CHAPITRE 7

Optique

V. BORDERIE

La lumière

L'optique est la physique des lois de la lumière dont la nature est double, à la fois corpusculaire et ondulatoire. La lumière est un rayonnement électromagnétique dont la longueur d'onde correspond au spectre visible (environ entre 400 et 800 nm). Elle correspond à des variations sinusoïdales des champs électrique et magnétique, perpendiculaires entre eux, qui sont liées par les équations de Maxwell décrites pendant la deuxième moitié du XIX^{e} siècle.

La nature corpusculaire de la lumière repose sur la notion de photons, particules énergétiques (1,5 à 3 électronvolts [eV]) de masse nulle, sans charge électrique et de *spin* 1. L'interaction de la lumière avec la matière se fait par quantités seuil ou quanta, concept développé par Albert Einstein au début du XX^{e} siècle. Le transfert d'énergie ne peut être qu'un multiple de l'énergie du photon qui est donnée par la relation $e = h\nu$, h étant la constante de Planck et ν la fréquence.

La nature corpusculaire de la lumière permet d'expliquer sa propagation rectiligne ainsi que les phénomènes de réflexion et de réfraction de l'optique géométrique. La nature ondulatoire permet d'expliquer les phénomènes d'interférences.

Aberrations optiques

Les aberrations optiques correspondent aux défauts d'un système optique. Elles sont la conséquence du déphasage du front d'onde induit par le système optique. Les techniques d'aberrométrie permettent de les quantifier à l'aide des polynômes de Zernike (tableau 7-1). Cette fonction mathématique décompose les décalages du front d'onde en aberrations de bas grade et aberrations d'ordre élevé. Chaque polynôme correspond à une aberration optique et est caractérisé par un indice azimutal et un indice radial.

- Les polynômes d'indice radial compris entre 0 et 2 correspondent aux aberrations de bas grade. Ces aberrations se manifestent par un flou visuel, une déformation de l'image, une diplopie monoculaire.
- Les polynômes d'indice radial supérieur à 2 correspondent aux aberrations d'ordre élevé. Ces aberrations se manifestent par des halos, une irisation des sources lumineuses, un éblouissement, un brouillard, un flou visuel, une courbure de champ, une distorsion de l'image, une polyopie.

En pratique clinique, les aberrations d'intérêt de bas grade sont le défocus, l'astigmatisme vertical et l'astigmatisme

Tableau 7-1 – Décomposition des aberrations optiques à l'aide des polynômes de Zernike.

Terme	Indice radial	Indice azimutal	Fonction mathématique	Aberration optique	Représentation
Aberrations de bas grade					
Z^{0}_{0}	0	0	1	Piston	
Z^{-1}_{1}	1	–1	$2\rho \sin \phi$	*Tilt*	
Z^{1}_{1}	1	+1	$2\rho \cos \phi$	*Tip*	
Z^{-2}_{2}	2	–2	$\sqrt{6\rho^2}\sin 2\phi$	Astigmatisme oblique	
Z^{0}_{2}	2	0	$\sqrt{3}\left(2\rho^2-1\right)$	Défocus	
Z^{2}_{2}	2	+2	$\sqrt{6\rho^2}\cos 2\phi$	Astigmatisme vertical	

(*Suite*)

© 2025 Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés, y compris ceux relatifs à la fouille de textes et de données, à l'entraînement de l'intelligence artificielle et aux technologies similaires

Tableau 7-1 – Suite.

Terme	Indice radial	Indice azimutal	Fonction mathématique	Aberration optique	Représentation
Aberrations d'ordre élevé					
Z^{-3}_{3}	3	−3	$\sqrt{8}\rho^3\sin 3\phi$	*Trefoil* vertical	
Z^{-1}_{3}	3	−1	$\sqrt{8}(3\rho^3-2\rho)\sin\phi$	Coma verticale	
Z^{1}_{3}	3	+1	$\sqrt{8}(3\rho^3-2\rho)\cos\phi$	Coma horizontale	
Z^{3}_{3}	3	+3	$\sqrt{8}\rho^3\cos 3\phi$	*Trefoil* oblique	
Z^{-4}_{4}	4	−4	$\sqrt{10}\rho^4\sin 4\phi$	*Quadrafoil* oblique	
Z^{-2}_{4}	4	−2	$\sqrt{10}(4\rho^4-3\rho^2)\sin 2\phi$	Astigmatisme oblique secondaire	
Z^{0}_{4}	4	0	$\sqrt{5}(6\rho^4-6\rho^2+1)$	Aberration sphérique	
Z^{1}_{1}	4	+2	$\sqrt{10}(4\rho^4-3\rho^2)\cos 2\phi$	Astigmatisme vertical secondaire	
Z^{1}_{1}	4	+4	$\sqrt{10}\rho^4\cos 4\phi$	*Quadrafoil* vertical	

oblique. Les aberrations d'intérêt d'ordre élevé sont la coma verticale, la coma oblique, l'astigmatisme vertical secondaire, l'astigmatisme oblique secondaire et l'aberration de sphéricité.

Le défocus est le décalage sur l'axe optique du point de focalisation (fig. 7-1). Il correspond à l'amétropie sphérique.

Dans un système optique stigmate, l'image d'un objet ponctuel est un point unique. L'astigmatisme correspond à la perte de cette propriété. L'image d'un point objet n'est plus ponctuelle. Dans un astigmatisme régulier, l'image d'un point est une caustique, la conoïde de Sturm, délimitée par deux droites focales perpendiculaires entre elles avec un cercle de moindre diffusion situé à mi-distance de ces deux droites focales (fig. 7-2).

