

# Étude de la distribution et de l'énantiomorphisme des aberrations optiques oculaires de haut degré

D. Gatinel (1, 2, 3), E. Delair (1, 2, 4), H. Abi-Farah (1, 2), T. Hoang-Xuan (1, 2)

(1) Service d'Ophtalmologie, Fondation Ophtalmologique Adolphe de Rothschild, Paris.

(2) Service d'Ophtalmologie, Hôpital Bichat Claude-Bernard, Paris.

(3) Laboratoire de Statistiques Théoriques Appliquées, Université Pierre et Marie, Paris.

(4) Service d'Ophtalmologie, Hôpital Cochin, Paris.

Correspondance : D. Gatinel, Service d'Ophtalmologie, Fondation ophtalmologique Adolphe de Rothschild, 25, rue Manin, 75019 Paris.

E-mail : gatinel@aol.com

Reçu le 1<sup>er</sup> juillet 2004. Accepté le 30 août 2005.

## Distribution and enantiomorphism of higher-order ocular optical aberrations

## INTRODUCTION

D. Gatinel, E. Delair, H. Abi-Farah, T. Hoang-Xuan

*J. Fr. Ophtalmol., 2005; 28, 10: 1041-1050*

**Purpose:** To characterize and investigate the higher-order optical aberrations (HOAs) and their distribution and symmetry between both eyes (enantiomorphism).

**Patients and methods:** Wave-front measurements were taken using Hartmann-Shack aberrometry and Zernike polynomial terms reconstruction of the total ocular wave front. Optical aberrations were quantitatively analyzed using the RMS (root mean square) Zernike coefficient term value. Symmetry between both eyes was assessed for each aberration according to two criteria: the RMS coefficient value and aberration magnitude.

**Results:** Sixty patients were included in the study. The HOAs presenting the highest magnitude were fourth-order spherical aberration (Z40;  $M=0.3038 \mu\text{m}$ ), primary coma (Z31; magnitude  $M=0.2285 \mu\text{m}$ ) and trefoil (Z33;  $M=0.1870 \mu\text{m}$ ). A significant mirror symmetry between both eyes was present for high-order aberration orientations. Considering the magnitude of each aberration, symmetry was present in seven of eight aberrations (all but primary coma). HOAs were higher for ametropes than emmetropes. The hyperopic eyes had more spherical aberrations than myopic and emmetropic eyes.

**Conclusion:** Symmetry between the right and left eye is a less common characteristic of HOAs. The difference in the mean age of the studied population may account for the differences in the total high-order and spherical aberration levels found in our study.

**Key-words:** High-order optical aberrations, enantiomorphism, Shack-Hartmann aberrometry, refraction, pupil, Zernike polynomials.

## Étude de la distribution et de l'énantiomorphisme des aberrations optiques oculaires de haut degré

**Buts :** Le but de cette étude est d'analyser la distribution des aberrations optiques de haut degré (AHD) chez des sujets emmétropes, myopes ou hypermétropes et de rechercher une symétrie entre les deux yeux (énantiomorphisme), en fonction du type d'amétropie sphérique associé.

**Patients et méthodes :** Le front d'onde oculaire total a été recueilli pour les yeux droits et gauches de patients emmétropes, myopes et hypermétropes à l'aide d'un aberromètre de type Hartmann-Shack. Le front d'onde a été décomposé en polynômes de Zernike. La distribution des aberrations a été étudiée en comparant les valeurs des coefficients Root Mean Square (RMS). La symétrie entre les deux yeux a été évaluée par un test de Student apparié selon deux critères : la valeur du coefficient RMS du terme de Zernike et la magnitude (M) de l'aberration correspondante à la combinaison des polynômes de même ordre radial, mais de fréquence azimutale opposée.

**Résultats :** Soixante patients ont été inclus. Les AHD présentant la magnitude la plus élevée dans cette population étaient les aberrations sphériques de 4<sup>e</sup> ordre (Z40 ;  $M = 0,3038 \mu\text{m}$ ), le coma (Z31 ;  $M = 0,2285 \mu\text{m}$ ) et l'astigmatisme triangulaire trefoil (Z33 ;  $M = 0,1870 \mu\text{m}$ ). Lorsque l'énantiomorphisme des aberrations de haut degré était évalué selon la valeur des coefficients RMS des polynômes de Zernike, on trouvait une symétrie pour 12 polynômes sur 15.

Le passage d'une conception géométrique à une conception ondulatoire de la lumière a favorisé le développement de nouveaux moyens d'explorations de la qualité optique d'instruments tels que les télescopes, les interféromètres ou l'œil humain. Parmi ces nouveaux instruments, les aberromètres permettent un recueil et une analyse du front d'onde propagé à l'intérieur de l'œil. L'image d'une source lumineuse ponctuelle n'est plus représentée comme un faisceau de rayons lumineux rectiligne incident, mais comme un front d'onde se propageant et se déformant lorsqu'il traverse des milieux d'indices différents. Les aberrations optiques responsables de la déformation du front d'onde peuvent être séparées en aberrations de bas degré (comme le défocus et l'astigmatisme) et de haut degré. Les aberrations optiques de bas degré (défocus et astigmatisme) sont les seules à être corrigibles de façon conventionnelle par des lunettes ou des lentilles afin de restituer une bonne acuité visuelle non corrigée aux sujets présentant une amétropie sphéro-cylindrique isolée. Toutefois, la mesure de l'acuité visuelle à contraste maximal n'est qu'un des éléments de l'étude de la qualité de vision de l'œil humain, qui comporte également la réalisation d'examen comme la sensibilité aux

Lorsque la symétrie était évaluée en fonction de la magnitude des aberrations, elle était trouvée pour 7 aberrations sur 8. Seul le coma primaire ne présentait pas de symétrie « de magnitude ». Seulement trois aberrations orientées (coma primaire Z31, coma secondaire Z51 et l'astigmatisme secondaire Z42) sur 7 présentaient une symétrie en miroir au niveau de leur axe. Globalement, seulement deux aberrations orientées (Z42 et Z51) sur 7 présentaient une symétrie simultanément dans les trois paramètres étudiés (valeur du coefficient RMS, magnitude et axe). Les sujets hypermétropes présentaient un taux plus élevé d'aberration sphérique que les sujets myopes et hypermétropes.

**Conclusion :** L'existence d'une symétrie en miroir entre les yeux droit et gauche est plus fréquemment retrouvée pour les aberrations optiques de haut degré. La différence d'âge moyen entre les populations étudiées pourrait expliquer les différences de taux d'AHD d'aberration sphérique.

**Mots-clés :** Aberrations optiques de haut degré, énantiomorphisme, aberrométrie Shack-Hartmann, réfraction, pupille, polynômes de Zernike.

contrastes et le calcul d'indices objectifs comme le ratio de Strehl ou la mesure des fonctions d'étalement du point (FEP) et de transfert de modulation. Les résultats fournis par ces moyens d'explorations sont étroitement corrélés à la présence et à la magnitude des aberrations optiques monochromatiques [1].

