

D. GATINEL*



L'astigmatisme est une aberration de haut degré!

L'astigmatisme régulier est un défaut optique fréquent, et assimilé à une aberration dite de bas degré car on peut le corriger au moyen d'un verre de lunette torique. Ce défaut optique partage en pratique de nombreuses caractéristiques avec les aberrations dites de haut degré : suppression du stigmatisme, réduction du contraste, dépendance azimutale (orientation), contraintes similaires pour la correction chirurgicale.

Sur le plan fonctionnel et pratique, l'astigmatisme peut être considéré comme une aberration de haut degré.

Il est traditionnel de distinguer les aberrations de bas degré (myopie, hypermétropie, astigmatisme dit "régulier") des aberrations de haut degré (astigmatisme dit "irrégulier"). Ce clivage se fonde sur deux principes. Le premier est d'ordre pratique et correspond au fait que l'astigmatisme régulier peut être corrigé par un verre de lunette cylindrique. L'autre, plus théorique, repose sur le fait que l'erreur du front d'onde provoquée par l'astigmatisme est classée de degré 2, alors que les aberrations de haut degré sont de degré 3 et plus [1, 2].

Cet article aborde le cas de l'astigmatisme sous un angle fonctionnel, afin de montrer que la distinction énoncée précédemment n'est pas forcément pertinente d'un point de vue clinique. Cette nuance n'induit pas de conséquences pratiques majeures dans la gestion pratique des patients astigmatés, et le lecteur peu féru d'optique pourra sauter avec joie cet article sans risque majeur pour la qualité de son exercice quotidien. Certaines notions techniques concernant la mesure du front d'onde ont été simplifiées ou volontairement omises pour faciliter le parcours du lecteur plus téméraire ou curieux.

■ QU'EST-CE QUE LE DEGRÉ D'UNE ABERRATION ?

Le formalisme utilisé dans cet article, comme le "degré" d'une aberration, n'est pas forcément familier pour l'ophtalmologiste habitué aux sphères et cylindres, mais il est utilisé pour caractériser l'astigmatisme et les aberrations optiques dans la plupart des autres domaines de l'optique. L'astigmatisme est un défaut complexe, mais une partie de cette complexité provient de l'utilisation de notions certes pratiques pour prescrire une correction en lunettes, mais plus ambiguës pour qui veut suivre dans le temps l'évolution d'une correction optique.

A titre d'exemple, une erreur trop souvent rencontrée consiste à effectuer des calculs statistiques sur des angles, ce qui est erroné et

mène à de sérieuses erreurs d'interprétation (sinon que penser de la moyenne entre deux cylindres identiques en puissance mais dont l'un possède un axe à 180° , et l'autre à 10° ? La différence d'axe entre ces cylindres est en réalité moindre que celle séparant des cylindres orientés respectivement à 180° et 165° ...).

Le formalisme mathématique inhérent à l'étude aberrométrique peut paraître rebutant, mais lui seul permet l'utilisation pertinente d'outils statistiques, en plus de rassembler les aberrations optiques dans une même classification. Cette dernière s'avère incontournable pour la gestion de l'astigmatisme par les techniques de mesure et de correction les plus récentes (mesure du front d'onde, optique adaptative, etc.). Enfin, cette standardisation facilite les comparaisons entre les différentes études [1, 2].

1. – Le front d'onde et les rayons lumineux

La valeur du chiffre correspondant au degré d'une aberration est celle du plus grand exposant "n" qu'il faut utiliser pour en fournir une représentation mathématique. Nous reviendrons sur la signification de ce degré plus loin. Pour saisir l'intérêt de cette représentation sans rentrer dans des détails trop mathématiques, il faut admettre que la lumière se propage sous la forme d'une onde (front d'onde) qui est localement perpendiculaire aux rayons lumineux ; ceux-ci correspondent en fait à la direction de propagation locale du front d'onde. Si le front d'onde est une vague qui se propage, le rayon marque la direction locale de propagation de cette vague. Un front d'onde convergent est sphérique : il converge vers un point (foyer) situé au centre des rayons qui sont alors par définition perpendiculaires en tout point de sa surface. Un front d'onde plan se déplace en ligne droite et ne converge pas (ou à l'infini), et cela correspond à la représentation de rayons parallèles.

L'aberromètre mesure les déformations d'un front d'onde émis puis réfléchi par la fovéa et recueilli après traversée des dioptries oculaires.