La coma est une aberration sphérique asymétrique des faisceaux obliques. Elle donne une déformation de l'image en forme de comète caractérisée par la présence d'une queue (fig. 7-3).

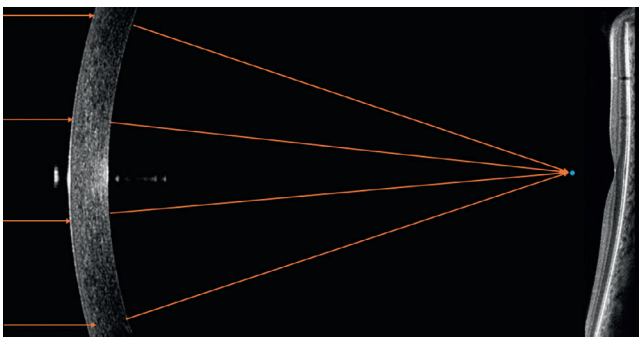


Fig. 7-1 ***Défocus (ici myopique).***

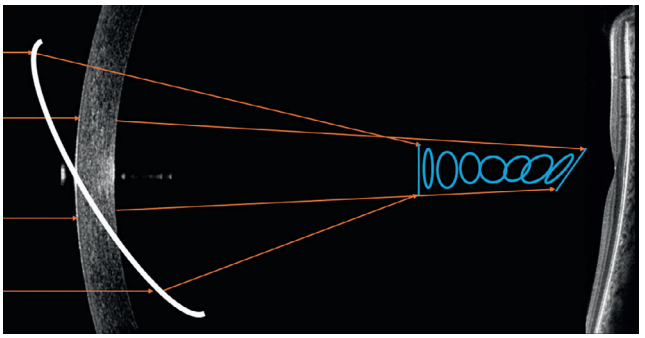


Fig. 7-2 ***Astigmatisme régulier : l'image d'un point n'est plus un point, mais une caustique, la conoïde de Sturm (en bleu).***

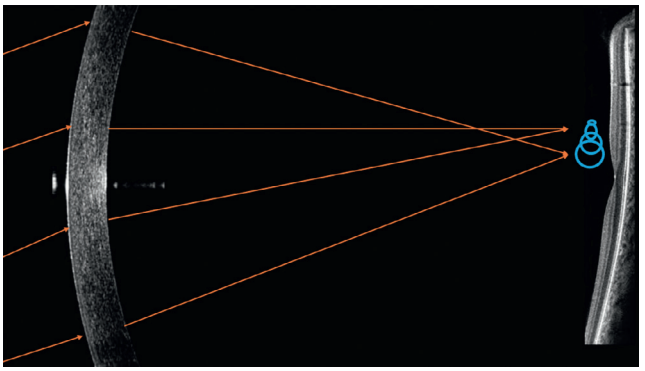


Fig. 7-3 ***Coma : l'image d'un point est déformée en forme de comète.***

L'aberration de sphéricité résulte du fait que les rayons réfractés par la périphérie d'une lentille sphérique ne convergent pas au même point que ceux réfractés par le centre de la lentille. Il n'y a plus un foyer unique de focalisation, mais une caustique de focalisation. Dans le cas d'un dioptre convergent, les rayons réfractés par la périphérie du dioptre vont converger en avant des rayons réfractés par le centre, car l'angle d'incidence est plus important en périphérique qu'au centre (fig. 7-4).

Techniques d'analyse des aberrations optiques

La topographie cornéenne est une technique de mesure des rayons de courbure de la cornée sur toute sa surface. La topographie spéculaire utilisant le disque de Placido consiste à analyser l'image de cercles lumineux concentriques projetés sur la face antérieure de la cornée (fig. 7-5). L'interface air-film lacrymal se comporte comme un miroir déformant : plus la courbure cornéenne est importante (rayon de courbure faible), plus l'image de l'objet reflété par la cornée est petite. La topographie spéculaire fournit une carte des rayons de courbure cornéen antérieurs en utilisant une échelle colorimétrique. À partir du rayon de courbure mesuré, les appareils calculent le pouvoir réfractif qui est proportionnel à la différence d'indice de réfraction entre l'air et la cornée, et inversement proportionnel au rayon de courbure ($P = (n_c - n_a)/r$).

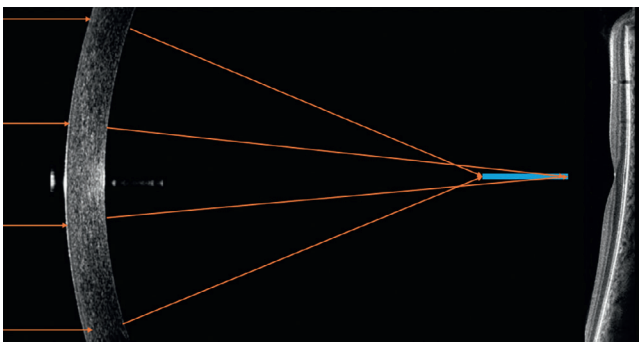


Fig. 7-4 ***Aberration sphérique.***

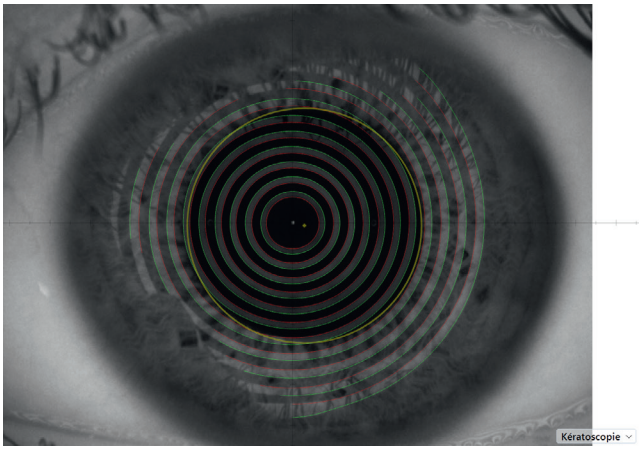


Fig. 7-5 ***Image du disque de Placido reflétée par la cornée dans un topographe spéculaire.***

