

Les principales cartes topographiques cornéennes



→ **D. GATINEL**
Fondation Ophtalmologique
A. de Rothschild,
CEROC, PARIS.

Il existe actuellement de nombreuses méthodes d'évaluation pour la topographie cornéenne, qui peuvent essentiellement être considérées comme autant de développements autour du même thème fondamental : fournir au clinicien une image bidimensionnelle représentant une propriété géométrique et/ou optique de la surface tridimensionnelle de la cornée.

La représentation de la surface antérieure de la cornée peut être réalisée par deux familles de cartes : celles d'élévation ou celles de courbure. Les deux correspondent à des modes de représentation plus appropriés à certains contextes cliniques, et elles doivent être utilisées par le clinicien de manière pertinente, en fonction d'une application spécifique. Il

existe diverses variantes au sein d'une même famille (ex. : mode axial, mode tangentiel au sein des cartes de courbures), et pratiquement autant de types de cartes que d'indications ! (**tableau I**).

Bien que l'élévation et la courbure soient mathématiquement liées, elles correspondent à des propriétés géométriques intrinsèquement différentes et une certaine confusion doit être évitée lors de l'interprétation de ces cartes. En particulier, le fait d'essayer d'extrapoler la forme de la cornée d'après les cartes de courbure peut être source de confusion. Les zones rouges ne correspondent pas toujours à des zones "élevées", élévation qui doit être définie par rapport à une surface de référence. Ainsi, dans le cas du kératocône, les zones rouges sur les cartes d'élévation correspondent à des points d'altitude plus élevée par

rapport à une surface dite de référence. Sur une carte de courbure, la zone la plus rouge correspond à la zone la plus cambrée. Or la zone d'élévation maximale ne correspond pas forcément à la zone la plus cambrée. Enfin, il faut garder à l'esprit que courbure et élévation correspondent à des propriétés géométriques "structurales", mais non directement fonctionnelles. L'étude des propriétés de focalisation du dioptré cornéen (réfraction par la cornée d'un faisceau lumineux incident) fait appel à un troisième type de représentation, généralement appelé carte de "puissance réfractive".

Cartographie de courbure

Les cartes de courbure ont été les premières cartes disponibles pour les cliniciens. Elles ont été élaborées à partir

Cartes	Indications
Courbures Axiales Tangentielles Moyennes	Contractologie Adaptation difficile
Cartes d'élévation Antérieures Postérieures	Chirurgie réfractive Dépistage des KC Chirurgie astigmatisme Centrage, taille ZO
Cartes de puissance optique Réfractive	Chirurgie cataracte Astigmatisme cornéen
Cartes de pachymétrie Pachymétrie totale Profil pachymétrique	Chirurgie greffe Astigmatisme/régularité

TABLEAU I : Cartes topographiques et indications.

IMAGERIE DU SEGMENT ANTÉRIEUR

de l'analyse informatisée de l'image spéculaire (c'est-à-dire de réflexion) des disques de Placido sur la surface antérieure de la cornée.

1. Rendu des cartes de courbure

A chaque fois que l'on interprète une carte de courbure (axiale, tangentielle ou moyenne), il faut impérativement garder à l'esprit que l'on visualise des "rayons de courbure". Les cartes en échelle millimétriques attribuent en général une couleur d'autant plus chaude que les rayons de courbure mesurés sont petits. Quand l'échelle est en dioptries, il faut également se rappeler qu'il s'agit de dioptries de courbures, et non de dioptries de puissance optique. Ces dioptries sont calculées comme l'inverse du rayon de courbure (exprimé en mètre) multiplié par la différence entre l'indice kératométrique (égal à 1,33) et l'indice de l'air (égal à 1).

Une zone représentée par des couleurs "chaudes" est simplement une zone où la courbure est plus importante (les rayons de courbure y sont plus petits). Inversement, une zone de couleurs plus froides est une zone où la courbure est moindre (les rayons de courbure sont plus grands).

Une erreur commune est d'extrapoler la représentation tridimensionnelle de la cornée à partir des informations de courbure; visualiser les zones rouges comme des sommets ou des bosses, et les zones bleues comme des creux ou des vallées conduit à une interprétation erronée. Les cartes de courbures ne montrent que... la courbure.