Quand il n'y a aucune aberration, des rayons lumineux qui seraient émis depuis la fovéa émergeraient de l'œil comme un faisceau paral-

* Fondation A. de Rothschild, Hôpital Bichat Claude Bernard, PARIS. Centre d'Expertise et de Recherche en Optique Clinique (CEROC).

- ▶ La classification des aberrations optiques repose classiquement sur une distinction entre aberrations corrigibles (bas degré) et non corrigibles (haut degré) par verres de lunettes.
- ▶ L'astigmatisme oculaire régulier partage de nombreux points communs avec les aberrations de haut degré, que ce soit sur le plan causal, clinique et thérapeutique.
- ▶ Les situations cliniques pourvoyeuses d'une élévation du taux des aberrations de haut degré sont généralement responsables d'une élévation concomitante de l'astigmatisme régulier.

lèle. Dans cette situation idéale, le front d'onde recueilli à la sortie de l'œil est alors assimilable à un disque plan (sans déphasage), dont les bords sont délimités par la pupille de sortie de l'œil. En cas d'aberrations optiques oculaires, le faisceau émergent comporte des rayons "déviant", ce qui revient à dire que le front d'onde présente des déformations par rapport à un disque plan de référence. Ces déformations correspondent à des déphasages optiques (*fig. 1*). Arriver à mesurer ces déphasages et les localiser dans la pupille est d'autant plus intéressant qu'ils permettent de reconstruire le trajet des rayons lumineux à travers l'œil.

2. – La mesure des déformations du front d'onde

Le front d'onde oculaire est reconstruit dans le plan de la pupille, et est naturellement délimité par le pourtour de celle-ci (une partie de la lumière émergente après réflexion fovéale est stoppée par l'iris !). Il existe une classification des aberrations optiques en fonction de la déformation qu'elles infligent au front d'onde.

Les polynômes de Zernike sont une classe de fonctions mathématiques particulièrement utiles dans ce contexte (*fig. 2*), pour deux raisons majeures. La première est que face à une déformation donnée, il n'existe qu'une seule manière de l'exprimer en piochant dans l'éventail des aberrations procuré par cette classification. La seconde est que les premiers termes de la classification de Zernike ont l'avantage de correspondre aux aberrations optiques "classiques" (défoc, astigmatisme, coma, etc.). Nous ne rentrerons pas dans les détails de cette classification, et affirmerons que schématiquement, plus le degré "n" d'une aberration est grand, et plus la déformation présente aux bords de la pupille par rapport au centre est importante.

En l'absence d'aberrations, le front d'onde recueilli par l'aberrmètre est plan (cas des rayons parallèles). En présence d'aberrations, le front d'onde présente des distorsions (rayons non parallèles). Le défoc cylindrique (astigmatisme) induit une distorsion du front d'onde en forme de "selle de cheval" (*fig. 3*). Contrairement à la notation (Cylindre x Axe), où toute modification du cylindre entraîne une modification de l'équivalent sphérique, l'utilisation des polynômes de Zernike effectue une distinction implicite entre les composantes sphériques et purement cylindriques de l'amétropie cylindrique. En cela, elle simplifie l'analyse statistique des variations de l'astigmatisme, qui sont analysées comme une fluctuation de puissance optique autour d'une moyenne. Par exemple, la formule $-3(-4x0^\circ)$ serait exprimée