Divers algorithmes sont utilisés par les topographes pour calculer le rayon de courbure. Dans l'algorithme axial, le rayon de courbure est asservi à l'axe optique, ce qui permet de caractériser les qualités optiques de la cornée importantes pour la vision. L'algorithme tangentiel ne prend pas en compte l'axe optique et permet de mieux détecter des modifications locales du rayon de courbure cornéen, comme c'est le cas dans le kératocône. Les cartes en pouvoir réfractif prennent en compte l'effet de la face postérieure de la cornée et montrent donc le pouvoir réfractif global de la cornée et non celui de sa face antérieure isolée.

L'indice de réfraction de la cornée utilisé peut être variable d'un topographe à l'autre. Certaines machines permettent à l'utilisateur de choisir l'indice de réfraction. La carte des puissances/rayons de courbure peut être décomposée en aberrations optiques à l'aide des polynômes de Zernike. Cela permet de quantifier les aberrations optiques de la face antérieure de la cornée. Sur le plan de la vision, on considère que les 3 mm centraux de la cornée forment la zone optique qui permet la formation de l'image sur la rétine.

Les techniques de tomographie cornéenne fondées sur l'utilisation de la caméra Scheimpflug (Pentacam®) ou de techniques d'interférométrie (OCT) permettent de mesurer l'élévation cornéenne et fournissent une cartographie de cette élévation par rapport à une sphère de référence (*best fit sphere*). À partir de la carte d'élévation, certains tomographes tels que le Pentacam® calculent le rayon de courbure cornéen. La cartographie des rayons de courbure cornéens peut alors être décomposée en aberrations optiques cornéennes à l'aide des polynômes de Zernike.

Réfraction de la lumière

POUVOIR RÉFRACTIF DE LA CORNÉE

L'interface antérieure air-cornée a un pouvoir réfractif très élevé (environ 49 dioptries [D]) qui représente 80 % du pouvoir réfractif total de l'œil (60 D). Le rayon de courbure moyen de la face antérieure de la cornée est de 7,8 mm. Cette interface convergente est elle-même constituée de deux interfaces successives : air (indice de réfraction = 1,000)-film lacrymal (1,336), puis film lacrymal (1,336)-cornée (1,376) ; le pouvoir réfractif de l'interface antérieure correspondant à la somme du pouvoir réfractif de ces deux interfaces successives. L'interface postérieure humeur aqueuse-endothélium cornéen a un pouvoir réfractif plus faible, car la différence d'indice réfractif des deux milieux (cornée 1,376 et humeur aqueuse 1,336) est moindre que pour l'interface antérieure. Elle est de plus divergente, car on passe d'un milieu d'indice de réfraction (1,376), la cornée, à un milieu d'indice plus faible (1,336), l'humeur aqueuse. Sa valeur est de –6 D (rayon de courbure moyen 6,8 mm). Le pouvoir réfractif total de la cornée est donc de 43 D (49 – 6) en moyenne, avec des extrêmes à 39 D et 47 D, si l'on considère comme négligeable l'épaisseur cornéenne, soit plus des deux tiers du pouvoir réfractif de l'œil (fig. 7-6).

L'importance de l'interface antérieure air-film lacrymal dans le pouvoir réfractif de l'œil explique que la régularité de l'épithélium soit essentielle à la qualité de la vision. Ainsi, toute pathologie de l'épithélium cornéen central (œdème épithélial, kératite sèche, insuffisance limbique, ulcère, dystrophie) entraîne

