

NUMÉRO THÉMATIQUE

Chirurgie de l'astigmatisme : nouveautés

Composantes de l'astigmatisme oculaire

RÉSUMÉ : Cet article concerne l'étude des composantes qui permettent de quantifier l'astigmatisme oculaire régulier pour en permettre le traitement statistique et prédire l'astigmatisme résiduel issu de l'effet cumulé de deux optiques génératrices d'astigmatisme comme la cornée et un implant de cristallin artificiel torique.



→ D. GATINEL
Fondation Rothschild,
CEROC, PARIS.

L'astigmatisme oculaire fait partie du quotidien de l'ophtalmologiste. Malgré la relative banalité de ce défaut réfractif, l'étude de son formalisme est plus délicate, en raison du caractère orienté de cette aberration. Cet article expose les principales méthodes qui permettent de quantifier l'astigmatisme oculaire régulier (corrigible par un verre de lunette sphéro-cylindrique), ce qui peut être utile pour calculer des moyennes, prédire l'effet cumulé de deux optiques génératrices d'astigmatisme (par exemple : cornée et implant de cristallin artificiel torique).

Astigmatisme oculaire : vision fovéale

L'astigmatisme oculaire provoque une dégradation de la focalisation des rayons émis par une source ponctuelle située sur l'axe visuel : il est le plus souvent induit par la toricité de la cornée, dont la courbure (inversement proportionnelle à la vergence ou puissance optique) varie selon les méridiens. L'astigmatisme oculaire affecte la vision fovéale et, selon sa magnitude, réduit l'acuité visuelle et la sensibilité aux contrastes. L'astigmatisme oculaire diffère ainsi de celui qui peut entacher la qualité d'un système optique construit (objectif photo, télescope, microscope, etc.). Dans le cas de ces systèmes, l'astigmatisme affecte plutôt

l'image de points sources situés à distance de l'axe optique. En effet, en dehors de cas très particuliers, les lentilles et les surfaces optiques manufacturées présentent une symétrie de révolution : bien alignés et sans tilt, ils n'induisent pas d'astigmatisme pour les points situés sur l'axe optique. Il est toutefois plus difficile de contrôler l'astigmatisme des points situés à distance de l'axe optique, qui sont réfractés en une zone de focalisation tangentielle et une zone de focalisation sagittale.

Bien entendu, le décentrement (et/ou le tilt) d'une ou plusieurs lentilles pourtant non toriques d'un système optique peut induire de l'astigmatisme pour des points situés sur l'axe optique. Ce type de mécanisme intervient pour l'astigmatisme provoqué par le décentrement d'un traitement photoablatif au laser Excimer, une subluxation du cristallin, le décentrement ou le tilt d'implant, etc.). Dans ce type de situations, à l'astigmatisme dit "régulier" (corrigible avec un verre de lunette cylindrique) s'ajoute un astigmatisme dit "irrégulier", qui regroupe les aberrations optiques de haut degré (non corrigibles par verre de lunette) comme le coma, le trefoil, etc.

Composantes anatomiques de l'astigmatisme oculaire

Dans des conditions physiologiques standard (œil phaqué) et certaines affections

pathologiques (ex : kératocône), l'astigmatisme est majoritairement induit par la toricité de la cornée : la courbure des méridiens varie entre deux extrêmes, dont les axes sont séparés par un angle de 90°.

Quand le méridien de courbure maximale (le plus puissant) est orienté à 90°/270° (ou est proche de cette direction), l'astigmatisme est direct (ou conforme). Quand le méridien le plus courbe est horizontal (direction 0°/180°), l'astigmatisme est inverse (non-conforme). Quand ces méridiens de courbure extrême sont alignés

le long (ou sont proches) des directions 45°/225° ou 135°/315°, l'astigmatisme est oblique. Le cristallin est pourvoyeur d'un astigmatisme dit "interne", dont la magnitude est généralement faible (moins d'une demi-dioptrie) [1].

Un désaxage plus important du cristallin vis-à-vis de la cornée peut provoquer l'apparition d'un astigmatisme oculaire : on observe cela dans de rares affections comme le syndrome de Marfan avec subluxation du cristallin (**fig. 1**), ou la myopie maligne. Dans ces cas précis, l'élon-

gation du globe oculaire peut entraîner un déplacement et une angulation significative du cristallin vis-à-vis de la cornée, en plus d'un éventuel déplacement de la fovéa vis-à-vis de l'axe optique "moyen" de la cornée et du cristallin. La mesure d'un astigmatisme oculaire chez un myope fort dont la cornée n'est pas ou peu torique a pu convaincre certains esprits de l'existence d'un "astigmatisme rétinien". Cette expression n'a pas véritablement de signification physique car la rétine n'est pas un élément réfractif, mais un écran "récepteur" de la lumière : dans ces situations cliniques, l'astigmatisme trouve son origine dans la position et la relatif décentrement et désaxage de la cornée et du cristallin, et non une quelconque géométrie de la couche des photorécepteurs rétiniens.

Formalisme de l'astigmatisme oculaire

La mission thérapeutique de l'ophtalmologiste explique probablement que la description de l'astigmatisme oculaire recouvre en fait celle d'une prescription optique, permettant à l'opticien de tailler, puis délivrer la lentille sphéro-torique correctrice.

Ce formalisme, qui est en soit "discret" (un chiffre de magnitude, un chiffre d'axe), ne reflète pas exactement la nature de l'astigmatisme qui correspond à une variation continue de la vergence entre deux extrêmes, dont les axes respectifs sont séparés par un angle de 90° (**fig. 2 A et B**). Cette représentation continue peut être utilisée pour représenter le principe utilisé par un dispositif correcteur de l'astigmatisme : il doit induire un astigmatisme de même orientation mais de signe opposé (**fig. 2 C**). En cas de décalage angulaire entre l'astigmatisme initial et celui introduit par le dispositif correcteur (lentille de contact torique, implant torique...), on observe l'apparition d'un astigmatisme résiduel dont la magnitude et l'orientation dépendent de l'angle du décalage (**fig. 2 D et E**).

