

Institut des Sciences et Techniques Appliquées

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de Master Professionnelle

OPTOMETRIE

Présenté par

BOUKADJAR Rahma

BOUNEGAB Norelhouda

Thème

Comparaison de l'épaisseur épithéliale cornéenne chez les différents stades de kératocône.

Soutenu le 02 Juin 2025 devant le jury composé de :

Dr. D.GUARNAZI	Président
Dr. N.LARBI DAHO BACHIR	Examineur 1
Dr. D.OUZZANI	Encadreur
Pr. F.KAIL	Co-encadreur

Année universitaire 2024- 2025

Remercîment

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant qui nous a donné la force et la patience pour accomplir ce modeste travail.

Nous tenons tout particulièrement à remercier Dr M. Ouzzani notre encadrant qui nous a fait l'honneur de diriger ce mémoire. Nous témoignons notre profonde reconnaissance pour ça généreuse disponibilité, ses qualités pédagogiques, scientifiques et professionnelles, sans lui ce travail n'aurait jamais vu le jour.

Nous remercions également la clinique Hammou Boulélis de l'EHS Ophtalmologie à Oran, la clinique Ibn Al Haythem à Alger et tout le personnel avec qui nous avons travaillé durant ce stage, pour leur aide et leur assistance.

Nous adressons nos sincères remerciements à tous les ophtalmologues et les optométristes intervenants, qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé nos réflexions et ont accepté de nous rencontrer et de répondre à nos questions durant notre recherche.

On tient également à remercier nos familles et nos proches, pour leurs soutiens, encouragements et amour durant tous les moments difficiles, sans eux en n'aurait peut-être pas pu arriver ici. Un grand merci destiné aux enseignants qui nous ont assistés tout au long de ces années de formation au sein de l'université d'Oran 1 et l'institut des sciences et techniques appliquées.

Enfin, nous remercions du fond du cœur toutes les personnes qui nous ont soutenus tout au long de notre cursus universitaire. Mes vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Dédicace

À mes chers parents,

Pour leur amour, leurs sacrifices,

leur soutien constant et leurs prières silencieuses.

Votre confiance en moi a été ma force tout au long de ce parcours.

À mes frères et sœurs,

Pour leur tendresse, leur complicité, et leurs encouragements qui m'ont porté dans les moments de doute.

À ma famille,

Pour leur présence réconfortante et leurs encouragements.

À mes enseignants et encadrants,

Pour leur patience, leur bienveillance et leurs précieux conseils.

À mes amies fidèles

, Pour leur présence bienveillante, leur écoute et leur énergie positive tout au long de ce parcours.

À toutes celles et ceux qui, de près ou de loin, ont cru en moi et m'ont inspiré à persévérer... Je vous dédie ce mémoire avec toute ma reconnaissance et ma gratitude.

Rahma

Dédicace

*Je dédie ce modeste travail de fin d'étude à mes parents, pour leur soutien
inconditionnel, leur amour et leurs encouragements constants tout au long de mon
parcours.*

qu'un jour je pourrais leur rendre un peu de ce qu'ils ont fait pour moi.

*Je dédie aussi à mes frères et mes amis tous mes professeurs qui m'ont enseigné et eu
tous ceux qui me sont chers.*

Norelhouda.

Table des matières

Introduction générale :	6
Chapitre 01 :	7
Anatomie de la cornée.	7
Anatomie macroscopique :	7
Physiologie de la cornée :	8
Propriétés géométriques de la cornée :	10
Anatomie microscopique :	11
Chapitre 02 :	16
Le Kératocône.....	16
Définition :	16
Les symptômes du kératocône :	17
Facteurs de risques :	18
Diagnostic de kératocône :	20
Diagnostic différentiel :	27
Classification :	29
Prise en charge du kératocône :	34
Chapitre 03 :	39
Techniques de mesure de l'épaisseur épithéliale.....	39
Topographie cornéenne :	39
Principe de fonctionnement	40
Tomographie par Cohérence Optique :	48
Chapitre 04 :	53
Partie pratique.....	53
I.Introduction et problématique :	53
Méthodologie :	54
Résultat :	63
Discussion :	85
Conclusion :	88
Bibliographie :	89

Introduction générale :

Le kératocône est une ectasie cornéenne, progressive et non inflammatoire, caractérisée par un amincissement stromal associé à une déformation conique de la cornée. Cette pathologie, souvent bilatérale mais asymétrique, entraîne une dégradation progressive de la qualité visuelle, principalement en raison de l'induction d'un astigmatisme irrégulier et d'une myopie évolutive.

Le kératocône était, jusqu'à récemment, principalement diagnostiqué à des stades avancés en raison des anomalies topographiques évidentes de la cornée, l'évolution des technologies d'imagerie a permis une détection plus précoce, notamment par l'analyse fine des couches cornéennes, plus précisément l'épithélium.

L'épithélium cornéen, couche la plus superficielle de la cornée, joue un rôle fondamental dans l'homéostasie, la protection mécanique, et la régulation optique de la surface oculaire. Sa structure dynamique lui permet de s'adapter aux altérations du stroma sous-jacent. Dans les premiers stades du kératocône, des modifications spécifiques de l'épaisseur épithéliale peuvent être détectées, souvent avant l'apparition d'anomalies topographiques manifestes. Ces variations épithéliales représentent donc une clé pour le diagnostic précoce et le suivi de la maladie. Cette plasticité épithéliale, mise en évidence grâce aux progrès récents de l'imagerie cornéenne haute résolution, en particulier la tomographie par cohérence optique (OCT) du segment antérieur.