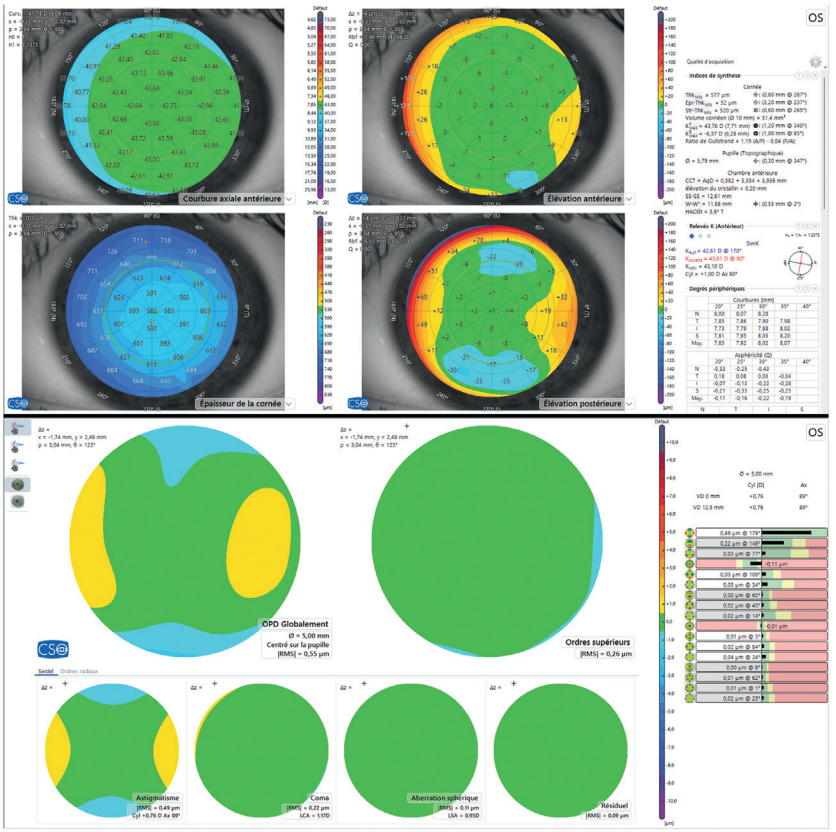


Fig. 7-6 ***Cornée normale d'une patiente myope de 34 ans.***
La topographie spéculaire en algorithme axial montre une topographie ronde. Le pouvoir réfractif de la cornée dans la zone optique de 3 mm est de l'ordre de 43 dioptries (D). Il existe un astigmatisme direct physiologique de +1 D à 80° sur la carte topographique avec une aberration de bas grade de 0,49 µm pour l'astigmatisme. Les aberrations d'ordre élevé sont faibles (coma : 0,22 µm, aberration de sphéricité : 0,11 µm).

un retentissement visuel important. La topographie cornéenne montre une altération des indices de régularité de la surface cornéenne dans les syndromes secs, avec une amélioration après instillation de larmes artificielles.

L'ablation de l'épithélium augmente le pouvoir optique de la cornée de cadavre de 1 D en moyenne, ainsi que l'astigmatisme cornéen. Les variations physiologiques de l'hydratation (et donc l'épaisseur) de la cornée ne modifient pas la puissance dioptrique de celle-ci en situation physiologique, mais peuvent la modifier en situation non physiologique (kératotomies radiaires ou dystrophie de Fuchs par exemple).

L'aberration optique associée au pouvoir réfractif de la cornée est le défocus (aberration d'indice radial 2 et d'indice azymutal 0 du polynôme de Zernike). La contribution de cette aberration aux amétropies sphériques (myopie et hypermétropie) est habituellement faible, car leur origine est le plus souvent axile ou d'indice (cataracte). Néanmoins, le kératocône et les autres ectasies cornéennes peuvent engendrer une myopie de courbure et la *cornea plana* est source d'hypermétropie de courbure.

■ ASTIGMATISME CORNÉEN

La cornée est le plus souvent torique : le long d'un cercle centré par l'apex cornéen, son rayon de courbure varie d'un méridien à l'autre. Cette toricité de la face antérieure et de la face postérieure de la cornée engendre un astigmatisme. La contribution de la face antérieure de la cornée à l'astigmatisme cornéen est largement supérieure à celle de la face postérieure du fait de la différence d'indice de réfraction entre l'air et le film lacrymal (0,336), qui est beaucoup plus importante que la différence d'indice de réfraction entre la cornée et l'humeur aqueuse (0,04).

L'astigmatisme cornéen peut être direct lorsque le méridien cornéen le plus puissant est le méridien vertical, inverse lorsque le méridien le plus puissant est horizontal, ou oblique. Il peut être régulier lorsque les méridiens cornéens principaux sont orthogonaux avec une symétrie des hémiméridiens opposés, donnant une image en sablier symétrique en topographie cornéenne, ou irrégulier lorsque ces conditions ne sont pas respectées, avec un aspect en sablier asymétrique caractérisé par des hémiméridiens opposés non symétriques ou non alignés.

La toricité de la cornée normale est énanthiomorphe : il existe une symétrie en miroir entre les deux yeux de sorte que les deux cornées ont un cylindre peu différent et un axe symétrique (par exemple +2,50 D à 110° à droite et +2,25 D à 70° à gauche). L'astigmatisme cornéen régulier est intégralement corrigible par un verre sphérocylindrique si son amplitude n'est pas trop élevée. Il peut être évalué (cylindre et axe) par la kératométrie simulée de la topographie cornéenne (fig. 7-7), l'autokératométrie, ou l'aberrométrie cornéenne (termes d'indice radial 2 et d'indice azimutal –2 et 2 du polynôme de Zernike) (fig. 7-8).

Si l'on trace la courbe du rayon de courbure (ou de la puissance cornéenne) en fonction du méridien le long du cercle trigonométrique, on obtient une fonction périodique sinusoïde de période 180°, l'amplitude de la fonction correspondant au cylindre. Les séries de Fourier permettent d'analyser la topographie cornéenne et d'identifier la fonction périodique correspondant à l'astigmatisme régulier (période = 180°, amplitude = cylindre). L'astigmatisme cornéen irrégulier n'est pas corrigible par un verre sphérocylindrique, mais une lentille rigide permet de le corriger. Il peut être évalué par l'aberrométrie