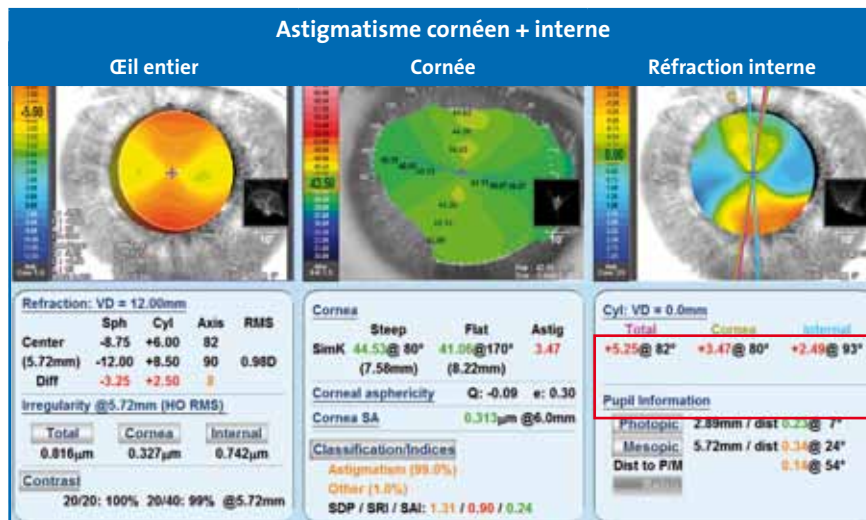


FIG. 1A : Examen topo-aberrométrique (OPDscan III) pour un œil atteint d'une subluxation cristallinienne (patient atteint d'un syndrome de Marfan). L'astigmatisme oculaire total résulte de la combinaison d'un astigmatisme cornéen et interne.

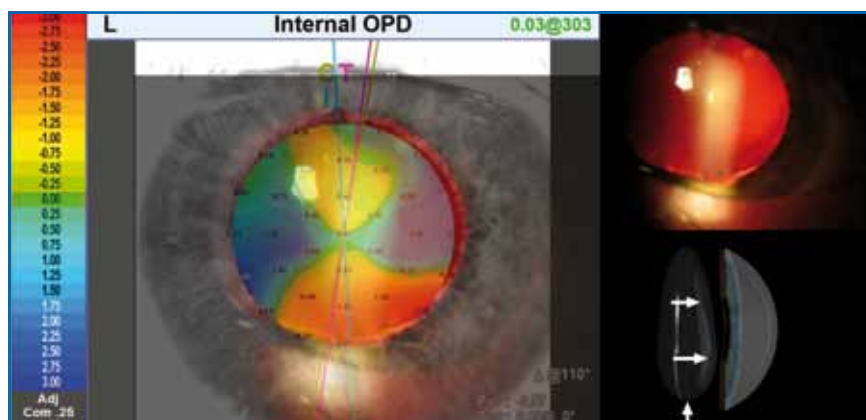


FIG. 1B : La composante interne de l'astigmatisme est liée aux lésions zonulaires, qui provoquent une subluxation de la lentille cristallinienne (noté l'aspect crénelé du bord inférieur du cristallin).

NUMÉRO THÉMATIQUE

Chirurgie de l'astigmatisme : nouveautés

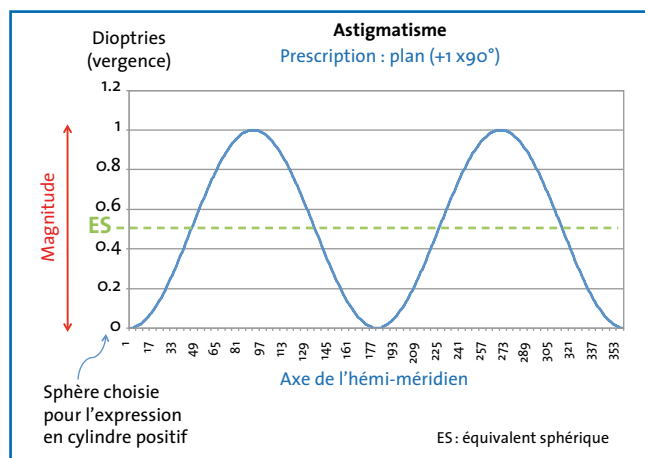


FIG. 2A : Représentation schématique de la variation de vergence induite par un astigmatisme oculaire hypermétrope simple dont la formule de prescription serait plan (+1 x 90°) pour les hémi-méridiens (0° à 360°). La magnitude de l'astigmatisme est de 1D, son signe est positif dans l'expression de prescription choisie. Dans cette formulation en cylindre positif, on choisit une valeur "zéro" (plan) pour la puissance de la sphère de correction, et on garde par convention (comme pour la formule de prescription) un signe positif pour la vergence du méridien le plus puissant. L'astigmatisme induit une double variation de la vergence sur 360°. Le différentiel de vergence (exprimée comme celle de la prescription nécessaire à la correction) varie entre 0D (hémi-méridiens d'axe 0° et 180°) et +1D (hémi-méridiens d'axe 90° et 270°). L'équivalent sphérique (ES) est égal à +0.5D. En réalité, sur un plan réfractif, tous les méridiens ont un défaut de vergence compris entre 1D (méridien horizontal, le moins puissant) et 0D (méridien vertical le plus puissant). La double oscillation de la vergence représentée sur le schéma est donnée par une fonction trigonométrique de type $ES + \frac{1}{2} C \times \sin(2\alpha + \phi)$, où ES est l'équivalent sphérique, C est la magnitude du cylindre (valeur positive), α est l'axe de l'hémi-méridien considéré (variant entre 0° et 360°), et ϕ l'axe de l'hémi-méridien le moins puissant. ϕ dépend de l'orientation de l'astigmatisme. En appliquant la formule de trigonométrie : $\sin(A + B) = \sin A \cos B + \cos A \sin B$ à cette expression, on obtient $\sin(2\alpha + \phi) = \sin 2\alpha \cos \phi + \cos 2\alpha \sin \phi$. $\cos \phi$ et $\sin \phi$ correspondent à une constante. Quand $\phi = 0$, l'astigmatisme est inverse ou direct, en fonction du signe affecté à la magnitude de l'astigmatisme. Les variations de vergence causées par l'astigmatisme régulier peuvent être modélisées par une combinaison de fonctions $\sin 2\alpha$ et $\cos 2\alpha$ (voir notation Jo et J45 de Thibos).

