



Influence de la géométrie de la cornée sur la réfraction

Olivier Touzeau

La courbure de la cornée ne joue pas un rôle déterminant dans les amétropies sphériques contrairement à la longueur axiale. Les différences de courbure sont faibles selon le groupe réfractif et la courbure cornéenne moyenne n'est pas corrélée à l'équivalent sphérique. La toricité de la cornée explique l'essentiel de l'astigmatisme réfractif et la symétrie en miroir des axes (énantiomorphisme). L'astigmatisme réfractif est d'autant plus proche de l'astigmatisme cornéen que le cylindre est élevé. L'épaisseur de la cornée, son diamètre, son asphéricité n'ont pas d'influence sur la réfraction. Bien que la cornée soit responsable des deux tiers du pouvoir réfractif de l'œil, en dehors de la toricité, la géométrie de la cornée a finalement peu d'influence sur la réfraction.

La géométrie cornéenne joue un rôle majeur dans le pouvoir réfractif de l'œil

L'œil, qui est une succession de milieux transparents, est en première approximation optiquement assimilable à une série de dioptries sphériques centrés. La relation

entre la puissance (en D), le rayon de courbure (en m) et la différence d'indices de réfraction des deux milieux est donnée par la formule des dioptries sphériques :

$$\text{Puissance (en D)} =$$

$$\frac{\Delta \text{ Indice de réfraction}}{\text{rayon de courbure (en m)}}$$

Les différents milieux oculaires ont des valeurs d'indices de réfraction proches contrairement à l'air. Compte tenu de la grande différence d'indices entre l'air et la cornée, le dioptrie cornéen antérieur possède un pouvoir réfractif le plus élevé et sa géométrie est par conséquent détermi-

nante. La correspondance entre la géométrie de la cornée et les propriétés optiques de l'œil est indiquée dans le tableau I.

Tableau I. Correspondance entre les données géométriques de la cornée et les propriétés optiques de l'œil.

Géométrie de la cornée		Modèle	Propriétés optiques de l'œil		
KÉRATOMÉTRIE	Courbure		Réfraction	Aberrométrie	
	KÉRATOMÉTRIE	Courbure moyenne : courbure constante unique	Sphérique	Composante sphérique de la réfraction	
Toricité : variation régulière de la courbure entre deux méridiens principaux orthogonaux		Sphéro-cylindrique	Équivalent sphérique	Défocus	Z_2^0
TOPOGRAPHIE	Coef. d'asphéricité : variation régulière de la courbure entre l'apex et la périphérie (le long d'un même méridien)	Asphérique	-	Astigmatisme régulier	
				Cylindre et Axe	Jackson 0°/90° : composante directe/inverse
	Indice d'irrégularité : multiples courbures ou variation anarchique de courbure	Irrégulier	-		Aber aberration de sphéricité
				Autres aberrations d'ordre élevé	$\sum Z_{n \geq 3}^f$

CHNO des Quinze-Vingts,
Paris

La toricité de la cornée explique l'essentiel de l'astigmatisme réfractif

Longtemps, les données de l'astigmatisme cornéen ont été utilisées pour déterminer l'astigmatisme réfractif (ou oculaire). À partir d'observations effectuées avec son ophtalmomètre, l'ingénieur français Louis Émile Javal a trouvé empiriquement en 1890 une relation linéaire reliant l'astigmatisme réfractif et l'astigmatisme cornéen (règle de Javal) :

$$\text{Ast. réfractif} = [1,25 \times \text{Ast. cornéen}] + [(-0,50) \times 90^\circ].$$

Des études plus rigoureuses ont conduit à simplifier la règle en supprimant le facteur multiplicatif (règle de Javal simplifiée) :

$$\text{Ast. réfractif} = \text{Ast. cornéen} + [(-0,50) \times 90^\circ].$$

La règle de Javal implique que le cylindre cornéen et le cylindre réfractif soient proportionnels avec un axe identique. La constante est destinée à compenser l'astigmatisme intraoculaire (en particulier cristallinien) non mesuré qui est supposé être de type inverse avec une valeur de 0,50 D. La règle de Javal relativement acceptable quand l'axe de l'astigmatisme est proche de 90° ou de 0°/180° est prise en défaut pour les axes obliques ou quand les deux axes (cornéen et réfractif) diffèrent trop.

