

D. GATINEL\*



## Redécouvrir l'astigmatisme

L'astigmatisme oculaire est un défaut aussi classique que complexe si l'on veut en décrire avec justesse les conséquences sur le trajet des rayons lumineux réfractés. L'étude des phénomènes optiques engendrés par l'astigmatisme est cependant nécessaire pour comprendre l'effet des dispositifs de correction, ainsi que leurs contraintes.

A ces particularités s'ajoute le fait que l'astigmatisme oculaire est la résultante de l'astigmatisme engendré par la cornée et les dioptries internes.

Cette distinction est essentielle dans le cadre de la chirurgie de la cataracte quand on envisage l'utilisation d'un implant torique pour corriger un astigmatisme cornéen.

**L'**astigmatisme est un défaut optique de l'œil fréquent, qui peut être associé à la myopie ou à l'hypermétropie, et qui provoque un flou visuel non corrigible par un verre sphérique concave ou convexe.

Derrière cette définition élémentaire se dissimulent bien des complexités. Les documents qui fournissent une définition précise ou une description claire de l'astigmatisme sont en effet assez rares et la plupart des schémas explicatifs se limite à un tracé sommaire de rayons focalisés à travers une lentille torique vers un système de focales perpendiculaires.

Alors qu'il fait partie du quotidien de l'ophtalmologiste, la représentation de l'astigmatisme en tant que phénomène optique demeure souvent approximative (ce qui n'empêche pas d'en effectuer un diagnostic précis et une prescription de correction efficace). Cet article vise à éclairer sous un angle original et moderne certains aspects propres aux particularités de l'astigmatisme et des techniques dédiées à son diagnostic et sa correction.

### ■ ASTIGMATISME RÉGULIER: DÉFINITION

L'astigmatisme désigne littéralement l'absence de stigmatisme affectant un système optique. Il peut être régulier ou irrégulier; nous aborderons ici le cas de l'astigmatisme régulier, ou "défocus cylindrique", qui correspond à l'astigmatisme que l'on peut corriger en lunettes (l'astigmatisme irrégulier correspond à l'ensemble des aberrations optiques de haut degré qui ne sont pas corrigibles par les verres de lunettes).

Avant l'introduction des outils modernes de diagnostic comme les topographes et les aberromètres, il était impossible de quantifier et de qualifier les défauts optiques non corrigibles par des verres de lunettes. Aujourd'hui, l'utilisation d'un aberromètre permet de séparer les composantes régulières et irrégulières de l'astigmatisme oculaire. Cette distinction peut être même effectuée séparément pour ses composantes cornéennes et internes, à condition de disposer d'un topographe-aberromètre (ex. : OPDscan®, Nidek®) [1].

La composante irrégulière de l'astigmatisme peut être scindée en différentes composantes dénommées "aberrations de haut degré (coma, aberration sphérique, trefoil, etc.)" [2]. Etayer le diagnostic d'astigmatisme interne ou irrégulier est nécessaire pour assurer une gestion chirurgicale moderne et efficace de l'astigmatisme [3] où l'utilisation de techniques soustractives (photoablation) ou additives (implants) pourra être employée selon le contexte clinique.

### ■ CONSEQUENCES DE L'ASTIGMATISME RÉGULIER SUR LE TRAJET DES RAYONS LUMINEUX

L'astigmatisme est un défaut optique dont les conséquences sur le trajet des rayons optiques réfractés ne se perçoivent pleinement qu'en trois dimensions. Pour en étudier les caractéristiques, on peut considérer une lentille torique qui possède une courbure variant régulièrement selon les méridiens et générant de l'astigmatisme régulier.

Cette lentille peut être matérialisée comme l'assemblage continu de sections de lentilles de courbure (et donc de puissance) variable. Elle ne peut faire d'un point source une image ponctuelle, car les rayons réfractés convergent différemment selon les méridiens qu'ils ont traversés. Il n'existe pas de plan focal où l'on peut former une image ponctuelle d'un point source (même si certains plans sont "meilleurs" que d'autres): cette caractéristique épouse la définition même de l'astigmatisme.

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

La **figure 1** fournit une représentation schématique d'une lentille torique plan-convexe dont seuls les méridiens principaux sont représentés. Le méridien le plus courbe étant vertical, la lumière réfractée par ce méridien converge en avant de celle réfractée par le méridien horizontal.

Imaginons maintenant que l'on déplace un écran le long de ce train de lumière. Il existe des positions "remarquables" où l'on observe des images où la distribution focale des rayons se fait en forme de "trait" (**fig. 2**).

