérifier que la profondeur de champ pouvait être accrue par l'induction de certaines de ces aberrations.

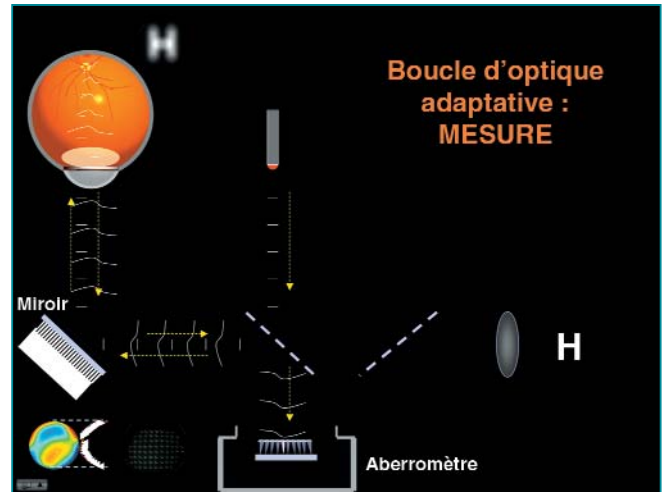


Fig. 2a : Boucle d'optique adaptative. La première étape consiste à mesurer les aberrations optiques qui dégradent la qualité de l'image de l'objet fixé (ici un optotype "H"). Cette mesure est effectuée par un aberromètre de type Schack-Hartman. (Illustration : D. Gatinel)

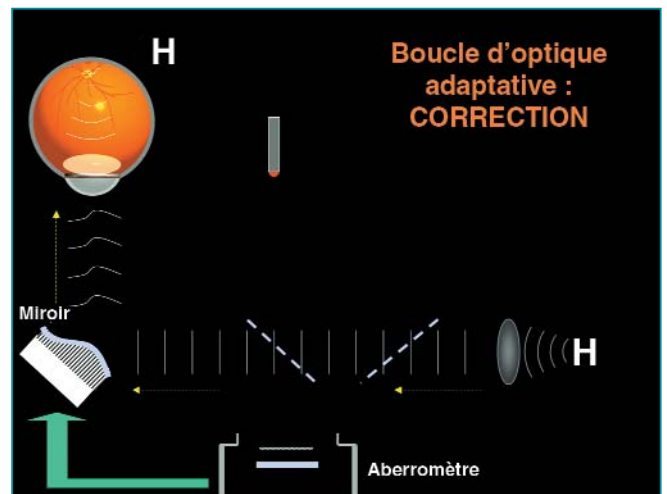


Fig. 2b : La mesure de la distorsion du front d'onde permet de calculer la déformation à appliquer au miroir d'optique adaptative. Cette déformation produit une distorsion inverse de celle causée par les dioptries oculaires au niveau du front d'onde incident. Lors de la traversée des milieux oculaires (cornée et cristallin), les déformations préalablement induites s'annulent pour produire une image rétinienne uniquement limitée en qualité par les effets de la diffraction pupillaire. (Illustration : D. Gatinel)

■ APPLICATIONS DE L'OPTIQUE ADAPTATIVE POUR L'ETUDE ET LA CORRECTION DE LA VISION

Outre les applications mentionnées précédemment (correction des aberrations de haut degré de patients atteints de kératocône, etc.), il existe de nombreuses applications de l'optique adaptative pour l'étude de la vision.

1. – Etude du pouvoir séparateur de l'œil

Le pouvoir séparateur d'un œil humain normalement transparent (faible diffusion) est limité par la diffraction, les aberrations optiques et la densité de photorécepteurs.

La diffraction et les aberrations réduisent le stigmatisme, en d'autres termes, l'image rétinienne d'un point élémentaire de l'image observée est élargie. Au-delà d'un certain seuil, deux points élémentaires distincts au sein de l'objet observé seront confondus en une tache lumineuse unique sur la rétine, et ne seront plus séparés.

Les effets de la diffraction sont réduits par la dilatation pupillaire, alors que celle-ci provoque une augmentation du taux des aberrations optiques de haut degré, liée au fait que les dioptries oculaires présentent des imperfections géométriques plus importantes à leurs bords qu'en leur centre, et qu'ils ne sont pas alignés sur un axe commun (*fig. 3*).