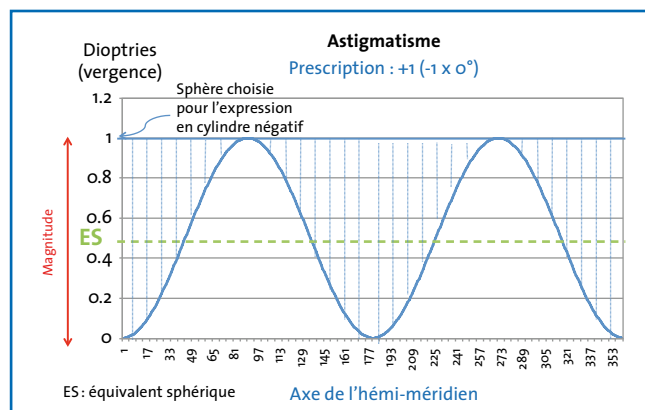


FIG. 2B : La formule transposée de prescription utilise la valeur de la sphère la plus positive comme niveau de référence, pour laquelle l'astigmatisme induit une double modulation sur 360°. L'inversion du signe de la magnitude de l'astigmatisme est équivalent à un décalage de 90° de l'orientation de l'astigmatisme.

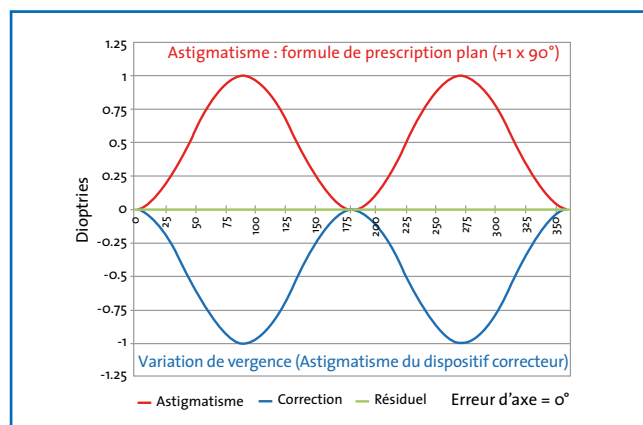


FIG. 2C : Représentation schématique de la correction d'un astigmatisme hypermétrope simple par un dispositif correcteur : il doit induire un astigmatisme de magnitude opposée mais d'orientation identique.

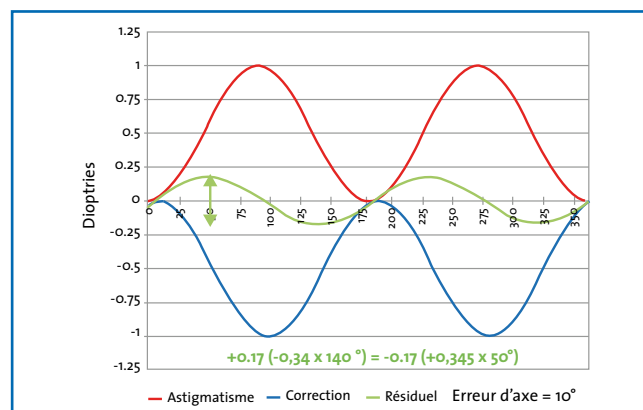


FIG. 2D : En cas de décalage de 10° du dispositif correcteur, on obtient un astigmatisme résiduel de magnitude égale à 0.34D (courbe en vert), la formule de prescription de la réfraction obtenue est +0.17 (-0.34 x 140°).

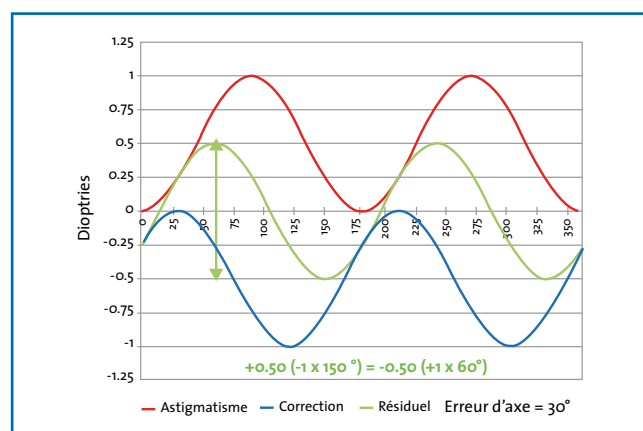


FIG. 2E : En cas de décalage de 30°, l'astigmatisme résiduel présente la même magnitude que l'astigmatisme initial : son orientation a été modifiée (décalage de 30°).

Différents formalismes sont à même d'exprimer l'astigmatisme régulier en fonctions mathématiques qu'il est possible de traiter par des opérations arithmétiques courantes, pour effectuer des calculs et des comparaisons statistiques.

