

REMERCIEMENTS

A MON MAITRE
PROFESSEUR BENATIYA ANDALOUSSI IDRIS

Mes sincères gratitudees pour la qualitt de votre enseignement, vos conseils et l'intertt que vous portez à tous les rtsidents. Vos compttences professionnelles incontestables ainsi que vos qualitts humaines vous valent l'admiration et le respect de tous.

Nous vous sommes ggalement reconnaissants pour toutes les occasions que vous nous avez offert afin d'amliorer nos connaissances en participant aux manifestations scientifiques nationales ou internationales.

Pour tout ceci et pour tant d'autres raisons, nous souhaitons tre dignes de la confiance que vous portez en nous. Qu'elle puisse trouver ici le tmoinage de notre profond respect et infinie gratitude.

A MON MAITRE
PROFESSEUR ABDELLAOUI MERIEM

J'exprime mes profonds remerciements à vous, Madame Abdellaoui pour l'aide compétente que vous m'avez apporté, pour votre patience et votre encouragement. J'admire la façon et le calme avec lequel vous gérez votre exercice, vos qualités humaines et professionnelles seront pour moi un exemple à suivre dans l'exercice de ma profession.

A MON MAITRE
PROFESSEUR CHRAIBI FOUAD

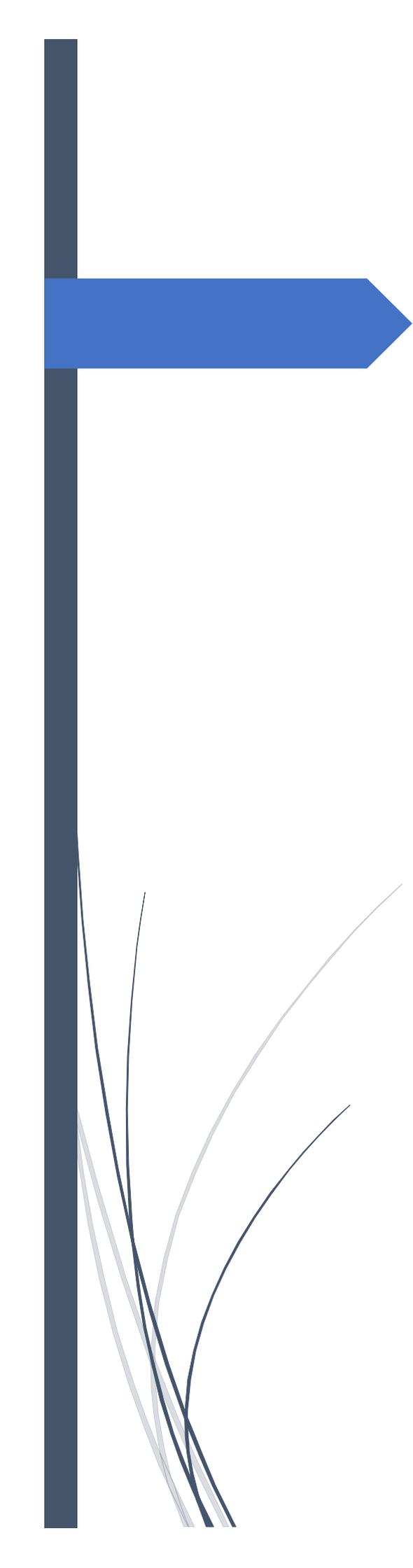
J'ai eu le grand plaisir de connaître le côté passionnant et intéressant de la spécialité d'Ophthalmologie sous votre tutelle. J'ai apprécié durant mes 5 années de spécialité vos qualités de médecin et votre grand savoir. Un grand Merci pour vos précieux conseils et vos encouragements.

A MON MAITRE
PROFESSEUR BENNIS AHMED

*Je tiens à vous remercier cher maitre pour votre engagement à nos côtés,
pour votre soutien au service, votre disponibilité, votre patience, de
nous avoir fait profiter de vos compétences tant théoriques que
pratiques.*

A MA CHÈRE FAMILLE

*Nul mot ne pourrait exprimer mon profond attachement et
reconnaissance pour l'amour, la tendresse, le soutien et la présence dans
les moments les plus difficiles, Puisse Dieux, tout puissant, vous
préserver et vous accorder santé, longue vie et bonheur.*



SOMMAIRE

Table des matières

INTRODUCTION.....	15
RAPPEL DU KERATOCONE.....	15
I. Définition et historique du kératocône :.....	16
II. Physiopathologie :.....	16
III. Epidémiologie :.....	16
IV. Facteurs de risques :.....	17
V. Diagnostic du kératocône :.....	20
VI. Evolution :.....	27
VII. Prise en charge thérapeutique :.....	27
MATERIELS ET METHODES.....	31
A. Description de l'étude :.....	32
B. L'étude statistique :.....	33
C. Fiche d'exploitation :.....	33
RESULTATS.....	35
A. L'âge :.....	36
B. Sexe :.....	36
C. Réfraction :.....	37
D. Kératométrie plate : K1 :.....	37
E. Kératométrie cambrée : K2 :.....	37
F. Kératométrie maximale : K max :.....	37
G. Kératométrie moyenne : K moy :.....	37
H. Astigmatisme :.....	37
I. Facteur Q :.....	38
J. Pachymétrie apex :.....	38
K. Pachymétrie minimale :.....	38
L. Élévation antérieure et postérieure :.....	38

Etude topographique du kératocône fruste

M. Indices de progressions :	39
N. CTSP : Corneal Thickness Spatial Profile :	39
O. PTI : Percentage Thickness Increase :	40
P. Indices kératoconique :	40
DISCUSSION	41
A. Kératométrie :	46
B. Pachymétrie :	47
C. Facteur Q :	50
D. Elévation antérieure et postérieure :	51
E. Indices kératoconiques :	53
CONCLUSION	55

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : répartition des âges de découverte de kératocône	19
Figure 2 : Kératométrie de la face antérieure et postérieure de la cornée sur Pentacam	22
Figure 3 : l'inclusion du cône dans le calcul de la BFS peut masquer l'anomalie cornéenne	23
Figure 4 : l'exclusion du cône du calcul de la surface de référence influencera la BFS et mettra en évidence l'anomalie cornéenne	24
Figure 5 : Les cartes du Belin Ambrosio display sur Pentacam	25
Figure 6 : Répartition des patients en fonction du sexe	36
Figure 7 : Les formes les plus fréquemment retrouvées dans le kératocône	43
Figure 8 : Indice I-S	44
Figure 9 : Indices topographiques de Rabinowitz	45

LISTE DES TABLEAUX

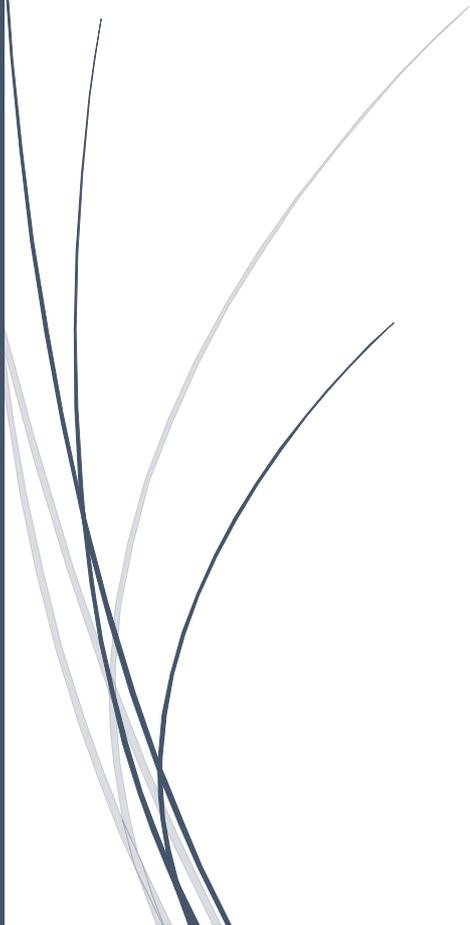
Tableau 1 : Les indices de kératocône.....	26
Tableau 2 : moyennes et écarts types du CTSP dans les 2 groupes	39
Tableau 3 : moyennes et écarts types du PTI dans les 2 groupes	40
Tableau 4 : Moyennes et écarts types des indices kératoconiques des 2 groupes	40
Tableau 5 : Les formes de kératocône	42

LISTE DES ABREVIATIONS

AB : Asymmetric Bowtie
BFS : Best Fit Sphere
CKI : Center Keratoconus Index
CT : Corneal Thickness
CTSP : Corneal Thickness Spatial Profile
EBFS : enhanced Best Fit Sphere
KI : Keratoconus Index
KLAP : kératoplastie lamellaire antérieure profonde
KT : kératoplastie transfixiante
IHA : Index of Height Asymmetry
IHD : Index of Height Decentration
ISV : Index of Surface Variance
IVA : Index of Vertical Asymmetry
OCT : Tomographie par cohérence optique
PTI : Percentage Thickness Increase
Rmin : Minimum Sagittal Curvature
ROS : Reactive oxygen species
SRAX : Skewed Radial Axes



INTRODUCTION



Etude topographique du kératocône fruste

Le kératocône est une ectasie cornéenne bilatérale et typiquement asymétrique. C'est une pathologie dégénérative non inflammatoire caractérisée par un amincissement cornéen progressif. L'évolution de la maladie est extrêmement variable, commençant classiquement entre la puberté et la trentaine. Elle est responsable d'une baisse de l'acuité visuelle du fait de l'astigmatisme irrégulier qu'il induit aux stades précoces et à cause des opacités cornéennes qui peuvent apparaître à un stade avancé.

L'incidence du kératocône varie de 50 à 230 pour 100 000 dans la population générale, ceci correspond approximativement à 1 cas pour 2000 personnes. La prévalence du kératocône a été trouvée comme étant au maximum de 0,6 % et au minimum de 0,05 % de la population générale.

Il existe différentes formes cliniques, le kératocône avéré ne posant pas de problème diagnostique, il est suspecté cliniquement et confirmé par une imagerie cornéenne. Cependant, un kératocône 'fruste' ou 'infraclinique' échappe parfois aux critères diagnostiques standards du kératocône. Sa recherche constitue un vrai challenge diagnostique essentiellement avant toute chirurgie réfractive.

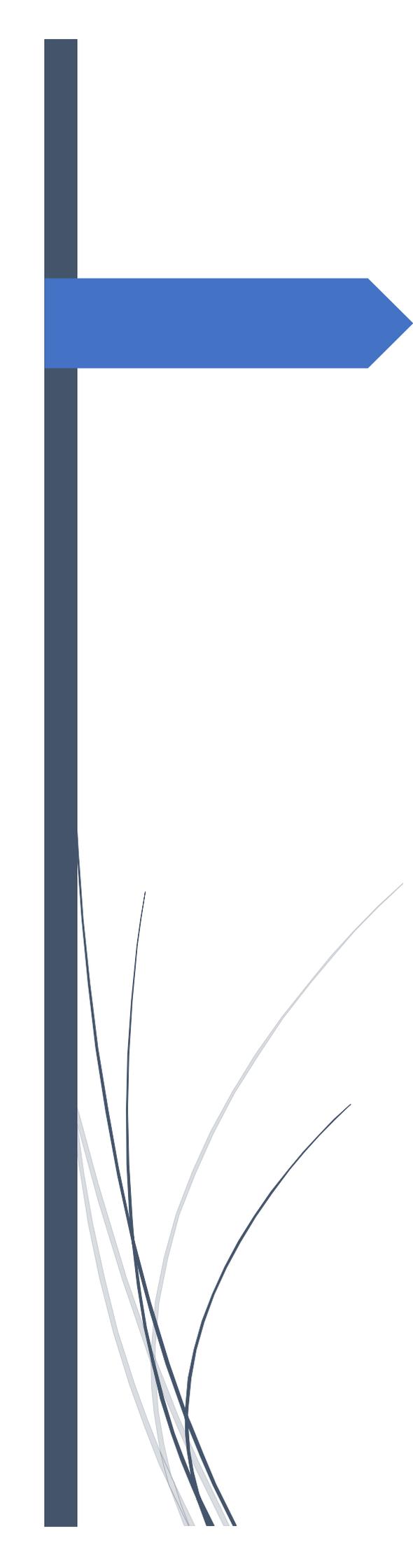
Avec l'essor de la chirurgie réfractive, plusieurs machines utilisant différentes techniques de mesures sont disponibles capables de fournir plusieurs détails sur les caractéristiques anatomiques et optiques de la cornée. Les données sont représentées sous forme de multiples cartes : carte de pachymétrie cornéenne, carte d'élévations antérieures et postérieures, cartes de puissances et courbures antérieures et postérieures.

La différenciation entre cornée ectatique et normale demeure une condition préalable à toute chirurgie réfractive ou une adaptation orthokératologique. De nombreuses études ont été menées afin de déterminer des critères précis à la détection précoce du kératocône. De nombreux indices comme l'élévation cornéenne postérieure, pachymétrie (CT), volume cornéen (CV) et les aberrations cornéennes antérieures et postérieures ont été identifiés.

Le Pentacam est un topographe cornéen qui utilise un système de caméra Scheimpflug rotative afin de mesurer l'élévation cornéenne antérieure et postérieure, ainsi que la pachymétrie point par point. Il s'agit de l'une des technologies les plus avancées en matière de topographie cornéenne. Il permet la détection des formes infracliniques de kératocône et des candidats dits à risque de complications (ectasie post chirurgie).

Étude topographique du kératocône fruste

Le but de notre étude est de comparer les différentes mesures et indices cornéens entre des yeux ayant un kératocône fruste et des yeux normaux.



RAPPEL DU KERATOCONE

I. Définition et historique du kératocône :

Le kératocône est une dystrophie cornéenne non inflammatoire bilatérale et souvent évolutive se manifestant par une protrusion de la cornée qui débute généralement pendant l'adolescence. Cette déformation s'accompagne d'un amincissement progressif de la cornée. L'évolution se fait vers une baisse d'acuité visuelle lié à l'importance de l'astigmatisme irrégulier et à la survenue d'opacités cornéennes.

Les premières descriptions de cette pathologie et les premières propositions de prise en charge pour en ralentir l'évolution datent du XVIIIème siècle. Dans son "Traité des maladies des yeux", Antoine Pierre Demours, nomme cette déformation cornéenne "protubérance" et décrit à l'époque un traitement par incision cornéenne puis bandage oculaire compressif.

II. Physiopathologie :

La pathogénie du kératocône demeure mystérieuse. L'hypothèse biomécanique suggère que le kératocône pourrait être lié à un glissement des fibres de collagène. Cette altération de l'arrangement orthogonal des fibres de collagène pourrait contribuer à l'instabilité biomécanique du stroma cornéen.