La correction des aberrations optiques de bas et haut degré par un dispositif d'optique adaptative peut théoriquement donner à l'œil, en lumière monochromatique, une qualité optique uniquement limitée par la diffraction. Dans ces conditions, le pouvoir séparateur oculaire est conditionné par les rapports entre les dimensions des diamètres respectifs de la tache focale de diffraction et des photorécepteurs fovéolaires.



Fig. 3 : Comparaison pour différents diamètres pupillaires des images rétinienne d'un point lumineux : en présence de diffraction et d'aberration sphérique (en haut), et en présence de diffraction seule (en bas). Alors que la dilatation pupillaire réduit l'effet de la diffraction, elle augmente celui de l'aberration sphérique (dans cet exemple, le taux d'aberration sphérique positive est équivalent à 0,3 micron à 6 mm, soit le taux moyen observé chez les sujets opérés de cataracte après implantation d'un implant sphérique conventionnel). (Illustration : D. Gatinel)

- L'optique adaptative en ophtalmologie dérive d'une technologie utilisée en astronomie pour accroître le pouvoir de résolution des instruments de détection comme les télescopes.
- L'optique adaptative offre la possibilité d'étudier l'effet de la correction sélective des aberrations de haut degré de l'œil humain comme le coma, l'aberration sphérique, ou n'importe quelle combinaison de ces aberrations.
- L'optique adaptative a permis de confirmer la possibilité d'une "supervision" dans des conditions expérimentales.
- L'optique adaptative permet non seulement de corriger mais également d'induire des aberrations optiques de haut degré afin d'en étudier l'effet sur l'acuité visuelle, la profondeur de champ, etc.

En l'absence d'aberrations optiques, le diamètre de la tache d'éclairement rétinien (PSF : Point Spread Function), qui ne dépend que de la diffraction, peut être estimé à 3 microns (pour un diamètre pupillaire = 6 mm et une longueur focale de 20 mm) (*fig. 4*). Ce diamètre est très proche de la distance minimale entre les articles externes des photorécepteurs fovéolaires, estimée par deux auteurs, Williams (1988) et Curcio (1990) (*fig. 5*). Il est intéressant de noter que la taille des photorécepteurs est parfaitement adaptée aux contraintes issues des lois de l'optique physique (a priori, l'augmentation de la densité des photorécepteurs n'aurait pas un effet majeur sur l'acuité visuelle théorique au regard du diamètre minimum imposé à la PSF par la diffraction pupillaire). Cette résolution maximale correspond à une acuité d'environ 20/10. La *figure 6* montre une représentation schématique de l'échantillonnage rétinien d'un

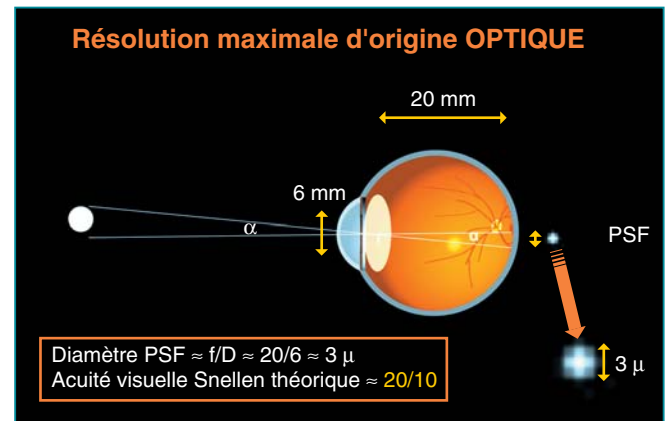


Fig. 4 : La résolution théorique maximale d'un œil peut être calculée en fonction du diamètre de la tache d'éclairement rétinien (PSF : Point Spread Function) et du critère de Rayleigh. En l'absence d'aberrations optiques, ce diamètre ne dépend que des conditions de diffraction et peut être estimé à 3 microns (pour un diamètre pupillaire = 6 mm et une longueur focale de 20 mm). (Illustration : D. Gatinel)