2. Courbure axiale, courbure tangentielle, courbure moyenne

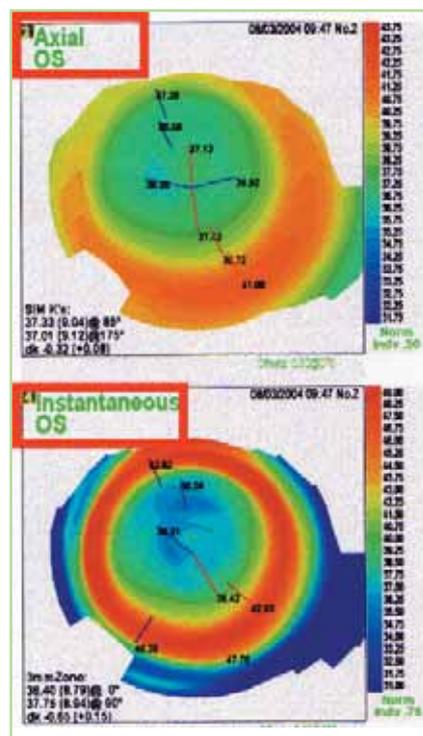
La sphère est une surface particulière dont le rayon de courbure en tout point est identique quelle que

soit la direction de mesure. En revanche, pour une surface non sphérique comme un ellipsoïde, le rayon de courbure des points en dehors du sommet dépend non seulement de leur distance à ce sommet, mais aussi de la direction dans laquelle on va mesurer la courbure en ces points. La cornée est asphérique, et la géométrie de sa face avant peut être assimilée à une surface ellipsoïdale. La courbure tangentielle (ou instantanée, ce terme reflétant le caractère "local" et non moyenné de la mesure, ou encore méridionale, car reflétant la direction de mesure) est mesurée en un point le long de l'hémiméridien qui s'étend du vertex à ce point. La courbure sagittale (ou axiale) est mesurée le long de la direction qui est per-

pendiculaire au méridien tangentiel au point de mesure. La **figure 1** fournit une représentation comparée des courbures instantanée et axiale de la même cornée.

Lorsque la cornée est normale ou ne manifeste pas de déformation importante, les données sagittales et tangentielles apparaissent différentes même si les informations fournies ne sont pas contradictoires mais plutôt complémentaires.

Au sens mathématique, les modes de "courbure moyenne" ou de "courbure gaussienne" correspondent à la représentation la plus juste des variations de la courbure de la surface cornéenne. Elles correspondent à la moyenne arithmétique ou géo-



Après Lasik myopique

Mode axial : l'axe du cylindre cornéen est bien visualisé

Mode instantané : le changement de courbure (bord de la ZO) est bien visualisé

FIG. 1: Courbure axiale, courbure tangentielle: tracés des courbures axiales et instantanées des yeux droit et gauche d'un patient après Lasik myopique. Compte tenu de sa sensibilité aux variations de courbure le long d'un méridien, le mode axial est particulièrement indiqué pour l'étude de l'astigmatisme cornéen dans la région apicale (astigmatisme direct dans cet exemple). Le mode instantané permet en particulier d'explorer la variation de la courbure cornéenne du centre vers les bords. Le "cercle rouge" correspond à la zone annulaire de courbure plus élevée à la jonction des zones traitée et non traitée. Il est plus défini au niveau de la carte en mode instantané.

métrique entre la courbure minimale et la courbure maximale au point d'intérêt. La courbure moyenne est relativement indépendante de la direction de mesure de la courbure, mais elle nécessite l'acquisition indépendante préalable de données d'élévation (c'est-à-dire de données de forme) pour pouvoir être calculée avec précision, notamment pour les cornées fortement déformées. Compte tenu de leur caractère "moyenné", les cartes de courbure moyenne masquent les directions des axes principaux de courbure (minimale et maximale),

L'inspection des cartes axiales, tangentielles, de courbure moyenne d'une même cornée révèle généralement que l'apex cornéen (zone de cambrure maximale) varie pour chacune d'entre elles, mais que les localisations fournies par les modes tangentiel et courbure moyenne sont plus proches entre elles que celles obtenues par le mode axial.

3. Application clinique

En présence d'un astigmatisme réfractif, le mode axial est plus à même de fournir des informations pertinentes sur la présence d'une toricité cornéenne ("astigmatisme" d'origine cornéenne). Les cartes de courbure moyenne permettent d'apprécier la répartition spatiale globale de la courbure cornéenne ou de détecter d'éventuelles fluctuations locales. La localisation précise de l'apex d'un cône est effectuée dans le mode de courbure moyenne. Cela est particulièrement intéressant en contactologie. Le type d'asphéricité (oblate ou prolata) de la cornée est généralement mieux perçu en mode tangentiel. Il est également bien mis en évidence par le mode de courbure moyenne, surtout en cas de forte toricité (astigmatisme d'origine cornéenne).