L'hypothèse biologique considérant le désordre biologique à l'origine du déséquilibre biomécanique. Le rôle du stress oxydatif a été plus récemment mis en cause avec une accumulation de radicaux libres, d'ions d'oxygène et de peroxydes qui favoriseraient les troubles métaboliques cellulaires cornéens.

On a également suggéré l'implication de médiateurs inflammatoires dans la pathogénie du kératocône, remettant en cause le concept de maladie non inflammatoire.

III. Epidémiologie :

La prévalence du kératocône varie en fonction de la localisation géographique et les critères diagnostiques, elle est estimée à 54,5 pour 100 000 soit environ 1/2 000 ¹. L'incidence est estimée entre 50 et 230 pour 100 000 habitants.

L'étude de Wheeler et al reportait une estimation du nombre de patients atteints de kératocône avec une forme familiale d'environ 6 à 23 % ². Wang et al estimaient que le risque relatif d'être atteint d'un kératocône est 15 à 67 fois supérieur chez les apparentés de premier degré par rapport au risque de la population générale ³.

La prédominance d'un sexe n'est pas clairement établie dans les différentes séries et on considère souvent qu'il existe une relative parité de cette affection. Les données les plus récentes s'orientent vers une légère prédominance masculine de l'affection.

Des études longitudinales ont montré son caractère toujours ou presque bilatéral et asymétrique. Des taux de kératocône unilatéraux variant de 14,3% à 41% ont été rapportés lorsque le diagnostic était basé sur des critères cliniques. En utilisant des techniques de vidéotopographies numérisées, ces taux ont diminué à des valeurs comprises entre 0,5 à 4%.

IV. Facteurs de risques :

A. Facteurs environnementaux :

Il est communément admis que l'étiologie du kératocône est multifactorielle associant des facteurs environnementaux et génétiques. Les facteurs environnementaux, qui ont été reconnus sont le frottement oculaire chronique, l'atopie et l'exposition aux UV, bien que la contribution de tous ces facteurs soit actuellement inconnue ^{4 5}.

B. Frottement oculaire :

Les frottements oculaires sont considérés comme un facteur de risque de progression ou d'éclosion de la maladie, mais non nécessaire ni suffisant pour son déclenchement ⁶.

Près de la moitié des patients ayant un kératocône se frottent les yeux, selon qu'il s'agisse d'un frottement doux ou vigoureux ou selon le temps de ⁶.

Des cas de kératocône asymétrique ont été rapportés dans lesquels l'œil le plus touché est celui qui a été frotté le plus ^{6 7}. Néanmoins, cette association n'est pas nécessairement causale. Pourtant le frottement oculaire reste un facteur de risque au moins dans certaines formes tel que le kératocône génétiquement prédisposé ⁸.

C. L'atopie :

Beaucoup de patients atteints de kératocône ont une prédisposition aux allergies. La présence d'un terrain atopique est retrouvée pour près de 50% des cas, alors que sa fréquence en est seulement de 10% dans la population générale. Cette association a été confirmée par de nombreux auteurs ^{9 10}, mais d'autres n'ont pas trouvé d'association statistiquement significative par rapport au groupe témoin ¹¹.

En pratique, il est évident qu'un terrain atopique favorise les sensations de prurit oculaire et les frottements oculaires répétés. Kaya et al ont montré que les patients atteints de kératocône associé à une atopie avaient une cornée plus fine et plus ectasique que les patients de même âge et de même sexe sans atopie ⁹.

D. Position de sommeil :

La compression prolongée de l'œil au cours du sommeil (sujets dormant la tête dans l'oreiller, quand le corps est positionné sur le côté, ou sur le ventre) est très fréquemment retrouvée chez les patients atteints de kératocône ¹². L'œdème cornéen nocturne rend certainement la cornée plus fragile à un stress mécanique comme les frottements ¹².

E. Exposition solaire :

Les ultraviolets sont responsables de formation des espèces réactives de l'oxygène « reactive oxygen species » (ROS) qui entraînent de nombreux dommages oxydatifs au niveau moléculaire (acides nucléiques, protéines, lipides...).

Au niveau de la cornée keratoconique l'exposition excessive au soleil entraîne ces dommages oxydatifs par diminution des enzymes aldéhyde déshydrogénase 3 (ALDH3) et superoxyde dismutase nécessaire pour éliminer les ROS ¹³. Par conséquent, la prévalence la plus élevée de kératocône est retrouvée dans les pays chauds et ensoleillés en comparaison avec l'Europe et l'Amérique du nord.

F. Facteurs socio-économiques :

1. Age :

Le kératocône est habituellement découvert à la puberté (entre 10 et 20 ans), rarement après l'âge de 35 ans ¹⁶. Dans une cohorte de 196 patients, l'âge moyen d'apparition était de 18 ans ³ et de 15.39 ans ($\pm 3,95$) dans une autre étude ¹⁷. Cependant, la plupart des études donnent l'âge du diagnostic, qui précède de quelques années le début de la maladie généralement asymptomatique au début.

Des études sur le kératocône pédiatrique ont démontré que la maladie survient à la fin de la première décennie ou au début de l'adolescence ^{18 19}, au-delà de 50 ans le pourcentage des patients atteints de kératocône est estimé faible.

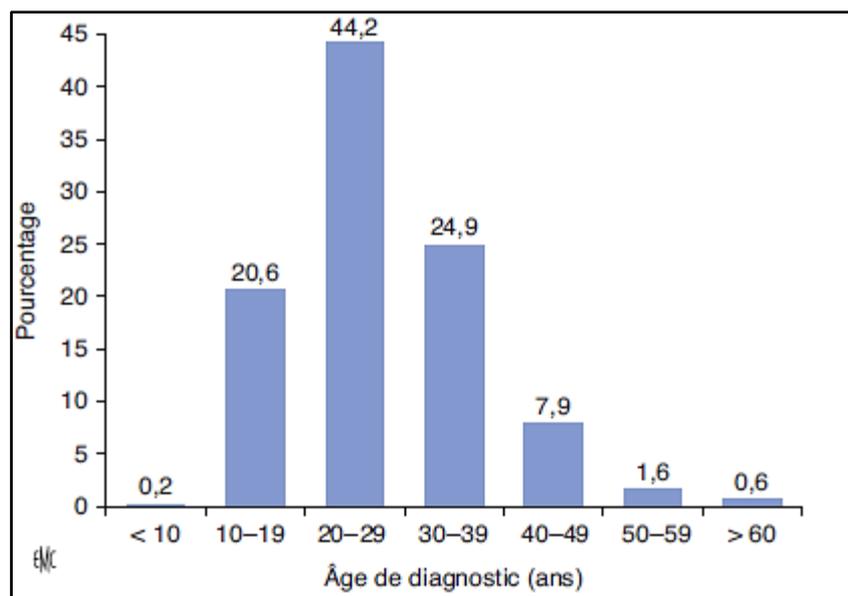


FIGURE 1 : Répartition des âges de découverte de kératocône (EMC)

2. L'origine géographique :

La prévalence du kératocône n'est pas la même partout dans le monde. La faible prévalence se trouve au niveau de l'Europe ²⁰, le nord des Etats-Unis ²¹ et le Japon ²², elle est relativement élevée dans les pays du Moyen-Orient ²³, l'Inde ²⁴, et la Chine ²⁵. On n'a pas de statistique sur le Maghreb ; une étude menée en Tunisie sur les causes de cécité chez l'enfant a montré que le kératocône est responsable de malvoyance chez 0,7% ²⁶.

Les pays du Moyen-Orient et l'Inde sont caractérisés par des climats chauds et ensoleillés, incriminés comme sus décrit dans la pathogenèse du kératocône.

G. Facteurs génétiques :

L'origine génétique supposée du kératocône a été suggérée à partir du résultat de certaines études épidémiologiques. A ce jour aucune étude n'a permis de dégager un typage particulier à cette pathologie. Cependant, quelques loci et gènes ont été retrouvés dans le cadre d'études familiales.

Néanmoins, il est difficile, devant une atteinte familiale, de faire la part entre l'hérédité et l'action de facteurs de risques communs sur les membres d'une même famille. Le risque relatif d'être atteint d'un kératocône serait 15 à 67 fois supérieur chez les apparentés de premier degré par rapport au risque de la population générale.

Plusieurs travaux suggèrent l'existence de formes infracliniques « frustes » parmi les apparentés de patients porteurs d'un kératocône ^{27 28}.

H. Pathologies associées :

Le kératocône serait plus fréquemment rencontré chez des personnes ayant d'autres pathologies : telle que la trisomie 21, la rétinite pigmentaire, l'amaurose congénitale de Leber, la maladie d'Ehlers-Danlos, l'osteogenesis imperfectum, le syndrome d'Appert, le prolapsus de la valve mitrale... Une partie de ces syndromes favorise le frottement oculaire (ex : stimulation rétinienne par frottement oculaire dans le cadre de l'amaurose congénitale de Leber).

Il est toutefois difficile d'établir un lien direct entre ces pathologies et le kératocône.

V. Diagnostic du kératocône :

A. Diagnostic clinique :

1. Circonstances de découverte :

Le kératocône débute classiquement entre la puberté et la trentaine, bien que certains cas puissent se voir bien avant. Les signes fonctionnels sont peu spécifiques et rapportés comme un flou visuel, une photophobie, baisse d'acuité visuelle progressive surtout de loin, l'acuité visuelle peut être inférieure à 1/20 avec un retentissement important sur la vie sociale qui est dû à la déformation des images ²⁹. La maladie est bilatérale et asymétrique, le plus souvent unilatéral au début.

Il est fréquent de porter le diagnostic lors d'un examen systématique, notamment lors d'un bilan préopératoire d'un patient demandeur de chirurgie réfractive.

2. L'examen clinique :

L'examen clinique sera contributif à un stade avancé de la maladie et reflètera à des degrés variables l'ectasie cornéenne :

a) L'acuité visuelle :

Au stade initial, elle est conservée. La correction optique peut se faire par des verres correcteurs. A un stade avancé, l'acuité visuelle est faible. La correction optique doit se faire par des lentilles rigides.

b) L'inspection :

Le signe de Munson : Dans le regard vers le bas, la saillie conique cornéenne se transmet à la paupière inférieure qui épouse sa forme triangulaire.

c) Examen biomicroscopique :

- Amincissement cornéen et la saillie conique qui déforme la fente lumineuse.
- L'anneau de Fleischer est un anneau partiel ou complet de coloration brune, situé à la base du cône. Il est dû à un dépôt de ferritine, en provenance des larmes.
- Les nerfs cornéens peuvent être anormalement visibles.
- Les stries de Vogt sont des lignes fines, le long du méridien de plus grande courbure, elles sont situées dans le stroma cornéen postérieur, juste en avant de la membrane de Descemet et disparaissent lorsqu'on exerce une pression externe sur le globe.
- Les lignes cicatricielles superficielles intéressent le stroma antérieur au sommet du cône. Elles représentent des ruptures de la couche de Bowman comblées par du tissu cicatriciel.
- Le kératocône aigu ou l'hydrops cornéen correspond à une rupture aiguë de la membrane de Descemet. L'irruption d'humeur aqueuse à l'intérieur de la cornée provoque un œdème épithélial et stromal brutal responsable d'un tableau clinique bruyant avec apparition d'une opacité profonde diffuse séquellaire.

B. Diagnostic topographique :

Le diagnostic objectif du kératocône repose sur la topographie cornéenne, elle a un intérêt également dans la surveillance et la détection d'une éventuelle progression. C'est une technique qui permet de recueillir des informations relatives à la courbure ou au relief (élévation) de la cornée, grâce à la projection et l'analyse du reflet d'un motif lumineux éclairant ou balayant la cornée. Les images recueillies sont analysées de façon automatisée par un logiciel, et des cartes en couleur sont fournies pour interprétation.

Les instruments qui mesurent et décrivent avec le plus de précision les propriétés topographiques de la surface cornéenne peuvent être classés en deux types :

- Le disque de Placido : utilise des mires réfléchives concentriques.
- Les enregistreurs d'élévation/dépression : soit par balayage d'une fente lumineuse (Orbscan) ou par une caméra rotative Scheimpflug (Pentacam). Ces topographes d'élévation fournissent une estimation directe de l'élévation de la cornée, établissant ainsi

Etude topographique du kératocône fruste

une « vraie » carte en trois dimensions de la forme de la surface cornéenne antérieure et postérieure. L'étude de la face postérieure est importante car sa déformation, apparaît avant celle de la face antérieure.

Le topographe **Pentacam (Oculus)**, dispose d'un système de camera Scheimpflug pour l'étude de la pachymétrie et de l'élévation antérieure et postérieure. Les informations recueillies sont rendues sous formes de représentation tridimensionnelle des surfaces avec de multiples cartes colorées.

Un examen topographique donne les informations suivantes :

- **La valeur kératométrique** : Les rayons de courbures centraux de la cornée, l'astigmatisme et l'axe correspondant ainsi que l'excentricité sont affichés. L'excentricité moyenne et le diamètre pupillaire moyen sont aussi indiqués.

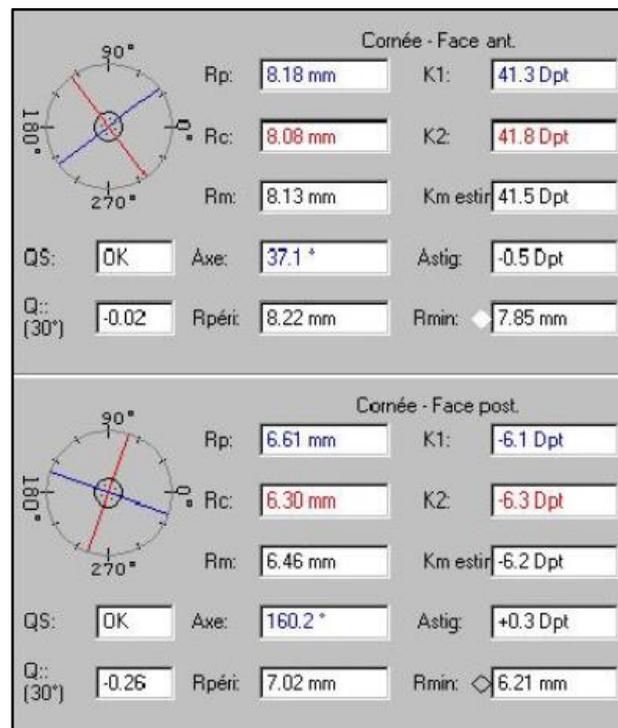


FIGURE 2 : Kératométrie de la face antérieure et postérieure de la cornée sur Pentacam

- **Les cartes de pachymétrie et de topographies** : des cartes de topographie et de pachymétrie (pachymétrie de l'apex, minimale avec ses coordonnées par rapport à l'apex cornéen) sont affichées sous forme de cartes colorées. Toutes ces cartes sont centrées sur l'apex cornéen. L'apex est défini comme la portion de la cornée ayant un gradient mathématique égal à zéro.
- **L'échelle de couleur** : l'échelle de couleur indique l'équivalence entre les couleurs de la cartographie ainsi que les valeurs numériques. En général, pour les cartes de courbure, les couleurs chaudes (rouge, orange, etc.) traduisent une courbure élevée, et inversement pour les couleurs froides.
- **Belin Ambrosio display** : la BFS (Best-Fit-Sphere : sphère de référence) suppose que la surface de référence est normale, par conséquent, La BFS sera influencée par toute partie anormale de la cornée. En cas de kératocône ou ectasie cornéenne, la BFS sera plus cambrée, ce qui sous-estimera la différence d'élévation entre le sommet du cône et la BFS.