Pour analyser sérieusement les relations entre l'astigmatisme réfractif et l'astigmatisme cornéen, il est nécessaire d'utiliser une méthode vectorielle. En effet, l'addition ou la soustraction des cylindres n'est rigoureusement exacte que si les axes sont identiques (ou orthogonaux). Le poids de l'astigmatisme cornéen dans l'astigmatisme réfractif est d'autant plus important que le cylindre réfractif est élevé (tableau II).

Tableau II. Proportions de l'astigmatisme cornéen antérieur et de l'astigmatisme interne en fonction du cylindre réfractif. L'origine de l'astigmatisme réfractif a été calculée à l'aide d'une méthode vectorielle à partir des données de l'auto-kérato-réfractométrie portant sur 250 yeux normaux ayant un cylindre non nul. La proportion respective des deux astigmatismes est influencée par la valeur du cylindre réfractif ($r = 0,64$, $p < 0,001$).

Cylindre réfractif	Astigmatisme	
	cornéen antérieur	interne
≤ 0,50 D	51,6 %	48,4 %
0,51 à 1,00 D	54,8 %	45,2 %
1,01 à 1,50 D	58,0 %	42,0 %
1,51 à 2,00 D	73,8 %	26,2 %
2,01 à 3,00 D	80,5 %	19,5 %
> 3,00 D	82,9 %	17,1 %

L'astigmatisme est essentiellement expliqué par la toricité de la cornée. D'un point de vue théorique, la chirurgie réfractive cornéenne est d'autant plus logique pour corriger un astigmatisme que le cylindre est élevé puisqu'elle constitue dans ce cas un traitement étiologique. Le traitement des faibles astigmatismes semble plus discutable car ces derniers peuvent être en partie d'origine cristallinienne. Leur traitement est moins légitime car le développement ultérieur d'une phacoclérose ou la réalisation d'une phacoexérèse seront susceptibles de le modifier. De plus, la modification de l'axe avec la sénescence est plus fréquente en cas de cylindre faible. Le rôle de l'astigmatisme interne explique le faible intérêt de la kératométrie par rapport à l'auto-réfractométrie pour prédire l'astigmatisme réfractif, en particulier quand on a affaire à des faibles astigmatismes (tableau III). Les données de l'astigmatisme cornéen ne sont supérieures à celles de l'auto-réfractométrie pour prédire l'astigmatisme réfractif que pour les cornées très irrégulières (kératocône, greffe de cornée) et à condition d'utiliser un topographe.

Tableau III. Corrélation entre le cylindre subjectif et les cylindres de l'auto-kérato-réfractométrie (250 yeux normaux ayant un cylindre non nul ($p < 0,001$)). Pour les faibles astigmatismes, le cylindre cornéen présente une corrélation médiocre avec le cylindre subjectif car l'astigmatisme interne, qui n'est pas négligeable, est ignoré.

Cylindre mesuré		Cylindre subjectif	
		≤ 1,50 D	> 1,50 D
Auto-réfractométrie	r	0,69	0,80
Kératométrie	r	0,44	0,78

L'axe de l'astigmatisme réfractif est très influencé par la toricité cornéenne

Comme le cylindre, l'axe de l'astigmatisme réfractif est fortement influencé par la toricité cornéenne. Les axes réfractif et cornéen sont d'autant plus proches que le cylindre est élevé. Les importants écarts entre ces deux axes ne sont observés que pour les faibles cylindres (figure 1).

La différence d'axe entre les astigmatismes réfractif et cornéen exprimée en valeur absolue est significativement corrélée au cylindre subjectif ($r = -0,42$, $p < 0,001$). La différence moyenne est de 17,8°.