L'objectif de notre mémoire est d'analyser et de comparer l'épaisseur épithéliale cornéenne en fonction des différents stades du kératocône, afin d'évaluer la pertinence de ce paramètre comme outil diagnostique. Ce travail s'organise en quatre chapitres : Le premier est consacré à l'anatomie de la cornée, avec un focus sur l'épithélium. Le deuxième chapitre traite le kératocône, de sa physiopathologie à sa classification. Le troisième chapitre expose les différentes techniques d'imagerie permettant la mesure de l'épaisseur épithéliale utilisé dans cette étude.

Enfin, le dernier chapitre présente notre étude pratique, incluant l'analyse comparative de l'épaisseur épithéliale en fonction des stades de la maladie.

Chapitre 01 :

Anatomie de la cornée.

I. Anatomie macroscopique :

La cornée est le principal élément réfractif de l'œil. Elle est avasculaire, transparente et enchâssée dans l'orifice antérieur de la sclérotique. Son diamètre moyen est de 11,5mm, avec un diamètre horizontal de 11,7mm, plus important que le diamètre vertical qui est de 10,6 mm. Son épaisseur est de 0,5 mm au centre et de 0,8 à 1 mm en périphérie. En arrière, elle est à peu près circulaire et son diamètre est de 13mm dans toutes les directions. Ainsi la face postérieure étant plus étendue que l'antérieure, la périphérie est taillée en biseau au dépend de la face antérieure. Le diamètre varie selon les individus, le sexe et l'âge. Sa taille définitive est atteinte à l'âge de 6ans. L'épaisseur de la cornée augmente du centre (0,52mm en moyenne) vers la périphérie pour atteindre 0,7 mm au limbe. La cornée répond en avant au film lacrymal et aux paupières, en arrière à la chambre antérieure et en périphérie, elle répond au limbe cornéoscléral. [1] [2]

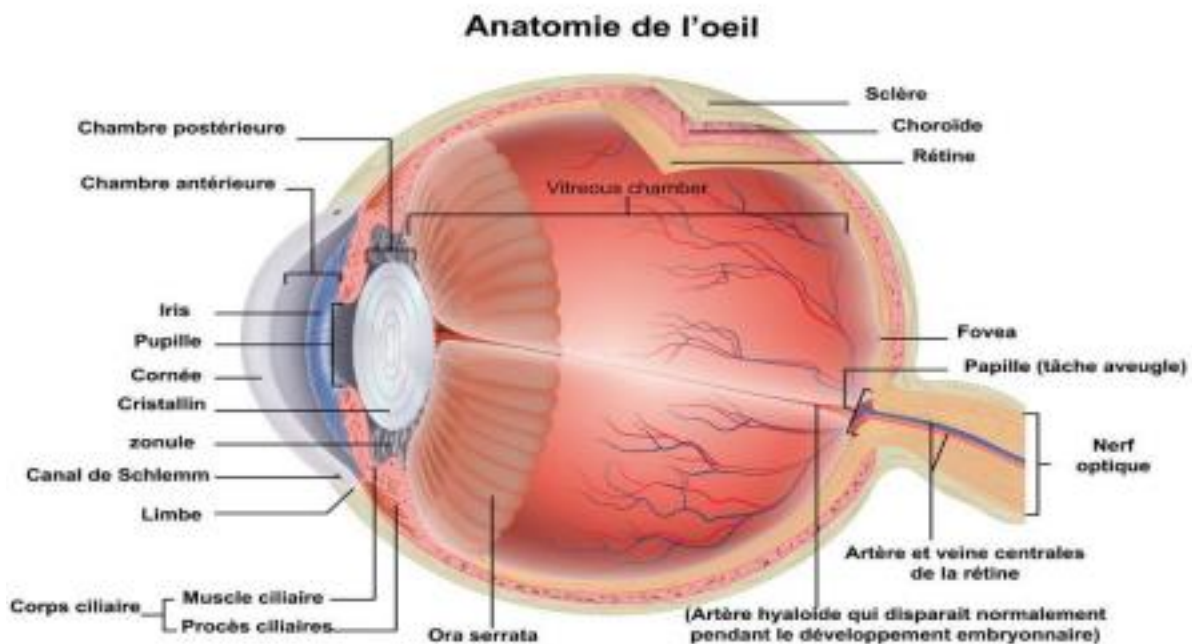


Figure 1: coupe sagittale schématisée de l'œil montrant les différents rapports de la cornée. [Julie-Marzocco]

II. Physiologie de la cornée :

I. Le rôle mécanique :

La cornée protège l'œil contre les agents extérieurs et intervient dans la résistance à la pression intraoculaire. 9

II. La fonction optique :

- Transmission de la lumière : La cornée transmet les radiations de longueur d'onde comprise entre 310nm (ultra-violet) et 2500nm (infra rouge). Cette transmission, à travers le stroma est due à l'uniformité du diamètre des fibrilles de collagène et de la distance inter-fibrillaire.