L'étude des aberrations optiques de haut degré fait ainsi actuellement l'objet d'un intérêt croissant avec le développement des techniques de traitement laser personnalisé et la place de plus en plus importante accordée à l'étude de la qualité de la vision après les procédures de chirurgie réfractive [2]. Les aberrations optiques monochromatiques mesurées par les aberromètres correspondent à l'ensemble des déphasages infligés par les différents milieux oculaires au front d'onde. Recueilli à la sortie d'un œil dépourvu d'aberrations optiques, ce front d'onde est théoriquement plan (absence de déphasage). L'existence d'une déformation du front d'onde de référence traduit l'existence d'aberrations optiques (par exemple coma, astigmatisme triangulaire ou trefoil, aberrations sphériques...).

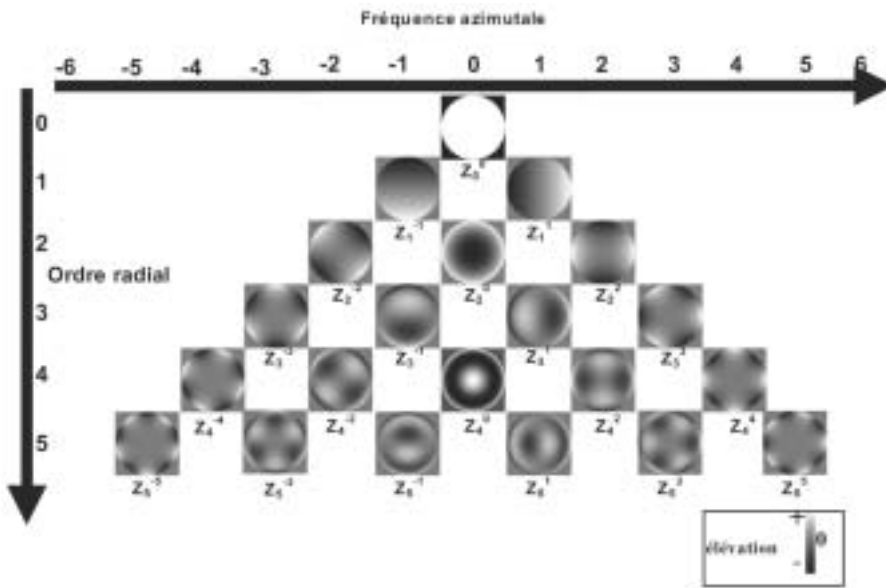
Le front d'onde peut ainsi être décomposé pour l'analyse clinique en une somme de surfaces élémentaires qui correspondent le plus souvent aux polynômes de Zernike car ceux-ci correspondent (pour les premiers d'entre eux) à des aberrations optiques familières pour le clinicien (défocus, astigmatisme, coma...) (fig. 1). Chaque polynôme est pondéré par un coefficient RMS (*Root Mean Square*) qui correspond à l'écart quadratique moyen, c'est-à-dire la racine carrée de la somme des carrés des écarts au front d'onde de référence. Les aberrations optiques non orientées avec symétrie de révolution sont décrites par un unique polynôme de fréquence azimutale nulle (ex : aberration sphérique correspondant au polynôme  $Z_4^0$  pondéré par le coefficient  $C_4^0$ ). Les aberrations orientées avec absence de symétrie de révolution sont décrites par une paire de polynômes de fréquence azimutale non nulle et de signe opposé (ex : coma qui correspond à la combinaison des polynômes  $Z_3^1$  et  $Z_3^{-1}$  pondérés respectivement par les coefficients  $C_3^1$  et  $C_3^{-1}$ ) (fig. 2).

L'amplitude reflète l'importance de la contribution de l'aberration considérée dans la déformation du front d'onde (fig. 3). Elle s'exprime en microns. L'amplitude d'une aberration non orientée ( $Z_n^0$ ) est directement proportionnelle à la valeur absolue du coefficient du terme de Zernike qui la pondère ( $|C_n^0|$ ). L'amplitude d'une aberration orientée ( $Z_n^{\pm m}$ ) est égale à la racine carrée de

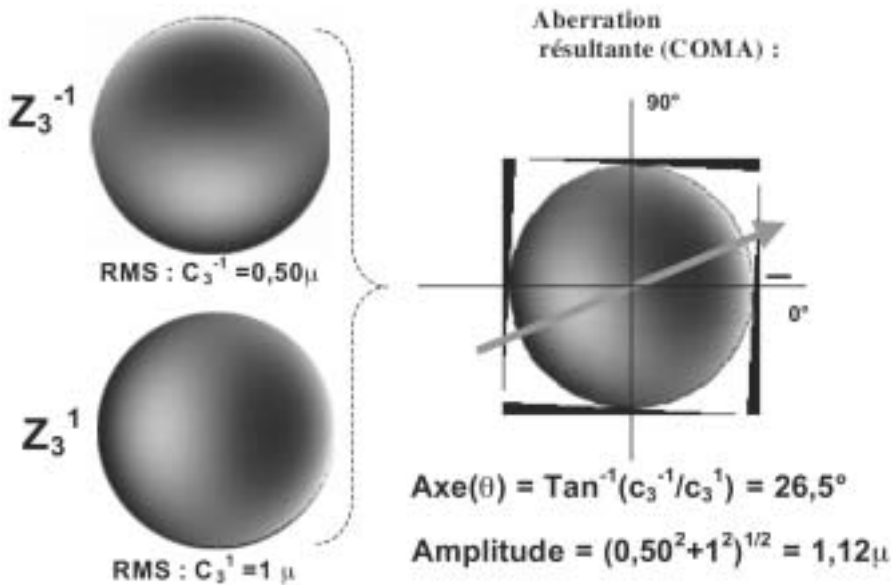
la somme des carrés des deux coefficients de Zernike ( $(C_n^m)^2 + (C_n^{-m})^2$ )<sup>1/2</sup> qui la pondère. Cette représentation (amplitude et axe) semble plus cliniquement pertinente que la combinaison des deux termes de Zernike à partir desquels il est difficile de deviner l'importance et l'orientation résultante de l'aberration considérée. L'utilisation de ce type de représentation a été suggérée par Campbell [3].

En pratique, on retrouve chez les sujets emmétropes et amétropes (mais indemnes de toute affection oculaire et sans antécédents chirurgicaux) un taux faible d'aberrations de haut degré. La frontière entre les taux considérés comme physiologiques et pathologiques n'est pas définie avec précision à ce jour. Le diamètre pupillaire utilisé pour la mesure du front d'onde influence fortement la valeur des coefficients RMS [2, 4]. Si l'induction d'un taux élevé d'aberrations optiques de haut degré (chirurgie réfractive cornéenne, kératocône) est responsable d'une dégradation de la qualité de vision, leur effet à taux modérés pourrait être bénéfique par le biais d'une augmentation de la profondeur de champ ou la réduction des aberrations de chromaticité [5, 6]. Si l'effet sur l'acuité visuelle à taux égal des aberrations diffère selon leur type [7], le recueil et l'analyse du front d'onde permettraient de prédire la réfraction subjective avec précision [8]. Une étude récente n'a pas mis en évidence de différence significative pour l'analyse des aberrations optiques de haut degré chez les sujets ayant une acuité visuelle non corrigée supérieure ou égale à 12/10<sup>e</sup> et les sujets amétropes sans autre anomalie ophtalmologique [9].