1. Prescription optique

L'astigmatisme oculaire est généralement exprimé comme une prescription optique par l'ophtalmologiste. Considérons l'expression libellée comme "plan (-1 x 0°)". L'équivalent sphérique (-0.50D qui correspond à la somme de la puissance sphérique et la moitié de la puissance cylindrique) suggère que l'œil affecté de cette prescription est un œil légèrement myope (dont le défocus moyen est d'une demi-dioptrie).

La formule de prescription plan (-1 x 0°) traduit la présence d'un astigmatisme myopique simple, où le méridien de plus forte puissance est situé à 90°/270°, ce que la présente formulation ne suggère pas implicitement... si l'on occulte le fait qu'elle correspond à une prescription optique. Il n'est toutefois pas évident de relier l'expression plan (-1 x 0°) à la présence d'un excès de puissance optique d'une dioptrie en regard du méridien situé à 90°!... Il serait plus adéquat (si l'on veut appréhender la formulation usuelle de l'astigmatisme oculaire de manière fonctionnelle) de considérer l'expression d'un astigmatisme oculaire ("cylindre" x "axe") comme la présence d'un manque ou d'un excès relatif de vergence égale au "cylindre" selon l'"axe". L'expression "(-1 x 0°)" traduit ainsi la réduction d'une dioptrie de la vergence du méridien orienté à 0°/180° vis-à-vis du méridien orienté à 90°/270°. On peut appliquer cette règle à l'expression transposée "-1 (+1 x 90°)": le méridien orienté à 90° possède bien un excès de vergence d'une dioptrie vis-à-vis du méridien orienté à 0°.

En dehors du monde de l'ophtalmologie et de l'optique visuelle, on s'affranchit de ces notations transposées car l'astig-

matisme y est défini et compris comme une variation de la réfraction autour d'un défocus moyen (ce défocus équivaut à la notion d'équivalent sphérique). L'astigmatisme correspond alors à une puissance dite "Jacksonienne", par analogie à la puissance du verre d'examen appelé cylindre de Jackson, qui ne comporte pas de défocus sphérique: un œil présentant un astigmatisme mixte avec un équivalent sphérique nul (exemple: +1(-2 x 90°)) présente ce type d'astigmatisme. Dans notre exemple précédent (réfraction = plan (-1 x 0°)), l'œil est affecté d'un excès de défocus myopique moyen de 0.5D et d'un astigmatisme de magnitude d'1D.

Explorée "en coupe" dans un plan méridional, la réfraction de l'œil varie selon le méridien considéré, autour de l'équivalent sphérique (-0.50D): emmétrope à 0°/180°, myope (-0.5D) à 45°/225° et 135°/315°, myope (-1.0D) et à 90°/270°.

Ces "subtilités sémantiques" peuvent paraître anecdotiques, mais elles induisent une certaine confusion dans certaines applications très concrètes comme la formulation de la puissance d'un implant de cristallin artificiel torique. En effet, la formulation de la puissance nominale de l'implant et celle de son cylindre peut être analogue à la formule de prescription... ou celle d'une variation de puissance cylindrique

autour d'une puissance moyenne. Ainsi, selon les fabricants, le label de puissance "22D cyl 3D" peut correspondre soit à un implant de puissance moyenne égale à 22D (celle de l'"équivalent sphérique"), dont les extrêmes varient entre 20.5D et 23.5D (exemple: implants toriques de la gamme Physiol ou Alcon), soit à un implant dont la puissance minimum (méridien cornéen le plus cambré) est égale à 22D, et la puissance maximum à 25D (exemple: implants toriques de la gamme Zeiss) (fig. 3). Dans cette configuration, la puissance "moyenne" de l'implant est alors de 23.5D...

Très familière pour l'ophtalmologiste, la formulation de prescription a de plus l'inconvénient de ne pas autoriser à effectuer directement certaines opérations comme le calcul d'une moyenne, ou du cumul de plusieurs astigmatismes. Il est, en effet, erroné de considérer que l'astigmatisme résultant de l'addition d'un astigmatisme d'1D orienté à 175° et d'un astigmatisme de 3D orienté à 5° correspondrait à un astigmatisme de deux dioptries orienté à 90°!

2. Polynômes de Zernike

La mise à disposition des aberromètres en ophtalmologie permet d'exprimer l'astigmatisme oculaire en un langage plus mathématique, visant à quantifier l'effet de déphasage induit par l'astig-



Fig. 3 : Implant de cristallin artificiel torique dont le label est exprimé comme une formule de prescription: +21.5 cyl +02.0. L'équivalent sphérique (ES) est +22.50D: cette valeur est celle que l'on obtiendrait si l'on effectuait une formule de calcul biométrique en utilisant la valeur de la kératométrie moyenne.