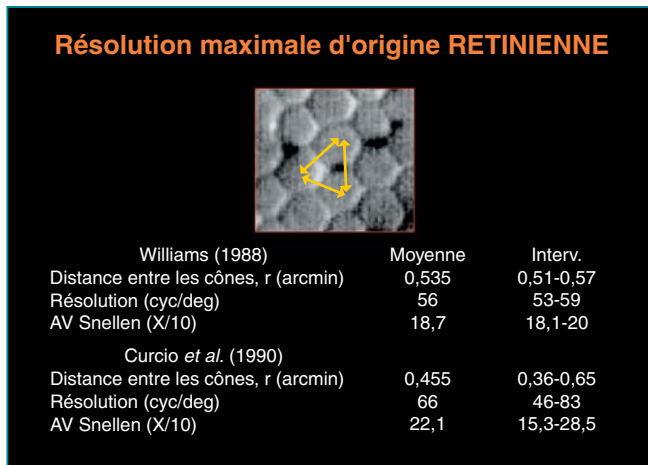


Fig. 5 : L'acuité visuelle est limitée par la capacité rétinienne d'échantillonnage, qui dépend en retour de la distance minimale entre les articles externes des photorécepteurs fovéolaires, estimée par deux auteurs, Williams (1988) et Curcio (1990). Il est intéressant de noter que la taille des photorécepteurs est parfaitement adaptée aux contraintes issues des lois de l'optique physique (a priori, l'augmentation de la densité des photorécepteurs n'aurait pas un effet majeur sur l'acuité visuelle théorique au regard du diamètre minimum imposé à la PSF par les dimensions de l'œil). (Illustration : D. Gatinel)

optotype correspondant à une résolution de 10/10 (1 minute d'arc, 30 cycles par degré).

Par ailleurs, l'utilisation de l'optique adaptative en imagerie rétinienne a permis d'explorer les mécanismes de la perception colorée par la mosaïque tri-chromatique des cônes fovéaux. La qualité des images rétiniennes obtenues par ces techniques a permis de réaliser des simulations lumineuses de longueur d'onde (couleur) variable pour un cône donné. Ces techniques ont également montré que les zones fovéolaires,

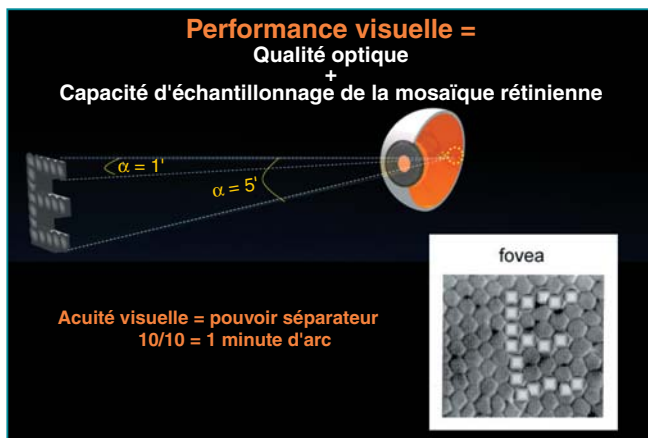


Fig. 6 : Projection rétinienne d'un optotype correspondant à la résolution maximale théorique d'un œil humain (10/10). Le diagramme en bas à droite représente la projection fovéale au niveau des photorécepteurs de la lettre E. (Illustration : D. Gatinel)

où la densité de cônes est maximale, ne sont pas toujours utilisées pour la fixation ! L'étude de ces fluctuations spatiales permet également d'étudier avec précision les micro-mouvements oculaires pendant la fixation.

2. – Bénéfices de la correction des aberrations optiques de haut degré pour la vision

La démonstration clinique des gains prédits par la correction des aberrations de haut degré a été apportée par l'équipe de Williams, qui a pu démontrer que par-delà la meilleure correction sphéro-cylindrique, la compensation des aberrations optiques de haut degré induit une augmentation de la résolution spatiale et de la sensibilité aux contrastes. Les bénéfices de cette correction étaient particulièrement évidents pour des diamètres pupillaires supérieurs à 4 mm (car en deçà, le taux d'aberrations optiques est relativement faible), et en lumière monochromatique (car en lumière blanche, la performance optique est réduite par les aberrations polychromatiques).

Ces résultats encourageants et la précision théorique de la photoablation cornéenne au laser Excimer ont jeté les bases de la chirurgie réfractive guidée par le front d'onde, faisant miroiter la promesse de supervision (acuité visuelle proche de 20/10) chez les patients opérés. Certaines limitations d'ordre physique et biologique ont tempéré ces espoirs initiaux, mais le recueil et l'analyse du front d'onde ont tout de même apporté un bénéfice en chirurgie réfractive en permettant d'optimiser la qualité des traitements délivrés.