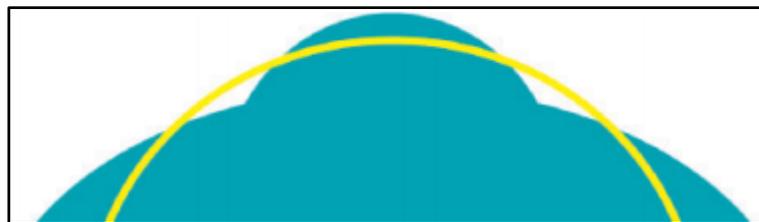


FIGURE 3 : L'inclusion du cône dans le calcul de la BFS peut masquer l'anomalie cornéenne

L'objectif du Belin Ambrosio display est de concevoir une surface de référence qui se rapproche plus de la cornée normale de l'individu, puis de comparer la forme réelle de la cornée à cette nouvelle forme de référence.

La nouvelle surface de référence (enhanced BFS) est basée sur la cornée propre du patient après avoir exclu la région conique ou ectatique : une zone optique de 4 mm centrée sur la partie la plus fine de la cornée (zone d'exclusion).

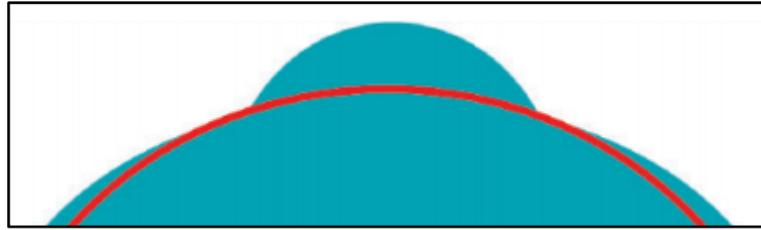


FIGURE 4 : L'exclusion du cône du calcul de la surface de référence influencera la BFS et mettra en évidence l'anomalie cornéenne

La différence d'élévation entre une BFS standard et la nouvelle surface de référence (enhanced BFS) sera significative pour une cornée conique, tandis que la différence est minimale dans une cornée normale.

Le Belin Ambrosio display donne 2 premières cartes d'élévations standards : BFS de base (antérieure : placée à gauche et postérieure : à droite). Suivies des 2 cartes d'élévations basées sur l'enhanced BFS. Les 2 cartes du bas sont des cartes de différence d'élévation entre la carte d'élévation de base et carte d'exclusion.

- **En rouge :** la différence d'élévation antérieure et postérieure est supérieure à 12 μm et 20 μm respectivement. C'est le cas dans les kératocônes avérés.
- **En jaune :** la différence d'élévation antérieure est comprise entre 6 et 12 μm et postérieure entre 8 et 20 μm . Cela oriente vers une suspicion de kératocône.

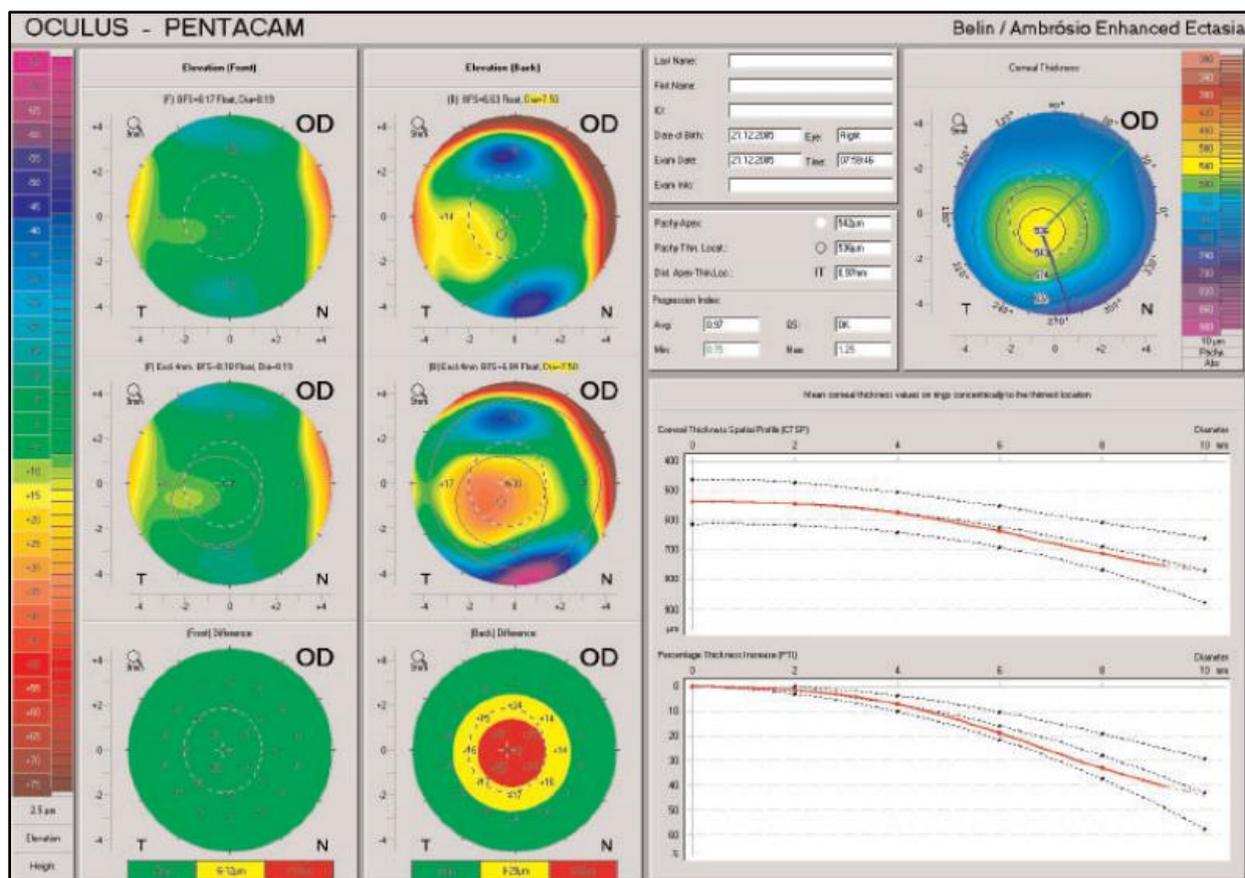


FIGURE 5 : Les cartes du Belin Ambrosio display sur Pentacam

Certains indices sont spécialement conçus pour dépister les formes débutantes de kératocône :

- **Progression de l'épaisseur cornéenne** : Cette fonction analyse l'évolution de l'épaisseur cornéenne et la compare à une base de données statistique d'yeux non traités en 2 diagrammes :
 - En données absolues pour le diagramme du haut (CTSP : Corneal Thickness Spatial Profile)
 - En pourcentages pour le diagramme du bas (PTI : Percentage Thickness Increase)

La pachymétrie est analysée sur des anneaux de 1mm, 2mm, 3mm, 4mm et 5mm de rayon, centrés sur la localisation la plus fine. La progression de la pachymétrie du patient est représentée par une courbe rouge qui représente l'évolution de la pachymétrie sur les anneaux concentriques.

Etude topographique du kératocône fruste

- **Indices de progression** : De manière générale, plus l'indice est élevé, plus la probabilité de présence d'un kératocône ou d'un risque d'instabilité de la cornée est élevé.

- **Indices de kératocône** : Ces indices ne considèrent que la face antérieure de la cornée.
 - ISV (Index of Surface Variance) : Déviation individuelle des rayons de courbure par rapport au rayon moyen. Valeur élevée pour tous les types d'irrégularités de la cornée (cicatrices, astigmatisme, corneal warpage, kératocône...)
 - IVA (Index of Vertical Asymmetry) : Degré de symétrie des rayons de courbure de la cornée autour du méridien horizontal. Valeur élevée en cas d'astigmatisme oblique, de kératocône ou d'ectasie limbique.
 - KI (Keratoconus Index) : Augmente avec la sévérité d'un kératocône.
 - CKI (Center Keratoconus Index) : Augmente avec la sévérité d'un kératocône central.
 - Rmin (Minimum Sagittal Curvature) : Plus petit rayon de courbure sagittal mesuré sur la totalité de la cornée.
 - IHA (Index of Height Asymmetry) : Degré de symétrie des données d'élévation autour du méridien horizontal. Analogue au IVA, cependant parfois plus sensible.
 - IHD (Index of Height Decentration) : Calculé à partir de l'analyse de Fourier des données d'élévation, cet indice donne le degré de décentrement dans la direction verticale. Valeur élevée en cas de kératocône.

Indice	Valeur anormale (jaune)	Valeur pathologique (rouge)
ISV	≥ 37	≥ 41
IVA	≥ 0.28	≥ 0.32
KI	≥ 1.07	≥ 1.07
CKI	≥ 1.03	≥ 1.03
Rmin	≥ 6.71	≥ 6.71
IHA	≥ 19	≥ 21
IHD	≥ 0.014	≥ 0.016

TABLEAU 1 : Les indices de kératocône

VI. Evolution :

L'évolution d'un kératocône n'est pas prévisible. Cependant, l'âge est un facteur de risque d'évolution. Plus le patient est jeune, plus le risque d'évolution est important, le risque est inversement proportionnel à l'âge.

C'est une maladie du jeune adulte qui commence assez précocement, évolue majoritairement jusqu'à l'âge de 30 ans, se stabilise un peu spontanément entre 30 et 40 ans et après évolue moins.

Environ 20% des patients finiront par nécessiter une greffe de cornée.

VII. Prise en charge thérapeutique :

Le kératocône est une pathologie chronique et couteuse, la prise en charge thérapeutique dépend essentiellement de la sévérité du kératocône.

A. Traitement médical :

1. Correction optique par verres correcteurs :

La correction par verres de lunettes est possible à un stade précoce. La réfraction peut être difficile et fluctuante.

2. Lentilles de contact :

Les lentilles de contact demeurent la modalité de prise en charge de première ligne pour la réhabilitation visuelle des patients et ce à différentes étapes de l'évolution de la maladie cornéenne.

a) Lentilles rigides perméables aux gaz :

La lentille rigide demeure le traitement optique de choix dans le kératocône. Elle est préconisée chez environ 75% des patients avant le stade de chirurgie et permet l'obtention d'excellents résultats visuels. De plus, elle est adaptable à l'évolutivité du kératocône dans le temps.

b) Lentilles sclérales :

Sont indiqués pour les kératocônes avancés ou en cas d'intolérance aux lentilles rigides, leurs inconvénients sont le cout cher et les difficultés de manipulation.

B. Traitement chirurgical :

1. Anneaux intra cornéens :

Permettent de diminuer l'astigmatisme asymétrique, sans enlever de tissu cornéen et sans toucher le centre de la cornée^{30 31}. S'ils n'améliorent pas forcément la vision, les anneaux intra cornéens permettent une adaptation plus aisée en lentilles de contact.

2. Laser excimer :

La photoablation était contre-indiquée dans le kératocône en raison de l'amincissement et de l'affaiblissement biomécanique cornéen. L'essor du Cross-Linking du collagène cornéen permet de reconsidérer une photokératectomie réfractive (PKR) dans le kératocône sous certaines conditions. La PKR sera guidée par la topographie, avec une photoablation n'excédant donc pas 50 microns^{32 33}. L'objectif est de « régulariser » la surface cornéenne.

3. Implants intra oculaire :

La mise en place d'implants intraoculaires permet de corriger la myopie axiale ou de courbure, chez des patients ayant un kératocône stabilisé (avec ou sans CXL) afin d'améliorer la qualité visuelle de ces patients. L'implantation pourra être phaque ou pseudophaque en cas de cataracte associée.

Elle peut intervenir en première intention ou après une chirurgie préalable par implantation d'anneaux ou greffe de cornée. L'indication opératoire ne repose sur aucun consensus et doit se réfléchir au cas par cas. L'implantation intra-oculaire s'adresse essentiellement à des kératocônes peu évolués, associés à une myopie forte et uniquement si la réfraction est accessible.

4. Greffe de cornée :

La greffe de cornée n'a indication qu'en dernier recours. Longtemps considérée comme le traitement de référence du kératocône, la kératoplastie transfixiante (KT) a perdu cette place au profit de la kératoplastie lamellaire antérieure profonde (KLAP) pré-descemétique. Les avantages sont une meilleure résistance mécanique, une acuité visuelle et un astigmatisme postopératoire identiques, mais surtout la conservation endothéliale^{34 35}. Si le risque de rejet épithélial, sous-épithélial ou stromal persiste après KLAP, le risque de rejet endothélial est nul. La survie des greffons lamellaires semble ainsi rallongée. En dehors de la courbe d'apprentissage de la technique³⁶, la KLAP présente des complications propres dont la

principale, la perforation peropératoire des couches endothélio-descémétiques, peut nécessiter une conversion en KT.

C. Traitement physique - Crosslinking :

Le Cross-Linking du collagène cornéen a pour but de « rigidifier » une cornée bio mécaniquement instable pour stabiliser la maladie. Si le mécanisme d'action du Cross-Linking n'est pas complètement élucidé, le principe repose sur un « pontage » biochimique photo-induit des fibres de collagène par combinaison de riboflavine (vitamine B2) et d'UV-A ^{37 38}.

Plusieurs protocoles sont rapportés dans la littérature, actuellement le protocole conventionnel (épi-off) est le seul à avoir prouvé son efficacité et son innocuité ³⁹.

Les indications du Cross-Linking dans le kératocône évolutif diffèrent selon les auteurs. Il existe cependant deux exceptions où l'indication d'un Cross-Linking peut être posée dès la découverte d'un kératocône : chez l'enfant (<18 ans) et après LASIK.