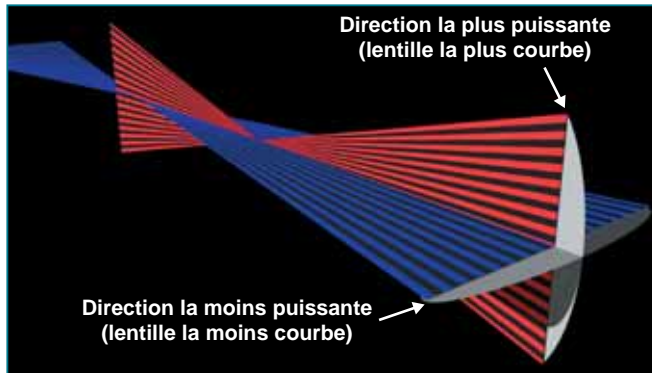
Si l'on ajoute des rayons réfractés par les méridiens obliques, on obtient une figure plus complexe qui se rapproche de l'enveloppe de l'ensemble des rayons réfractés par un système entaché d'astigmatisme, appelée conoïde de Sturm (Sturm conoid) (**fig. 3**).

Cette figure peut être appréhendée de façon concrète en interposant à nouveau un écran sur le trajet de ces rayons afin d'obtenir une représentation plus fidèle, mais toujours schématique de la distorsion

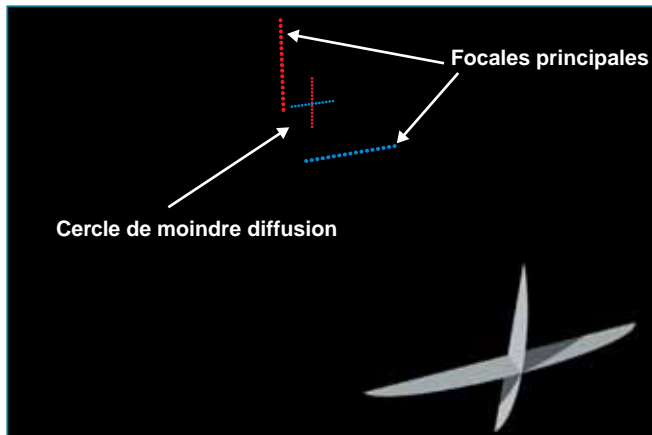
optique induite par l'astigmatisme, que la simple représentation des focales en forme de traits épars (**fig. 4**).

On remarque alors que la forme de la tache focale (délimitée par l'enveloppe des rayons) varie entre l'ellipse plus ou moins allongée et le "nœud papillon" dans l'espace situé en dehors des "focales principales", mais épouse une allure globalement losangique dans l'espace situé entre les focales. La distorsion optique est d'ailleurs moindre si l'on recueille l'image du point source dans un plan situé entre les focales (zone du cercle de moindre diffusion). Ces figures sont obtenues par modélisation informatique et ne tiennent pas compte des phénomènes de diffraction; elles ne fournissent qu'une représentation approchée de l'image en intensité lumineuse que l'on recueillerait à la sortie d'une lentille torique convexe.

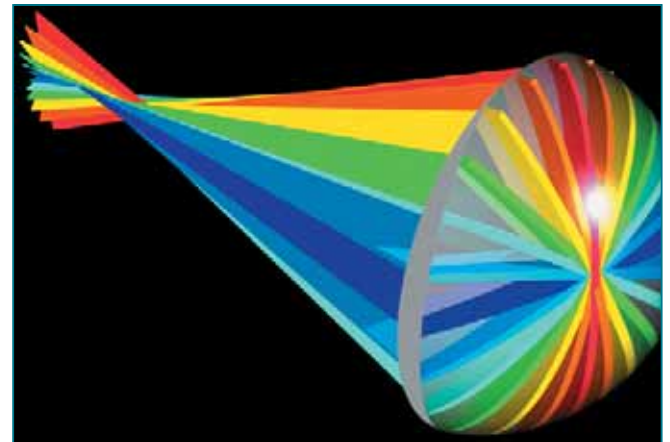
La **figure 5** simplifiée fournit toutefois une clé pour représenter les différents types d'astigmatisme rencontrés en pratique clinique et classés selon la position des plans des focales principales vis-à-vis de la rétine du patient.



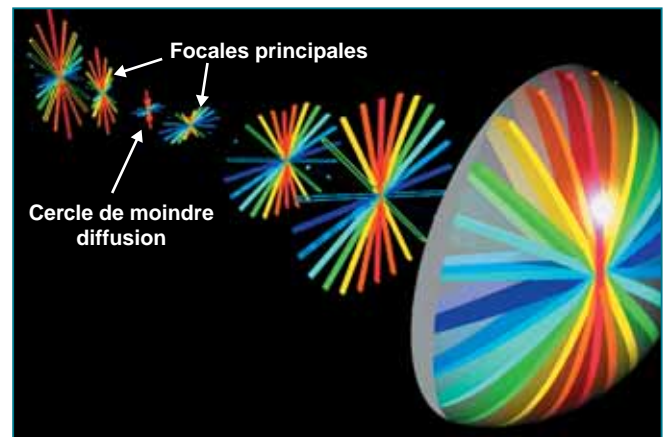
**Fig. 1 :** Trajets de focalisation par une lentille torique plan-convexe dont seuls les méridiens principaux et les rayons lumineux réfractés ont été représentés. (Illustration © D. Gatinel)