- Réfraction de la lumière : La cornée joue le rôle d'une lentille convergente qui forme l'élément principal du dioptré oculaire, sa puissance est fonction de : Des rayons de courbure qui sont en moyenne pour la face antérieure de 7,8mm en horizontal et de 7,7mm en vertical ; et pour la face postérieure, de 6,6mm. L'indice de réfraction qui est d'environ 1,376 L'interface antérieure air-cornée avec un pouvoir réfractif de 47D. L'interface postérieure avec un pouvoir réfractif de -5D. Le pouvoir réfractif total de la cornée est de 42D en moyenne (2/3 du pouvoir réfractif total de l'œil humain). [37]

III. La transparence cornéenne :

Les facteurs de transparence :

- Anatomiques :

- La régularité de la disposition des cellules épithéliales.
- La finesse et le parallélisme des fibres de collagène.
- L'absence de vaisseaux sanguins.

- Biochimiques : A l'état normal, la cornée maintient une hydratation constante et lutte contre l'imbibition

Anatomie microscopique :

La cornée est classiquement décrite en cinq couches, alors que son rôle réfractif impose d'inclure le film lacrymal dans sa structure normale qui s'agit d'un gel comprenant :

- Une couche muqueuse, profonde qui dépend des cellules caliciformes conjonctivales.
- Une couche intermédiaire aqueuse sous la dépendance des glandes lacrymales.
- Une couche superficielle réalisant un film lipidique permettant de retarder l'évaporation du film lacrymal, et qui est sécrétée par les glandes de Meibomius.

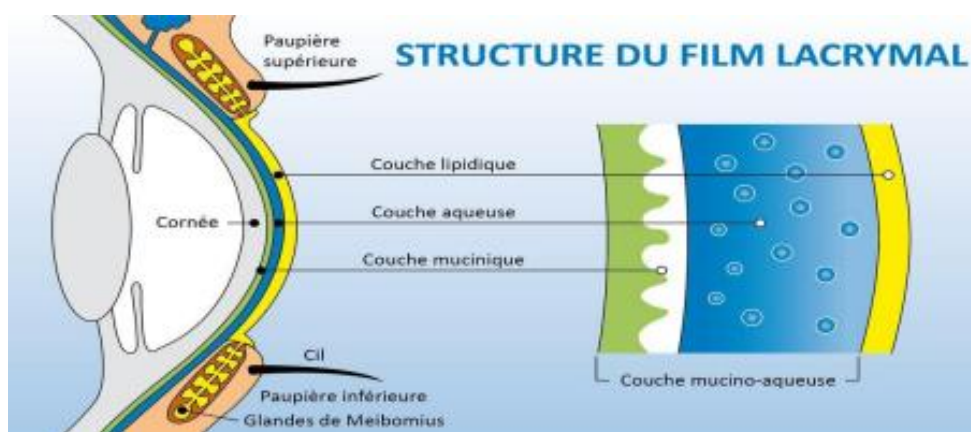


Figure 4 différentes couches du film lacrymal [Christoph Widmer]

Ensuit on a la cornée qu'est constituée de 5 couches de tissus de nature différente, qui doivent assurer des fonctions optiques de réfraction et de transparence, tout en satisfaisant aux exigences métaboliques des tissus vivants.

1) Epithélium cornéen :

L'épithélium cornéen est la couche cellulaire externe de la cornée (approximativement 10 % de l'épaisseur totale) [22] qui joue un rôle important en tant que première barrière de défense contre les infections oculaires. Il est au contact du film lacrymal, qui est la première interface rencontrée par la lumière incidente.

L'épithélium est stratifié (plusieurs couches de cellules empilées). Son épaisseur centrale est d'environ 50 microns ; cette épaisseur augmente vers les bords de la cornée. Les cellules épithéliales cornéennes sont jointives, afin d'éviter que l'eau des larmes (film lacrymal) ne pénètre au sein du stroma cornéen. Il est formé de 3 assises cellulaires :

- L'assise basale : Elle est monostratifiée à larges cellules polygonales reposant sur une membrane basale.
- L'assise intermédiaire : Elle est faite de cellules polyédriques « à ailes » formant de nombreuses jonctions entre elles. Elle est répartie en 2 à 3 couches au centre et 4 à 5 en périphérie.
- L'assise superficielle : Elle est constituée de 2 couches de cellules longues et fines à noyau aplati. L'épithélium est en renouvellement permanent, ce renouvellement est assuré par un contingent de cellules « souches », appelées cellules souches limbiques car situées à la jonction de la cornée et de la conjonctive.