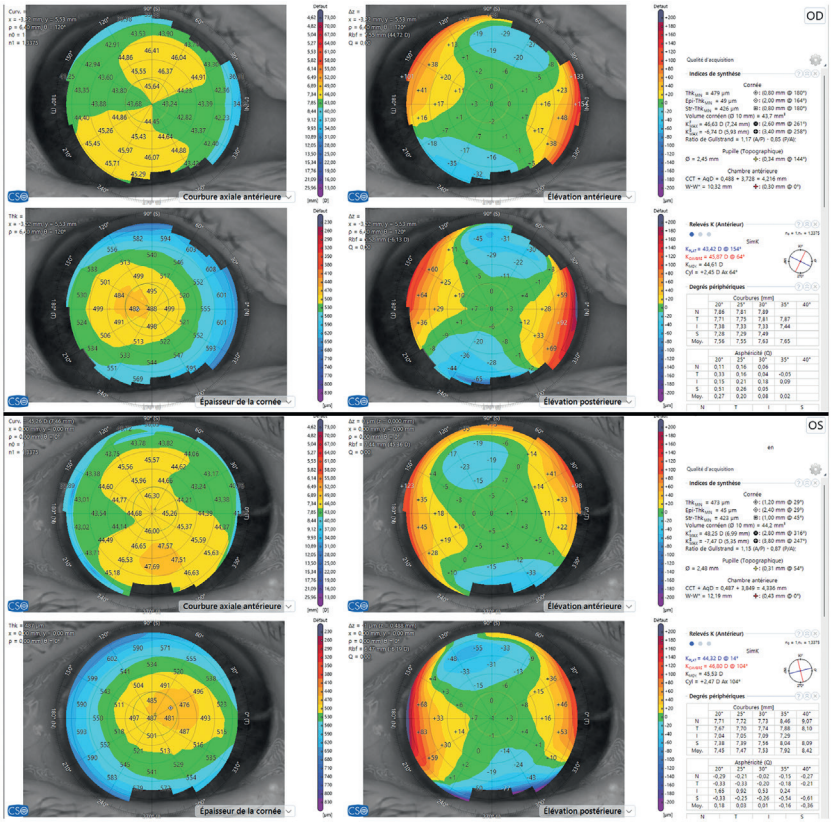


Fig. 7-7 ***Astigmatisme congénital chez une patiente de 79 ans.***
La topographie spéculaire en algorithme axial montre un astigmatisme régulier (sablier symétrique), énanthiomorphe (symétrie en miroir des deux cornées : +2,45 D à 64° à droite et +2,47 D à 104° à gauche). Les cartes d'élévation antérieure et postérieure montrent un aspect en selle. Les cornées sont fines, mais l'épaisseur cornéenne est symétrique. L'acuité visuelle est à 10/10es avec un cylindre réfractif de 0,5 D après chirurgie de la cataracte avec implant torique.

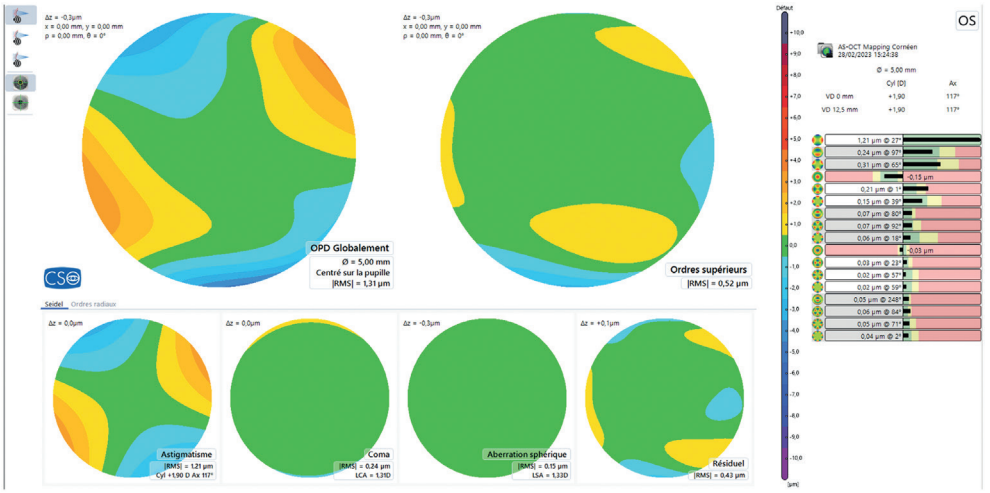


Fig. 7-8 ***Astigmatisme congénital (patiente de la fig. 7-7).***
La carte des aberrations cornéennes (polynôme de Zernike) montre surtout de l'astigmatisme (1,21 µm) alors que les aberrations d'ordre élevé sont faibles (coma : 0,24 µm, aberration sphérique : 0,15 µm).

cornéenne (termes d'indice radial 4 et d'indice azimutal –2 et 2 du polynôme de Zernike), les données des hémiméridiens de la topographie cornéenne (*refractive power symmetry index*) et les séries de Fourier appliquées à la topographie cornéenne [1].

Chez les sujets jeunes, il existe un astigmatisme physiologique direct de 0,50 à 0,75 D. Avec le vieillissement se développe un astigmatisme inverse qui est associé à un changement d'axe du méridien le plus cambré de la face antérieure de la cornée (qui, de vertical, devient horizontal), alors que l'astigmatisme de la face postérieure de la cornée est peu modifié [2]. Soixante-dix pour cent des patients présentent un astigmatisme cornéen supérieur ou à égal à 0,50 D. Seuls 30 % à 40 % des patients présentent un cylindre cornéen supérieur ou égal à 1,00 D. Lorsqu'il est régulier, cet astigmatisme est le plus souvent congénital, peu ou pas évolutif au cours de la vie. L'astigmatisme inverse est plus fréquent chez les hommes que chez les femmes [3]. L'inversion de l'astigmatisme survient dès l'âge de 50 ans chez les hommes ; elle est plus tardive chez les femmes, vers 70 ans. La diminution du tonus musculaire des paupières et des muscles extraoculaires, en particulier le droit

médial, après 40 ans, pourrait expliquer le changement d'axe de l'astigmatisme avec l'âge. Une chirurgie du strabisme chez l'enfant peut également entraîner un changement d'axe de l'astigmatisme cornéen.