Le taux d'aberrations optiques de haut degré ne semble pas corrélé avec le type d'amétropie sphéro-cylindrique selon Cheng *et al.* [10] alors que Paquin *et al.* [11] ont trouvé un taux d'aberrations optiques proportionnel à l'équivalent sphérique dans une population de sujets myopes. Ces aberrations correspondent aux déformations infligées par les principales lentilles réfractives de l'œil (cornée et cristallin) et peuvent ainsi être assimilées à une sorte d'« empreinte » laissée par ces structures sur le front d'onde oculaire. Ainsi, l'existence d'une symétrie au niveau du front d'onde des yeux droit et gauche d'un même individu témoigne indirectement de l'existence d'un certain degré de symétrie anatomique. L'énantiomorphisme correspond en particulier à une symétrie en miroir par rapport à un axe médian vertical des parties droite et gauche du corps. En l'absence de pathologie oculaire, un certain degré d'énantiomorphisme



$\frac{1}{2}$



**Figure 1 :** Représentation des polynômes de Zernike en niveau de gris (zone claire : déphasage positif, avances de phase ; zones foncées : déphasage négatif, retard de phase). Le tableau périodique des polynômes de Zernike est constitué d'une pyramide où chaque rangée correspond à un ordre radial et chaque colonne un ordre azimutal. La colonne centrale de la pyramide correspond aux polynômes décrivant les aberrations non orientées. De part et d'autre, se répartissent de façon symétrique les polynômes permettant le calcul de l'amplitude et de l'axe des aberrations orientées.

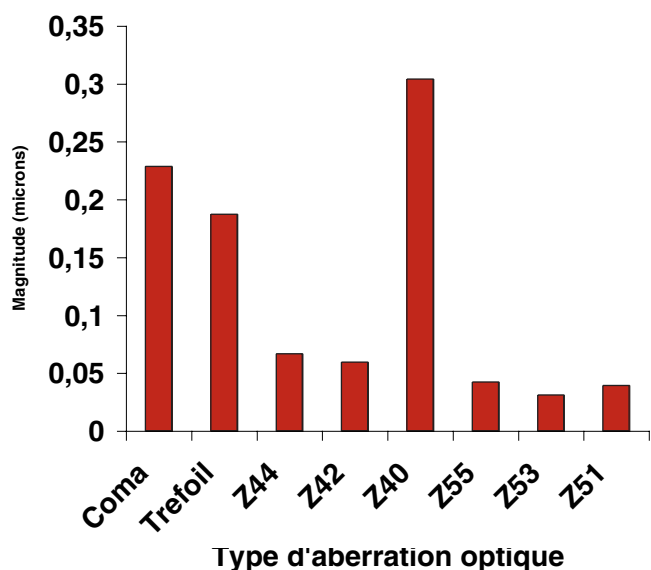
**Figure 2 :** Calcul de l'amplitude et de l'axe d'une aberration orientée (coma) à partir des termes de Zernike correspondants. Le calcul de l'amplitude et de l'axe d'une aberration orientée (coma) est effectué à partir des coefficients pondérant les termes de Zernike correspondants. Il est analogue au calcul de la norme et de la direction d'un vecteur à partir de vecteurs unitaires. Il permet d'obtenir l'axe (orientation spatiale) et l'amplitude (importance du déphasage induit) de l'aberration.

existe au niveau de certaines caractéristiques des yeux d'un même patient (couleur de l'iris, position et diamètre de la pupille, kératométrie moyenne, diamètre pupillaire, longueur axiale...).

Peu d'études ont cherché à évaluer le degré de symétrie des aberrations optiques de haut degré. Pour les aberrations non orientées et représentées par un terme de Zernike de fréquence spatiale nulle ( $Z_2^0, Z_4^0, \dots$ ), l'existence d'une symétrie peut être appréciée par la recherche d'une corrélation entre les valeurs de termes de Zernike leur correspondant. Pour les aberrations orientées et décrites par la combinaison de deux polynômes de même ordre radial, mais de fréquence azimutale

opposée, une symétrie (valeurs statistiquement proches) entre l'œil droit et gauche d'un même patient pour l'ensemble des polynômes de Zernike refléterait l'absence d'énantiomorphisme (symétrie en miroir), mais la parfaite similitude des fronts d'ondes droit et gauche (front d'onde directement superposable). En cas d'énantiomorphisme, les coefficients de Zernike seront égaux en signe et en magnitude pour les modes ayant une symétrie paire autour de l'axe vertical (ex :  $Z_2^{+2}$ ) alors que les modes ayant une symétrie impaire auront des coefficients de même magnitude, mais de signe opposé.

Pour une aberration donnée, une symétrie d'amplitude isolée correspond à une valeur statistiquement proche



**Figure 3** : Amplitude des aberrations optiques de haut degré dans la population totale étudiée. L'aberration sphérique est l'aberration dont le taux est le plus élevé.

entre l'œil droit et l'œil gauche de la magnitude calculée d'une aberration donnée, indépendamment de son orientation spatiale.

Le but de notre étude était d'analyser la distribution des aberrations optiques de haut degré dans la population étudiée, de mettre en évidence une éventuelle symétrie entre les deux yeux et de comparer le taux de ces aberrations dans des sous-groupes composés en fonction du type d'amétropie associé (emmétropie, myopie, hypermétropie). Le recueil et l'analyse de ces données pourraient contribuer à une meilleure définition du seuil pathologique correspondant à l'élévation d'un type d'aberration de haut degré, dans les conditions de mesure de notre étude.

## PATIENTS ET MÉTHODES

Les patients inclus dans cette étude ont été répartis en trois groupes en fonction du type d'amétropie sphérique (myopie, hypermétropie, emmétropie). L'amétropie cylindrique devait être inférieure à 0,75 D pour permettre l'inclusion. Les patients présentant une amétropie étaient candidats à une chirurgie réfractive tandis que les patients emmétropes ayant servi de témoins ont été recrutés au sein du personnel médical et paramédical de la Fondation Ophtalmologique A. de Rothschild. Ils ne devaient présenter aucun antécédent pathologique ophtalmologique, en particulier aucun signe fonctionnel ou biomicroscopique de sécheresse oculaire. L'ensemble des patients inclus dans l'étude était ainsi

exempt de toute chirurgie ophtalmologique et ne présentait aucune pathologie cornéenne, cristallinienne ou rétinienne.

Pour chaque patient ou témoin, l'examen ophtalmologique comportait une mesure de l'acuité visuelle avec et sans correction, un examen de la réfraction subjective sous skiacol, un examen à la lampe à fente, une topographie cornéenne (Orbscan<sup>®</sup>, Bausch & Lomb), une analyse du front d'onde recueilli par un aberromètre de type Hartmann-Shack (Zywave<sup>®</sup>, Bausch & Lomb). Les mesures du front d'onde ont été effectuées à deux reprises sur les deux yeux, sur des pupilles dilatées par instillation d'une goutte de tropicamide (sauf pour les individus emmétropes pour lesquels la mesure a été effectuée sans dilatation préalable en ambiance scotopique pour obtenir un diamètre pupillaire supérieur ou égal à 6 mm). Les mesures aberrométriques ont été faites au moins 20 minutes après l'instillation de la première goutte de tropicamide. L'aberrromètre utilisé effectue automatiquement cinq mesures et garde les trois meilleures, à partir desquelles une moyenne est calculée pour établir les valeurs des coefficients RMS de chaque polynôme. Les sujets emmétropes dont le diamètre pupillaire était inférieur à 6 mm en ambiance scotopique n'ont pas été inclus.