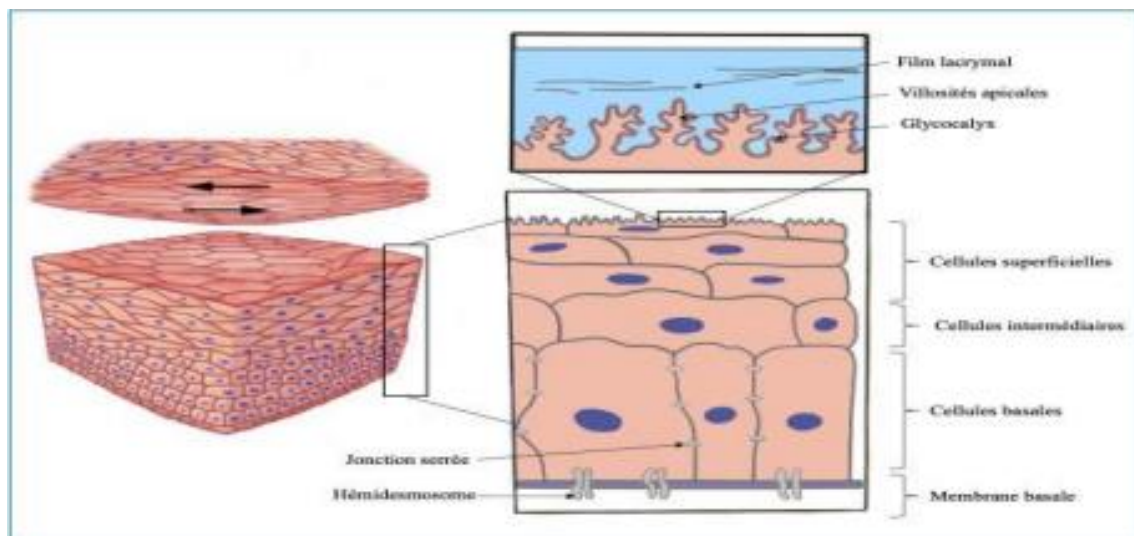


Figure 5: les couches cellulaires de l'épithélium cornéen. [Sciencedirect]

2) Couche de Bowman :

Cette couche élastique est première barrière contre les traumatismes et la pénétration de larmes. Elle possède une épaisseur de 8 à 14 microns. Elle est constituée de fibrilles collagènes entrelacées, au sein d'une matrice mucoprotéinique. Ces fibrilles ont un diamètre de 20 à 25 nm, sans orientation privilégiée. La couche de Bowman n'est pas une membrane individualisée, mais une zone de transition vers le stroma sous-jacent ; sa limite avec le stroma n'est pas clairement individualisable.

2) Le stroma :

Le stroma est la couche principale de la cornée, dont il occupe environ 90% de l'épaisseur. Il est composé de cellules (kératocytes) et d'une matrice extracellulaire qui contient de nombreuses macromolécules, dont l'arrangement harmonieux est le garant du maintien de la transparence du tissu cornéen.

3) La membrane de DESCOMET :

La Membrane de Descemet est une barrière postérieure empêchant la pénétration de l'humeur aqueuse. Elle correspond à la membrane basale de l'endothélium, qui est la couche cellulaire la plus profonde de la cornée. Elle est produite de manière continue au cours de l'existence, ce qui contribue à son épaissement au fil du temps. Chez l'enfant, son épaisseur n'est que de 5 microns, alors qu'elle peut atteindre 15 microns après 60 ans.

5) L'endothélium cornéen :

L'endothélium cornéen est une mono-couche de cellules jointives, de pourtour hexagonal, situées à la face postérieure (profonde) de la cornée. Noter la taille relativement homogène des cellules.

Les cellules endothéliales sont munies d'un système de pompe cellulaire qui permet de rejeter les molécules d'eau qui peuvent diffuser passivement dans la cornée vers l'humeur aqueuse ; ceci permet de contrôler l'état d'hydratation de la cornée, et donc sa transparence.

Chapitre 02 :

Le Kératocône.

I. Définition :

Le Kératocône est une maladie dégénérative progressive caractérisée par un amincissement et une protrusion localisée de la cornée, résultant en un astigmatisme irrégulier. L'atteinte est le plus souvent bilatérale et asymétrique. Elle apparaît généralement à la puberté et est susceptible d'évoluer vers l'aggravation de manière plus ou moins linéaire jusqu'à la 3ème décennie. Elle entraîne une baisse qualitative et quantitative de la vision du fait des aberrations optiques de bas et haut degrés générés par la déformation et la survenue possible d'opacités cornéennes. Cette dégradation de la vision aboutit à une diminution de la qualité de vie de ces patients. [23]



Figure 7: une cornée atteinte de kératocône. [Coss-ophtalmologie. Paris]

Les symptômes du kératocône : Les symptômes et signes oculaires du kératocône varient en fonction de :

Les symptômes les plus fréquents sont les suivants :

- une baisse brutale de l'acuité visuelle, avec douleur intense
- Éblouissement
- Photophobie
- Diplopie monoculaire
- Images fantômes
- Irritation oculaire (yeux larmoyants).

- Vision déformée (astigmatisme irrégulier).

Les personnes atteintes de kératocône doivent changer souvent de lunettes, car celles-ci deviennent vite impuissantes à corriger l'astigmatisme.

Dans les stades avancés, la cornée se déforme et s'amincit tellement que des cicatrices apparaissent et l'opacifient, rendant la vision d'autant plus trouble. Mais comme l'évolution peut s'arrêter à tout moment, beaucoup de patients atteints du kératocône n'atteignent pas un tel stade. [8, 17, 18]

Facteurs de risques :

Jusqu'à maintenant, on ne connaît pas encore la pathogénie exacte du kératocône, mais selon les recherches et les études, de nombreux facteurs ont été associés au kératocône parmi lesquels :

1) Facteurs mécaniques :

Il repose sur la fréquence qui semble accrue de façon significative du kératocône dans les cas où la cornée subirait des agressions mécaniques.