NUMÉRO THÉMATIQUE

Chirurgie de l'astigmatisme : nouveautés

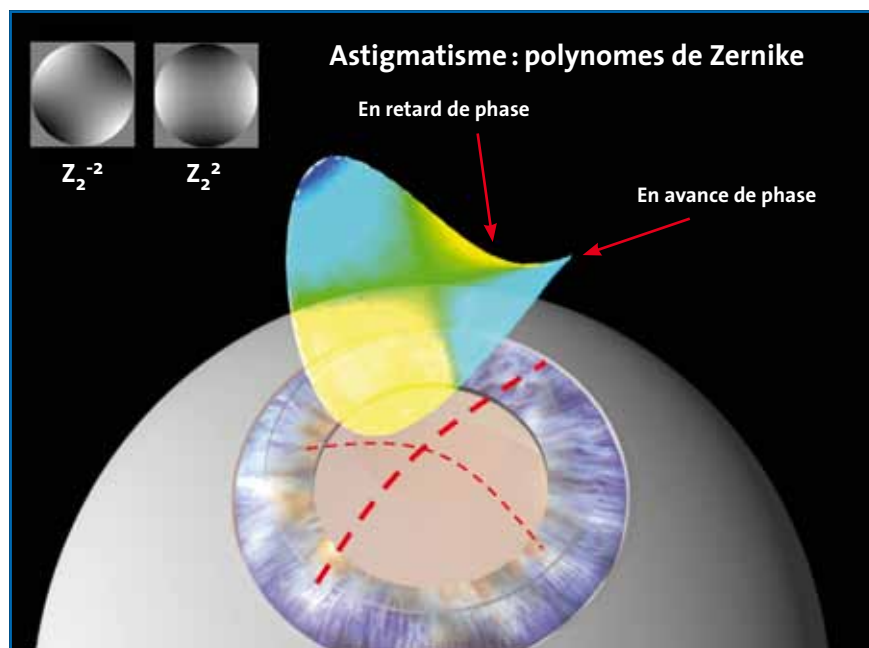


FIG. 4 : Représentation schématique du déphasage infligé au front d'onde par un astigmatisme régulier "mixte" (équivalent sphérique nul). Les extrémités du méridien plat de la cornée sont géométriquement plus éloignées de la fovéa que celles du méridien cambré. Cet allongement du trajet optique fait 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). Le déphasage infligé au front d'onde peut être exprimé comme une combinaison linéaire des fonctions de Zernike Z_2^{-2} et Z_2^2 .

matisme sur le front d'onde (fig. 4). Cet effet est scindé en deux composantes indépendantes, dont la contribution dépend de l'orientation de l'astigmatisme et de sa magnitude. Dans ce contexte, l'astigmatisme est décrit comme un déphasage continu sinusoïdal "autour" du défocus (la valeur du défocus doit être comprise comme celle de l'équivalent sphérique). Il est quantifié par deux fonctions polynomiales, dont les symboles respectifs sont Z_2^{-2} et Z_2^2 , chacune étant affectée d'un coefficient RMS (noté respectivement C_2^{-2} et C_2^2) exprimé en microns.

Dans cette notation, l'indice (Z_2) correspond à la "courbure" du déphasage induit, qui est donc un défocus parabolique. L'exposant ($Z^{\pm 2}$) correspond à la fréquence azimutale faisant varier ce défocus : cette fréquence est égale à 2, car le défocus oscille "deux fois" sur 360° (les pics et les creux se situent en regard

de chacun des héli-méridiens principaux). La composante Z_2^2 est orientée pour refléter la composante directe ou inverse de l'astigmatisme, alors que la composante Z_2^{-2} est orientée pour refléter la composante oblique (45°/135°).

N'importe quel astigmatisme régulier peut être décrit par la combinaison de ces fonctions, en faisant varier le signe et la valeur de chacun des coefficients C_2^{-2} et C_2^2 . Par exemple, le déphasage induit par un astigmatisme parfaitement direct ou inverse sera exprimé par une valeur positive ou négative du coefficient C_2^2 , et nulle pour le coefficient C_2^{-2} . Un astigmatisme parfaitement oblique (méridien de puissance extrême orienté à 45° ou 135°) sera exprimé par une valeur positive ou négative du coefficient C_2^{-2} , et nulle pour le coefficient C_2^2 . Les autres orientations pourront être atteintes en pondérant judicieusement la valeur des coefficients.

L'avantage de cette notation est de faciliter le traitement mathématique et statistique de l'astigmatisme : elle s'affranchit de la valeur de l'axe, par une "projection" sur deux fonctions dont l'orientation est fixée. Bien entendu, des formules de conversion permettent de transcrire en notation "Zernike" un astigmatisme ("cylindre" x "axe") pour un diamètre de pupille donné. Il est important de garder à l'esprit que le diamètre du front d'onde analysé influe sur la valeur des coefficients de Zernike. Pour fournir les éléments d'une comparaison pertinente entre différentes mesures, le recueil des valeurs des coefficients affectés à ces polynômes doit donc être effectué sur un diamètre pupillaire identique.

3. Coefficients J_0 , J_{45} (notation de Thibos)

Cette notation s'apparente dans ses principes à la notation en polynômes de Zernike, mais elle permet de conserver l'unité "dioptrie" pour caractériser la magnitude de l'astigmatisme [2]. L'astigmatisme oculaire peut être décomposé en deux composantes de puissance vectorielle J_0 et J_{45} dont on calcule les coefficients en utilisant les notations suivantes :

$$J_0 = \frac{1}{2} C \times \cos(2 \cdot \phi)$$

$J_{45} = \frac{1}{2} C \times \sin(2 \cdot \phi)$, où C est égal à la magnitude de l'astigmatisme, et ϕ est l'axe (en radian) correspondant à l'orientation de l'astigmatisme (qui doit être exprimé dans la formule de prescription en cylindre positif).

La valeur absolue du coefficient qui pondère la composante J_0 reflète le "poids" de l'astigmatisme direct (ou inverse, en fonction du signe), alors que celle de la composante J_{45} reflète le "poids" de l'astigmatisme oblique. Cette notation est utile pour effectuer des calculs de moyennes [3] ou comparer l'efficacité de deux stratégies de correction de l'astigmatisme [4].

4. Coefficients de Fourier

Cette notation est généralement employée en topographie cornéenne (**fig. 5**). L'opération de transformation de Fourier consiste à décomposer un signal périodique complexe en une somme d'harmoniques élémentaires (fonction cosinus ou sinus). Le signal est représenté ici par la mesure sur 360°, à une distance donnée du centre de la pupille (ou du vertex cornéen), de la puissance kératométrique locale, ou de l'élévation vis-à-vis d'une surface de référence : ce signal est périodique, car on revient au point de départ et l'on décrit la même variation du paramètre mesuré à chaque fois que l'on fait un tour complet !