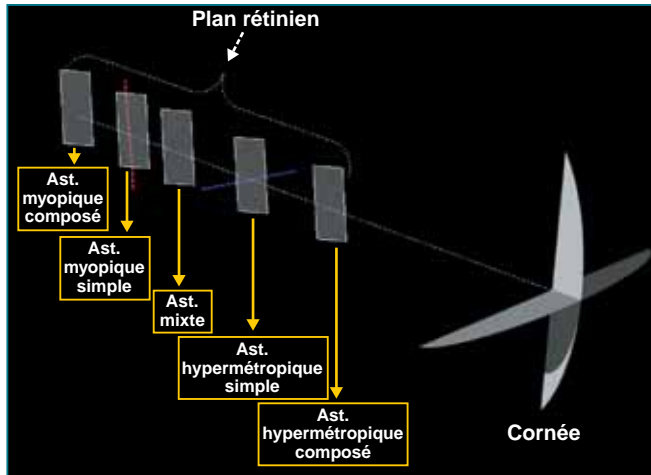
**Fig. 2 :** Représentation schématique de l'intersection des rayons réfractés par les plans principaux d'une lentille torique. Cette représentation simplifiée fait l'impasse sur la lumière réfractée par l'ensemble des méridiens non extrêmes de la lentille, et ne correspond qu'à une simple intersection de rayons (la diffraction est négligée). (Illustration © D. Gatinel)



**Fig. 3 :** Représentation de l'enveloppe des rayons réfractés par différents méridiens d'une lentille torique. Les couleurs sont ici utilisées pour permettre une meilleure visualisation de la figure, et n'ont rien à voir avec un quelconque "chromatisme". (Illustration © D. Gatinel)



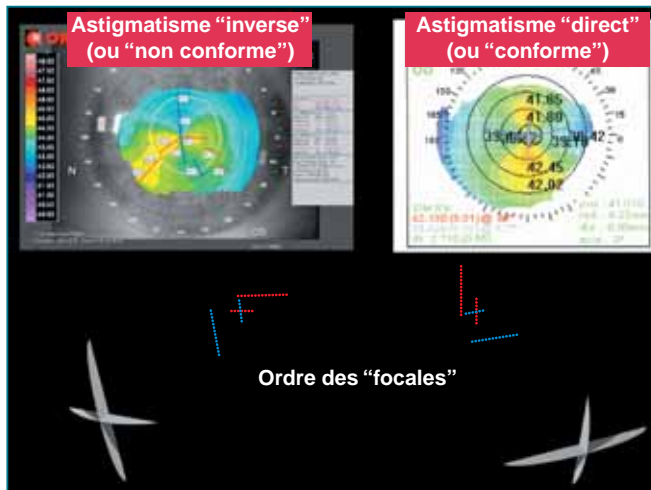
**Fig. 4 :** Intersection des rayons réfractés dans certains plans situés sur le trajet des rayons ayant été réfractés par une lentille torique. (Illustration © D. Gatinel)



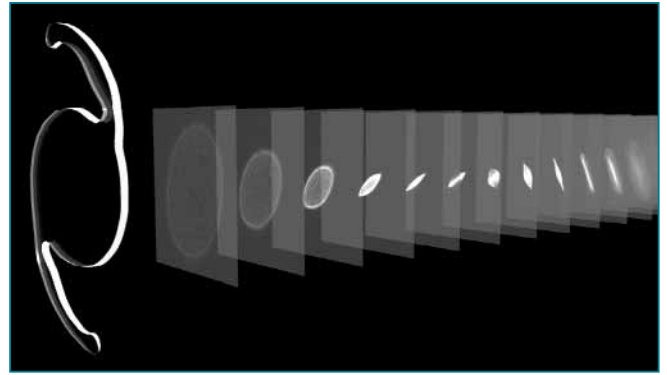
**Fig. 5 :** Classification des astigmatismes en fonction des distances focales propres aux méridiens principaux vis-à-vis du plan rétinien. Cette classification de l'astigmatisme oculaire ne prend pas en compte son origine (cornéenne ou interne). (Illustration © D. Gatinel)

Par convention, un astigmatisme direct (ou conforme – “WTR : with the rule”) induit une focalisation des rayons de telle sorte que la focale “verticale” est située dans un plan plus éloigné de la pupille d’entrée que la focale “horizontale”. Un astigmatisme indirect (ou non-conforme – “ATR : against the rule”) induit une focalisation des rayons de telle sorte que la focale “horizontale” est située dans un plan plus éloigné de la pupille d’entrée que la focale “verticale” (**fig. 6**).