• **Frottement oculaire :**

Le frottement oculaire est souvent rapporté dans le KC et doit être évité. Les antécédents de frottement oculaire sont fréquemment signalés dans la littérature avec une prévalence évaluée entre 66 et 73 %. [29]

• **Port de lentilles de contact : (corneal warpage)**

Le corneal warpage ou syndrome de déformation cornéenne induite par les lentilles est une modification de la forme de la cornée secondaire à la pression exercée par une lentille surtout rigide, plus rarement souple. L'aspect vidéo-topographique est proche de celui d'un kératocône. La diminution ou disparition de l'anomalie topographique en trois à quatre semaines confirme le diagnostic. [27]

• **Position de sommeil : Floppy eyelid syndrome :**

Ce syndrome d'éversion palpébrale se voit chez les patients qui dorment la tête dans l'oreiller et les patients obèses, quand le corps est positionné sur le côté, ou sur le ventre, en appuyant avec la paume de la main au niveau des tempes ou des joues. Il s'agit d'une hyperlaxité tarsale de la paupière supérieure qui est éversée et recouverte de papilles conjonctivales. [28]

2) Facteurs généraux :

L'étude de la littérature médicale permet de retrouver des associations entre KC et certaines affections générales. Les associations les plus courantes sont :

• **La maladie allergique et/ou tropique :**

Elles regroupent l'asthme, l'eczéma, une conjonctivite allergique et/ou une rhinite printanière. Se retrouvent chez de nombreux patients avec une prévalence de 35% contre 10% dans la population générale.

• **Syndrome de Down :**

Dans la trisomie 21, il existe une très forte association avec le KC, l'incidence est estimée entre 0,5 et 15%, soit 10 à 300 fois celle observée dans la population générale. Cette association a été rapportée à une liaison du KC avec le chromosome 21 ou à des facteurs environnementaux comme le frottement oculaire qui est souvent noté chez ces patients. [30]

• **Les troubles du tissu conjonctif :**

Le kératocône serait plus fréquemment rencontré au cours de certaines maladies du tissu conjonctif comme le syndrome de Marfan, Ehlers- Danlos, prolapsus de la valve mitrale...etc. Une des anomalies du métabolisme du tissu cornéen (collagène ou protéoglycanes) est peut être en cause. [30]

• **Les hormones :**

Le début de kératocône est à la puberté, ce qui soulève l'hypothèse que certaines hormones ou un dérèglement du système endocrinien soient en cause. Cette hypothèse est actuellement reste non démontré. [31]

• **L'hérédité :**

La majorité des cas de KC sont sporadiques, mais 6 à 23% des patients atteints ont une histoire familiale de KC, avec une transmission de profil plutôt autosomique dominant [7]. 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. Les chercheurs ont évalué le risque d'atteinte pour la descendance à moins de 10 % lorsque l'un des deux parents est porteur d'un kératocône. [31]

Diagnostic de kératocône :

Le dépistage de KC se fera au cours d'un examen ophtalmologique complet pour rechercher les trois typiques de la maladie :

- l'astigmatisme cornéen irrégulier.
- la protrusion excentrique de la cornée.
- La présence des opacités cornéennes au sommet du cône.

. Interrogatoire :

Il s'agit de la première partie de l'examen permettant de mettre en évidence des facteurs de risques du KC (frottements, allergies, hérédité...etc) et de mieux orienter le diagnostic.

. Inspection et signes :

D'après cet examen on recherchera les signes directs de KC absents aux stades précoces de la maladie :

- Le signe de Munson : la protrusion cornéenne qui correspond à une déformation de la paupière inférieure par le cône lors du regard vers le bas.



Figure 8: le signe de Muson. [Signe-de-munson]

- Le signe de Rizzutti : c'est la focalisation des rayons lumineux près du limbe nasal lorsqu'un faisceau lumineux éclaire le côté temporal de l'œil. Dans une cornée normale, la focalisation se fait au-delà du limbe. Ce signe, non spécifique, peut s'observer en cas de fort astigmatisme.



Figure 9: le signe de Rizzutti. [societesmio.ma]

- L'effet de ciseau correspond à une distorsion du reflet rétinoscopie, apparaissant avec un centre sombre le séparant en 2 branches.
- L'hydrops correspond à un œdème stromal aigu majeur secondaire à une rupture Décimétrique et stromal postérieure sous l'effet de la contrainte exercée par la courbure cornéenne postérieure.
- Une sécheresse oculaire, une kératite, des signes d'allergie oculaire seront également recherchés car pouvant être à l'origine de frottements oculaires.

. Réfractomètre automatique :

Cet examen va permettre de donner des indices sur l'amétropie du patient bien que dans le cas du KC, les résultats ne soient pas souvent fiables.

Cet examen peut être difficile, voire impossible dans le cas de stades avancés.

. Acuité visuelle et réfraction :

Après cet examen on retrouve le plus souvent une myopie et un astigmatisme important. La réfraction peut être utilisée pour réaliser une analyse de la progression et aider au diagnostic du KC, chez les patients au stade infra- clinique.

. Examen à la lampe à fente :

Il ne permet pas le diagnostic précoce du kératocône, il permet en revanche la confirmation d'une saillie conique avérée et révèle plusieurs signes caractéristiques importants à rechercher :

- L'amincissement cornéen est visible notamment en utilisant une inclinaison de 30° de la fente. Celui-ci est maximum au sommet de la protrusion.
- Les stries de Vogt elles sont profondément situées dans le stroma cornéen postérieur, juste en avant de la membrane de Descemet et généralement alignées le long du méridien de plus grande courbure. Ce sont des lignes de contrainte verticales, obliques, fines, qui disparaissent lorsqu'on exerce une pression externe sur le globe.
- L'anneau de Fleischer est un anneau partiel ou complet de coloration brune, situé à la base du cône à la limite de la zone déformée et non déformée de la cornée, correspondant à un dépôt de ferritine à l'intérieur de l'épithélium cornéen, Il est mieux visible en lumière bleue et lorsque la pupille est dilatée.
- Les opacités (cicatrices) superficielles linéaires, présentes au sommet du cône. Elles ont un aspect réticulaire et correspondent à des zones de rupture de la membrane de Bowman comblées par du tissu cicatriciel.
- Une visibilité anormale des nerfs cornéens Cette visibilité est cependant inconstante et non spécifique. [12, 16]