Il existe des situations cliniques particulières où les aberrations optiques de haut degré augmentent et réduisent la meilleure acuité visuelle corrigée en lunettes. La distorsion géométrique, induite au niveau du mur cornéen par un kératocône avancé, d'un cristallin ou d'un implant pseudophaque décentré, a pour conséquence une distorsion du front d'onde oculaire. Les distorsions asymétriques ou périphériques (ex. : coma, aberration sphérique) ne peuvent être corrigées en lunettes ; de ce fait, l'image rétinienne élémentaire d'un point lumineux (PSF) se départit largement de la tache de diffraction idéale pour prendre une forme généralement ovale ou allongée. Le corollaire de cette anomalie optique est la présence de symptômes visuels à type d'image fantôme, de diplopie monoculaire, etc. (*fig. 7*). Ces symptômes sont liés à la stimulation trop étendue des cônes rétiniens, qui est également source de réduction de la sensibilité aux contrastes. En cas de doute sur l'origine optique de ces symptômes (ex. : présence d'une membrane épitrévitale débutante), le recours à un système performant d'optique adaptative permettra de trancher en

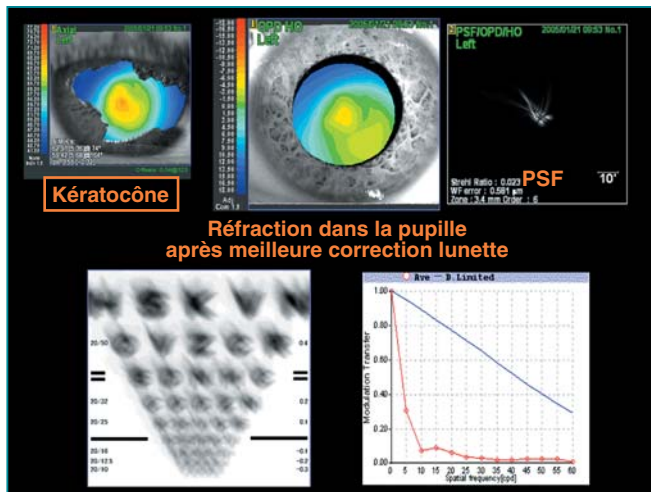


Fig. 7 : Distorsion optique majeure induite par un kératocône stade 4. L'acuité visuelle est limitée à 5/10 avec -13 (-3,50 x 175°). Le gradient de réfraction résiduel après correction de la sphère et du cylindre est de l'ordre d'une quinzaine de dioptries! La distorsion de l'image rétinienne du point est majeure, et entraîne une perte d'acuité visuelle maximale corrigée et de la sensibilité aux contrastes théoriques (courbe MTF) (examen recueilli avec l'aberromètre topographique l'OPD scan de Nidek).

confirmant (disparition des symptômes visuels après correction) ou infirmant (persistance) leur origine optique.

3. – Effet des aberrations optiques sur la perception visuelle

L'œil est avant tout un capteur de lumière, mais il existe un codage de l'information visuelle au niveau rétinien. L'optique adaptative a permis d'étudier les mécanismes d'adaptation du système neuro-visuel aux aberrations optiques, car elle offre non seulement la possibilité de corriger, mais également de moduler le taux d'aberrations optiques de haut degré. Cela permet de rechercher des effets potentiellement bénéfiques des aberrations optiques de haut degré (induction de multifocalité).

Si l'utilisation d'un miroir déformable permet de corriger des aberrations optiques, rappelons que ce dernier peut également permettre d'induire un pattern contrôlé d'aberrations. L'équipe d'Artal à l'Université de Murcia (Espagne) a réalisé une expérience intéressante en modifiant sélectivement non pas le taux, mais l'orientation de l'ensemble des aberrations optiques propres à différents sujets [6]. L'utilisation du miroir d'optique adaptative était conçue pour faire "tourner" l'ensemble des aberrations autour de leur axe, comme si l'on faisait tourner (sans en modifier la puissance) l'axe de l'astigmatisme, brouillant la vision d'un sujet par ailleurs corrigé pour toutes les autres aberrations.