Afin d’obtenir une représentation plus concrète de la distribution de l’intensité lumineuse après traversée d’un système pourvoyeur d’astigmatisme, nous avons capturé plusieurs images au moyen d’une caméra CCD d’un faisceau de lumière laser (635 nm) après traversée d’un implant torique (AcrySof® Toric). Cette acquisition a été réalisée dans le cadre d’une expérimentation destinée à isoler et mesurer dans des conditions expérimentales l’effet sur le front



**Fig. 6 :** Exemples de cartes de courbure topographique cornéenne pour des cornées “toriques”, pourvoyeuses d’astigmatisme et représentation schématique des focales successives correspondantes. (Illustration © D. Gatinel)



**Fig. 7 :** Représentation de la répartition de l’intensité lumineuse après réfraction d’un faisceau incident collimaté monochromatique. Les focales principales, encadrant “l’intervalle de Sturm”, sont bien visibles. Les images des taches focales ont été obtenues grâce à une caméra CCD, et remises “en perspective” pour des besoins didactiques. (Illustration © D. Gatinel)

d’onde d’implants pseudophaques (utilisation de l’interférométrie à décalage latérale, technologie SID 4, Phasics, France : [www.phasics.com](http://www.phasics.com)).

La **figure 7** présente une vue d’artiste en perspective, effectuée à partir des images recueillies par le capteur CCD. Les focales principales et la zone de moindre diffusion sont aisément discernables. Une fois implanté dans le sac capsulaire, l’implant torique induirait un astigmatisme neutralisant idéalement l’astigmatisme cornéen et corrigerait l’hypermétropie liée à l’aphaquie.

## VISION DE L'ASTIGMATE

Les tracés de rayons sont utiles pour comprendre l’erreur de focalisation provoquée par un système pourvoyeur d’astigmatisme.

Pour étudier le “rendu” d’un œil atteint d’astigmatisme, il faut le réduire à un système optique composé d’un objectif (cornée + cristallin) destiné à la formation de l’image de la scène observée sur un capteur (la rétine). L’image observée (que l’on peut assimiler à un ensemble de points sources élémentaires) est échantillonnée par la mosaïque des photorécepteurs rétinien. La qualité optique de l’œil gouverne la manière dont celui-ci projette sur la mosaïque rétinienne l’ensemble des points élémentaires de l’image situés autour du point fixé. En l’absence d’aberration optique (ni myopie, ni astigmatisme, etc.), la résolution maximale théorique de l’image perçue dépend de la densité de ces photorécepteurs, tout comme la résolution d’un écran est liée au nombre de pixels qu’il comporte. Les aberrations optiques provoquent un étalement de l’image du point, qui, moins défini spatialement, pourra simuler plusieurs cônes adjacents, de sorte que deux points sources rapprochés ne pourront être distingués [3].

La fovéa est la région de la rétine utile pour la vision précise centrale et où la densité des cônes est maximale et leur taille minimale (deux microns). Cette densité autorise une résolution de l’ordre de 20/10. Ce pouvoir de résolution permet à l’œil de séparer deux points séparés par une distance angulaire de 30 secondes d’arc (c’est-à-dire un cent-vingtième de degré : on peut calculer que cette acuité permet-

trait théoriquement de discerner les bords du disque occupé dans le ciel par la planète Jupiter à l'œil nu depuis la Terre !).

Il est intéressant de constater que dans des conditions optimales (aucune aberration, et pupille dilatée pour réduire au maximum la diffraction), les dimensions de l'image formée d'une source lumineuse ponctuelle sont du même ordre que celles d'un cône de la fovéa (deux microns environ). L'œil astigmaté non corrigé présente une acuité inférieure à 20/10 car il forme une image non fidèle d'un point source (c'est-à-dire plus large que ne l'impose la seule diffraction). L'astigmatisme provoque également une réduction significative de la perception des contrastes.

La vision de l'astigmaté peut être simulée (fig. 8) par le logiciel de certains aberromètres au moyen de techniques de convolution. Le flou induit par cette aberration isolée est "orienté" selon un axe particulier, mais la plupart des patients astigmatés ne perçoit pas cette orientation et se plaint simplement de voir "flou". La présence d'une diplopie monoculaire autour des lumières vives est parfois rapportée en cas d'astigmatisme prononcé direct ou oblique: elle doit également faire rechercher la présence d'une aberration de coma associée.

La dispersion spatiale de l'intensité lumineuse étant moindre dans la zone comprise entre les focales principales, toutes les amétropies composées de même magnitude cylindrique (ex.:  $(-3 \times 0^\circ) + 1$ ,  $(+3 \times 90^\circ) + 1$ ) n'ont pas les mêmes conséquences en termes d'acuité visuelle non corrigée. Un équivalent sphérique proche de 0 implique que la dispersion de la Point Spread Function (Fonction d'Étalement du Point) dans le plan rétinien puisse prendre une forme plus compacte (cercle de moindre diffusion) et autoriser une acuité visuelle non corrigée plus élevée que dans le cas d'un astigmatisme composé. Un astigmatisme de magnitude modérée, classiquement oblique ou inverse, peut accroître la profondeur de champ d'un patient presbyte.