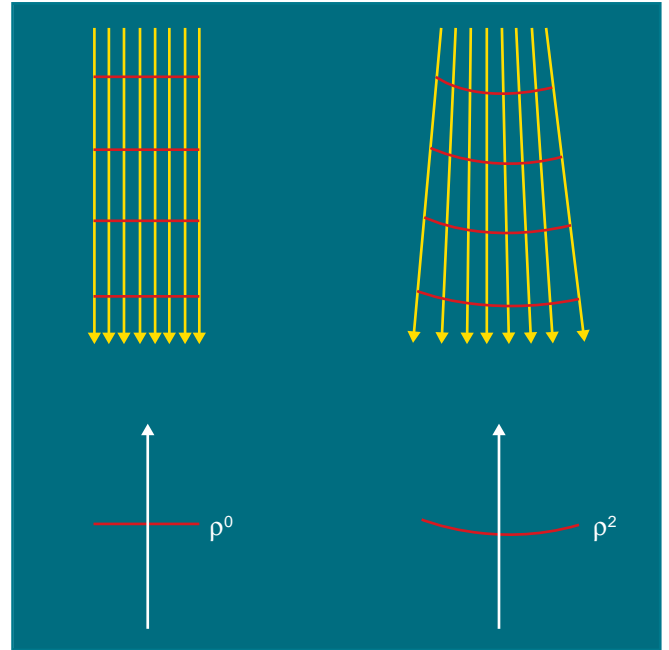


Fig. 1: Relations entre rayons et front d'onde. Le front d'onde (en rouge) représente les points en phase lors de la propagation de l'onde lumineuse (oscillations du champ électro-magnétique). Les rayons (en jaune) peuvent être vus comme des vecteurs de propagation. A gauche, le front d'onde est plan et peut s'exprimer comme un segment plat (un disque en 3 dimensions après traversée d'une pupille circulaire). A droite, les rayons divergent à partir d'un foyer; le front d'onde peut être exprimé comme une fonction de degré 2 car son enveloppe a un profil parabolique. (Illustration © D. Gatinel)

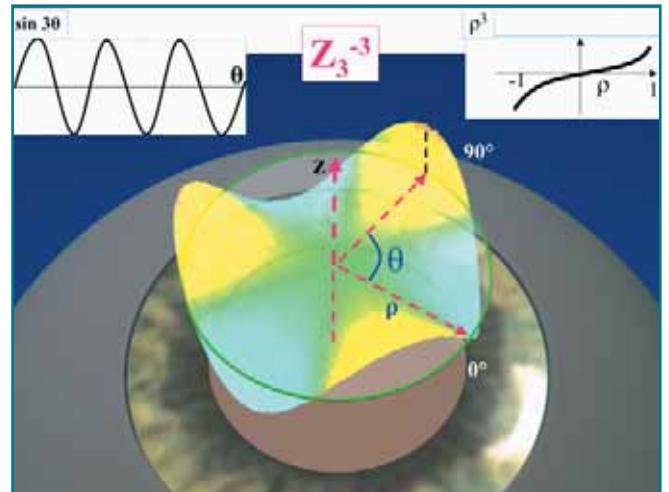


Fig. 2: Représentation schématique du polynôme de Zernike (hors facteur de normalisation) correspondant à l'aberration trefoil Z3-3 sur le disque pupillaire matérialisé sur cette figure par un contour vert. La déformation du front d'onde infligée par cette aberration est égale au produit d'une fonction polynomiale du rayon de degré 3 (ρ^3) où ρ représente la distance du point considéré au centre, et d'une fonction trigonométrique de fréquence azimutale égale à 3 ($\sin 3\theta$), où θ correspond à l'angle fait avec l'horizontale du méridien où est situé le point considéré. La forme globale du polynôme est dictée par ces deux fonctions dont le "déroulé" respectif est représenté à la partie supérieure de l'illustration. (Illustration © D. Gatinel)

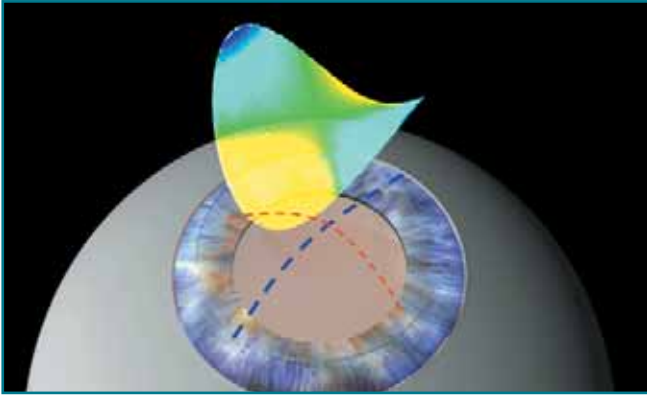


Fig. 3 : Représentation schématique du déphasage infligé au front d'onde par un astigmatisme régulier "mixte" (équivalent sphérique nul). Les extrémités du méridien plat de la cambrée sont géométriquement plus éloignées de la fovéa que celles du méridien cambré. Cet allongement du trajet optique fait qu'une onde lumineuse réfléchie depuis la fovéa vers la pupille "sort" de l'œil avec du retard vers le méridien plat (ou de l'avance vers le méridien cambré, ce qui revient au même). L'aberromètre mesure cette déviation, qui est localement de l'ordre de la longueur d'onde lumineuse (micron).

(Illustration © D. Gatinel)

comme une myopie moyenne de -5 dioptries (valeur de l'équivalent sphérique), dont l'astigmatisme module la puissance selon les méridiens, en rajoutant dans cet exemple (pour n'aborder que des méridiens principaux) $+2$ D de puissance focale à 90° (la myopie est de -7 D dans le plan du méridien 90°), et -2 D à 0° (la myopie est de -3 D dans le plan du méridien 0°).