Parmi les nombreux paramètres que le recueil et l'analyse du front d'onde fournissent, seules les données permettant une analyse quantitative ont été retenues, à savoir, le taux d'aberrations optiques totales (coefficient RMS-total), le taux global d'aberrations optiques de haut degré (coefficient RMS-HO), le coefficient RMS de chaque type d'aberration de haut degré et le diamètre pupillaire au cours de la mesure. La valeur du coefficient RMS étant corrélée au diamètre pupillaire au cours de la mesure, les chiffres fournis par l'aberrromètre ont été calculés pour un diamètre pupillaire de 6 mm en excluant les données recueillies au-delà de ce diamètre pour le calcul de décomposition du front d'onde.

L'analyse du recueil du front d'onde a été limitée aux aberrations optiques de degré 3, 4 et 5.

## Calcul de la magnitude et de l'orientation des aberrations

Afin de déceler la présence d'un certain degré de symétrie entre les deux yeux, nous avons reformulé selon la méthode décrite par Campbell [3] l'expression du front d'onde oculaire à partir des polynômes de Zernike de façon à ce que chaque type d'aberration de haut degré soit défini par deux caractéristiques :

- la magnitude, représentée par la résultante des coefficients RMS —  $C_n^m$  et  $C_n^{-m}$  — des deux polynômes correspondant (respectivement  $Z_n^m$  et  $Z_n^{-m}$ ) à la même aberration notée  $Z_n^{-m}$  (c'est-à-dire présentant le même index radial  $n$  et des fréquences azimuthales  $m$  et  $-m$  identiques en valeur absolue, mais de signe opposé). Elle a été calculée en utilisant la formule suivante :

$$(1) \text{ Magnitude} = \sqrt{(C_n^m)^2 + (C_n^{-m})^2}.$$

Lorsque  $m$  était égal à zéro (ex : aberration sphérique  $Z_4^0$ ), la magnitude était égale à la valeur absolue du coefficient RMS (aberration présentant une symétrie de révolution) ;

– l'axe, représentant l'orientation dans un espace bi-dimensionnel. Il est calculé en utilisant la formule :

$$(2) \text{ Axe (degré)} = \left( \text{ArcTangente} \frac{C_n^{-m}}{C_n^m} \times \frac{180}{\pi} \right) \times \frac{1}{m}$$

avec :  $C_n^m$  : coefficient RMS du polynôme  $Z_n^m$  ;  $C_n^{-m}$  : coefficient RMS du polynôme  $Z_n^{-m}$  ;  $m$  : fréquence azimutale du couple de polynômes considéré : elle correspond au nombre d'axes d'invariance par révolution du polynôme  $Z_n^{\pm m}$ .

### Évaluation de la symétrie entre les deux yeux

Plusieurs études portant sur l'étude de la distribution des aberrations optiques dans la population générale ont montré l'existence d'une distribution gaussienne des coefficients de Zernike. Ces distributions sont centrées sur 0, sauf l'aberration sphérique  $Z_4^0$  dont la valeur moyenne est légèrement négative [12, 13]. L'analyse d'une symétrie d'orientation des aberrations de haut degré à partir de l'axe relève de l'étude statistique des données directionnelles et n'est possible de façon conventionnelle qu'en utilisant une décomposition vectorielle de données orientées (équivalent à la décomposition en termes de Zernike d'une aberration donnée).

Le degré de symétrie entre les deux yeux a été évalué pour l'ensemble des patients inclus dans cette étude selon deux critères. Le premier correspondait à la symétrie en miroir (énantiomorphisme). Il a été estimé en représentant sur deux graphiques séparés les modes de Zernike à symétrie paire et les modes de Zernike à symétrie impaire correspondant aux yeux droit et gauche, puis à calculer le coefficient de corrélation de Pearson.

Le second critère correspondait à la recherche d'une symétrie pour l'amplitude de l'aberration considérée. Il a été effectué par un test de Student bilatéral apparié entre l'amplitude de l'aberration calculée par l'équation (1).

### Recherche de différences entre les trois groupes (emmétropes, myopes, hypermétropes)

Dans chacun des trois groupes étudiés, la moyenne et l'écart type des coefficients RMS de chaque polynôme de Zernike ainsi que la magnitude des aberrations résultantes pour chaque type d'aberration de haut degré telles définies par Campbell [3] ont été calculés et comparés.

Les différences éventuelles entre les trois groupes étudiés ont été analysées en utilisant un test statistique de Student, bilatéral, non apparié. Une différence significative était retenue pour une valeur de  $p < 0,05$ .

## RÉSULTATS

Soixante patients ont été inclus et répartis en trois groupes (myopes, hypermétropes, emmétropes) (tableau I).

La valeur absolue de l'équivalent sphérique moyen ne présentait pas de différence significative entre les deux groupes de patients amétropes (myopes et hypermétropes).

Le diamètre pupillaire lors de l'acquisition était significativement plus petit chez les sujets emmétropes par rapport aux deux autres groupes ( $p < 0,001$ ), les mesures ayant été pratiquées sans dilatation dans ce groupe (dilatation naturelle en ambiance scotopique).

Les patients hypermétropes étaient significativement plus âgés que les patients des deux autres groupes ( $p < 0,001$ ) car une bonne partie de ces patients consultait pour une éventuelle chirurgie de la presbytie associée. La différence d'âge était également significative

1045

**Tableau I**

Caractéristiques générales de la population étudiée.

	Nombre	Âge moyen	Sexe M/F	Équivalent sphérique moyen (D) [min ; max]	Cylindre moyen [min ; max]	Diamètre pupillaire (mm)
Emmétropes	18	27,7	2/16	0	0	6,63*
Myopes	23	33,5	7/16	- 3,23 [- 1 ; - 6,5]	- 0,29 [0 ; - 0,75]	7,54**
Hypermétropes	19	46,5	7/12	+ 3,47 [+ 1 ; + 6,5]	- 0,35 [0 ; - 0,75]	7,20**
Total	60	35,9	16/44	-	-	7,12**

\* Diamètre pupillaire mesuré en ambiance scotopique ; \*\* diamètre pupillaire mesuré au moins 20 min après instillation d'une goutte de tropicamide.

entre le groupe des sujets myopes et celui des sujets emmétropes.

### Distribution générale des aberrations optiques de haut degré

Les moyennes et les écarts types des coefficients RMS attribués à chaque polynôme de Zernike sont résumés dans le *tableau II*.

Les moyennes absolues des aberrations diminuaient quand l'ordre radial des aberrations augmentait : elles étaient plus importantes au niveau des aberrations de 3<sup>e</sup> ordre et diminuaient pour les aberrations de 4<sup>e</sup> ordre, excepté pour l'aberration sphérique  $Z_4^0$ , et diminuaient encore pour les aberrations de 5<sup>e</sup> ordre.