Le traitement du deuxième œil sera en revanche décalé d'au moins trois mois afin d'être à distance d'éventuelles complications. Celles-ci vont du risque infectieux dû à la désépithélialisation peropératoire et à la pose d'une lentille pansement, jusqu'à des cas de nécrose cornéenne avec perforation. Les cas de « pseudo-haze » cicatriciel postopératoires sont fréquents, voire systématiques, et le plus souvent régressifs. Il n'est cependant pas rare d'observer des pertes de ligne d'acuité visuelle après Cross-Linking. Des infiltrats cornéens aseptiques ont également été rapportés. Il convient également de respecter une pachymétrie résiduelle après désépithélialisation (Epi-Off) de 400 µm pour limiter les risques potentiels de complications endothéliales notamment.

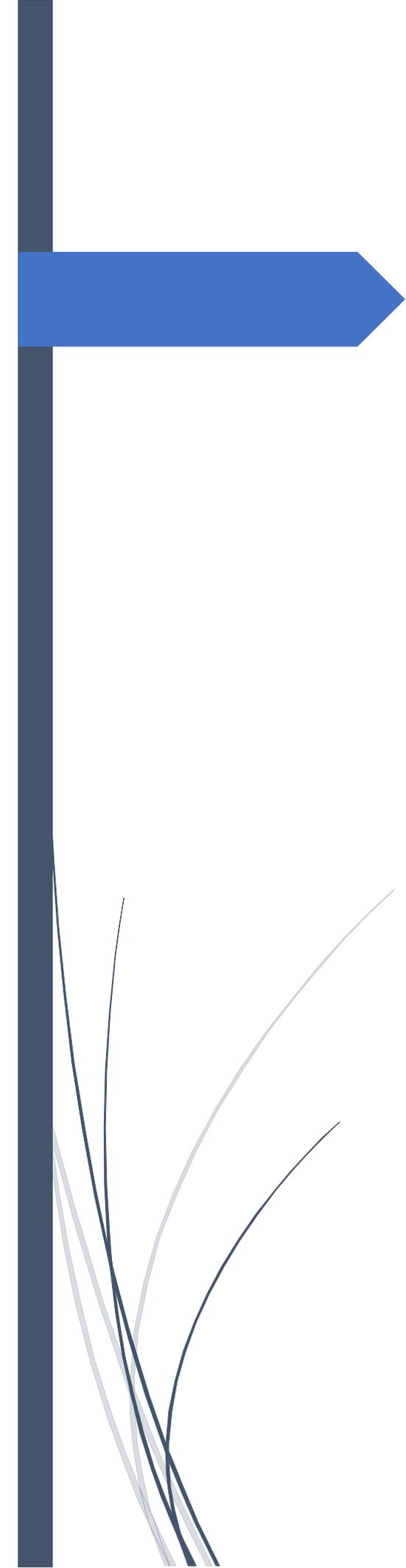
D. Indications :

La prise en charge du kératocône se fait au cas par cas et prend en compte de nombreux paramètres :

- Ophtalmologiques : acuité visuelle, confort binoculaire, transparence cornéenne, épaisseur cornéenne, stabilité ou progression du kératocône, myopie axiale associée, tolérance aux lentilles de contact.
- Généraux : atopie, pathologies générales associées, trisomie 21.
- Personnels : âge, activités professionnelles, activités de loisir, observance, attentes raisonnées et raisonnables du patient.

Etude topographique du kératocône fruste

L'objectif étant de stabiliser un kératocône évolutif, corriger au maximum par des moyens optiques avant d'envisager la solution chirurgicale la plus adapt e au patient, la greffe de cornée étant réalisée en dernier recours.



MATERIELS ET METHODES

A. Description de l'étude :

Il s'agit d'une étude rétrospective réalisée au service d'ophtalmologie du CHU HASSAN II de, hôpital Omar Idrissi, analysant une base de données topographique des 7 dernières années (de 2013 à 2020) à savoir 4358 examens de topographie Pentacam. On a recensé 1584 cas de kératocône et 30 cas de kératocône avéré dans 1 œil et fruste au niveau de l'œil adelphe.

L'objectif de notre étude est de comparer les yeux ayant un kératocône fruste au yeux normaux. Tous les sujets ont été évalués avec un système d'imagerie rotatif Scheimpflug (Pentacam), y compris l'analyse de la courbe antérieure, la kératométrie, pachymétrie et l'élévation.

Les yeux ayant un kératocône fruste n'avaient pas de signes topographiques pouvant rentrer dans le cadre de kératocône suspect ou avéré.

Les mesures prise en considérations sont :

Critères d'inclusion :

- Age > 18 ans
- Patients suivis pour kératocône avéré au niveau d'un œil, et fruste de l'œil adelphe sans critères pouvant le placer dans le stade 1 sur la classification de Krumeich
- Acquisition satisfaisante par le Pentacam

Critères d'exclusion :

- Age < 18 ans
- Les patients ayant bénéficié d'un Crosslinking
- Les patients ayant bénéficié d'une chirurgie photoablatrice
- Patients dont les acquisitions ne sont pas satisfaisantes

B. L'étude statistique :

Les données ont été saisies et gérées à l'aide de Microsoft Office Excel 2010. L'analyse statistique des différents paramètres étudiés a été effectuée à l'aide du logiciel SPSS version 19 (SPSS Inc., Chicago, IL, ETATS-UNIS). Les variables quantitatives ont été décrites en termes de moyenne plus écart type et les résultats ont été comparés avec le test Anova.

Une valeur P inférieure à 0,05 a été considérée comme statistiquement significative. L'étude statistique a été réalisée en collaboration avec le service d'épidémiologie du CHU Hassan II de Fès.

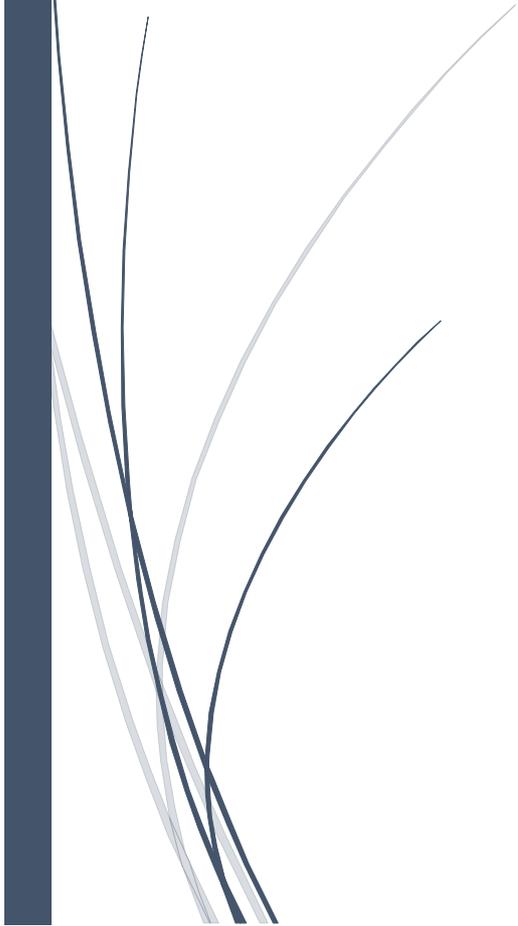
C. Fiche d'exploitation :

Etude topographique du kératocône fruste

Nom	
Age	
Sexe	
Œil	
Réfraction	
K1	
K2	
K moy	
K max	
Astigmatisme	
Axe	
Facteur Q	
Pachy apex	
Pachy min	
Indice de progression min	
Indice de progression moy	
Indice de progression max	
CTSP 2mm	
CTSP 4mm	
CTSP 6mm	
CTSP 8mm	
PTI 2mm	
PTI 4mm	
PTI 6mm	
PTI 8mm	
EA	
EA diff	
EP	
EP diff	
ISV	
IVA	
KI	
CKI	
IHA	
IHD	



RESULTATS



Etude topographique du kératocône fruste

Notre étude inclut 30 yeux ayant un kératocône fruste de 30 patients (groupe 1) et 26 yeux de 26 sujets normaux (groupe2).

A. L'âge :

La moyenne d'âge du groupe 1 était de 28.5 ans avec des extrêmes allant de 18 à 41 ans. La moyenne d'âge du groupe 2 était de 27.07 ans. Il n'y avait pas de différence significative entre les 2 groupes.

B. Sexe :

On a noté une légère prédominance masculine dans le groupe 1 avec un sexe ratio F/H : 0,75. Avec des résultats similaires dans le groupe témoin, sans différence significative entre les 2 groupes.

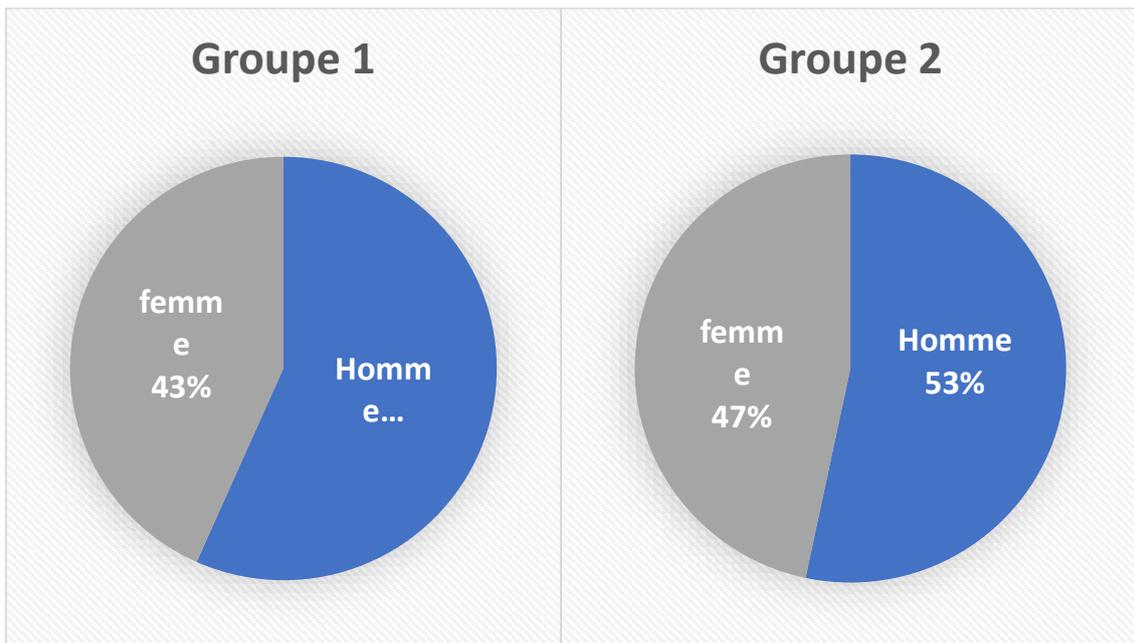


FIGURE 6 : Répartition des patients en fonction du sexe

C. Réfraction :

La moyenne des sphères du groupe 1 était de 1,05D. Tous les patients avaient un astigmatisme myopique avec une moyenne de 1,6 D à 67° d'axe. Il n'y avait pas de différence significative entre les 2 groupes.

D. Kératométrie plate : K1 :

La moyenne des mesures de la kératométrie la plus plate du groupe 1 est de $42,87 \pm 1,40$ D. Elle est de $41,24 \pm 0,86$ D dans le groupe 2. L'étude statistique montre une différence statistiquement significative entre les deux groupes avec $p=0,001$ ($p<0,05$).

E. Kératométrie cambrée : K2 :

La valeur moyenne de l'ensemble des mesures de la kératométrie cambrée du groupe 1 est de $44,50 \pm 1,25$ D. Elle est de $42,55 \pm 0,66$ D dans le groupe 2. L'étude statistique montre une différence statistiquement significative entre les deux groupes avec $p=0,001$ ($p<0,05$).

F. Kératométrie maximale : K max :

La moyenne des mesures de la kératométrie maximale du groupe 1 est de $45,22 \pm 1,28$ D. Elle est de $42,98 \pm 0,60$ D dans le groupe 2. L'étude statistique montre une différence statistiquement significative entre les deux groupes avec $p=0,001$ ($p<0,05$).

G. Kératométrie moyenne : K moy :

La moyenne des mesures des kératométries moyennes du groupe 1 est de $43,64 \pm 1,21$ D. Elle est de $41,87 \pm 0,60$ D dans le groupe 2. L'étude statistique montre une différence statistiquement significative entre les deux groupes avec $p=0,001$ ($p<0,05$).

H. Astigmatisme :

La valeur moyenne de l'astigmatisme du groupe 1 mesuré par le Pentacam, exprimé en valeur négative, est de $1,63 \pm 1,18$ D. La moyenne d'axe est de $64,70 \pm 67,98$ °. Dans le groupe 2, la moyenne est de $1,31 \pm 0,94$ D, La moyenne d'axe est de $56,48 \pm 60,35$ °. L'étude statistique ne montre pas de différence statistiquement significative entre les deux groupes avec $p=0,268$ ($p>0,05$).

I. Facteur Q :

La valeur moyenne du facteur Q dans le groupe 1, exprimé en valeur négative, est de $-0,38 \pm 0,11$. Dans le groupe 2, elle est de $-0,26 \pm 0,098$. Il existe une différence statistiquement significative entre les deux groupes avec $p=0,002$ ($p<0,05$).

J. Pachymétrie apex :

La moyenne des pachymétries de l'apex du groupe 1 est de $516,5 \pm 27,1$ μm . Elle est de $544,7 \pm 35,42$ μm dans le groupe 2. Il existe une différence statistiquement significative entre les deux groupes avec $p=0,001$ ($p<0,05$).

K. Pachymétrie minimale :

La moyenne des pachymétries de l'apex du groupe 1 est de $510,5 \pm 25,0$ μm . Elle est de $538,6 \pm 36,1$ μm dans le groupe 2. Il existe une différence statistiquement significative entre les deux groupes avec $p=0,001$ ($p<0,05$).

L. Élévation antérieure et postérieure :

La moyennes des élévations antérieures (BFS standard) du groupe 1 est de $3,63 \pm 1,88$ μm et de $2,50 \pm 2,19$ dans le groupe 2. L'étude statistique montre une différence statistiquement significative entre les deux groupes avec $p=0,002$ ($p<0,05$). La moyenne des élévations postérieures (BFS standard) du groupe 1 est de $7,86 \pm 5,02$ μm et de $5,19 \pm 3,26$ dans le groupe 2. Cependant, il n'y a pas de différence statistiquement significative entre les deux groupes avec $p=0,187$ ($p>0,05$).

Avec la nouvelle surface de référence (enhanced BFS), la moyenne des élévations antérieures du groupe 1 est de $4,13 \pm 1,43$ μm et de $2,69 \pm 1,66$ dans le groupe 2. Pour les élévations postérieures, la moyenne est de $6,43 \pm 3,63$ μm dans le groupe 1 et de $4,61 \pm 3,29$ μm dans le groupe 2. L'étude statistique montre une différence statistiquement significative entre les deux groupes avec $p=0,0001$ ($p<0,05$).