L'astigmatisme est assimilé à une harmonique exprimée par un cosinus ou sinus 2α . La distance séparant la hauteur du "pic" et la profondeur du "creux" correspond à la magnitude de l'astigmatisme. La position des pics et des creux corres-

pond aux axes respectifs des héli-méri-diens principaux, et permet de retrouver facilement l'axe de la formule de prescription à même de permettre la correction de l'astigmatisme cornéen.

5. Représentation vectorielle

Les vecteurs offrent un outil efficace pour la résolution de nombreux problèmes mathématiques, notamment en géométrie. Ils se prêtent également à la modélisation de nombreux problèmes en physique. L'astigmatisme est défini par une magnitude et une orientation, et à ce titre, peut être modélisé comme un vecteur.

Un vecteur est généralement représenté par un segment orienté (une flèche), qui est caractérisé par sa longueur, sa direction et son sens (**fig. 6**). Il est facile de modéliser la valeur absolue de la magnitude de l'astigmatisme comme la longueur de la flèche. Dans un réfé-

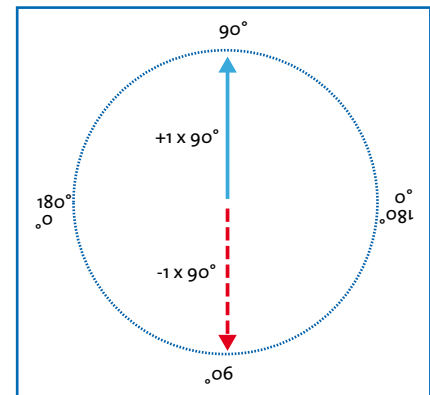


FIG. 6 : Exemple de représentation vectorielle de l'astigmatisme : l'astigmatisme correspondant à une formule de prescription (+1 x 90°) est représenté par la flèche bleue, orientée dans un hémiquadrant supérieur. La correction de cet astigmatisme peut être accomplie par un vecteur d'astigmatisme de magnitude égale mais de direction opposée (pointillés rouges). Ce type de représentation est utile pour estimer le cumul de plusieurs astigmatismes.

rentiel plan, l'orientation de l'astigmatisme peut être assimilée à l'angle formé par la flèche vis-à-vis d'une direction de référence (exemple : 0°/180°). Le signe (positif ou négatif) de la magnitude (le signe du cylindre dans la notation de prescription) définit le sens de la flèche.

L'addition de deux astigmatismes peut s'effectuer comme une somme vectorielle, c'est-à-dire l'addition de flèches permettant de définir un nouveau vecteur. En additionnant deux flèches de même orientation, de même magnitude mais de sens opposé, on obtient un vecteur de longueur nulle ; ce type de "neutralisation" correspond à l'addition d'un astigmatisme de (+1 x 90°) et de (-1 x 90°). On peut ainsi concevoir la correction d'un astigmatisme comme l'addition d'un astigmatisme de même orientation, de même magnitude, mais de sens (signe) opposé.

Pour modéliser l'addition de deux astigmatismes, l'utilisation de vecteurs requiert certaines précautions, car l'astigmatisme correspond à une double oscillation de la puissance optique entre

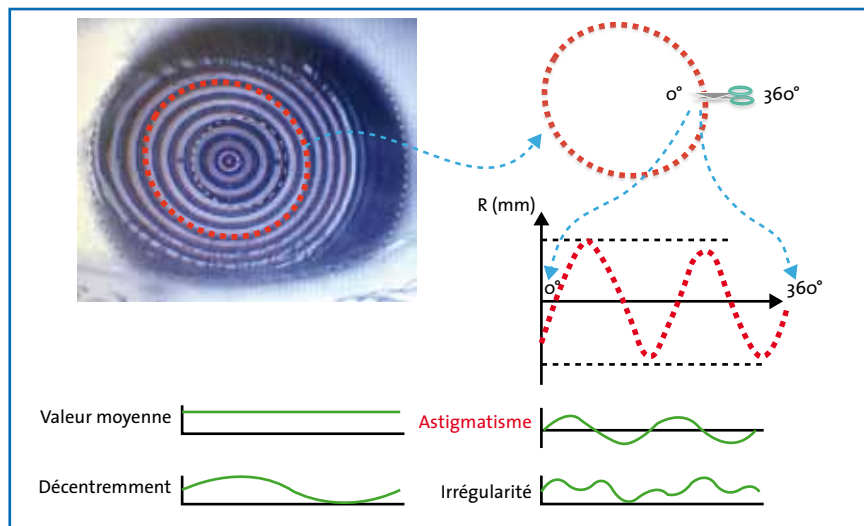


FIG. 5 : Principe de l'analyse de Fourier en topographie cornéenne. Dans cet exemple, l'analyse concerne les variations de la puissance kératométrique sagittale de la surface antérieure de la cornée. Le bord de chaque anneau (reflet du disque de Placido) est analysé comme suit. Considérons le bord matérialisé ici par l'anneau en pointillé rouge. Les variations de la kératométrie le long de cet anneau (sur 360°) sont alors représentées en "déroulé" sur le graphique, entre 0° et 360°. La valeur moyenne de la kératométrie est calculée, ainsi que l'amplitude entre ses valeurs extrêmes. L'astigmatisme (régulier) est exprimé par la seconde harmonique paire. Les coefficients des harmoniques suivantes sont calculés, puis additionnés et regroupés dans un coefficient unique "Irrégularité". Ce calcul est répété pour chacun des anneaux obtenus à partir de l'image de réflexion des mires circulaires. Pour chaque harmonique, la valeur du coefficient global final est égal à la moyenne des coefficients mesurés sur tous les anneaux. La valeur du coefficient de la seconde harmonique correspond au "poids" de l'astigmatisme régulier.