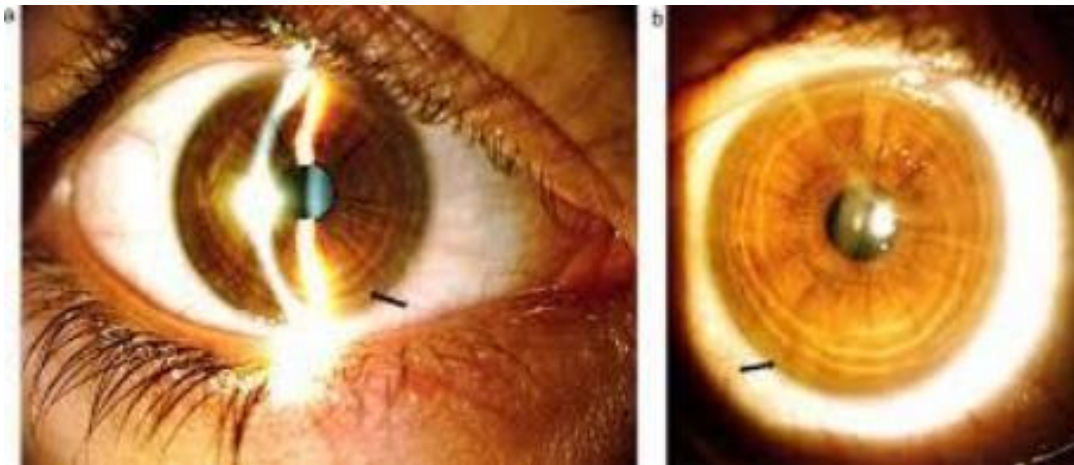


Figure 10 : l'anneau de Fleicher. [Aurelia Poujois]

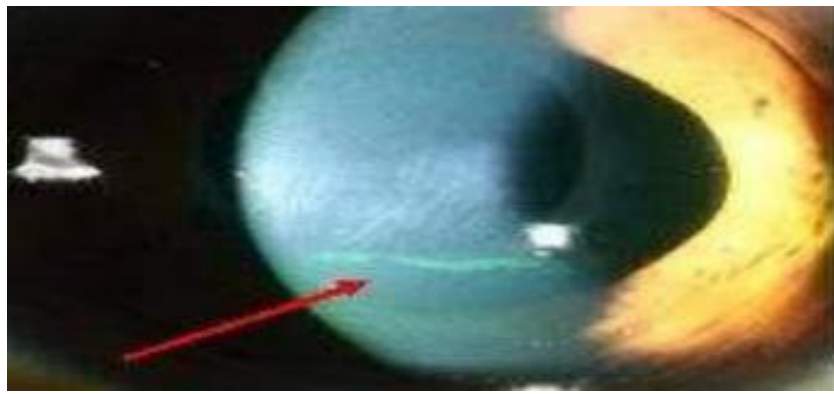


Figure 11: stries de Vogt. [Eye Roundes.org]



Figure 12 : les opacités (cicatrices) cornéennes. [. keratocone.net]

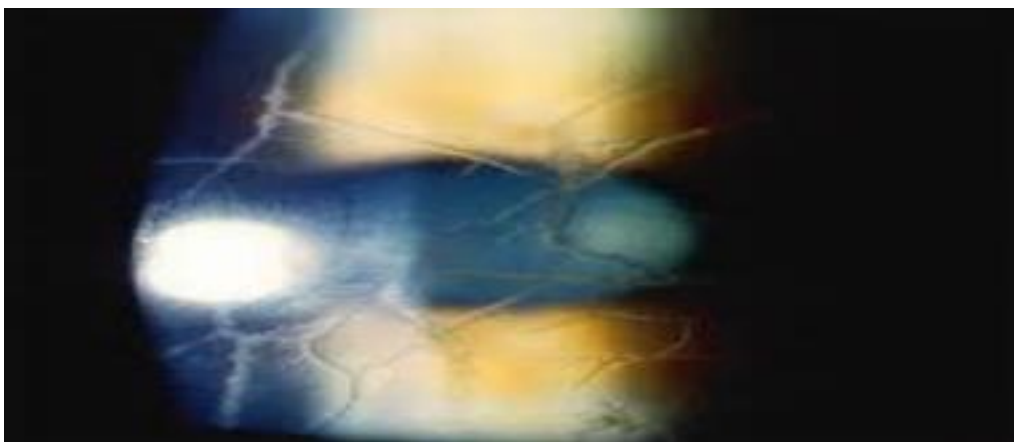


Figure 13 : une visibilité anormale des nerfs cornéens.

Examens complémentaires :

Analyse de la biomécanique cornéenne :

L'analyse biomécanique cornéenne est une évaluation des propriétés mécaniques de la cornée, c'est-à-dire sa rigidité, élasticité, viscosité et capacité à se déformer sous une force. Elle permet de mieux comprendre la résistance structurelle de la cornée et vise à l'évaluation préopératoire en chirurgie réfractive pour prévenir les complications post-opératoires telles que l'ectasie cornéenne, le suivi de traitements

comme le cross-linking cornéen, détecter précocement des affections telles que le kératocône.