M. Indices de progressions :

Les moyennes des indices de progression du groupe 1 sont :

- Indice de progression minimal : $0,79 \pm 0,13$
- Indice de progression moyen : $1,14 \pm 0,16$
- Indice de progression maximal : $1,51 \pm 0,29$

Dans le groupe 2 :

- Indice de progression minimal : $0,67 \pm 0,15$
- Indice de progression moyen : $0,97 \pm 0,19$
- Indice de progression maximal : $1,74 \pm 0,31$

Il existe une différence statistiquement significative entre les deux groupes concernant tous les indices de progression, avec $p=0,001$ ($p<0,05$).

N. CTSP : Corneal Thickness Spatial Profile :

	Groupe 1		Groupe 2	
	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type
CTSP 2mm	518,50	28,99	547,15	35,78
CTSP 4mm	549,63	31,64	573,23	34,69
CTSP 6mm	601,86	37,39	619,57	33,82
CTSP 8mm	684,00	45,24	693,34	36,86

TABLEAU 2 : moyennes et écarts types du CTSP dans les 2 groupes

L'étude statistique montre une différence statistiquement significative entre les deux groupes concernant les 4, 6 et 8 mm, avec $p<0,05$.

O. PTI : Percentage Thickness Increase :

	Groupe 1		Groupe 2	
	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type
PTI 2mm	2,16	0,53	1,53	0,50
PTI 4mm	8,20	1,39	6,46	1,02
PTI 6mm	18,46	2,38	15,15	2,67
PTI 8mm	34,63	3,37	28,8	5,10

TABLEAU 3 : moyennes et écarts types du PTI dans les 2 groupes

L'étude statistique montre une différence statistiquement significative de tous les paramètres de PTI entre les deux groupes avec $p < 0,05$.

P. Indices kératoconique :

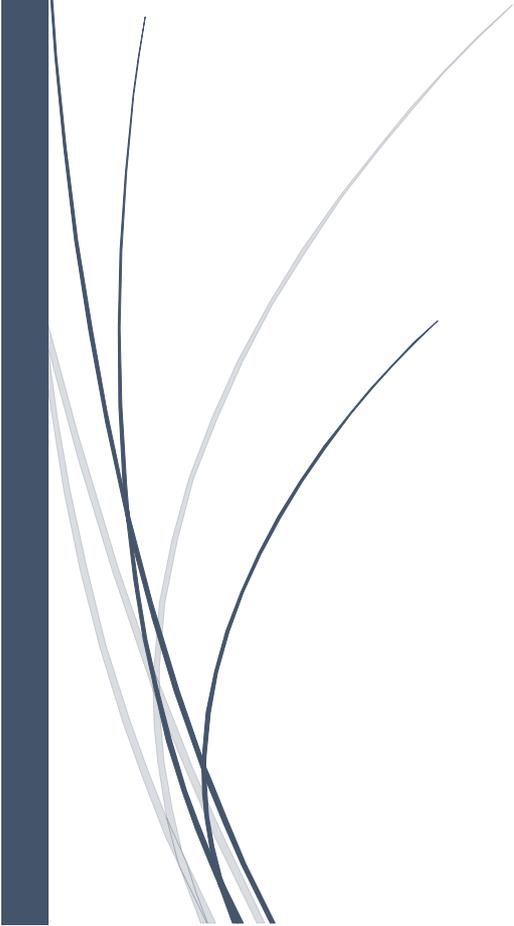
	Groupe 1		Groupe 2	
	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type
ISV	23,56	7,34	18,80	8,18
IVA	0,16	0,06	0,13	0,066
KI	1,04	0,023	1,01	0,018
CKI	1,00	0,007	1,0	0,005
IHA	7,10	4,53	4,75	3,67
IHD	0,015	0,007	0,012	0,006

TABLEAU 4 : Moyennes et écarts types des indices kératoconiques des 2 groupes

L'étude statistique des indices kératoconiques montre une différence statistiquement significative entre les deux groupes des paramètres suivants : ISV, IVA, CKI, IHA, IHD, avec $p < 0,05$. Cependant, il n'y a pas de corrélation statistiquement significative de l'indice KI entre les deux groupes, $p = 0,241$.



DISCUSSION



Etude topographique du kératocône fruste

Avec l'essor de la chirurgie réfractive, l'identification des patients à risque d'ectasie cornéenne post chirurgie réfractive est devenue une priorité. Il est admis que les cornées ayant des similitudes avec des cornées ectasiques (kératocône ou dégénérescence cornéenne marginale pellucide) présentent un risque plus élevé de complications ^{40 41}.

On définit le **kératocône fruste** comme une forme cliniquement silencieuse très précoce de kératocône pour laquelle l'analyse topographique spéculaire (Placido) est négative – les seuils fixés pour les indices permettant la détection positive d'une forme au moins suspecte de kératocône ne sont pas franchis.

	Cornée saine	Kératocône fruste	Kératocône suspect	Kératocône avéré
Signes cliniques ou biomicroscopiques	NON	NON	NON	OUI
Détection par topographie spéculaire	NON	NON	OUI	OUI
Détection par topographie d'élévation et pachymétrie	NON	OUI	OUI	OUI

TABLEAU 5 : Les formes de kératocône

Les formes infra cliniques (frustes) ont souvent une expression topographique mineure. Le dépistage du kératocône fruste est une priorité en chirurgie réfractive plus particulièrement. Rabinowitz et McDonnell ³⁷ ont été les premiers à proposer une méthode numérique de détection systématique du kératocône. Les indices de dépistages sont des marqueurs qui aident le clinicien à juger du risque d'être en présence d'un kératocône fruste.

1. Indices Qualitatifs de dépistage :

Les critères topographiques de dépistage du kératocône furent initialement proposés par Rabinowitz pour l'identification rapide d'une forme suspecte de kératocône. Ces aspects sont présentés sur la Figure 23 :

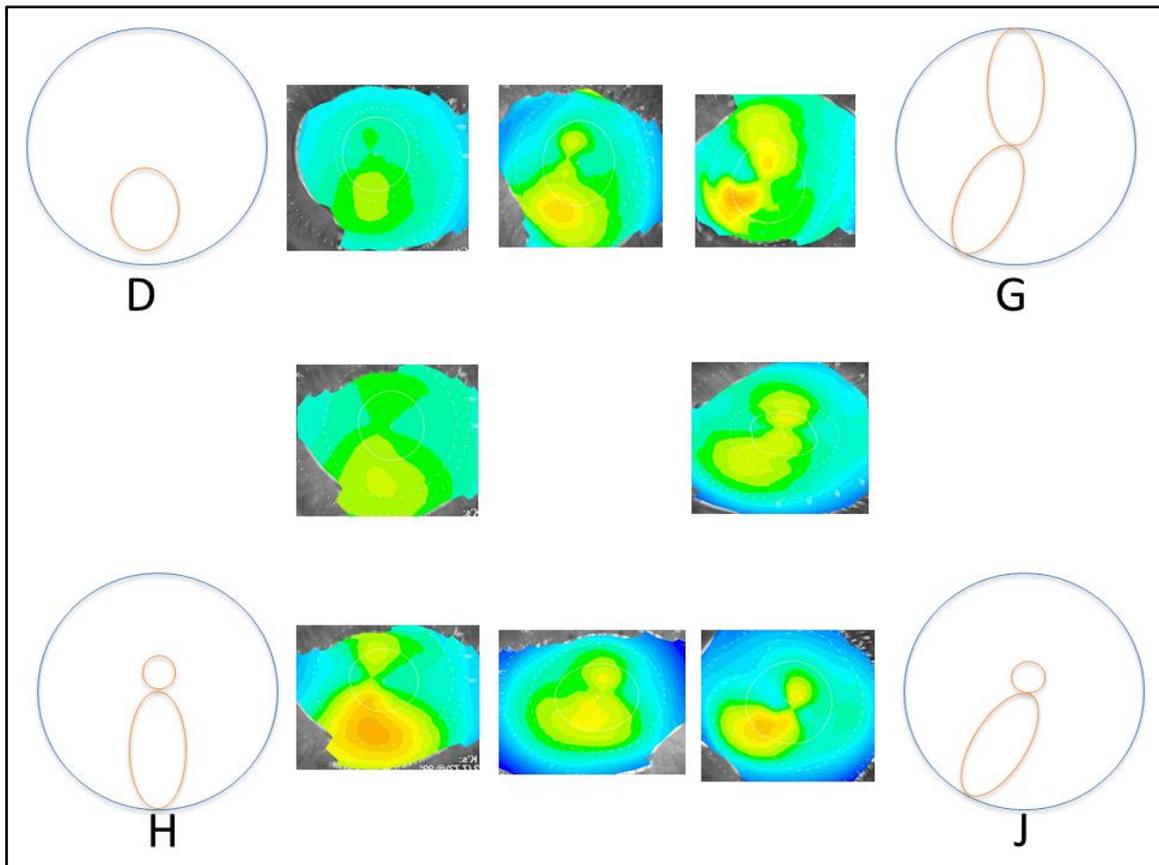


FIGURE 7 : Les formes les plus fréquemment retrouvées dans le kératocône (Gatinel)

L'existence d'un pattern AB/SRAX, associant un nœud papillon asymétrique (Asymmetric Bowtie : AB) et d'une angulation excessive des hémis méridien les plus cambrés (Skewed Radial Axes : SRAX) est fréquemment retrouvée (environ 80%) sur l'image de topographie en courbure de l'œil « sain » chez des patients atteints de kératocône « unilatéral ». Cet aspect représente un risque d'évolution vers une forme avérée supérieure à 50%.

A ces aspects topographiques, une valeur de **kératométrie centrale supérieure à 47.2D**, et/ou une **différence de kératométrie centrale supérieure à 1D entre les deux yeux** consistaient d'autres indices susceptibles d'évoquer la présence d'un kératocône fruste. Afin d'accroître leur spécificité (une proportion non négligeable de cornées indemnes de kératocône peut présenter un ou plusieurs de ces caractéristiques), d'autres éléments quantitatifs ont ensuite été proposé.

2. Indices Quantitatifs :

a) Indice I-S :

Cet indice est la différence entre la moyenne des valeurs kératométriques obtenues en différents points de l'hémicornee inférieure (I) et la moyenne des points correspondants de l'hémicornee supérieure (S). 5 mesures de kératométrie sur l'anneau des 3 mm centraux sont considérés, à l'intersection des méridiens 210, 240, 270, 300 et 330°. Le calcul de S est effectué selon le même principe avec les méridiens 30, 60, 90, 120 et 150°.

Une valeur seuil de **1.4D** pour l'indice I-S a été retenue comme celle permettant de trancher entre asymétrie « physiologique » et un kératocône infra clinique. Une valeur supérieure à 1.9D est couramment associée à une forme avérée de kératocône. Afin d'accroître la sensibilité de ce critère, il est recommandé de placer un des points utilisés pour le recueil des valeurs kératométriques sur l'hémi-méridien inférieur le plus cambré.

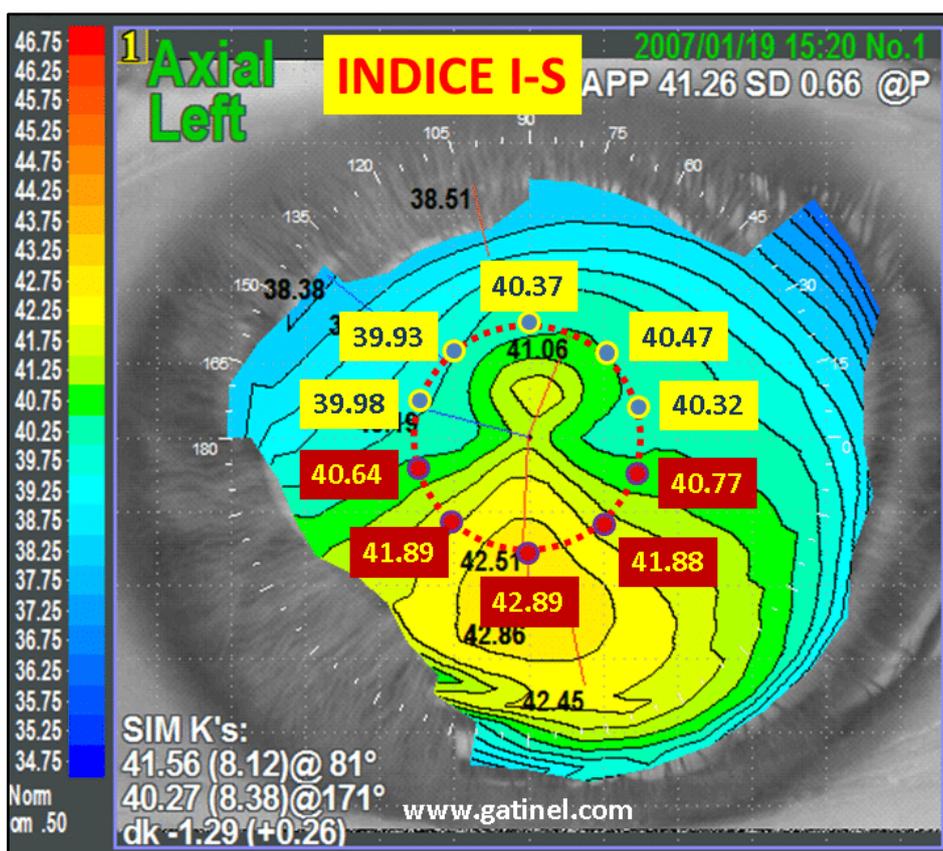


FIGURE 8 : Indice I-S (Gatinel)

Etude topographique du kératocône fruste

b) Indice KISA% :

Il a été développé par Rabinowitz et Rasheed. Il repose sur l'utilisation de la valeur exprimée en degrés de l'angulation des deux hémisphères les plus bombés (SRAX), ainsi que des valeurs de la kératométrie maximale ôtée de 47D, de l'astigmatisme kératométrique, et de la soustraction (I-S).

La formule permettant le calcul de l'indice composite KISA% est :

$$\text{KISA}\% = K \times (I-S) \times \text{Ast} \times \text{SRAX} \times 0.3$$

Avec : $K=1$ si la kératométrie maximale est inférieure à 47D, $(I-S) = 1$ si $(I-S) < 1$ et $\text{Ast} = 1$ si Astigmatisme ($\text{simK1} - \text{simK2}$) < 1 .

Selon Rabinowitz et Rasheed :

- $\text{KISA}\% < 60$: cornée normale.
- $60 < \text{KISA}\% < 100$: kératocône fruste.
- $\text{KISA}\% > 100$: kératocône.