Cartes topographiques d'élévation

La topographie d'élévation est un outil diagnostique complémentaire à la topographie spéculaire de courbure. Contrairement à cette dernière, qui fournit des informations sur la courbure cornéenne, la topographie d'élévation permet de recueillir des informations directement relatives à la morphologie spatiale, c'est-à-dire au relief de la surface cornéenne. Elle permet d'accéder à l'étude de la face postérieure de la cornée et fournit des informations sur l'épaisseur cornéenne (pachymétrie optique). Sa généralisation relativement récente a été favorisée par l'essor de la chirurgie réfractive, où elle est particulièrement utile pour la planification de la chirurgie photoablatrice cornéenne, ainsi que le dépistage des contre-indications au Lasik (kératocône fruste).

L'élévation dans la topographie cornéenne fait simplement référence à la distance au-dessus ou en dessous à laquelle se situent les points de la surface cornéenne vis-à-vis d'une surface de référence calculée. Les données traitées en topographie d'élévation sont directement les coordonnées spatiales de la surface analysée, et non celle de la courbure locale. La cornée y est assimilée à un maillage dont les points possèdent une abscisse X, une ordonnée Y et une coordonnée d'élévation (Z). Les images des données brutes recueillies par le système de détection sont traitées par un procédé mathématique dédié (ex. : triangulation) en vue de la reconstruction tridimensionnelle des surfaces de la cornée. Ces surfaces délimitent le volume cornéen, ce qui permet d'établir un relevé pachymétrique "point par point".

Compte tenu de la divergence entre le diamètre total de la cornée (échelle millimétrique) et la variation de l'élévation qu'il faut décrire (échelle

micronique), la représentation des variations fines de l'élévation ne peut pas être faite par rapport à une surface de référence (SR) horizontale arbitraire comme le plan limbique, ou le plan passant par le vertex de la cornée.

La représentation de l'élévation cornéenne suppose ainsi l'utilisation d'une surface de référence par rapport à laquelle les différences d'élévation seront caractérisées. Afin de mettre en évidence les petites variations locales, la surface de référence doit épouser le profil global de la surface mesurée. La sphère est la surface choisie "par défaut" pour représenter l'élévation de la cornée.

Après calcul de la sphère de référence sur un diamètre d'analyse donné, les données d'élévation sont rendues en utilisant une échelle de couleurs appropriée. Avec la plupart des topographes et par analogie avec les cartes terrestres d'élévation, les points au-dessus de la sphère (élévation positive) sont représentés en couleurs chaudes, allant du jaune et rouge foncé, tandis que les points situés au-dessous de la sphère (élévation négative) sont représentés en couleurs froides (du bleu ciel au violet). Les points situés au niveau de la sphère sont représentés en vert ("niveau zéro").

Il faut calculer une sphère de référence pour la face antérieure de la cornée, et une autre sphère de référence pour la face postérieure de la cornée. Disposer de l'élévation antérieure et postérieure tout en connaissant l'écart entre ces surfaces permet de réaliser une carte de pachymétrie qui fournit un relevé exhaustif des variations de l'épaisseur cornéenne. L'échelle de couleur varie des couleurs chaudes (cornées fines) aux couleurs plus froides (cornées épaisses). La valeur de l'épaisseur minimale, sa localisation, l'existence d'un