Deux dispositifs principaux sont utilisés pour l'analyse biomécanique cornéenne :

Ocular Response Analyzer (ORA) : évalue la réponse de la cornée à une impulsion d'air, mesurant notamment :

Hystérésis cornéenne (CH) : reflète la capacité de la cornée à absorber et dissiper l'énergie. Facteur de résistance cornéenne (CRF) : indique la résistance globale de la cornée à la déformation.

Corvis ST (Oculus) : utilise une caméra Scheimpflug pour capturer en temps réel la déformation de la cornée en réponse à une impulsion d'air. Il fournit des mesures détaillées telles que :

Amplitude de déformation (DA) : mesure de la flexibilité cornéenne. [35,36]

Classification :

1) Classification fondée sur la kératométrie :

Elle permet une stadification du kératocône en fonction de la kératométrie moyenne.

Stade du kératocône	Kératométrie en dioptrie	Kératométrie en mm
Stade 1 (Kératocône débutant)	Km < 45D	Km > 7,50mm
Stade 2 (Kératocône modéré)	Km : 45 à 50 D	Km : 6,75 à 7,50 mm
Stade 3 (Kératocône évolué)	Km : 50 à 55 D	Km : 6,14 à 6,75 mm

Tableau 1 : classification fondée sur la kératométrie.

Ces valeurs peuvent légèrement varier selon les sources ou les appareils utilisés (ex. Orbscan, Pentacam, etc.), mais cette échelle est très largement utilisée. [23]

2) Classification Amsler-Krumeich (AK) :

La classification d'Amsler-Krumeich repose sur l'examen clinique, la réfraction et la pachymétrie. C'est la plus ancienne et la plus utilisée à ce jour. Elle ne prend en compte que les anomalies de la face antérieure, considère seulement l'épaisseur cornéenne à l'apex, et non au point le plus fin et ne prend pas en compte l'acuité visuelle. [23]

Stade	Caractéristiques
Stade 1	-Bombement cornéen excentrique -Myopie ou astigmatisme < 5 D. -Courbure > 47 D. -Stries de Vogt sans opacité
Stade 2	-5 D < Myopie ou astigmatisme < 8 D. -Courbure inférieur à 53 D. -Aucune opacité centrale -Pachymétrie 400 µm
Stade 3	-8 D < Myopie ou astigmatisme < 10 D. -Courbure > 53 D. -Aucune opacité centrale -Pachymétrie entre 200 et 400 µm
Stade 4	- Réfraction impossible à mesurer -Courbure > 55 D. -Cicatrices centrales -Pachymétrie < 200 µm

Tableau 2: classification d'Amsler-Krumeich.



Figure 19 : classification de Krumeich.

3) Classification de Belin (ABCD Grading System):

A = Anterior radius of curvature : Rayon de courbure moyen de la face antérieure, Sur une zone de 3 mm de diamètre centrée sur le point le plus fin.

B = Posterior radius of curvature (Back) : Rayon de courbure moyen de la face postérieure, sur une zone de 3 mm de diamètre centrée sur le point le plus fin.

C = Corneal pachymetry at thinnest : Épaisseur cornéenne au point le plus fin.

D = Distance best corrected vision : Meilleure acuité visuelle corrigée de loin. Elle est basée sur les données topographiques de la face antérieure et postérieure, la pachymétrie, la meilleure acuité visuelle corrigée, et la présence de cicatrice cornéenne. De plus, l'analyse est centrée sur le point le plus fin et non l'apex cornéen. Chaque item est gradé indépendamment en 5 stades de 0 à 4.

Scarring :

(-) = Absence de cicatrice cornéenne

(+) = Cicatrice laissant visibles les détails de l'iris

(++) = Cicatrice masquant les détails de l'iris. [34]

ABCD	A ARC (3mm zone)	B PRC (3mm zone)	C Thinnest pach (um)	D (BDVA)	Scarring

Stage 0	>7.25mm (<46.5D)	>5.90mm	>490um	$\geq 20/20$ (≥ 1.0)	-
Stage I	>7.05mm (<48.0D)	>5.70mm	>450um	<20/20 (<1.0)	-,+,++
Stage II	>6.35mm (<53.0D)	>5.15mm	>400um	<20/40 (<0.5)	-,+,++
Stage III	>6.15mm (<55.0D)	>4.95mm	>300um	<20/100 (<0.2)	-,+,++
Stage VI	>6.15mm (<55.0D)	>4.95mm	$\leq 300\text{um}$	<20/400 (<0.005)	-,+,++

Tableau 3: classification ABCD.

4) Classification fondée sur la pachymétrie :

Elle repose sur l'épaisseur du kératocône. La valeur moyenne de la centrale de pachymétrie optique dans les kératocônes retrouvés dans leur étude était $0,377\mu\text{m}$ en comparaison avec des cornées normales de $0,506\mu\text{m}$. Une différence de $0,085\mu\text{m}$ entre la zone de cornée la plus fine et une mesure prise à 35° de cette position est pour eux pathognomonique de diagnostic.

Il est possible de classer la sévérité des kératocônes selon l'épaisseur cornéenne. La différence entre l'épaisseur dans le quadrant supérieur par rapport à l'apex cornéen et dans le quadrant inférieur indique le degré de sévérité des cônes.

-Une valeur entre 75 et 100 micromètres désigne un suspect de kératocône ou un cône débutant. - entre 100 et 125 micromètres, un cône modéré et au-delà de 125 micromètres un cône avancé. [32]

32

4) Catégorisation morphologique (la forme de kératocône) :

Cette classification fait intervenir la morphologie du kératocône c'est à dire la forme du cône

- Ronde ou (nipple cône) : petit diamètre (5mm) le plus souvent centré.