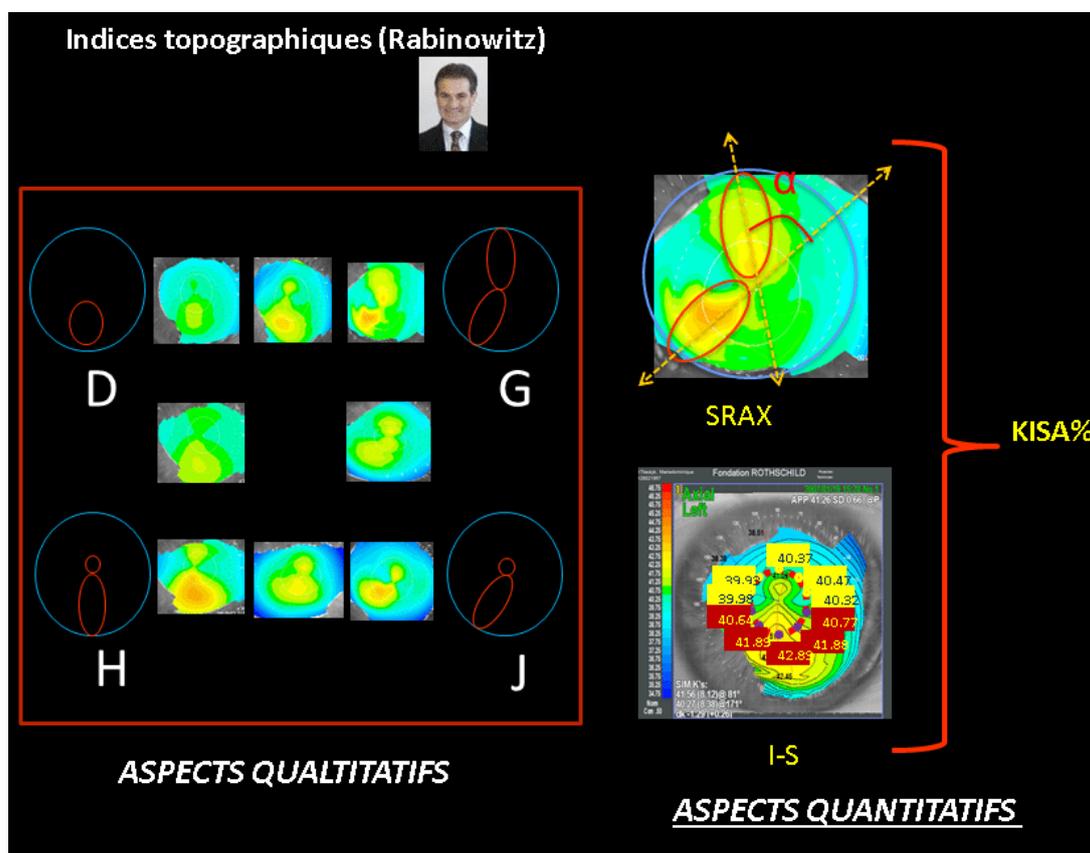


FIGURE 9 : Indices topographiques de Rabinowitz (Gatinel)

c) **Autres indices :**

- Indices liés au degré de toricité de la surface cornéenne : simK1/simK2, CYL
- Indices liés au degré de fluctuation de puissance kératométrique : CVP, SDP
- Indices liés au degré de l'asphéricité de la surface cornéenne : DSI, SRI, SRC, SAI, IAI, OSI, CSI, KPI

Le diagnostic du kératocône repose sur l'analyse de plusieurs paramètres : carte de pachymétrie cornéenne, carte d'élévations antérieures et postérieures, cartes de puissances et courbures antérieures et postérieures, les aberrations optiques cornéennes et aussi des indices topographiques sensible et spécifique pour la mise en évidence de cette pathologie.

A. Kératométrie :

Le calcul des puissances cornéennes revêt d'une importance cruciale dans le diagnostic du kératocône grâce aux cartes de courbure kératométriques qui fournissent des informations sur la courbure au niveau de chaque point de la surface cornéenne ⁴⁵. Ce calcul peut se faire soit en se basant sur une courbure sagittale ou tangentielle, ayant une des significations et des apports différents ⁴⁶.

Les yeux kératoconiques sont caractérisés par des modifications des courbures et de puissances cornéennes représentées essentiellement par le cambrement et la protrusion de la cornée et exprimées ainsi par des valeurs kératométriques très élevées ⁴⁷. Ces modifications intéressent non seulement la face antérieure mais aussi la face postérieure de la cornée qui n'est pas influencée par le film lacrymal comme la précédente ⁴⁵, d'où l'intérêt du Pentacam qui permet l'analyse des deux surfaces séparément.

Selon de nombreuses études statistiques, la moyenne des cambrures cornéennes est significativement plus élevée dans les cornées kératoconiques que dans les cornées normales ⁴³ ⁴⁴. En effet, c'est le même constat qui se dégage de notre étude, avec une différence statistiquement significative entre les deux groupes concernant tous les paramètres de kératométrie : plate, cambrée, moyenne et maximale. Cependant, les chiffres de kératométrie n'étaient pas assez élevés pour dépasser le seuil de suspicion de kératocône.

Une étude asiatique a comparé 116 yeux suspects de kératocône à 70 sujets candidats à une chirurgie réfractive à l'aide de l'Orbscan II. L'analyse statistique a montré que les valeurs de kératométrie étaient plus élevées chez le groupe de kératocône suspect par rapport au groupe de sujets témoins, avec la présence d'une différence statistiquement significative $p < 0.001$ ⁴³. Selon l'étude réalisée par Saad et Gatinel, la kératométrie moyenne n'est pas un bon indicateur pour différencier des cas de kératocône fruste des yeux normaux, les indices de pachymétrie et d'élévation seraient meilleurs pour la détection du kératocône fruste ⁴².

Concernant le diagnostic du kératocône basé sur la kératométrie antérieure, il y a une certaine controverse, des auteurs rapportent que c'est un paramètre important et d'autres rapportent le contraire ⁶³. En effet Toprak et al ⁶⁴ a constaté une grande capacité de la kératométrie maximale antérieure à détecter un kératocône (92,9% de sensibilité, 93,2% de spécificité), Tandis que Uçakhan et al ⁶⁵ a conclu à une faible sensibilité et spécificité (81,8% et 65,1% respectivement). Plusieurs facteurs peuvent expliquer cette contradiction en termes de kératométrie, notamment l'inclusion de cas de kératocône de sévérité différente dans les études évaluant la sensibilité et la spécificité de la kératométrie en matière de Kératocône.

L'analyse de l'astigmatisme cornéen des deux groupes de notre étude n'a pas montré de différence statistiquement significative, ce qui suggère que l'astigmatisme cornéen n'est pas bon indice de détection d'un kératocône infraclinique. Cependant, Piñero et al ⁶⁶ ont démontré que l'astigmatisme cornéen antérieur et postérieur pourrait être utile pour détecter le kératocône, avec des sensibilités jusqu'à 76% et des spécificités jusqu'à 80% pour les deux types d'astigmatisme.

B. Pachymétrie :

Les données d'épaisseur cornéenne ont été utilisées pour étudier les atteintes endothéliales cornéennes et fournissent des considérations cliniques dans le cadre de l'évaluation d'un glaucome. La pachymétrie est également essentielle pour poser l'indication de chirurgie réfractive.

Les cartes de pachymétrie cornéenne fournissent beaucoup d'informations supplémentaires qui n'étaient pas possibles avec la pachymétrie par ultrasons, avec une précision de 3 μm . Le Pentacam fournit une carte de pachymétrie, 2 graphiques qui représentent la progression de la pachymétrie du point le plus fin vers la périphérie (CTSP et PTI) et les indices pachymétriques.

Etude topographique du kératocône fruste

Les cartes de pachymétrie Scheimpflug identifient l'emplacement, la magnitude et la pachymétrie au niveau du point le plus fin de la cornée, au niveau de l'apex cornéen et la distance entre les 2 points ⁴⁸. Dans seulement 12% des cornées normales, la différence pachymétrique entre le point le plus fin et l'apex est supérieure à 10 μm ⁴⁸.

L'amincissement cornéen est l'une des principales caractéristiques du kératocône. En effet la mesure de la pachymétrie cornéenne est un élément primordial non seulement pour le diagnostic de cette pathologie, mais aussi pour sa stadification, le suivi de sa progression et sa prise en charge chirurgicale. Actuellement, une variété d'appareils (contact et non contact) permettant cette mesure dont le Pentacam et l'Orbscan sont les plus utilisés. Classiquement Le point cornéen le plus fin est généralement déporté à la pointe du cône qui le plus souvent retrouvée en position temporale et inférieure.

L'analyse des données de pachymétrie de l'apex et la pachymétrie minimale dans notre étude a montré une différence significative entre le groupe de kératocône fruste et les sujets témoins malgré une pachymétrie minimale supérieure à 500 μm chez les patients ayant un kératocône fruste. Cependant, ces deux paramètres - n'étant pas significativement diminués dans le kératocône précoce - ont une sensibilité plus faible quant à la détection d'une forme fruste. C'est le même constat d'une étude égyptienne publiée en 2017 ⁵¹.

Par ailleurs il apparaît absurde de se prononcer sur le diagnostic du kératocône juste en se basant sur la pachymétrie la plus fine, le Pentacam nous permet d'évaluer la progression de la pachymétrie du centre à la périphérie qui s'avère être un bon indicateur du kératocône. Les cornées peuvent avoir la même épaisseur cornéenne centrale mais partager des progressions pachymétriques radicalement différentes. D'où l'intérêt du PTI (Percentage Thickness Increase) et CTSP (Corneal Thickness Spatial Profile) ⁵². Ambrosio et al ⁵³ ont prouvé que le profil de CTSP et PTI était différent au niveau des yeux kératoconiques par rapport aux yeux normaux. Cette étude n'avait pas inclus des yeux de kératocône fruste.

Les patients atteints de kératocône ont des cornées plus minces et une augmentation plus rapide et plus brusque du CTSP et du PTI que les cornées normales. Les graphiques CTSP et PTI ont été conçus pour permettre l'identification rapide des formes très précoces d'ectasie, en augmentant la sensibilité et la spécificité pour le dépistage des candidats à la chirurgie réfractive ⁴⁹. Les cornées normales ont généralement un indice de progression moyenne inférieur à 1,2 et des courbes de CTSP et PTI dans les 95% de l'intervalle de confiance ⁵⁷. Cependant, il existe

un certain chevauchement entre les yeux normaux et kératoconiques. Environ 7% des yeux normaux ont un indice de progression moyen compris entre 1,2 et 1,8. L'hypothèse actuelle est que ces cas peuvent être plus susceptibles à développer une ectasie en cas de frottements oculaires intensifs ou après une chirurgie réfractive. De plus, 11% des cas de kératocône avéré ont un indice de progression moyen inférieur à 1,2 et peuvent avoir une courbe de CTSP et PTI dans les limites de la normale. Ces cas auraient un risque de progression de l'ectasie plus faible, et sous certaines conditions, peuvent bénéficier d'ablation de surface personnalisée ⁵⁷.

Une étude réalisée par Gatinel et alain ⁵⁴ sur les propriétés topographiques et tomographiques du kératocône fruste, comparant 72 yeux normaux à 40 yeux ayant un kératocône fruste, a montré que le PTI était supérieur dans ce dernier groupe par rapport au groupe de sujets normaux. Ceci concorde avec nos résultats.

Il existe peu d'études disponibles sur l'évaluation du PTI et CTSP à un stade infraclinique du kératocône. Notre analyse statistique a montré que les yeux normaux avaient des courbes plus homogènes du point le plus fin à la périphérie cornéenne par rapport aux yeux de kératocône. Ces résultats sont en accord avec l'étude de Saad et Gatinel ⁵⁵, qui a utilisé l'Orbscan II pour comparer les profils de pachymétrie cornéenne d'une cornée normale, forme fruste et forme avérée de kératocône. Leur résultats ont indiqué que les yeux normaux avaient des valeurs de pachymétrie plus élevées de 1 mm au niveau du point le plus fin par rapport à des formes frustes et avérées de kératocône.

Plusieurs écrits ont montré que le Pentacam sous-estime légèrement les pachymétrie centrale des yeux kératoconiques comparativement à la biométrie mode A, de plus cette sous-estimation devient plus marquée et statistiquement significative dans les kératocônes avancés. En revanche le Pentacam garde une bonne répétabilité et la reproductibilité des mesures ⁵⁶. La caméra rotative Scheimpflug semble convenir à la stadification et au suivi de la maladie, lorsque les mesures de l'épaisseur de la cornée peuvent être répétées au fil du temps par différents examinateurs.

Cependant la pachymétrie de l'OCT reste plus précise que celle des topographes actuels pour la mesure de la pachymétrie minimale (intérêt dans le cross-linking) et au niveau des 5-6 mm (pose d'anneaux intra cornéens). Dans le stade 2 de la classification OCT, l'épaississement épithélial peut masquer un amincissement stromal si on tient compte seulement de la pachymétrie totale. Une pachymétrie minimale de 400 μm peut correspondre, par exemple, à 60 μm d'épaisseur épithéliale et 340 μm d'épaisseur stromale ce qui constitue une contre-

indication à un cross-linking classique, alors qu'elle ne l'est pas si on ne tient compte que de la pachymétrie totale (topographie ou pachymétrie ultrasonore).

Dans une étude récente sur 36 patients ayant un kératocône fruste (yeux adelphe d'un kératocône avéré et ayant une topographie normale : indices négatifs d'Orbscan ($K \leq 47$ D et $I-S \leq 1,4$) et de Pentacam ($KI < 1,03$, $KCI < 1,07$), il a été montré qu'une localisation inférieure du point épithélial le plus fin ainsi qu'une épaisseur inférieure à $52 \mu\text{m}$ de ce dernier étaient suspectes de kératocône fruste. L'aspect en doughnut est également très évocateur de kératocône : amincissement épithélial localisé à l'apex entouré d'une couronne d'épithélium épaissi ⁵⁰.

C. Facteur Q :

L'irrégularité cornéenne centrale comme dans le cas de kératocône conduit à une augmentation de l'asphéricité cornéenne ⁵⁸. Les altérations de l'asphéricité cornéenne et l'augmentation des aberrations optiques ont un impact non seulement sur la qualité de la vision mais également sur la sensibilité au contraste et la vision nocturne ⁵⁹. L'asphéricité cornéenne, représentée par la valeur Q, change en fonction des propriétés géométriques des courbes asphériques. Son signe détermine la façon dont la courbure apicale varie vers la périphérie. Le Facteur Q est négatif dans les asphéricités de type prolata et positif dans les asphéricités de type oblate ⁶⁰.

La valeur normale du facteur Q varie de -0,42 à -0,03 chez les jeunes adultes normaux, dans un diamètre de 8 mm ⁶¹. Il varie en fonction du stade de sévérité du kératocône, allant de -0,35 dans une forme précoce à -1,70 dans une forme sévère.