En moyenne, la performance visuelle était meilleure quand l'axe des aberrations était proche de celui présent à l'état physiologique. Il est important de réaliser que dans cette expérience, la simple rotation du motif d'aberration n'induisait pas de variation quantitative pour la distorsion optique. Seul le caractère qualitatif était testé. Cette expérience révèle l'existence de mécanismes neuronaux qui influencent la qualité subjective de l'image perçue. Il existe certainement des mécanismes d'apprentissage dans le système neuro-visuel qui permettent de compenser, au moins partiellement, le flou visuel introduit par des aberrations optiques permanentes.

Ce type d'expérience peut être reproduit pour tester l'effet subjectif des différentes aberrations optiques de haut degré sur l'acuité visuelle et la sensibilité aux contrastes. Ces techniques peuvent également être mises à profit pour améliorer le design optique de dispositifs correcteurs comme les verres progressifs, dont les zones adjacentes aux couloirs de progression, en plus d'un astigmatisme régulier, génèrent des aberrations de haut degré.

4. – Multifocalité et compensation de la presbytie

Les méthodes proposées actuellement pour la compensation de la presbytie par la multifocalité reposent sur des principes empiriques et/ou non personnalisés (ex. : photoablations multizones séquentielles, lentilles multifocales réfractives à géométrie purement concentrique). Ces méthodes ne tiennent pas ou peu compte des caractéristiques particulières de l'œil humain (jeu pupillaire, variabilité de la plasticité cérébrale), possèdent une faible reproductibilité et exposent au risque d'une augmentation incontrôlée des aberrations de haut degré. Nous avons conçu et récemment breveté une méthode de compensation de la presbytie dont le principe repose sur l'induction d'un taux contrôlé d'aberrations de haut degré au niveau du front d'onde oculaire¹. Comme dans l'expérience d'Artal *et al.* rapportée précédemment, l'optique adaptative y offre la possibilité de tester auprès d'un patient différents motifs et puissances de corrections multifocales avant réalisation définitive d'une lentille, d'un implant ou d'un traitement photoablatif multifocal personnalisé.

5. – Optique adaptative et traitements par laser cornéen ou cristallinien

La taille du spot de focalisation des lasers femtoseconde actuellement disponibles en ophtalmologie (quelques

¹ United States Patent 20060023162.

microns) ne permet pas la réalisation de traitements à visée optique et réfractive, qui requièrent la précision submicroscopique que seuls offrent les lasers Excimer. La réduction de la taille des spots est par ailleurs intéressante car elle permet de réduire l'énergie délivrée pour chaque impact, et ainsi d'accroître la tolérance clinique des découpes stromales au laser femtoseconde. Le diamètre des spots de ces lasers est en partie conditionné par l'existence d'aberrations optiques induites par l'assemblage des différents composants optiques du système de délivrance femtoseconde. L'implémentation de dispositifs correcteurs d'optique adaptative au sein de ces systèmes est actuellement à l'étude.

■ CONCLUSION

L'optique adaptative offre de riches perspectives. Sa portée scientifique dépasse la simple correction des aberrations optiques

de haut degré. De par la souplesse qu'elle autorise dans la réalisation de motifs particuliers de corrections ou d'induction d'aberration, l'optique adaptative intéresse l'ensemble des domaines où l'étude des mécanismes optiques et physiologiques liés à la perception visuelle occupe une place de choix. ■

Bibliographie

1. YOUNG T. On the mechanism of the eye. *Phil Trans R Soc London*, 1801 ; 91 : 23-8.
2. SMIRNOV MS. Measurement of the wave aberration of the human eye. *Biophysics*, 1961 ; 6 : 697-703.
3. WALSH G, CHARMAN WN, HOWLAND HC. Objective technique for the determination of monochromatic aberrations of the human eye. *J Opt Soc Am A*, 1984 ; 1 : 987-92.
4. BABCOCK HW. The possibility of compensating astronomical seeing. *Pub Astr Soc Pac*, 1953 ; 65 : 229-36.
5. LIANG J, WILLIAMS DR, MILLER DT. Supernormal vision and high-resolution retinal imaging through adaptive optics. *J Opt Soc Am A*, 1997 ; 14 : 2 884-92.
6. ARTAL P, CHEN L, FERNANDEZ EJ, SINGER B, MANZANERA S, WILLIAMS DR. Neural compensation for the eye's optical aberrations. *J Vis*, 2004 ; 4 : 281-7.