■ ASTIGMATISME CORNEEN OU INTERNE ?

L'astigmatisme total est principalement induit par la toricité de la cornée mais peut être également modulé par une composante cristallinienne [2]. L'utilisation d'un topographe-aberromètre permet d'effectuer cette distinction qui peut influencer sur la stratégie de correction de l'astigmatisme (fig. 9).

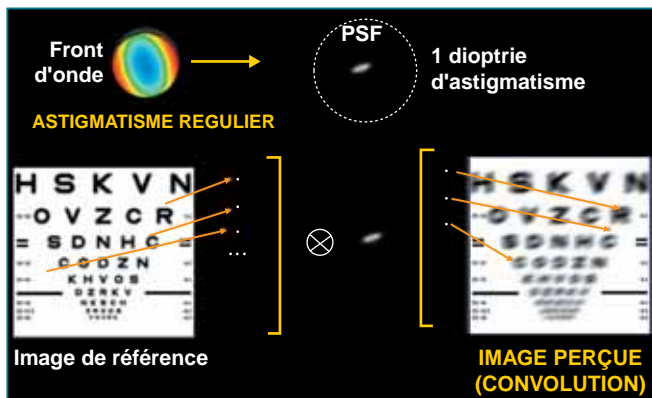


Fig. 8 : Simulation de la vision perçue par un patient astigmaté (pour une dioptrie d'astigmatisme myopique pur :  $-1 \times 25^\circ$ ). (Illustration © D. Gatinel)

- ▶ L'astigmatisme est un défaut optique complexe dont il existe de nombreuses représentations erronées. Les conséquences sur le trajet des rayons optiques réfractés par un dispositif pourvoyeur d'astigmatisme sont difficiles à visualiser et ne se perçoivent pleinement qu'en trois dimensions.
- ▶ Contrairement à ce que suggère sa formulation clinique (Cylindre x Axe), l'astigmatisme est la conséquence d'une déformation globale et affectant l'ensemble des méridiens des surfaces réfractives de la cornée et/ou du cristallin. Pour être pleinement efficace, la correction chirurgicale de l'astigmatisme doit tenir compte de cette spécificité.
- ▶ Les systèmes d'analyse composés à la fois d'un aberromètre et d'un topographe permettent de séparer les composantes internes et cornéennes de l'astigmatisme.
- ▶ La puissance et l'orientation d'un implant pseudophaque torique ne doivent tenir compte que de la composante cornéenne de l'astigmatisme. Celle-ci est estimée à partir des données seules de la topographie cornéenne.
- ▶ Une erreur d'alignement de l'axe d'un dispositif correcteur de l'astigmatisme se traduit par une sous-correction marquée par la persistance d'un cylindre résiduel dont l'axe est différent de celui de l'astigmatisme initial.

POINTS FORTS

La puissance et l'orientation d'un implant pseudophaque torique ne doivent tenir compte que de la composante cornéenne de l'astigmatisme. Celle-ci est estimée à partir des données seules de la topographie cornéenne. En préopératoire, leur soustraction aux données purement réfractives acquises par l'aberromètre permet de calculer

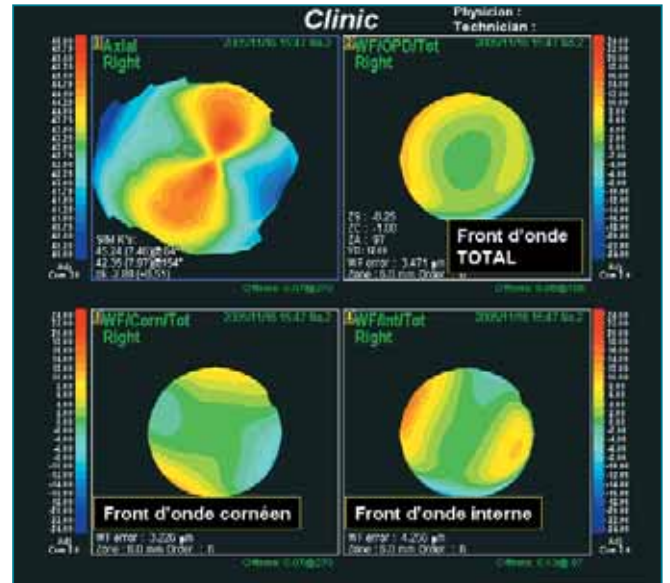


Fig. 9 : Calcul et représentation des fronts d'onde cornéens, total et interne (aberromètre-topographe OPDscan® Nidek®) chez un patient opéré de cataracte avec insertion d'un implant pseudophaque torique pour la correction d'un astigmatisme cornéen de 3D. Noter la perpendicularité des axes respectifs des fronts d'onde cornéen et interne. La sommation de ces deux astigmatismes d'axe opposé résulte en leur neutralisation au sein du front d'onde total.



la valeur de l'astigmatisme interne (face postérieure de la cornée, et surtout cristallin).