Lorsque l'on gère un astigmatisme cornéen postopératoire, il faut retenir que l'ablation d'un point cornéen a pour effet d'aplatir le méridien cornéen sur lequel il se trouve. Si l'on enlève un point situé à 90° à un patient ayant un cylindre cornéen de +3 D à 90°, on diminue son astigmatisme. En revanche, si l'astigmatisme cornéen est de +3 D à 180°, l'ablation d'un point situé à 90° aggravera l'astigmatisme.

La contribution de la face postérieure de la cornée à l'astigmatisme cornéen total explique que la mesure de l'astigmatisme cornéen antérieur ne suffise pas à calculer la toricité d'un implant dans la chirurgie de la cataracte. Il est nécessaire de prendre en compte l'astigmatisme cornéen total (donc l'astigmatisme postérieur), car c'est celui-ci (et non l'astigmatisme antérieur) qui doit être corrigé par l'implant torique. La mesure de l'astigmatisme cornéen postérieur peut être faite directement à l'aide de techniques tomographiques de mesure de l'élévation cornéenne postérieure, ou indirectement à partir de la mesure de l'astigmatisme antérieur en utilisant une correction statistique.

L'astigmatisme régulier est une donnée vectorielle qui peut être exprimée par des coordonnées polaires (cylindre et axe) ou cartésiennes. Par conséquent, une comparaison d'astigmatisme (postopératoire versus préopératoire) ou une analyse statistique d'une population ne peut pas être faite en soustrayant la valeur des cylindres ou en calculant la moyenne de ceux-ci. Il faut appliquer des méthodes de calcul vectoriel pour soustraire, additionner ou moyenner des astigmatismes. La méthode d'Alpins est largement utilisée pour réaliser ces calculs [4]. Elle utilise trois vecteurs principaux : *target-induced astigmatism vector* (TIA), *surgically-induced astigmatism vector* (SIA) et *difference vector* [5].

La régularité, l'énanthiomorphisme et l'évolutivité de l'astigmatisme permettent de distinguer deux grandes pathologies cornéennes sources d'astigmatisme : le kératocône (astigmatisme irrégulier, non énanthiomorphe et évolutif) et l'astigmatisme congénital (astigmatisme régulier, énanthiomorphe et peu ou pas évolutif avec le temps).

ASPHÉRICITÉ CORNÉENNE

La cornée est asphérique : son rayon de courbure varie du centre vers la périphérie. La forme d'une surface asphérique correspond à une ellipse, qui est une section de cône, définie par un foyer, une droite directrice et une excentricité (e) ; le rapport de la distance au foyer sur la distance à la droite directrice est constant pour tout point de la section ; il définit l'excentricité (e) de l'ellipse. Une ellipse est également caractérisée par son asphéricité Q (ou conicité). Le tableau 7-2 montre l'asphéricité des principales sections coniques.

La cornée normale est prolate (son rayon de courbure augmente en périphérie, d'environ 0,2 mm en moyenne périphérie et 0,4 mm en périphérie) dans 80 % des cas ; oblate (diminution du rayon de courbure en périphérie) voire paraboïdale ou hyperboïdale dans 20 % des cas. Le coefficient d'asphéricité moyen de la face antérieure de la cornée (Q) est de –0,26. La cornée devient plus sphérique avec l'âge. L'asphéricité de sa face antérieure varie d'un méridien à l'autre. L'asphéricité cornéenne permet de diminuer les aberrations sphériques de l'œil (si la cornée était sphérique, les rayons traversant la partie périphérique de la cornée convergeraient en avant de la rétine). Les aberrations sphériques varient avec le carré du diamètre pupillaire. Elles sont inférieures à 1 D pour un diamètre pupillaire de 4 mm. Une cornée prolate ayant un coefficient d'asphéricité Q à –0,26 corrige la moitié des aberrations sphériques (par rapport à une cornée sphérique) ; le cristallin atténue également les aberrations sphériques.

L'aberration sphérique est une limite de la chirurgie réfractive cornéenne de la myopie. En effet, la correction de la myopie implique d'aplatir la partie centrale de la cornée, ce qui augmente les aberrations sphériques de l'œil (fig. 7-9).

COMA CORNÉENNE

La coma cornéenne est une aberration optique très évocatrice du kératocône du fait de l'excentrement du cône par rapport à l'apex cornéen (fig. 7-10 et 7-11). Elle augmente avec l'âge [6]. Sa mesure peut aider au diagnostic de kératocône infraclinique [7]. L'implantation d'anneaux intrastromaux, notamment asymétriques, et les lentilles de contact rigides, notamment les lentilles sclérales, permettent de réduire la coma dans le kératocône [8, 9].

Réflexion de la lumière

La cornée se comporte également comme un miroir convexe. Une source lumineuse placée à 50 cm de la cornée donne une première image réfléchie par la face antérieure de la cornée, située à 6 à 7 mm en arrière de celle-ci, et une deuxième image réfléchie par la face postérieure de la cornée, de plus petite taille que la première (images de Purkinje). La taille de l'image réfléchie (reflet cornéen) est fonction du rayon de courbure cornéen (principe utilisé par les algorithmes des topographes cornéens).

Tableau 7-2 – Caractéristiques des sections coniques.