La toricité de la cornée explique l'énantiomorphisme de l'astigmatisme, c'est-à-dire la symétrie en miroir que

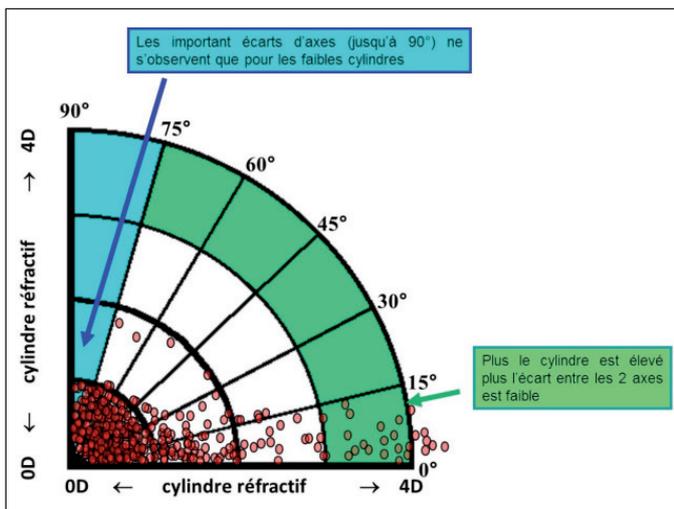


Figure 1. Différence d'axe entre l'astigmatisme réfractif et l'astigmatisme cornéen selon le cylindre réfractif (250 yeux normaux ayant un astigmatisme non nul). Certains points, en particulier les plus centraux, représentent plusieurs yeux. Chacun des arcs de cercles représente 1 D.

présente un axe par rapport à l'axe contro-latéral. L'énantiomorphisme est parfait quand la somme des deux axes (droit et gauche) est égale à 180° (comme les couples « 10° et 170° » ou « 85° et 95° »). L'astigmatisme cornéen est plus énantiomorphe que l'astigmatisme réfractif car le degré de symétrie en miroir de l'astigmatisme interne est plus faible. Le degré d'énantiomorphisme des axes est d'autant plus important que le cylindre est élevé, c'est-à-dire que l'astigmatisme a une origine cornéenne. Par rapport à la situation de l'énantiomorphisme parfait, les deux axes sont en moyenne éloignés de 27° quand le cylindre est inférieur à 1 D, de 15° quand le cylindre est compris entre 1 et 2 D et de 11° si le cylindre est supérieur à 2 D.

La courbure de la cornée ne joue pas un rôle déterminant dans les amétropies sphériques

Bien que responsable des deux tiers du pouvoir réfractif de l'œil, la courbure de la cornée ne semble pas jouer un rôle déterminant dans l'amétropie sphérique. La courbure cornéenne moyenne présente des différences faibles bien que souvent significatives selon les groupes réfractifs (emmétropie, myopie, hypermétropie). D'une manière générale, les yeux longs ont tendance à avoir des cornées plates et vice versa. Cependant, la cornée des myopes forts est plus cambrée que celle des emmétropes. Grosvenor explique ce paradoxe par le fait qu'une cornée cambrée

pourrait être un facteur prédisposant à l'évolution vers la myopie forte. En effet, une augmentation du rapport longueur axiale/rayon de courbure cornéen (AL/CR ratio) chez le jeune enfant aurait une valeur prédictive défavorable. Toutefois, la responsabilité de la courbure cornéenne dans la myopie forte est relativement faible puisque AlMahmoud estime qu'une diminution de 1 D d'équivalent sphérique est associée à une augmentation de la puissance cornéenne de $+0,11$ D.

En cas d'emmétropie, un lien assez fort est fort logiquement retrouvé entre la courbure cornéenne et la longueur axiale de l'œil. La corrélation entre ces deux paramètres est assez forte ($r \approx 0,65$). La présence d'amétropies sphériques diminue le lien entre ces deux paramètres biométriques ($r \approx 0,30$). L'équivalent sphérique ne présente pas de corrélation significative avec la courbure cornéenne mais est fortement corrélé à la longueur axiale de l'œil ($r \approx 0,90$, $p < 0,001$). Ceci s'explique par l'embryogenèse oculaire. La période de développement de la cornée est brève puisque sa croissance s'achève vers trois ans. Le cristallin, et surtout la longueur axiale, évoluent longtemps après cet âge. La période de développement de la cornée étant brève, le statut sphérique de l'œil (hypermétrope, emmétrope ou myope) est donc essentiellement déterminé par la modification de la longueur axiale. L'hypermétropie physiologique du nourrisson et du jeune enfant régresse avec la croissance du globe durant l'enfance. Quand ce processus d'emmétropisation est optimal, l'œil ne présente pas d'amétropie sphérique.