En langage aberrométrique, l'astigmatisme s'exprime sous la forme d'une combinaison linéaire de polynômes de Zernike ( $Z_{22}$ ,  $Z_{2-2}$ ). Ce formalisme est effectué à la manière d'une écriture en "cylindres croisés", avec un équivalent sphérique de valeur nulle [4, 5]. En d'autres termes, cette notation permet de ne pas modifier l'équivalent sphérique d'un système quand on retire ou ajoute de l'astigmatisme (le cylindre croisé de Jackson ne génère qu'une combinaison des polynômes de Zernike  $Z_{22}$  et  $Z_{2-2}$ !).

## ■ PRINCIPES ELEMENTAIRES POUR LA CORRECTION DE L'ASTIGMATISME

Pour être efficace, la correction d'un astigmatisme oculaire doit :

- utiliser un système de correction (verre, profil d'ablation, surface réfractive) torique ou "cylindrique" afin de rétablir un stigmatisme dans un plan focal (c'est-à-dire amener vers un foyer unique les rayons focalisés par la cornée et le cristallin),
- utiliser un système de correction sphérique positif (convergent) ou négatif (divergent) pour déplacer ce foyer unique dans le plan de la rétine.

Notons que la première étape suffit dans le cas d'un astigmatisme pur.

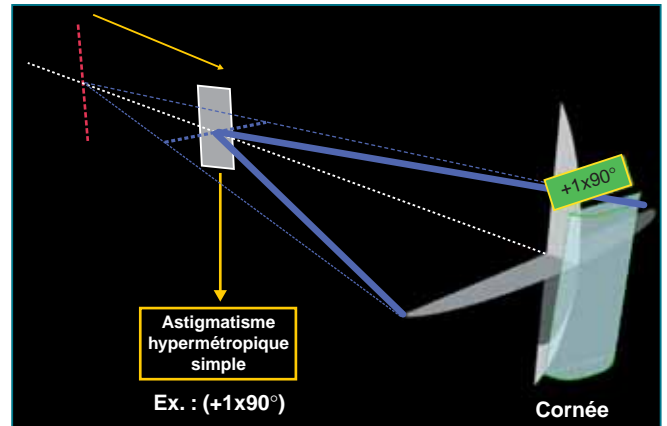
La **figure 10** représente l'effet d'un verre cylindrique positif sur la réfraction d'une cornée torique, dont l'axe le plus cambré est vertical.

Les stratégies de traitements de l'astigmatisme par la chirurgie réfractive au laser excimer ont fait l'objet de débats divers. Nous avons pu y contribuer en ayant recours à la modélisation informatique [6-8].

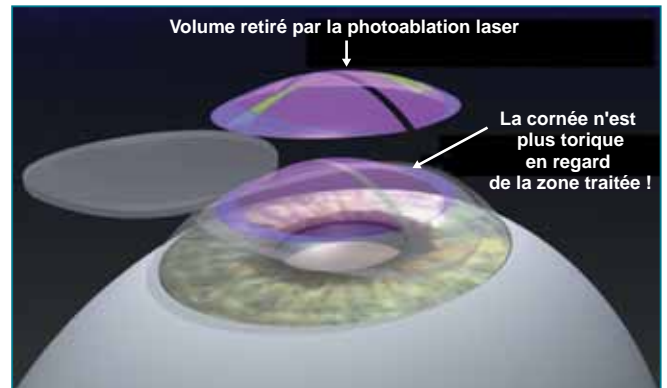
La **figure 11** représente le volume qui doit être photoablaté par le laser Excimer pour corriger un astigmatisme hypermétrope pur ( $+1 \times 90^\circ$ ). L'effet du traitement photoablatif est de cambrer sélectivement le méridien horizontal pour lui donner un gain de puissance optique égal à 1 D.

Le choix d'un profil d'ablation en cylindre négatif ou positif peut avoir des répercussions sur le traitement de l'astigmatisme hypermétrope simple, composé ou mixte. En utilisant des surfaces virtuelles, nous avons modélisé les différences induites par ces stratégies et expliqué la relation sous-jacente entre cylindre négatif et positif. L'utilisation de techniques de modélisation tridimensionnelles nous a conduit à modifier intentionnellement la forme des zones d'ablation programmées pour la correction au laser Excimer de l'astigmatisme myopique; le bénéfice clinique induit par cette "optimisation géométrique" a été vérifié [9-11].