NUMÉRO THÉMATIQUE

Chirurgie de l'astigmatisme : nouveautés

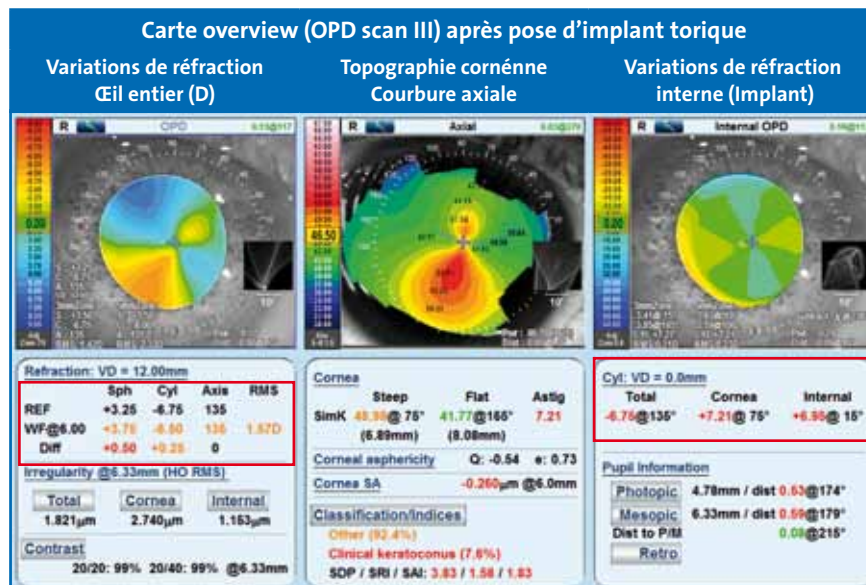


FIG. 7A : Carte topo-aberrométrique (OPDScan III) : œil opéré de cataracte avec pose d'un implant torique visant à corriger 7 dioptries d'astigmatisme kératométrique. La réfraction totale objective mesurée par la fonction aberrométrique du topographe est de +3.25 (-6.75 x 135°) : cette réfraction est celle d'un œil atteint d'astigmatisme mixte. L'astigmatisme cornéen est de +7.21 x 75°, l'astigmatisme interne (induit par l'implant) est de +6.95 x 15° (soit un cylindre négatif équivalent est orienté à 105° : -6.95 x 105°). Il en résulte un astigmatisme oculaire total (cornéen + interne) égal à +6.75 x 135°. La cornée présente un astigmatisme asymétrique (carte axiale, au centre) avec des valeurs kératométriques supérieures à la normales. Ce motif topographique de courbure axiale est très évocateur de kératocône. (À droite, l'encadré rouge contient les valeurs des magnitudes et axes des astigmatismes oculaire total, cornéen antérieur, et interne tels que mesurés par le topographe-aberromètre).

0° et 360°. Il suffit d'un demi-tour (180°), et non d'un tour complet (360°) pour décrire toutes les orientations possibles d'un astigmatisme... Ainsi, un astigmatisme de magnitude +1D orienté à 0° (+1 x 0°) est identique en magnitude et en orientation à un astigmatisme de +1° orienté à 180° (+1 x 180°). Pour éviter de commettre une erreur liée à cette redondance, il faut doubler la valeur de l'angle qui sépare deux vecteurs d'astigmatisme, avant d'additionner leurs flèches respectives. La longueur de la flèche résultante correspond à la magnitude de l'astigmatisme résultant de l'addition. Pour déterminer son orientation en formule de prescription, il est nécessaire de réduire l'angle correspondant à l'orientation de la flèche obtenue de moitié. Il est possible d'adopter certaines conventions de signes et d'orientation conduisant à représenter de manière graphique et simplifiée l'addition de deux astigmatismes (fig. 7). Il est alors possible, "à la main", d'évaluer les conséquences (l'astigmatisme résultant) d'un défaut d'orientation entre un dispositif correc-