Les autres caractéristiques de la cornée n'ont pas d'influence sur la réfraction

L'épaisseur cornéenne, le diamètre et l'asphéricité de la cornée ne présentent pas de lien statistique avec les paramètres de la réfraction, que ces derniers soient analysés sous leur forme conventionnelle (sphère, cylindre et axe) ou à l'aide d'expressions mathématiques « non polaires » plus complexes (comme les coordonnées rectangulaires).

La concordance est parfois imparfaite entre une modification de la géométrie cornéenne et sa traduction réfractive

Bien que la courbure cornéenne ne joue pas un rôle majeur dans la genèse des amétropies sphériques, la cornée reste la cible principale pour corriger les amé-

tropies du fait de son caractère superficiel et de l'importance de son pouvoir réfractif. L'ablation des sutures des kératoplasties transfixiantes constitue une situation privilégiée pour analyser les conséquences réfractives d'une modification de la géométrie de la cornée. Sur 80 greffes examinées avant et après ablation des sutures, nous avons observé les variations géométriques et optiques suivantes :

$$\Delta \text{Ast. cornéen} = -0,97 \text{ D} \leftrightarrow \text{Ast. réfractif} = -0,90 \text{ D}$$

$$\Delta \text{K moyen} = -0,83 \text{ D} \leftrightarrow \Delta \text{Eq. sphérique} = -0,59 \text{ D}$$

Les variations réfractives induites par l'ablation des sutures présentent une corrélation assez forte avec les variations de la géométrie cornéenne ($r = 0,75$, $p < 0,001$). Les résultats d'une chirurgie réfractive cornéenne sont plus difficiles à analyser en raison des phénomènes de cicatrisation épithéliale et stromale et de la présence d'une éventuelle interface. D'une manière générale, les discordances que l'on peut observer entre les modifications de la géométrie cornéenne et leurs traductions sur le plan réfractif peuvent avoir plusieurs explications :

- l'absence de prise en compte de la distance verre-œil. À la différence des mesures cornéennes (kératométrie, topographie), les mesures de la réfraction, qu'elles soient subjectives (réfracteur ou verre d'essai) ou objectives (auto-réfractométrie), nécessitent d'être corrigées par la distance verre-œil. L'utilisation de formule ou le réglage de l'auto-réfractomètre en position lentille permet d'obtenir la valeur des données dans le plan cornéen ;

- le pas de l'échelle (0,25 D) est relativement élevé dans certains cas, en particulier quand on a affaire à des amétropies faibles ;

- la différence de nature des informations (géométrique/optique). La formule des dioptries sphériques qui permet la transformation des données géométriques de la cornée en données optiques a nécessité des approximations. La linéarisation du sinus ($\sin \alpha \approx \alpha$) a été obtenue avec l'approximation des petits angles. De plus, la valeur des indices de réfraction n'est qu'une estimation ;

- les phénomènes de cicatrisation postopératoire sont assez imprévisibles et difficilement quantifiables. Ils nous rappellent que la cornée est un tissu vivant et non pas une simple lentille inerte.

Pour en savoir plus

Touzeau O, Allouch C, Borderie V *et al.* Corrélation entre la réfraction et la biométrie. *J Fr Ophtalmol.* 2003;26(4):355-63.

Touzeau O, Gaujoux T, Bullet J *et al.* Relations entre les paramètres de la réfraction : sphère, cylindre et axe. *J Fr Ophtalmol.* 2012;35(8):587-98.

AlMahmoud T, Priest D, Munger R, Jackson WB. Correlation between refractive error, corneal power, and thickness in a large population with a wide range of ametropia. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* 2011;52(3):1235-42.

Grosvenor T, Goss DA. Role of the cornea in emmetropia and myopia. *Optom Vis Sci.* 1998;75(2):132-45.

Grosvenor T, Ratnakaram R. Is the relation between keratometric astigmatism and refractive astigmatism linear? *Optom Vis Sci.* 1990;67(8):606-9.