Le coma est de degré 3, l'aberration sphérique est de degré 4, etc. Le degré impair d'une aberration (ex. : coma = degré 3) signifie que celle-ci est asymétrique; les rayons focalisés par une moitié de pupille ne focalisent pas au même endroit que ceux focalisés par l'autre moitié. Cela se rencontre dans les situations cliniques où les dioptries oculaires sont désaxés, tiltés ou subissent des déformations irrégulières (implant subluxé, kératocône, etc.).

Le décentrement d'un dispositif optique pourvoyeur d'aberration de degré "n" génère des aberrations de degré $n-1$, $n-2$, etc. C'est principalement pour cette raison que les verres de lunettes (dont le centrage relatif varie avec la direction du regard) ne corrigent que les aberrations de degré 2: leur décentrement relatif n'engendre que des aberrations de degré 1 (tilt). En termes plus simples, seul un effet prismatique sans distorsion de l'image est engendré par les déplacements de l'axe du regard à travers un verre sphérique simple.

Pour des raisons identiques, la réalisation d'un verre de lunette corrigeant le coma (degré 3) exposerait à l'induction d'astigmatisme induit (degré 2). Ce problème préside d'ailleurs à la réalisation des verres progressifs, dont les zones situées en dehors du couloir de progression sont pourvoyeuses d'astigmatisme. Les nouvelles générations de verres progressifs bénéficient d'un surfacage postérieur conçu pour neutraliser une partie de cet astigmatisme.

■ ASTIGMATISME ET ABERRATIONS DE HAUT DEGRÉ : QUELLES DIFFÉRENCES ?

Abordée sous un angle pratique, la distinction entre astigmatisme et aberration de haut degré mérite ainsi d'être relativisée. Par exemple, on peut facilement rapprocher les conséquences visuelles des astigmatismes réguliers (degré 2) et irréguliers (degré 3 et plus), alors qu'il existe une différence plus fondamentale entre un astigmatisme et une amétropie sphérique (myopie, hypermétropie). Pour un système optique entaché d'astigmatisme comme d'aberrations de haut degré, il n'existe pas de plan image pour former l'image nette d'un objet. En revanche, quand un système optique est uniquement affecté de défaut (myopique ou hypermétropique), il existe "quelque part" un plan focal où l'image est nette. L'astigmatisme et le coma non corrigés peuvent induire une sensation de diplopie monoculaire, surtout quand ils se conjuguent.

Les aberrations engendrées par le décentrement d'une lentille vis-à-vis du trajet optique ne se limitent pas au coma, mais également à l'astigmatisme. Les situations cliniques où ces deux aberrations contribuent conjointement à la dégradation de la fonction optique de l'œil comprennent le kératocône, le décentrement, les subluxations et tilts d'implants, etc. A taux égal, l'astigmatisme est plus délétère pour l'acuité visuelle à contraste maximal et à contraste réduit que le coma.

La modélisation assistée par ordinateur révèle certaines similitudes entre les contraintes exercées par photoablation cornéenne pour la correction de l'astigmatisme et du coma. Ces deux aberrations sont orientées, et pour être pleinement efficace, leur correction doit parfaitement en respecter l'axe. A degré égal, la sous correction induite par une erreur d'axe est plus importante pour un astigmatisme régulier que pour une aberration de type coma. Cela est lié à une propriété générale des aberrations orientées: les conséquences d'un alignement imparfait du dispositif correcteur sont proportionnelles en importance à leur fréquence azimutale (1 pour le coma, 2 pour l'astigmatisme, 3 pour le trefoil, etc.).

■ CONCLUSION

L'astigmatisme régulier entretient de nombreuses similitudes avec les aberrations dites de haut degré. La correction de l'astigmatisme oculaire s'inscrit donc pleinement dans le cadre des stratégies de personnalisation pour les chirurgies oculaires à visée optique.

Au risque de froisser l'ordre établi au sein des aberrations optiques, il serait presque licite d'énoncer que d'un point de vue pratique, l'astigmatisme est la seule aberration de haut degré... que l'on peut corriger par des verres de lunettes ! □

Bibliographie

1. THIBOS LN, APPLGATE RA, SCHWIEGERLING JT, WEBB R. VSIA Standards Taskforce Members. Vision science and its applications. Standards for reporting the optical aberrations of eyes. *J Refract Surg*, 2002; 18: S652-60.
2. GATINEL D. Corneal Topography and Wavefront analysis. In: Principles and Practice of Ophthalmology, 4th Edition. Daniel M. Albert and Frederick A. Jakobiec, Saunders, Elsevier, USA, 2007.