Une cornée avec un cône décentré a un facteur Q moins négatif et une myopie moins importante, tandis qu'un cône centré aura un facteur Q plus négatif plus et une myopie plus sévère ⁶². Cependant, si l'asphéricité est mesurée dans la région centrale (4–5 mm), et si la protrusion est située en périphérie, le topographe peut fournir des valeurs d'asphéricité normales ou même positives. Par conséquent, cet indice quantitatif n'est pas très spécifique pour le diagnostic du kératocône, et doit être considéré en fonction de la position de l'apex cornéen par rapport au cône.

Il n'existe pas d'études disponibles sur l'évaluation du coefficient d'asphéricité (Facteur Q) à un stade infraclinique du kératocône. Notre analyse statistique a montré que les yeux normaux avaient un facteur Q moins négatif (cornées moins prolates) par rapport aux yeux de kératocône.

D. Elévation antérieure et postérieure :

L'étude de l'élévation cornéenne par le Pentacam est représentée sous forme de carte d'élévation antérieure et postérieure, qui sont obtenues en comparant la reconstruction de la surface cornéenne antérieure ou postérieure à la surface de références (sphérique, torique ellipsoïde) ⁶⁷. La dimension typique de la surface de référence est d'environ 8 mm de diamètre, de sorte que les scénarios susceptibles d'influencer le processus d'acquisition des données, tels que les ombres générées par les cils, sont évités ⁶⁸. Les données sont présentées quantitativement en μm , elles sont donc très précises et ont une grande sensibilité aux petits changements de la morphologie cornéenne dans un kératocône évolutif ⁶⁹. Ces cartes fournissent, pour les deux surfaces cornéennes, l'élévation de l'apex cornéen, l'élévation du point d'épaisseur minimale ⁷⁰.

La sensibilité de la mesure de l'élévation cornéenne dans le diagnostic du kératocône a été démontré par plusieurs études. Afin d'optimiser la sphère de référence (BFS), une nouvelle surface de référence (enhanced BFS) a été développée, basée sur la cornée propre du patient après avoir exclu une zone optique de 4 mm centrée sur la partie la plus fine de la cornée. Cela aplatit la surface de référence globale et augmente la différence d'élévation de la région ectatique, permettant ainsi d'identifier facilement un kératocône ⁷¹. Dans une cornée normale, cette différence est relativement mineure. La différence entre l'élévation en utilisant la BFS et l'EBFS se sont avérées hautement prédictives dans le dépistage des maladies ectatiques ⁷¹.

L'élévation cornéenne postérieure a été admise comme un indicateur précoce des pathologies ectatiques, et constitue un des paramètres les plus importants pour la détection des yeux kératoconiques, mieux que l'élévation cornéenne antérieure ⁷². En effet, un amincissement stromal localisé peut être comblé par un épaissement de l'épithélium cornéen, de ce fait il y aura des modifications minimales ou inexistantes sur la surface cornéenne antérieure qui peuvent passer inaperçus. Néanmoins, dans notre étude, la mesure de l'élévation cornéenne antérieure dans le groupe de kératocône fruste et la comparaison des résultats avec celle de nos témoins, en utilisant la BFS standard et l'enhanced BFS a montré une différence statistiquement significative.

L'élévation postérieure est l'un des premiers signes d'une maladie ectatique ^{73 74}. En utilisant Pentacam, De Sanctis ⁷³ a trouvé que l'élévation postérieure a une forte sensibilité et spécificité quant au diagnostic du kératocône dans sa forme fruste et avérée. C'est le même

constat de l'étude réalisée par Uçakhan ⁷⁵, cependant, il a trouvé une valeur de l'aire sous la courbe relativement plus faible (0,78) pour distinguer le kératocône fruste des yeux normaux.

Plusieurs études antérieures ^{73 74 76} ont trouvé un meilleur seuil d'élévation postérieure entre 20,0 μm et 26,5 μm pour différencier les yeux de kératocône des yeux normaux, et entre 15,5 μm et 29,0 μm pour différencier une forme fruste des yeux normaux. Miháitz K a démontré que des valeurs supérieures à 15,5 μm de l'élévation postérieure à une sensibilité de 95,1 % et une spécificité de 94,3 % dans le diagnostic du kératocône ⁷⁶.

Dans une étude multinationale récente de 555 témoins normaux, Feng et al ⁷⁷ ont rapporté une moyenne des élévations postérieures, mesurée sur les points cornéens les plus fins, inférieure à la moyenne des élévations postérieures dans les yeux normaux rapportée dans des études antérieures comparant des formes frustes de kératocône à des yeux normaux ^{73 74 76}. La moyenne des élévations postérieures des témoins normaux dans notre étude (4,61 μm) était proche mais légèrement plus basse que celle rapportée par Feng et al ⁷⁷. Khachikian et Belin ⁷⁸ suggèrent que la mesure d'élévation postérieure prise comme valeur maximale au-dessus de la BFS dans les 5 mm centraux peut incorporer un astigmatisme dans le calcul de la moyenne d'élévation normale, qui peut être alors surestimée. D'autres études sont nécessaires pour évaluer la fiabilité et la répétabilité des mesures des élévations cornéennes.

Dans notre étude, l'élévation postérieure (en considérant une BFS standard) n'a pas été un paramètre sensible dans la détection du kératocône fruste. Ce résultat est en désaccord avec les rapports de Muftuoglu et Al ⁷⁹. Cela peut être dû au fait que la majeure partie de nos patients avaient un kératocône de sévérité minime à modéré, et que les yeux adelphe (les yeux inclus dans notre étude) avaient des changements minimes au stade précoce.

La différence d'élévation postérieure en considérant l'EBFS serait plus fiable que l'élévation postérieure ⁷⁹. Le fabricant (Oculus) affirme qu'une différence d'élévation postérieure supérieure à 20 μm suggère une maladie ectatique et qu'une différence entre 10 μm et 20 μm serait suspecte. Dans notre étude, nous avons constaté que la différence d'élévation postérieure était meilleure que l'élévation postérieure pour dépister une forme fruste de kératocône.

E. Indices kératoconiques :

Le Pentacam est très fiable par rapport au topographe Placido et à l'Orbscan dans la mesure des indices topométriques et pachymétriques en matière de kératocône ^{81 82}, parce que les mesures sont indépendantes de l'apex et de l'axe de la cornée ⁷³.

Les indices topométriques tels que : index of surface variance (ISV), index of vertical asymmetry (IVA), index of height asymmetry (IHA), index of height decentration (IHD), keratoconus index (KI), central keratoconus index (CKI) ont été développés pour établir une classification du kératocône ainsi que l'évaluation post opératoire de l'asymétrie cornéenne.

Comme indiqué dans les résultats de notre étude, tous les indices kératoconiques étaient statistiquement différents entre les yeux sains et les yeux atteints de kératocône. C'est conforme aux conclusions d'autres études ^{83 84}.

Hashemi ⁸⁰ a évalué les paramètres de Pentacam dans les formes frustes et avérées de kératocône. Il a constaté que l'évaluation simultanée de la valeur de l'IVA qui compare les rayons de courbure des héli méridiens verticaux, et de l'ISV qui est le rapport entre la courbure moyenne et la moyenne des courbures, peut aider à détecter des cas frustes, surtout si la courbure cornéenne semble être normale. Une évaluation cornéenne plus attentive est nécessaire si l'IVA et l'ISV sont supérieurs à 0,14 et 0,22 respectivement.

Les indices IVA, KI (Keratoconus Index, qui évalue la probabilité de présence d'un kératocône), IHD (Index Height Decentration, qui représente le décentrement du point le plus haut par rapport au centre de la cornée) ont montré la précision prédictive la plus élevée pour différencier les cas de kératocône fruste des cornées fines ⁸⁵. Leur pouvoir prédictif était plus élevé que d'autres paramètres tels que la kératométrie maximale, moyenne et la pachymétrie centrale à un stade précoce.

Dans une étude réalisée en 2019 évaluant l'intérêt des indices topométriques dans les kératocônes évolutifs ⁸⁶, Les indices ISV, IVA et IHD étaient significativement plus élevées dans le groupe de kératocône progressif que dans le groupe non progressif. De ces 3 indices, seul un taux de changement de la valeur de l'ISV supérieur à 2,11 sur une année indiquait une progression.

Plusieurs études ont également montré que parmi les indices topométriques, l'IVA a la capacité de discrimination la plus élevée ^{80 83}. La raison pour laquelle cet indice a la meilleure précision semble être en rapport avec la nature topographique de la cornée kératoconique et

Etude topographique du kératocône fruste

l'emplacement du cône. En d'autres termes, l'emplacement du cône dans le kératocône est généralement inférieur par rapport au centre cornéen et donc le déplacement se fait généralement dans le sens vertical. De ce fait, une asymétrie verticale de la surface cornéenne apparaît chez la plupart des patients atteints de kératocône ⁷³.



CONCLUSION

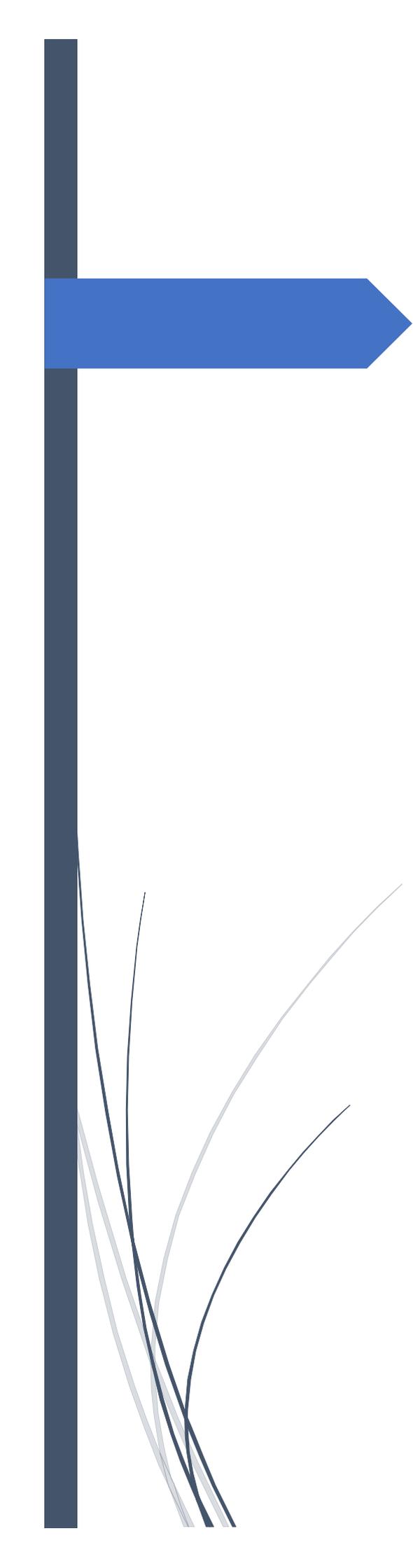


Etude topographique du kératocône fruste

Le kératocône est une affection asymétrique progressive qui va finir par se bilatéraliser même si l'atteinte est unilatérale initialement. Avec l'essor de la chirurgie réfractive, l'identification des formes frustes est devenue une priorité.

Le but de notre étude était de comparer la kératométrie, pachymétrie, élévation cornéenne et indices topographiques chez des yeux ayant un kératocône fruste et des yeux normaux. Les données de pachymétrie, d'élévation cornéenne postérieure (EBFS) et les indices kératoconiques (IVA et IVS essentiellement) sont les paramètres les plus importants permettant l'identification du kératocône fruste.

Les limites de notre étude incluent son caractère rétrospectif, le nombre limité de notre échantillon et des sujets témoins, et le fait que les conclusions reposaient uniquement sur des mesures effectuées à un moment donné.



REFERENCES

Etude topographique du kératocône fruste

1. Kennedy RH, Bourne WM, Dyer JA. A 48-year clinical and epidemiologic study of keratoconus. *Am J Ophthalmol.* 1986 Mar 15;101(3):267–73.
2. Wheeler J, Hauser M A, Afshari N A, Allingham R, Liu Y. The Genetics of Keratoconus: A Review.
3. Wang Y, Rabinowitz YS, Rotter JI, Yang H. Genetic epidemiological study of keratoconus: evidence for major gene determination. *Am J Med Genet.* 2000 Aug 28;93(5):403–9.
4. Davidson AE, Hayes S, Hardcastle AJ, Tuft SJ. The pathogenesis of keratoconus. *Eye Lond Engl.* 2014 Feb;28(2):189–95
5. Kenney MC, Brown DJ. The Cascade Hypothesis of Keratoconus. *Contact Lens Anterior Eye.* 2003 Sep 1;26(3):139–46.
6. McMonnies CW, Boneham GC. Keratoconus, allergy, itch, eye-rubbing and hand-dominance. *Clin Exp Optom.* nov 2003;86(6):376-84
7. Asymmetric keratoconus attributed to eye rubbing. - PubMed - NCBI
8. McMonnies CW. Abnormal rubbing and keratectasia. *Eye Contact Lens.* nov 2007;33(6 Pt 1):265-71
9. Kaya V, Karakaya M, Utine CA, Albayrak S, Oge OF, Yilmaz OF. Evaluation of the corneal topographic characteristics of keratoconus with orbscan II in patients with and without atopy. *Cornea.* sept 2007;26(8):945-8
10. Shneor E, Millodot M, Blumberg S, Ortenberg I, Behrman S, Gordon-Shaag A. Characteristics of 244 patients with keratoconus seen in an optometric contact lens practice. *Clin Exp Optom.* mars 2013;96(2):219-24
11. Lowell FC, Carroll JM. A study of the occurrence of atopic traits in patients with keratoconus. *J Allergy.* juill 1970;46(1):32-9
12. [Alain Saad](#)¹, [Yara Lteif](#), [Elodie Azan](#), [Damien Gatinel](#), PMID: 20042662
13. Cristina Kenney M, Brown DJ. The cascade hypothesis of keratoconus. *Contact Lens Anterior Eye J Br Contact Lens Assoc.* sept 2003;26(3):139-46
14. Newkirk KM, Chandler HL, Parent AE, Young DC, Colitz CMH, Wilkie DA, et al. Ultraviolet radiation-induced corneal degeneration in 129 mice. *Toxicol Pathol.* oct 2007;35(6):819-26
15. Chan E, Snibson GR. Current status of corneal collagen cross-linking for keratoconus: a review. *Clin Exp Optom.* mars 2013;96(2):155-64
16. Krachmer JH, Feder RS, Belin MW. Keratoconus and related noninflammatory corneal thinning disorders. *Surv Ophthalmol.* févr 1984;28(4):293-322
17. Olivares Jiménez JL, Guerrero Jurado JC, Bermudez Rodriguez FJ, Serrano Laborda D. Keratoconus: age of onset and natural history. *Optom Vis Sci Off Publ Am Acad Optom.* mars 1997;74(3):147-51
18. Arora R, Gupta D, Goyal JL, Jain P. Results of corneal collagen cross-linking in pediatric patients. *J Refract Surg Thorofare NJ* 1995. nov 2012;28(11):759-62.