Un implant torique de puissance adaptée permet de corriger l'astigmatisme cornéen à condition d'orienter l'axe le plus puissant de l'optique selon le méridien le moins cambré. Le positionnement de l'implant dans le sac capsulaire est favorisé par des repères situés sur l'optique de l'implant, ainsi que le marquage d'un ou plusieurs méridiens remarquables sur la cornée (qu'il est préférable d'effectuer sur un patient en



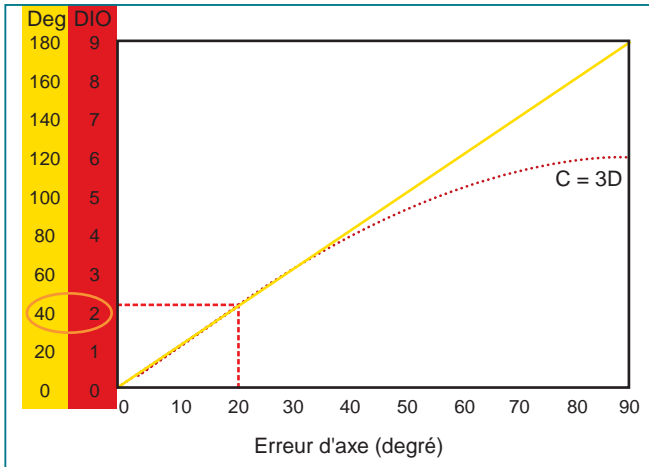
**Fig. 10:** La réfraction de ce système avant correction serait plan ( $+1 \times 90^\circ$ ). La cornée présenterait une toricité telle que la puissance du méridien horizontal serait insuffisante (il "manque" une dioptrie à l'axe  $0^\circ$ , et seul le méridien vertical focalise dans le bon plan : la focale verticale rouge est induite par le fait que les rayons qui ont traversé le méridien vertical ont déjà focalisé). L'axe "long" du cylindre (vertical dans cet exemple) est neutre sur le plan optique. L'axe "court" correspond à l'axe où la correction optique apportée est maximale. Cet axe est placé logiquement dans la même direction que l'axe le plus plat (celui où il manque une dioptrie), auquel il apporte le gain de puissance optique nécessaire à la correction de l'astigmatisme. Il est crucial d'observer que la focale éloignée (représentée en rouge) ne se "déplace" pas vers l'avant sous l'effet du verre correcteur (contrairement à ce que l'on peut trouver ainsi explicité en légende de nombreux schémas qui sont source de confusion). Cette focale "disparaît" naturellement du fait de la focalisation plus rapprochée des méridiens horizontaux induite par le verre cylindrique quand il est orienté verticalement. Les rayons situés sur le méridien vertical traversent une épaisseur de verre constante et leur trajet n'est heureusement pas modifié! (Illustration © D. Gatinel)



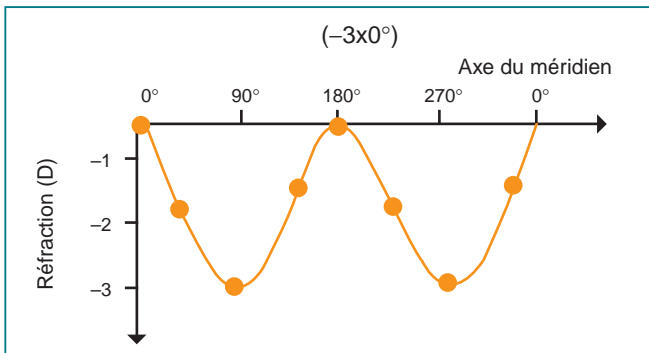
**Fig. 11:** Profil d'ablation pour le traitement de l'astigmatisme hypermétrope pur en LASIK: le volume modélisé correspond au volume photoablaté pour la zone optique et la zone de transition. (Illustration © D. Gatinel)

position assise). Une erreur d'alignement d'axe se traduit par une sous-correction et la persistance d'un cylindre résiduel (**fig. 12**).

La formulation (Sphère, Cylindre x Axe) classiquement utilisée pour la prescription de verres correcteurs n'en fournit pas une représentation directement intelligible. Par exemple, l'expression ( $-3 \times 0^\circ$ ) peut inciter à croire que l'astigmatisme est un défaut de trois dioptries qui s'exerce le long du méridien situé à  $0^\circ$ . En réalité, dans cet exemple, ce méridien horizontal possède la puissance la plus faible, car c'est



**Fig. 12:** Conséquence d'une erreur d'axe sur la magnitude et l'axe d'un traitement cylindrique. La courbe en pointillés rouges permet de mesurer la magnitude résiduelle (colonne rouge) d'un cylindre de 3 D en fonction de l'erreur d'axe (axe horizontal). Cette variation de magnitude s'accompagne d'une variation de l'axe du cylindre (rotation subie par l'axe en degré: colonne jaune). Noter la perte de l'effet correctif sur la magnitude du cylindre à partir d'un désaxage de 30°. Au-delà, la magnitude du cylindre résiduel augmente. Elle double pour un désaxage de 90°. (Illustration © D. Gatinel)



**Fig. 13:** Astigmatisme myopique pur régulier (-3x0°): variation théorique de l'erreur réfractive en fonction de la localisation azimutale du méridien considéré (les méridiens séparés par 180° sont identiques deux à deux). On observe dans cet exemple que tous les méridiens sauf le méridien horizontal (0°-180°) présentent une erreur réfractive myopique d'intensité variable (maximale pour le méridien 90°-270°).

le méridien vertical qui est le plus puissant de 3 dioptries. De plus, cette formulation tend à mettre l'accent sur les méridiens principaux, et occulte la contribution des méridiens intermédiaires.