Les magnitudes des différentes aberrations optiques étudiées sont représentées sur la *figure 1*.

Les aberrations optiques de haut degré présentant la plus grande magnitude étaient par ordre décroissant : l'aberration sphérique de 4<sup>e</sup> ordre ( $Z_4^0$  ;  $M = 0,3038 \mu\text{m}$ ), le coma ( $Z_3^1$  ; magnitude  $M = 0,2285 \mu\text{m}$ ), puis l'astigmatisme triangulaire ou trefoil ( $Z_3^3$  ;  $M = 0,1870 \mu\text{m}$ ). Les autres aberrations étaient quantitativement moins importantes et présentaient une magnitude moindre.

### Symétrie entre les deux yeux (*tableau III*)

Lorsque la symétrie était évaluée en fonction de la magnitude des aberrations (sans prise en compte de l'orientation), elle était retrouvée pour 7 aberrations sur 8 (*tableau IV*). Seul le coma ne présentait pas de symétrie « de magnitude » ( $p = 0,0094$ ).

Les *figures 4a et 4b* représentent les corrélations entre les aberrations de haut degré ( $n > 2$ ) entre les deux yeux. Un degré de symétrie en miroir a été constaté pour les aberrations optiques, même si une partie de leur variance échappe à cette corrélation. Les coefficients de corrélations de Pearson respectifs des aberrations paires et impaires étaient de 0,70 et  $-0,54$ .

### Différences entre les trois groupes (*tableau IV*)

La comparaison du taux global d'aberrations optiques de haut degré a montré l'existence de différences significatives entre les trois groupes de patients. Les patients emmétropes présentaient un moindre taux global d'aberrations de haut degré que les patients myopes ou hypermétropes (respectivement, 0,3657 ; 0,4309 et 0,4947  $\mu\text{m}$ , avec  $p = 0,04$  entre sujets myopes et sujets emmétropes et  $p = 0,0001$  entre sujets hypermétropes et sujets emmétropes). Il n'existait en revanche aucune différence significative entre les sujets myopes et les sujets hypermétropes.

En analysant séparément chaque type d'aberration, on ne retrouvait pas de différence significative entre les trois groupes étudiés, sauf pour l'aberration sphérique  $Z_4^0$ .

La magnitude de cette aberration était respectivement de  $-0,1744$  ;  $-0,2782$  et  $-0,4538 \mu\text{m}$  pour le groupe

**Tableau II**

Moyenne des coefficients RMS (en  $\mu\text{m}$ ) correspondant à chaque polynôme de Zernike pour les 60 patients inclus dans l'étude.

Polynôme de Zernike	Moyenne (ET)	Min à max
$Z_3^{-1}$	$-0,0044 (0,20)$	$-0,57 \text{ à } 0,47$
$Z_3^1$	$-0,0464 (0,16)$	$-0,46 \text{ à } 0,32$
$Z_3^{-3}$	$0,0044 (0,13)$	$-0,29 \text{ à } 0,33$
$Z_3^3$	$0,1091 (0,13)$	$-0,15 \text{ à } 0,41$
$Z_4^{-4}$	$-0,0145 (0,06)$	$-0,22 \text{ à } 0,10$
$Z_4^4$	$0,0044 (0,05)$	$-0,13 \text{ à } 0,14$
$Z_4^{-2}$	$-0,0086 (0,06)$	$-0,20 \text{ à } 0,11$
$Z_4^2$	$0,0034 (0,03)$	$-0,08 \text{ à } 0,08$
$Z_4^0$	$-0,2032 (0,18)$	$-0,91 \text{ à } 0,12$
$Z_5^{-5}$	$0,0004 (0,04)$	$-0,13 \text{ à } 0,09$
$Z_5^5$	$-0,0052 (0,03)$	$-0,08 \text{ à } 0,08$
$Z_5^{-3}$	$0,0010 (0,03)$	$-0,11 \text{ à } 0,07$
$Z_5^3$	$0,0001 (0,02)$	$-0,06 \text{ à } 0,07$
$Z_5^{-1}$	$0,0042 (0,03)$	$-0,09 \text{ à } 0,10$
$Z_5^1$	$-0,0056 (0,02)$	$-0,08 \text{ à } 0,07$

ET : écart type.

**Tableau III**

Comparaison des amplitudes de chaque aberration entre les deux yeux de chaque patient : résultats du test de Student bilatéral et apparié.

Polynôme de Zernike	Valeur de p
$Z_3^{-1}$ (coma X)	0,2355
$Z_3^3$ (trefoil Y)	0,3638
$Z_4^4$	0,4385
$Z_4^2$	0,1812
$Z_4^0$	0,1202
$Z_5^5$	0,3367
$Z_5^3$	0,1136
$Z_5^1$	0,6651

\* Différence significative entre les deux yeux pour  $p < 0,05$ .

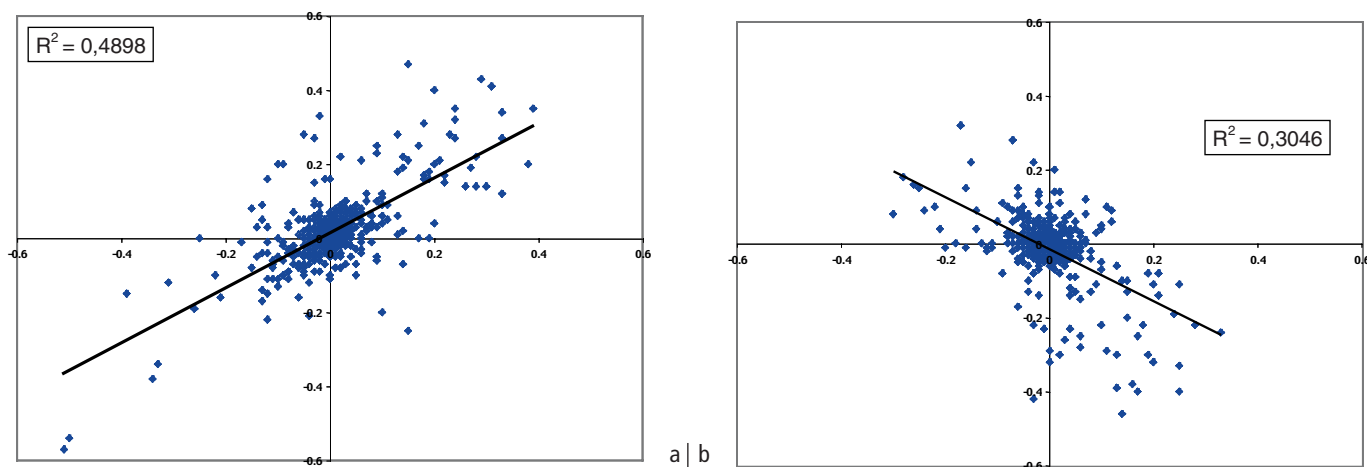
des sujets emmétropes, des sujets myopes et des sujets hypermétropes. Cette différence de magnitude était significative ( $p < 0,05$ ) entre sujets myopes et sujets emmétropes et hautement significative ( $p < 0,0001$ ) entre sujets hypermétropes et sujets myopes d'une part et sujets hypermétropes et sujets emmétropes d'autre part.