Section conique	Variation du rayon de courbure	Excentricité (e)	Asphéricité (Q)	Exemples
Hyperbole	Augmente en périphérie	> 1	< -1	
Parabole	Augmente en périphérie	1	–1	
Ellipse prolate (ou verticale)	Augmente en périphérie	$0 < e < 1$	]–1,0[	Cornée normale
Cercle	Constant	0	0	
Ellipse oblate (ou horizontale)	Diminue en périphérie	< 1	> 0	Kératoplastie, chirurgie réfractive

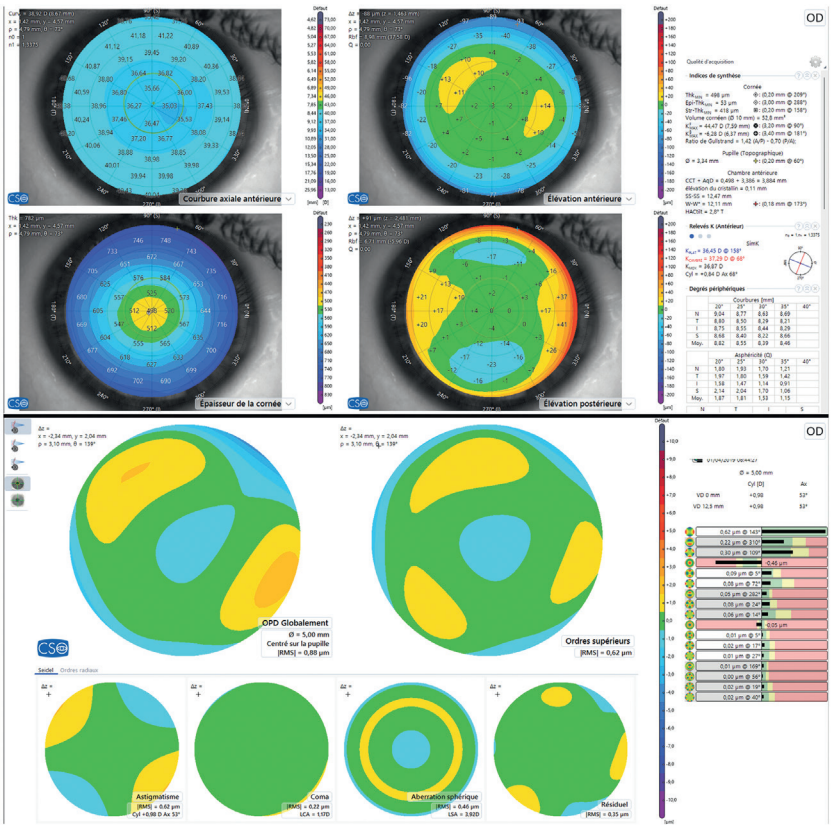


Fig. 7-9 ***Patiente de 38 ans opérée de LASIK pour une myopie forte.***
La topographie spéculaire en algorithme axial montre l'amincissement et l'aplatissement de la cornée centrale avec un pouvoir réfractif cornéen compris entre 35 et 36 D dans les 3 mm centraux. Cet aplatissement central génère une aberration de sphéricité de 0,46 µm qui peut être à l'origine de halos, notamment en ambiance mésopique. Il existe un astigmatisme antérieur de 0,84 D à 68° sur la carte topographique. La carte aberrométrique montre un astigmatisme de 0,98 D à 53° correspondant à une aberration de bas grade de 0,62 µm.

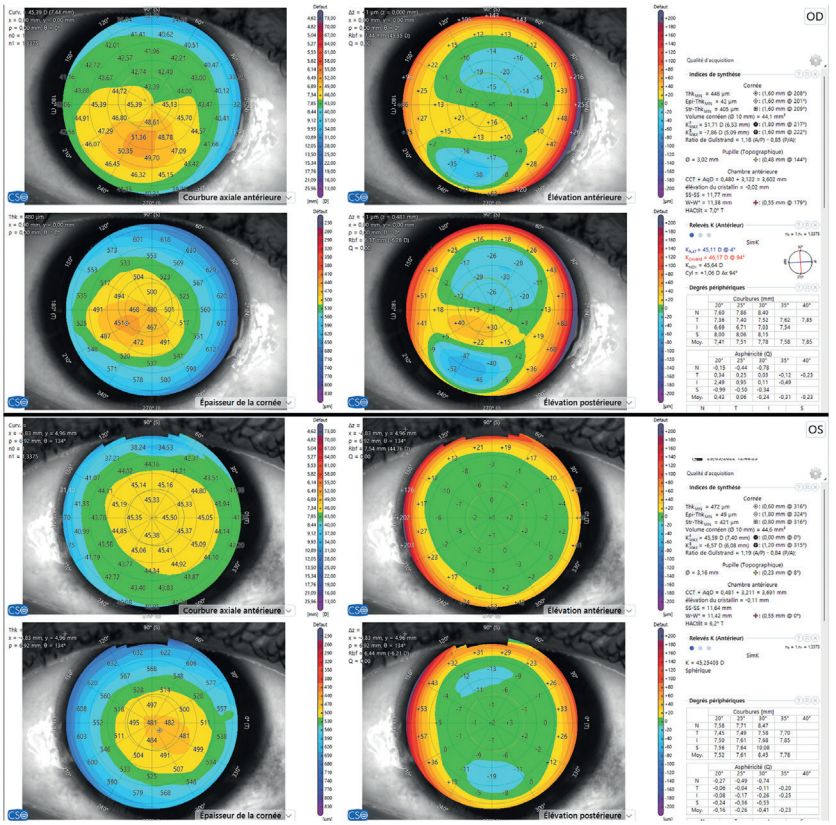


Fig. 7-10 ***Patiente de 35 ans présentant un kératocône unilatéral à droite.***
La topographie spéculaire en algorithme axial de l'œil droit montre un astigmatisme irrégulier (bombement inférieur) avec une perte de l'énanthiomorphe cornéen (symétrie en miroir des deux cornées). Les cartes d'élévation antérieure et postérieure montrent l'ectasie cornéenne. Les cornées sont fines, mais le point le plus fin de la cornée droite est déplacé en inférieur alors qu'il reste proche du centre à gauche. La topographie de l'œil gauche est normale avec un profil arrondi, sans astigmatisme, ni ectasie visible sur les cartes d'élévation (kératocône fruste).