L'astigmatisme est un défaut optique dont la représentation en termes de tracé de rayons fait appel aux trois dimensions de l'espace; l'astigmatisme régulier peut être appréhendé comme du défaut qui varie continuellement selon l'azimut entre deux méridiens perpendiculaires (fig. 13). C'est en fait cette particularité géométrique qui impose le plus de contraintes aux méthodes de corrections photoablatives ou incisionnelles car celles-ci doivent apporter le degré exact de compensation pour chacun des méridiens de la cornée. En pratique, la régression cicatricielle et le comportement biomécanique du tissu cornéen réduisent la précision de ce type de cor-

rection. Les incisions relaxantes sont pratiquées sur les méridiens les plus cambrés, et l'effet de ces traitements sur la courbure des méridiens intermédiaires et plus plats est plus difficile à contrôler. Enfin, toute asymétrie dans la réalisation des incisions relaxantes peut induire une élévation du taux des aberrations de haut degré.

De par leur design, les méthodes de correction additives (lentilles, implant torique) intègrent une variation régulière de la puissance réfractive qui épouse en négatif celle de l'astigmatisme à corriger. Un positionnement et un centrage adéquats suffisent alors en théorie à la correction d'un astigmatisme oculaire (lentille) ou cornéen (implant pseudophaque), car les phénomènes de régression cicatricielle n'en affectent pas directement la structure.

## CONCLUSION

Le diagnostic précis et la correction de l'astigmatisme oculaire présentent bien des contraintes, dont cet article ne fournit qu'un aperçu. La prise en compte de ces particularités permettra certainement d'accroître la qualité de la correction chirurgicale de ce fréquent défaut réfractif.

Les systèmes de correction additive comme les implants toriques ont l'avantage d'induire une correction optimale pour l'ensemble des méridiens oculaires. Ils exigent du chirurgien une maîtrise diagnostique et chirurgicale dont les détails sont exposés dans les articles compagnons de ce numéro spécial. □

## Bibliographie

- GATINEL D, HOANG-XUAN T. Measurement of combined corneal, internal and total ocular optical quality analysis in anterior segment pathology with the OPD-scan and OPD-station. *J Refract Surg*, 2006; 22: S1 014-S1 020.
- GATINEL D. Corneal Topography and Wavefront analysis. *In: Principles and Practice of Ophthalmology*, 4th Edition. Daniel M. Albert, Frederick A. Jakobiec, Saunders, Elsevier, USA, 2007.
- GATINEL D, HOANG XUAN T. LASIK outcomes in astigmatism. *In: Smolin and Thoft's The Cornea. Scientific foundations and clinical practice. Fourth Edition*, Foster CS, Azar DT, Dohlman CH, 2005, pp. 1 233-44, Lippincott Williams and Wilkins, Philadelphia, PA, USA.
- GATINEL D, MALET J. Appendices. *In: Gatinel D, Hoang-Xuan T. Le LASIK, de la Théorie à la Pratique*. Elsevier, Paris, 2003: pp. 377-88.
- THIBOS LN, HORNER D. Power vector analysis of the optical outcome of refractive surgery. *J Cataract Refract Surg*, 2001; 27: 80-5.
- GATINEL D. Correction des amétropies sphéro-cylindriques: intérêt de la modélisation tridimensionnelle des profils d'ablation. *In: Gatinel D, Hoang-Xuan T. Le LASIK, de la Théorie à la Pratique*. Elsevier, Paris, 2003: pp. 96-9.
- GATINEL D, T HOANG-XUAN T, AZAR DT. Three-dimensional representation and qualitative comparisons of the amount of tissue ablation to treat mixed and compound astigmatism. *J Cataract Refract Surg*, 2002; 28: 2 026-34.
- GATINEL D, HOANG-XUAN T. Modélisation tridimensionnelle et géométrie descriptive des profils de photoablation sphériques et cylindriques purs au laser Excimer. *J Fr Ophthalmol*, 2002; 25: 247-56.
- GATINEL D, HOANG-XUAN T. Geometric customization of the optical and transition zone parameters for the treatment of compound myopic astigmatism with the NIDEK EC-5000 excimer laser. *J Refract Surg*, 2007; in press.
- MACRAE S. Excimer ablation design and elliptical transition zones. *J Cataract Refract Surg*, 1999; 25: 1 191-7.
- GALLINARO C, TOULEMONT PJ, COCHENER B, COLIN J. Excimer laser photorefractive keratectomy to correct astigmatism. *J Cataract Refract Surg*, 1996; 22: 557-63.