La *figure 5* représente la répartition des aberrations optiques de haut degré au sein de ces trois groupes.

**Tableau IV**Moyenne des coefficients RMS ou magnitude moyenne (en  $\mu\text{m}$ ) des différentes aberrations optiques de haut degré en fonction des groupes étudiés.

	Emmétropes		Myopes		Hypermétropes	
	Moyenne	Écart type	Moyenne	Écart type	Moyenne	Écart type
Z total *	0,7571	0,34	5,0682	2,36	3,8373	2,09
HO *	0,3657	0,11	0,4309	0,20	0,4947	0,13
Coma	0,2046	0,13	0,2285	0,14	0,2507	0,13
Trefoil	0,1912	0,08	0,1867	0,10	0,1836	0,10
Z44	0,0616	0,03	0,0656	0,04	0,0719	0,04
Z42	0,0580	0,02	0,0535	0,03	0,0672	0,04
Z40 *	0,1744	0,13	0,2782	0,25	0,4538	0,18
Z55	0,0408	0,03	0,0431	0,02	0,0424	0,03
Z53	0,0324	0,02	0,0319	0,02	0,0280	0,02
Z51	0,0397	0,02	0,0390	0,02	0,0389	0,02

Z total : valeur globale des coefficient RMS de tous les polynômes de Zernike réunis. HO : valeur des coefficients RMS limités aux aberrations optiques de hauts degrés (3, 4 et 5). \* : différence significative ( $p < 0,05$ )tre deux groupes de patients, concernant la magnitude moyenne de l'aberration considérée.



1047

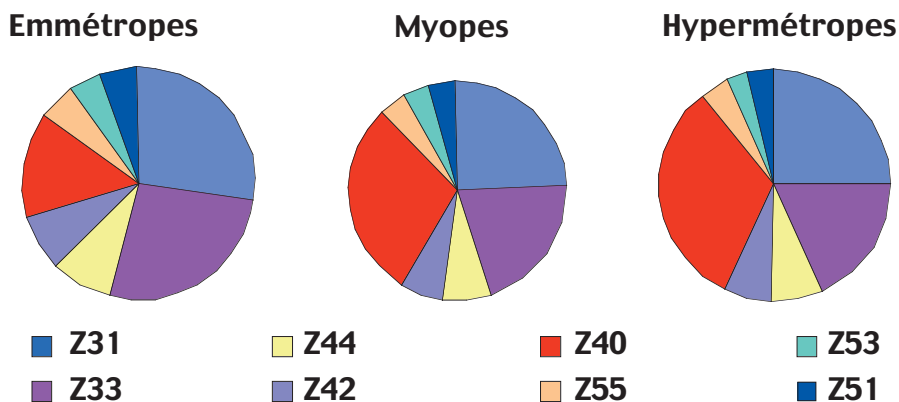
**Figure 4** : Corrélation des aberrations optiques entre les yeux droits et gauches. Chaque symbole correspond à la magnitude du coefficient RMS d'un mode donné pour l'œil droit et l'œil gauche d'un patient donné. En cas de parfaite symétrie de miroir, les symboles doivent se situer sur la droite médiane ascendante ( $y = x$ ) pour les aberrations à symétrie paire autour de l'axe vertical (a) et sur la droite médiane descendante ( $y = -x$ ) pour les aberrations à symétrie impaire autour de l'axe vertical (b).

## DISCUSSION

L'analyse de ces résultats permet de considérer le caractère énantiomorphe des aberrations optiques de haut degré comme un phénomène fréquent dans les populations emmétrope et amétrope.

Les données actuelles de la littérature évaluant le degré de symétrie en miroir des aberrations optiques de haut degré sont peu nombreuses. Porter *et al.* [14], en calculant le coefficient de corrélation entre les deux yeux de 109 patients, pour chaque polynôme de Zer-

nike (en prenant les valeurs RMS pour chaque polynôme), ont rapporté une corrélation entre les deux yeux dans 75 % des cas. Les polynômes qui n'étaient pas corrélés étaient  $Z_4^{-4}$ ,  $Z_4^{-2}$ ,  $Z_5^1$ ,  $Z_5^3$ ,  $Z_5^5$ . Ceux ayant le plus fort coefficient de corrélation étaient le défocus ( $Z_2^0$ ), puis les aberrations sphériques de 4<sup>e</sup> ordre ( $Z_4^0$ ) et l'astigmatisme ( $Z_2^2$ ). Dans cette étude, les auteurs ont pris en compte uniquement la valeur des coefficients RMS pour chaque polynôme de Zernike, sans calculer la magnitude de chaque aberration. La symétrie qu'ils retrouvent n'est donc pas celle de la magnitude des



**Figure 5 :** Répartition des aberrations optiques de haut degré entre les trois groupes étudiés : différence significative de taux des aberrations sphériques  $Z_4^0$ .

aberrations elles-mêmes, mais celles des seules composantes vectorielles de l'aberration considérée. Dans une autre étude consacrée aux aberrations d'origine cornéenne, Wang *et al.* [15] ont trouvé une corrélation significative entre les deux yeux pour 9 polynômes sur 22. Le recueil du front d'onde cornéen s'effectuait par vidéokératoscopie chez 94 patients et concernait les aberrations d'ordre radial 3 à 6. En considérant d'une part les résultantes des aberrations coma primaire et secondaire ( $Z_3^1, Z_3^{-1}, Z_5^1, Z_5^{-1}$ ), et d'autre part celles des aberrations sphériques ( $Z_4^0$  et  $Z_6^0$ ), ces auteurs ont rapporté une corrélation significative entre les deux yeux. La symétrie retrouvée dans cette étude est une symétrie d'« amplitude ». Elle ne tenait pas compte des aberrations internes.

Dans notre étude, seule l'aberration de type coma ne présentait pas de symétrie d'amplitude entre les yeux droit et gauche. Nous n'avons pas trouvé d'explication pour cette différence. Le coma reflète l'absence d'axe optique commun au niveau des différents dioptries oculaires et leur tilt éventuel. Le centre du référentiel utilisé pour l'analyse du front d'onde est le centre de la pupille irienne, qui est lui-même distinct du centre géométrique de la cornée et du cristallin. L'hypothèse d'une stratégie de fixation différente du patient entre l'œil droit et l'œil gauche (variation de l'angle kappa) au moment des mesures pourrait expliquer cette différence d'amplitude pour le coma qui doit être confirmée par d'autres études.

Les aberrations optiques de haut degré sont très variables d'un individu à l'autre et présentent une répartition gaussienne dans la population générale [12, 13]. Elles sont très spécifiques pour chaque individu, un peu comme les empreintes digitales. Le caractère énantiomorphe de l'astigmatisme du second degré (aspect symétrique des axes entre les deux yeux) n'était pas retrouvé dans une étude portant sur 192 sujets [16]. Nous n'avons pas étudié la présence d'un énantiomorphisme pour l'aberration  $Z_2^{\pm 2}$  (astigmatisme ou défocus cylindrique), la présence d'un astigmatisme supérieur à 0,75 D, la réfraction subjective étant un critère d'exclusion dans notre étude.