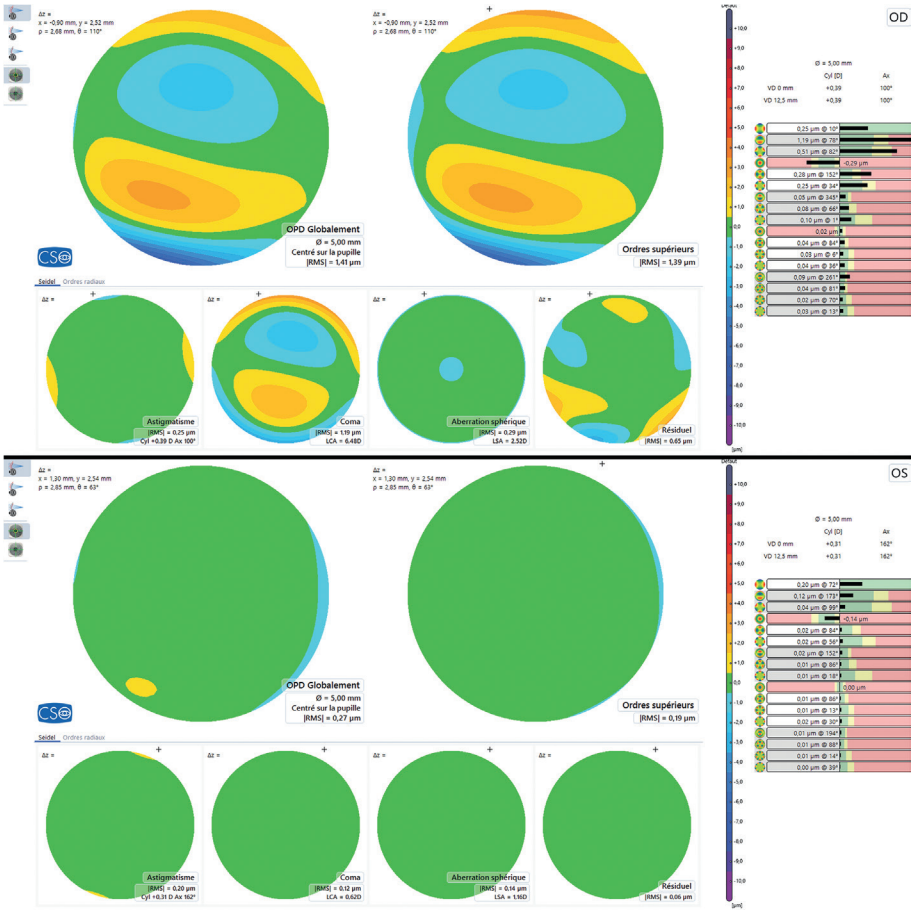


Fig. 7-11 ***Cartes aberrométriques cornéennes de la patiente de la fig. 7-10 (kératocône unilatéral).***
Les aberrations d'ordre élevé sont importantes (1,39 µm) sur l'œil pathologique. Elles sont représentées essentiellement par la coma (1,19 µm) et un peu par l'aberration sphérique (0,29 µm). Du côté gauche (kératocône fruste), les aberrations sont quasi inexistantes.

Points forts

- La lumière se comporte à la fois comme une onde et comme un flux de photons (corpuscules).
- La nature corpusculaire de la lumière explique sa réfraction (changement de direction au niveau des dioptres oculaires) et sa réflexion.
- La nature ondulatoire de la lumière est à l'origine de phénomènes d'interférences.
- Les aberrations optiques sont la conséquence du déphasage du front d'onde lors de la traversée des dioptres oculaires. Les décalages du front d'onde sont décomposés en aberrations de bas grade et en aberrations d'ordre élevé à l'aide des polynômes de Zernike.
- Les aberrations d'ordre élevé générées par une déformation cornéenne sont le plus souvent associées à une baisse de la qualité visuelle.

Bibliographie

[1] Borderie VM, Laroche L. Measurement of irregular astigmatism using semimeridian data from videokeratographs. J Refract Surg 1996;12(5):595–600.
[2] Koch DD, Ali SF, Weikert MP, et al. Contribution of posterior corneal astigmatism to total corneal astigmatism. J Cataract Ref Surg 2012;38(12):2080–7.
[3] Hayashi K, Sato T, Sasaki H, et al. Sex-related differences in corneal astigmatism and shape with age. J Cataract Ref Surg 2018;44(9):1130–9.
[4] Alpins NA. A new method of analyzing vectors for changes in astigmatism. J Cataract Refract Surg 1993;19(4):524–33.
[5] Alpins N. Astigmatism analysis by the Alpins method. J Cataract Refract Surg 2001;27(1):31–49.
[6] Oshika T. Quantitative assessment of quality of vision. Nippon Ganka Gakkai Zasshi 2004;108(12):770–807.
[7] Perez-Rueda A, Jimenez-Rodriguez D, Castro-Luna G. Diagnosis of subclinical keratoconus with a combined model of biomechanical and topographic parameters. J Clin Med 2021;10(13):2746.
[8] Benlarbi A, Kallel S, David C, et al. Asymmetric intrastromal corneal ring segments with progressive base width and thickness for keratoconus : evaluation of efficacy and analysis of epithelial remodeling. J Clin Med 2023;12(4):1673.
[9] Knoeri J, Mhenni R, Friquet C, et al. Comparison of optical aberrations in keratoconus with scleral versus rigid gas permeable lenses. Eur J Ophthalmol 2024;34(2):394–8.