Etude topographique du kératocône fruste

19. Zotta PG, Moschou KA, Diakonis VF, Kymionis GD, Almaliotis DD, Karamitsos AP, et al. Corneal collagen cross-linking for progressive keratoconus in pediatric patients: a feasibility study. *J Refract Surg Thorofare NJ* 1995. nov 2012;28(11):793-9
20. Ihalainen A. Clinical and epidemiological features of keratoconus genetic and external factors in the pathogenesis of the disease. *Acta Ophthalmol Suppl.* 1986;178:1-64
21. Kennedy RH, Bourne WM, Dyer JA. A 48-year clinical and epidemiologic study of keratoconus. *Am J Ophthalmol.* 1986 Mar 15;101(3):267-73.
22. Ota R, Fujiki K, Nakayasu K. [Estimation of patient visit rate and incidence of keratoconus in the 23 wards of Tokyo]. *Nippon Ganka Gakkai Zasshi.* 2002 Jun;106(6):365-72
23. Assiri AA, Yousuf BI, Quantock AJ, Murphy PJ. Incidence and severity of keratoconus in Asir province, Saudi Arabia. *Br J Ophthalmol.* 2005 Nov;89(11):1403-6.
24. Jonas JB, Nangia V, Matin A, Kulkarni M, Bhojwani K. Prevalence and associations of keratoconus in rural maharashtra in central India: the central India eye and medical study. *Am J Ophthalmol.* 2009 Nov;148(5):760-5.
25. Xu L, Wang YX, Guo Y, You QS, Jonas JB, Beijing Eye Study Group. Prevalence and associations of steep cornea/keratoconus in Greater Beijing. *The Beijing Eye Study. PloS One.* 2012;7(7):e39313.
26. enfant.pdf [Internet]. [cited 2016 Nov 9]. Available from: <http://www.santetunisie.rns.tn/fr/images/articles/enfant.pdf>
27. Salabert D, Cochener B, Mage F, Colin J. [Keratoconus and familial topographic corneal anomalies]. *J Fr Ophtalmol.* 1994;17(11):646-56.
28. Videokeratographic anomalies in familial keratoconus. - PubMed - NCBI
29. Fournié P, Touboul D, Arné J-L, Colin J, Malecaze F. Kératocône. </revues/01815512/v36i7/S0181551213002337>
30. Colin J, Malet FJ. Intacs for the correction of keratoconus: two-year follow-up. *J Cataract Refract Surg.* janv 2007;33(1):69-74
31. Ferrara G, Torquetti L, Ferrara P, Merayo-Llodes J. Intrastromal corneal ring segments: visual outcomes from a large case series. *Clin Experiment Ophthalmol.* juill 2012;40(5):433-9
32. Kanellopoulos AJ. Comparison of sequential vs same-day simultaneous collagen cross-linking and topography-guided PRK for treatment of keratoconus. *J Refract Surg Thorofare NJ* 1995. sept 2009;25(9):S812-818
33. tojanovic A, Zhang J, Chen X, Nitter TA, Chen S, Wang Q. Topography-guided transepithelial surface ablation followed by corneal collagen cross-linking performed in a single combined procedure for the treatment of keratoconus and pellucid marginal degeneration. *J Refract Surg Thorofare NJ* 1995. févr 2010;26(2):145-52

Etude topographique du kératocône fruste

34. Cheng YYY, Visser N, Schouten JS, Wijdh R-J, Pels E, van Cleynenbreugel H, et al. Endothelial cell loss and visual outcome of deep anterior lamellar keratoplasty versus penetrating keratoplasty: a randomized multicenter clinical trial. *Ophthalmology*. févr 2011;118(2):302-9.
35. Reinhart WJ, Musch DC, Jacobs DS, Lee WB, Kaufman SC, Shtein RM. Deep anterior lamellar keratoplasty as an alternative to penetrating keratoplasty a report by the american academy of ophthalmology. *Ophthalmology*. janv 2011;118(1):209-18.
36. Anwar M, Teichmann KD. Big-bubble technique to bare Descemet's membrane in anterior lamellar keratoplasty. *J Cataract Refract Surg*. mars 2002;28(3):398-403.
37. poerl E, Huhle M, Seiler T. Induction of cross-links in corneal tissue. *Exp Eye Res*. janv 1998;66(1):97-103.
38. Wollensak G, Spoerl E, Seiler T. Stress-strain measurements of human and porcine corneas after riboflavin-ultraviolet-A-induced cross-linking. *J Cataract Refract Surg*. sept 2003;29(9):1780-5.
39. Chan E, Snibson GR. Current status of corneal collagen cross-linking for keratoconus: a review. *Clin Exp Optom*. mars 2013;96(2):155-64
40. Binder PS. Analysis of ectasia after laser in situ keratomileusis: risk factors. *J Cataract Refract Surg*. 2007;33:1530–1538.
41. Randleman JB, Woodward M, Lynn MJ, Stulting RD. Risk assessment for ectasia after corneal refractive surgery. *Ophthalmology*. 2008;115:37–50.
42. Saad A, Lteif Y, Azan E, Gatinel D. Biomechanical properties of keratoconus suspect eyes. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 2010;51: 2912–2916
43. Lim L, Wei RH, Chan WK, Tan DT. Evaluation of keratoconus in Asians: role of Orbscan II and Tomey TMS-2 corneal topography. *Am J Ophthalmol*. 2007;143:390–400
44. Tanabe T, Tomidokoro A, Samejima T, et al. Corneal regular and irregular astigmatism assessed by Fourier analysis of videokeratography data in normal and pathologic eyes. *Ophthalmology*. 2004; 111:752–757.
45. Miháltz K, Kovács I, Takács A, Nagy ZZ. Evaluation of keratometric, pachymetric, and elevation parameters of keratoconic corneas with pentacam. *Cornea*. oct 2009;28(9):976-80.
46. Sonmez B, Doan M-P, Hamilton DR. Identification of scanning slit-beam topographic parameters important in distinguishing normal from keratoconic corneal morphologic features. *Am J Ophthalmol*. mars 2007;143(3):401-8.
47. McMahon TT, Edrington TB, Szczotka-Flynn L, Olafsson HE, Davis LJ, Schechtman KB, et al. Longitudinal changes in corneal curvature in keratoconus. *Cornea*. avr 2006;25(3):296-305
48. Scheimpflug imaging for keratoconus and ectatic disease. - PubMed - NCBI [Internet]. [cité 19 nov 2019].
49. Intrasubject corneal thickness asymmetry. - PubMed - NCBI [Internet]. [cité 19 nov 2019].
50. Otman Sandali, Vincent Borderie, Laurent Laroche, Comment diagnostiquer et évaluer un kératocône

Étude topographique du kératocône fruste

51. Awad et al. BMC Ophthalmology (2017) 17:186 DOI 10.1186/s12886-017-0584-2
52. Ambrósio R, Caiado ALC, Guerra FP, Louzada R, Sinha RA, Luz A, et al. Novel pachymetric parameters based on corneal tomography for diagnosing keratoconus. *J Refract Surg Thorofare NJ* 1995. 2011;27(10):753-8.
53. Ambrosio R Jr, Alonso RS, Luz A, Coca Velarde LG. Cornealthickness spatial profile and corneal-volume distribution: tomographic indices to detect keratoconus. *J Cataract Refract Surg*. 2006;32:1851–1859.
54. A. Saad, D. Gatinel, Topographic and Tomographic Properties of Forme Fruste Keratoconus Corneas February 11, 2010;
55. Saad A, Gatinel D (2010) Topographic and tomographic properties of forme fruste keratoconus corneas. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 51(11):5546–5555
56. De Sanctis U, Missolungi A, Mutani B, Richiardi L, Grignolo FM. Reproducibility and repeatability of central corneal thickness measurement in keratoconus using the rotating Scheimpflug camera and ultrasound pachymetry. *Am J Ophthalmol*. nov 2007;144(5):712-8
57. Michael W. Belin, Stephen S. Keratoconus / Ectasia Detection with the Oculus Pentacam: Belin / Ambrósio Enhanced Ectasia Display
58. Torquetti L, Ferrara P. Corneal Asphericity Changes after Implantation of Intrastromal Corneal Ring Segments in Keratoconus. *J Emmetropia* 2010;1:178–181
59. Queirós A, Villa-Collar C, Jorge J, et al. Multi-aspheric description of the myopic cornea after different refractive treatments and its correlation with corneal higher order aberrations. *J Optom* 2012;5:171–181.
60. Kiely PM, Smith G, Carney LG. The mean shape of the human cornea. *Opt Acta (Lond)* 1982;29:1027–1040
61. Yebra-Pimentel E, González-Jéijome JM, Cerviño A, et al. Corneal asphericity in a young adult population. Clinical implications. *Arch Soc Esp Oftalmol* 2004 Aug;79(8):385–39
62. Torquetti L, Ferrara G, Ferrara P. Correlation of anterior parameters in keratoconus patients. *Int J Kerat Ect Cor Dis* 2012;1:87–91
63. D.P. Piñero, J.C. Nieto, A. Lopez-Miguel, Characterization of corneal structure in keratoconus, *J. Cataract. Refract. Surg.* 38 (2012) 2167–2183.
64. Toprak I, Yaylalı V, Yildirim C. A combination of topographic and pachymetric parameters in keratoconus diagnosis. *Cont Lens Anterior Eye*. 2015 Oct;38(5):357-62.
65. O.O. Ucakhan, V. Cetinkor, M. Ozkan, A. Kanpolat, Evaluation of Scheimpflug imaging parameters in subclinical keratoconus, keratoconus, and normal eyes, *J. Cataract Refract. Surg.* 37 (2011) 1116–1124.
66. D.P. Pinero, J.L. Alio, A. Aleson, M. Escaf Vergara, M. Miranda. Corneal volume, pachymetry, and correlation of anterior and posterior corneal shape in subclinical and different stages of clinical keratoconus. *J. Cataract Refract. Surg.* 36 (2010) 814–825.

Etude topographique du kératocône fruste

67. Corneal topography in keratoconus: state of the art. - PubMed - NCBI [Internet]. [cité 19 nov 2019]. Disponible sur: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/26904709>
68. Hamano T. Lacrimal duct occlusion for the treatment of dry eye. *Semin Ophthalmol.* 2005;20(2):71–4.
69. Piñero DP, Nieto JC, Lopez-Miguel A. Characterization of corneal structure in keratoconus. *J Cataract Refract Surg.* 2012;38(12):2167–83.
70. Szczotka LB, Thomas J. Comparison of axial and instantaneous videokeratographic data in keratoconus and utility in contact lens curvature prediction. *CLAO J.* 1998;24(1):22–8.
71. Belin MW, Meyer JJ, Duncan JK et al. Assessing progression of keratoconus and cross-linking efficacy: the Belin ABCD progression display. *Int J Kerat Ect Cor Dis* 2017; 6: 1–10
72. Scheimpflug imaging for keratoconus and ectatic disease. - PubMed - NCBI [Internet]. [cité 19 nov 2019]. Disponible sur: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/23925323>
73. de Sanctis U, Loiacono C, Richiardi L, Turco D, Mutani B, Grignolo FM. Sensitivity and specificity of posterior elevation measured by Pentacam in discriminating keratoconus/subclinical keratoconus. *Ophthalmology* 2008; 115:1534–1539
74. Nilforoushan M-R, Speaker M, Marmor M, Abramson J, Tullo W, Morschauser D, Lasky R. Comparative evaluation of refractive surgery candidates with Placido topography, Orbscan II, Pentacam, and wavefront analysis. *J Cataract Refract Surg* 2008; 34:623–631
75. Uc, akhan EO, Cetinkor V, Ozkan M, Kanpolat A. Evaluation of Scheimpflug imaging parameters in subclinical keratoconus, keratoconus, and normal eyes. *J Cataract Refract Surg* 2011; 37:1116–1124
76. Mihaltz K, Kovacs I, Takacs A, Nagy ZZ. Evaluation of keratometric, pachymetric, and elevation parameters from keratoconic corneas with Pentacam. *Cornea* 2009; 28:976–980
77. Feng MT, Belin MW, Ambrósio R Jr, Grewal SPS, Yan W, Shaheen MS, Jordon CA, McGhee C, Maeda N, Neuhann TH, Dick HB, Steinmueller A. International values of corneal elevation in normal subjects by rotating Scheimpflug camera. *J Cataract Refract Surg* 2011; 37:1817–1821
78. Khachikian SS, Belin MW. Posterior elevation in keratoconus [letter]. *Ophthalmology* 2009; 116:816; reply by U de Sanctis, F Grignolo, 816–817
79. Muftuoglu O, Ayer O, Ozulken K, Ozyol E, Akinci A. Posterior corneal elevation and back difference corneal elevation in diagnosing forme fruste keratoconus in the fellow eyes of unilateral keratoconus patients. *J Cataract Refract Surg.* 2013;39:1348–57
80. Hashemi H, Beiranvand A, Yekta A, et al. Pentacam top indices for diagnosing subclinical and definite keratoconus. *J Curr Ophthalmol* 2016; 28: 21–26
81. Cairns G, McGhee CN. Orbscan computerized topography: Attributes, applications, and limitations. *J Cataract Refract Surg* 2005;31:205–220.
82. Kawana K, Miyata K, Tokunaga T, et al. Central corneal thickness measurements using Orbscan II scanning slit topography, noncontact specular microscopy, and ultrasonic pachymetry in eyes with keratoconus. *Cornea* 2005;24:967–971.

Étude topographique du kératocône fruste

83. Bae GH, Kim JR, Kim CH, et al. Corneal topographic and tomographic analysis of fellow eyes in unilateral keratoconus patients using Pentacam. *Am J Ophthalmol* 2014;157:103–109.e101.
84. Vázquez PRR, Galletti JD, Minguez N, et al. Pentacam Scheimpflug tomography findings in topographically normal patients and subclinical keratoconus cases. *Am J Ophthalmol* 2014;158:32–40.e32.
85. Huseynli, S., Salgado-Borges, J., & Alio, J. L. (2018). *Comparative evaluation of Scheimpflug tomography parameters between thin non-keratoconic, subclinical keratoconic, and mild keratoconic corneas. European Journal of Ophthalmology, 112067211876014.*
86. Kosekahya, P., Caglayan, M., Koc, M., Kiziltoprak, H., Tekin, K., & Atilgan, C. U. (2019). Longitudinal Evaluation of the Progression of Keratoconus Using a Novel Progression Display. *Eye & Contact Lens: Science & Clinical Practice, 45(5), 324–330.* doi:10.1097/icl.0000000000000582