Nous avons retrouvé un taux global d'aberrations optiques de haut degré plus important chez les sujets présentant une amétropie, myopie ou hypermétropie, que chez les sujets emmétropes. Une étude effectuée sur 27 patients myopes et 7 emmétropes montrait que les aberrations optiques de haut degré augmentaient de façon quasi linéaire en fonction de l'équivalent sphérique chez les patients myopes [11]. Dans notre étude, chaque aberration prise individuellement n'était pas plus importante dans un groupe par rapport à l'autre, sauf pour les aberrations sphériques de 4<sup>e</sup> ordre ( $Z_4^0$ ), qui étaient significativement plus importantes chez les sujets hypermétropes par rapport aux sujets myopes. Thibos *et al.* [12], à l'aide de méthodes statistiques, ont cherché à établir une corrélation entre les différentes aberrations optiques sur 200 yeux. Ils ont constaté une corrélation significative entre d'une part le prisme et le coma, et d'autre part, entre le défocus et les aberrations sphériques de 4<sup>e</sup> ordre. Ceci est en accord avec nos résultats qui associent des aberrations sphériques de 4<sup>e</sup> ordre plus importantes à la présence du défocus ( $Z_2^0$  : myopie ou hypermétropie en fonction du signe + ou - du coefficient RMS).

Plusieurs auteurs ont montré que la valeur du coefficient RMS augmentait avec le diamètre pupillaire [17, 18]. Dans notre étude, les sujets emmétropes présentaient un diamètre pupillaire au cours de la mesure significativement inférieur à celui des patients myopes ou hypermétropes. La moindre importance des aberrations de haut degré dans le groupe des sujets emmétropes pourrait donc être imputée au plus faible diamètre pupillaire. Mais cette hypothèse ne peut être retenue puisque les valeurs des coefficients RMS pris en compte dans notre étude ont été calculées par le logiciel de l'aberromètre pour un diamètre pupillaire de 6 mm à partir d'un front d'onde recueilli de diamètre supérieur ou égal à 6 mm. Par ailleurs, la position relative de la pupille par rapport aux différents dioptries oculaire influence l'aspect du front d'onde. Nous n'avons pas comparé la position de celle-ci. L'étude de Wyatt [19] a montré cependant qu'il existait un haut degré de symétrie entre la position, la forme et le diamètre des

pupilles oculaires d'un individu donné. Il pourrait s'avérer utile d'étudier les caractéristiques de la dilatation pupillaire et des modifications cristalliniennes consécutives à l'instillation de tropicamide pour compléter les résultats de cette étude.

Les patients hypermétropes de notre étude étaient significativement plus âgés, ce qui pourrait être une explication à la présence d'aberrations optiques (essentiellement  $Z_4^0$ ) plus importantes que chez les patients emmétropes. Plusieurs auteurs ont montré que les aberrations optiques de haut degré augmentaient avec l'âge des patients [20-23]. Il est important de garder à l'esprit que les aberrations optiques mesurées peuvent être d'origine cornéenne, d'origine cristallinienne ou concerner l'œil dans sa globalité. Les résultats évaluant la corrélation entre les aberrations optiques et l'âge des patients sont variables en fonction des études. En ne tenant compte que des aberrations d'origine cornéenne, Oshika *et al.* [20] ont constaté que le taux global d'aberrations optiques et les aberrations de type coma augmentaient avec l'âge, mais pas les aberrations sphériques, alors que pour Guirao *et al.* [21], les aberrations sphériques d'origine cornéenne augmentaient également avec l'âge. Pour Fujikado *et al.* [22], les aberrations optiques uniquement d'origine cristallinienne augmentaient avec l'âge (« *coma-like* » ou « *spherical-like* »). Pour Amano *et al.* [23], l'augmentation avec l'âge concernait les aberrations « *coma-like* » à la fois d'origine cornéenne et cristallinienne, mais seulement les aberrations « *spherical-like* » d'origine cristallinienne. Or, le cristallin joue un rôle dans la compensation de certaines aberrations optiques d'origine cornéenne, visant à diminuer les aberrations optiques de l'œil pris dans sa globalité [24].

Dans notre étude, le taux global d'aberrations optiques de haut et bas degrés cumulés était significativement plus important chez les patients myopes que chez les patients hypermétropes alors qu'il n'y avait pas de différence significative concernant l'équivalent sphérique (en valeur absolue). Ces résultats diffèrent de ceux rapportées par Levy *et al.* [9], mais corroborent ceux de Paquin *et al.* [11] qui ont mis en évidence chez les patients myopes un taux d'aberration optique de haut degré proportionnel à la valeur du défocus myopique. Les modifications du cristallin au cours de l'accommodation pourraient également expliquer la différence significative retrouvée dans notre étude entre les sujets myopes et les sujets hypermétropes concernant les aberrations sphériques de 4<sup>e</sup> ordre [25]. Une étude a montré que les aberrations optiques de haut degré augmentaient chez le sujet jeune au cours de l'accommodation [26]. Cette étude tenait compte du taux global des aberrations de haut degré, sans préciser les variations spécifiques à chaque type d'aberration. He *et al.* [27] ont par ailleurs démontré que l'aberration sphérique devenait moins positive avec lors de l'accommodation. Cette variation est la conséquence de modifications de courbure, d'asphéricité et d'indice de réfraction du cristallin

lors de l'accommodation. L'obtention d'un relâchement total de l'accommodation lors des mesures est certainement favorisée par l'instillation de tropicamide. Ceci pourrait expliquer en partie la différence mesurée pour le taux d'aberrations sphériques entre sujets amétropes et sujets emmétropes : ces derniers n'ayant pas reçu de tropicamide et pouvant conserver une accommodation résiduelle ou d' « instrument » lors des mesures, réduisant ainsi leur taux d'aberration sphérique. Une étude récente conduite par Llorente *et al.* [28] a trouvé un taux d'aberrations sphériques positives total supérieur chez les sujets hypermétropes par rapport aux sujets myopes et a confirmé l'existence d'une corrélation entre l'âge et le caractère plus positif de cette aberration chez les sujets hypermétropes [28]. L'existence d'une compensation entre les dioptries cornéens et cristalliniens vis-à-vis de l'aberration sphérique a été démontrée par Artal *et al.* [29]. Ces mêmes auteurs ont mis en évidence une réduction de cette compensation avec l'âge [30]. L'étude conjointe des aberrations d'origine cornéenne et interne dans l'étude de Llorente *et al.* [28] a également permis de conclure à une moindre compensation des aberrations sphériques d'origine cornéenne par le cristallin chez les sujets hypermétropes âgés. Cette explication peut ainsi être légitimement invoquée pour expliquer les différences entre les sujets myopes et les sujets hypermétropes de notre étude vis-à-vis du taux d'aberration sphérique.

L'intégrité du film lacrymal influence la qualité de recueil du front d'onde [31]. Les patients atteints de syndrome sec présentent un taux d'aberrations de haut degré plus important que les sujets sains [32]. En effet, un amincissement du film lacrymal entraîne en regard un avancement de phase du front d'onde, modifiant son aspect global. Dans notre étude, les patients présentant un syndrome sec n'ont pas été inclus.