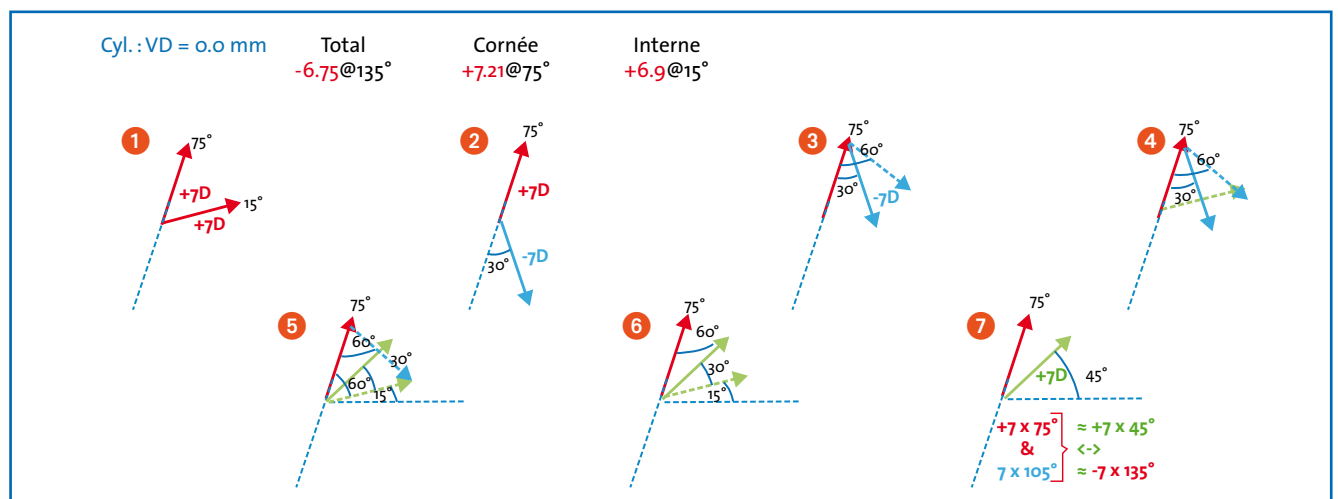


FIG. 7B : Calcul vectoriel : estimation de la résultante entre astigmatisme cornéen et interne (pour un décalage mesuré de 30°) :
 1: Transcription vectorielle de l'astigmatisme cornéen (orienté à 75°) et interne (orienté à 15°). Les magnitudes sont arrondies à 7D.
 2: Conversion en cylindre négatif de l'astigmatisme interne.
 3: On aligne les flèches avant sommation.
 4: On double l'angle (30° → 60°), car l'astigmatisme "oscille" deux fois sur 360°.
 5: On effectue alors la somme des vecteurs : on obtient une flèche résultante de 7D, et orientée à 15° (l'ensemble des flèches forme un triangle équilatéral).
 6: L'angle formé entre la flèche résultante et l'astigmatisme cornéen initial est divisé par deux (en raison de la double oscillation de l'astigmatisme sur 360°) : la flèche résultante forme un angle de 45° avec l'horizontale.
 7: La résultante finale est un astigmatisme de 7D orienté à 45°. Rappelons que +7 x 45° est équivalent à -7 x 135°, on retrouve la direction et la magnitude de l'astigmatisme total. En conclusion, l'erreur d'orientation de 30° de torique explique la magnitude et l'orientation de l'astigmatisme résiduel.

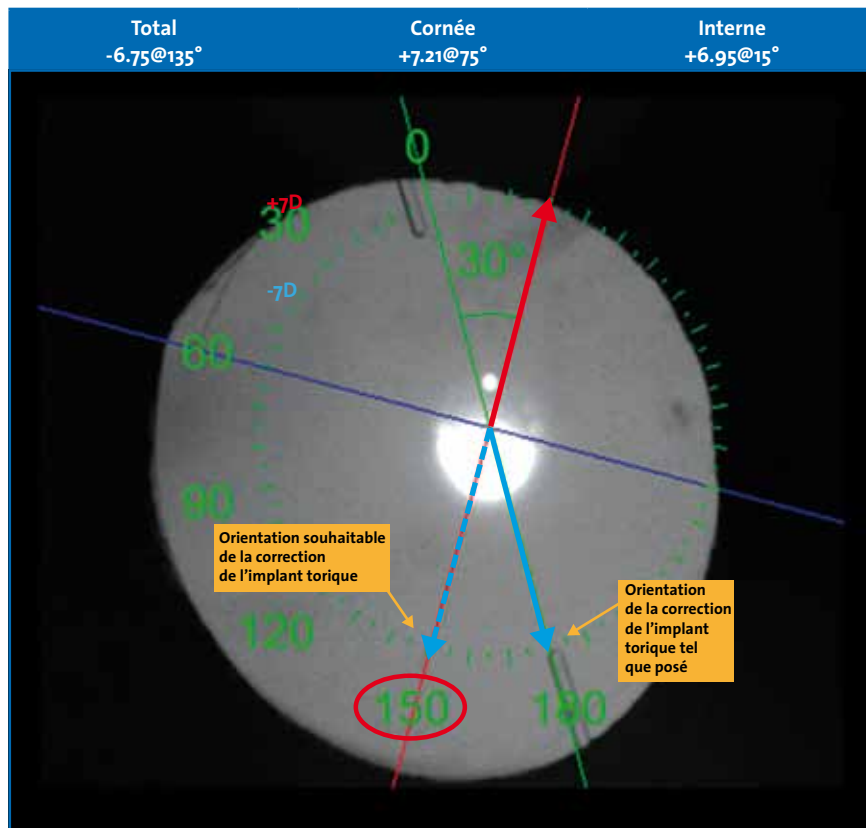


FIG. 7C : Capture en rétro-illumination de l'image pupillaire après dilatation (OPD Scan III) : les marques repères de l'implant permettent de mesurer un angle de 30° entre l'axe du méridien le plus cambré (en rouge) et l'axe le moins puissant de l'implant (repéré en alignant un réticule le long des marques périphériques correspondant au méridien le moins puissant de l'implant). Les flèches rouges et bleues matérialisent l'orientation des vecteurs d'astigmatisme de la cornée (flèche rouge) et de l'implant torique (flèche bleue).

teur (lentille torique, implant torique) et un astigmatisme oculaire ou cornéen. On conçoit alors aisément qu'un désaxage de 30° d'un dispositif correcteur de magnitude opposée (exemple : -2 x 30° pour corriger +2 x 0°) impose la conser-

vation de la magnitude de l'astigmatisme (l'astigmatisme résiduel sera de 2D) : le doublement de l'angle est égal à 60° ; et la longueur identique des flèches vectorielles dessine lors de leur addition un triangle équilatéral.

Conclusion

Cet article fournit une représentation non exhaustive du formalisme utilisé pour le traitement mathématique et statistique de l'astigmatisme oculaire (le traitement matriciel de l'astigmatisme a été volontairement omis). Son auteur espère que le lecteur aura entrevu que l'apparente simplicité des formules de prescription d'astigmatisme utilisées en ophtalmologie dissimule en fait la nature bien plus complexe de ce défaut optique courant.

Bibliographie

1. READ SA, COLLINS MJ, CARNEY LG. A review of astigmatism and its possible genesis. *Clin Exp Optom*, 2007;90:5-19.
2. THIBOS LN, WHEELER W, HORNER D. Power vectors: an application of Fourier analysis to the description and statistical analysis of refractive error. *Optom Vis Sci*, 1997;74:367-375.
3. MILLER JM. Clinical applications of power vectors. *Optom Vis Sci*, 2009;86:599-602.
4. GATINEL D, HOANG-XUAN T. Geometric customization of optical and transition zone parameters for treatment of compound myopic astigmatism with the Nidek EC-5000 excimer laser. *J Refract Surg*, 2007;23:924-930.

L'auteur a déclaré ne pas avoir de conflits d'intérêts concernant les données publiées dans cet article.