IMAGERIE DU SEGMENT ANTÉRIEUR

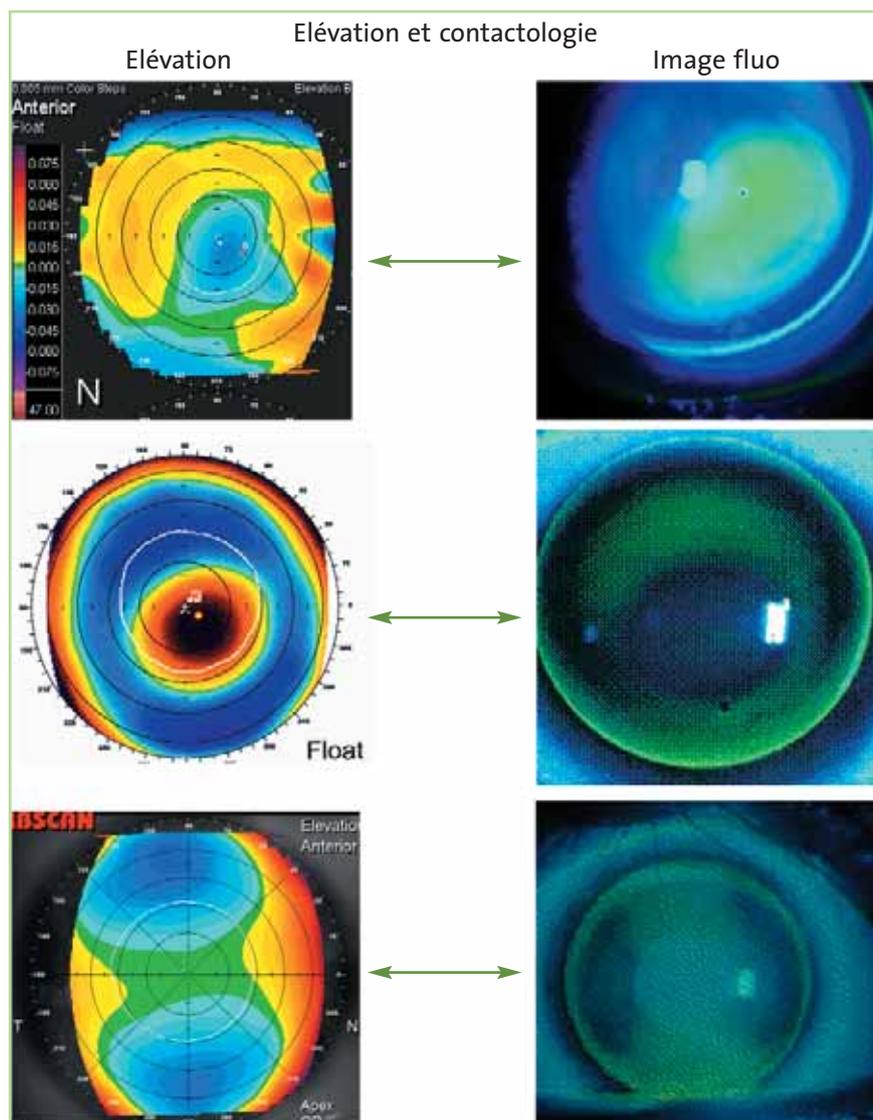


FIG. 2 : Les principes mis en jeu en topographie d'élévation – adaptation d'une sphère de référence au relief cornéen – sont voisins de ceux utilisés en contactologie – adaptation d'une lentille rigide au relief cornéen. Cette analogie explique la ressemblance entre cartes d'élévation et images fluorescéiniques sur lentille.

amincissement central ou paracentral sont autant d'informations recherchées en chirurgie réfractive, dans le cadre du dépistage du kératocône infraclinique par exemple.

1. Représentations alternatives en élévation

Des contraintes d'alignement peuvent être ajoutées à la sphère de référence

calculée, et d'autres surfaces géométriques de référence peuvent être choisies, telles que des ellipsoïdes, des toroïdes ou tout conicoïde. Ces différents modes ont le mérite de souligner la "relativité" de la représentation de l'élévation des surfaces cornéennes. L'utilisation de certains modes révèle particulièrement la présence d'une composante asymétrique de l'élévation. Elle est par conséquent

intéressante dans l'analyse d'un décentrement après Lasik ; l'alignement de la sphère de référence avec le centre géométrique de la cornée rehausse les variations asymétriques de l'élévation.

2. Applications cliniques

La "congruence anatomique" entre la surface analysée et la sphère de référence explique qu'il puisse être utile pour le contactologue de représenter la surface cornéenne en élévation, voire d'utiliser le rayon de cette sphère pour approcher celui d'une lentille de contact d'essai (*fig. 2*).

La topographie d'élévation apporte des données irremplaçables sur la morphologie des surfaces cornéennes. Les données d'élévation permettent de mesurer plus directement le remodelage cornéen induit par les profils d'ablation et seront utiles dans l'élaboration et l'amélioration des profils d'ablation personnalisés. La comparaison entre les données issues de l'aberrométrie et de la topographie cornéenne d'élévation pourra être utile pour comprendre la genèse et l'origine de certaines aberrations optiques de l'œil humain. L'utilisation de contraintes d'alignement et de surfaces de référence non sphériques (en particulier sphéro-cylindriques et aconiques), apporte pourtant une contribution intéressante à la compréhension de l'anatomie cornéenne topographique et pourra certainement représenter une aide précieuse au diagnostic de certaines affections cornéennes inductrices d'irrégularité (décentrement, ectasie). L'inspection attentive des cartes d'élévation postérieure et de pachymétrie joue un rôle crucial dans le dépistage des formes précoces de kératocône (kératocône fruste).

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