## CONCLUSION

Lors de cette étude, nous avons constaté une distribution symétrique des aberrations de haut degré dans la population générale. Parmi les aberrations de haut degré à symétrie de révolution, seules les aberrations sphériques de 4<sup>e</sup> ordre varient significativement en fonction de l'amétropie associée et sont retrouvées plus élevées chez les patients hypermétropes.

La prise en compte des aberrations optiques de haut degré est importante pour la qualité de la vision, notamment en ambiance scotopique, ou après chirurgie réfractive. La présence d'aberrations optiques d'origine cornéenne est parfois en partie compensée par les aberrations d'origine cristallinienne, notamment les aberrations sphériques, ce qui explique l'augmentation de ces aberrations après chirurgie de la cataracte et remplacement du cristallin par un implant sphérique. La magnitude du coma primaire était asymétrique entre l'œil

droit et l'œil gauche. Des études supplémentaires sont nécessaires pour confirmer cette différence, et tenter d'en préciser l'origine. L'étude comparée des aberrations d'origine cornéenne et interne pourrait permettre de préciser l'origine de cette différence (la différence de magnitude du coma primaire pourrait avoir une origine cornéenne, interne, ou mixte). Ainsi, différentes voies de recherche sont à explorer dans le domaine de l'optique physiologique humaine afin d'améliorer la qualité de la vision par la prise en compte de ces aberrations dans la fabrication de dispositifs de correction comme les lentilles de contact, les implants intra-oculaires ou les profils de photoablation cornéenne.

## RÉFÉRENCES

1. Applegate RA, Marsack JD, Ramos R, Sarver EJ. Interaction between aberrations to improve or reduce visual performance. *J Cataract Refract Surg*, 2003;29:1487-95.
2. Howland HC, Howland B. A subjective method for the measurement of monochromatic aberrations of the eye. *J Opt Soc Am*, 1977;67:1508-18.
3. Campbell CE. A new method for describing the aberrations of the eye using Zernike polynomials. *Optom Vis Sci*, 2003;80:79-83.
4. Gatinel D, Malet J, Azar D, Hoang-Xuan T. Effect of the pupil constriction on the wavefront Zernike terms. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, ARVO 2003, Abstract #966.
5. Williams DR, Yoon GY, Liang J, Williams DR. Aberrations and retinal image quality of the normal human eye. *J Opt Soc Am A*, 1997;14:2873-83.
6. McLellan JS, Marcos S, Prieto PM, Burns SA. Imperfect optics may be the eye's defence against chromatic blur. *Nature*, 2002;417:174-6.
7. Applegate RA, Ballentine C, Gross H, Sarver EJ, Sarver CA. Visual acuity as a function of Zernike mode and level of root mean square error. *Optom Vis Sci*, 2003;80:97-105.
8. Thibos LN, Hong X, Bradley A, Applegate RA. Accuracy and precision of objective refraction from wavefront aberrations. *J Vis*, 2004;4:329-51.
9. Levy Y, Segal O, Avni I, Zadok D. ocular high-order aberrations in eyes with supernormal vision. *Am J Ophthalmol*, 2005;139:225-8.
10. Cheng X, Bradley A, Hong X, Thibos LN. relationship between refractive error and monochromatic aberrations of the eye. *Optom Vis Sci*, 2003;80:43-9.
11. Paquin MP, Hamam H, Simonet P, Faao MS. Objective measurement of optical aberrations in myopic eyes. *Optom Vis Sci*, 2002;79:285-91.
12. Thibos LN, Bradley A, Hong X. A statistical model of the aberration structure of normal, well-corrected eyes. *Ophthalmic Physiol Opt*, 2002;22:427-33.
13. Thibos LN, Hong X, Bradley A, Cheng X. Statistical variation of aberration structure and image quality in a normal population of healthy eyes. *J Opt Soc Am A*, 2002;19:2329-48.
14. Porter J, Guirao A, Cox IG, Williams DR. Monochromatic aberrations of the human eye in a large population. *J Opt Soc Am A*, 2001;18:1793-803.
15. Wang L, Dai E, Koch D, Nathoo A. Optical aberrations of the human anterior cornea. *J Cataract Refract Surg*, 2003;29:1514-21.
16. McKendrick AM, Brennan NA. The axis of astigmatism in right and left eye pairs. *Optom Vis Sci*, 1997;74:668-75.
17. Howland HC. High order wave aberration of eyes. *Ophthalmic Physiol Opt*, 2002;22:434-9.
18. Liang J, Williams DR. Aberrations and retinal image quality of the normal human eye. *J Opt Soc Am A*, 1997;14:2873-83.
19. Wyatt HJ. The form of the human pupil. *Vision Res*, 1995;35:2021-36.
20. Oshika T, Klyce SD, Applegate RA, Howland HC. Changes in corneal wavefront aberrations with aging. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 1999;40:1351-5.
21. Guirao A, Redondo M, Artal P. Optical aberrations of the human cornea as a function of age. *J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis*, 2000;17:1697-702.
22. Fujikado T, Kuroda T, Ninomiya S, Maeda N, Tano Y, Oshika T, Hirohara Y, Mihashi T. Age-related changes in ocular and corneal aberrations. *Am J Ophthalmol*, 2004;138:143-6.
23. Amano S, Amano Y, Yamagami S, Miyai T, Miyata K, Samejima T, Oshika T. Age-related changes in corneal and ocular higher-order wavefront aberrations. *Am J Ophthalmol*, 2004;137:988-92.
24. He JC, Gwiazda J, Thorn F, Held R. Wave-front aberrations in the anterior corneal surface and the whole eye. *J Opt Soc Am A*, 2003;20:1155-61.
25. Hazel CA, Cox MJ, Strang NC. Wavefront aberration and its relationship to the accommodative stimulus-response function in myopic subjects. *Optom Vis Sci*, 2003;80:151-8.
26. Pallikaris IG, Panagopoulou S, Siganos C, Molebny V. Objective measurement of wavefront aberrations with and without accommodation. *J Refract Surg*, 2001;17:S602-7.
27. He JC, Burns SA, Marcos S. Monochromatic aberrations in the accommodated human eye. *Vision Res*, 2000;40:41-8.
28. Llorente L, Barbero S, Cano D, Dorronsoro C, Marcos S. Myopic versus hyperopic eyes: axial length, corneal shape and optical aberrations. *J Vis*, 2004;22;4:288-98.
29. Artal P, Guirao A. Contributions of the cornea and the lens to the aberrations of the human eye. *Optics Letters*, 1998;23,1713-5.
30. Artal P, Berrio E, Guirao A, Piers P. Contribution of the cornea and internal surfaces to the change of ocular aberrations with age. *J Opt Soc Am A*, 2002;19:137-43.
31. Thibos LN, Faao, Hong X. Clinical applications of the Shack-Hartmann aberrometer. *Optom Vis Sci*, 1999;76:817-25.
32. Montes-Mico R, Caliz A, Alio JL. Wavefront analysis of higher order aberrations in dry eye patients. *Refract Surg*, 2004;20:243-7.