- Ovale (ovale cône) : large diamètre le plus souvent en inféro-temporal qui ont plus souvent des valeurs dioptriques élevées et seraient le plus souvent responsables des hydrops.
- Globale : 75% de la surface cornéenne. [33]

Type de cône	Diamètre cône
Cône centré :	
Débutant	4,0 à 5,0 mm
Modéré	2,8 à 3,9 mm
Évolué	2,0 à 2,7 mm
Cône ovale :	
Débutant	2,0 à 4,0 mm
Modéré	4,2 à 5,0 mm
Évolué	5,2 à 7,0 mm
Cône globe	>7,0 mm
DPM :	
Débutant	5,0 à 7,0 mm
Évolué	7,2 à 9,0 mm

Tableau 4: relation entre le type de cône et le diamètre.

Kératocône infra-clinique : [8, 19, 20]

À la marge de ces classifications, est apparu le terme de « kératocône infraclinique ». Ce terme regroupe toutes les formes précoces de KC (formes dites « frustes », formes dites « suspectes »). En pratique, suspect ou fruste, le patient est asymptomatique avec un examen clinique cornéen normal, des anomalies vidéo-topographiques et un œil controlatéral atteint de KC avéré dans le KC fruste alors qu'il ne l'est pas dans le KC suspect.

Le mapping épithélial trouve tout son intérêt dans le dépistage des KC frustes.

Prise en charge du kératocône :

1) Traitements chirurgicaux :

- **Le Cross-linking du collagène cornéen (CXL) :**

Le terme de Cross-linking (CXL), qui signifie réticulation, est un terme scientifique utilisé pour désigner la formation de liaisons chimiques entre des protéines ou d'autres molécules suite à l'application de chaleur, d'une pression ou de radiations sur un tissu. . [21]

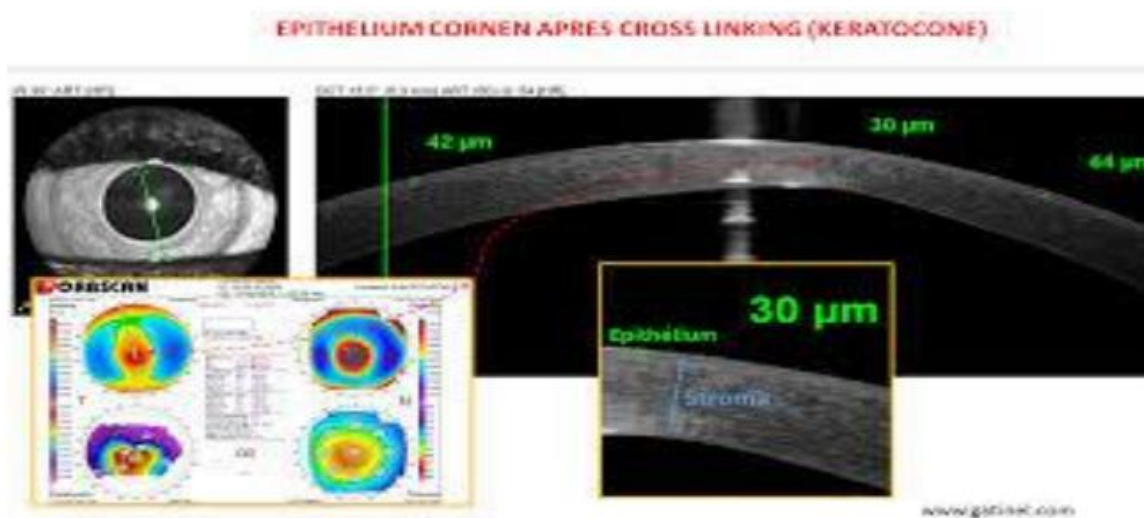


Figure 20 : l'épaisseur épithéliale cornéenne après cross lin King. [Damien Gatinal]

- **Anneaux intra-cornéens :**

Les anneaux intra-cornéens sont des petits segments semi-circulaires rigides en (PMMA). Ils ont pour but de modifier la géométrie cornéenne afin d'améliorer ses propriétés réfractives altérées par le KC.

Ils permettent une Cornéo-plastie intéressante chez les patients porteurs de kératocônes modérés avec amélioration de l'acuité visuelle dans 75% des cas. Les anneaux permettent un gain d'une à trois lignes d'acuité visuelle chez 70 à 80 % des patients, ce qui n'est pas négligeable pour une maladie oculaire.

Ils sont introduits dans l'épaisseur même de la cornée, en moyenne périphérie de la cornée. Le centre de la cornée est donc totalement préservé, leur épaisseur est environ égale à la moitié de l'épaisseur cornéenne normale. . [21]



Figure 21 : les anneaux intra-cornéens. [Clinique-yeux-tunisie]

- **Implants intraoculaires :**

Si la cornée centrale est claire et l'astigmatisme n'est pas trop irrégulier, il est possible de proposer un implant intraoculaire correcteur. Cet implant peut être torique pour corriger l'astigmatisme.

Il n'est pas incompatible avec la présence d'anneaux intra-cornéens insuffisamment efficaces. En cas d'intolérance ou d'inefficacité, il peut être retirés, ces implants sont encore rarement posés mais pourraient à l'avenir prendre une place plus codifiée dans la prise en charge de la maladie.

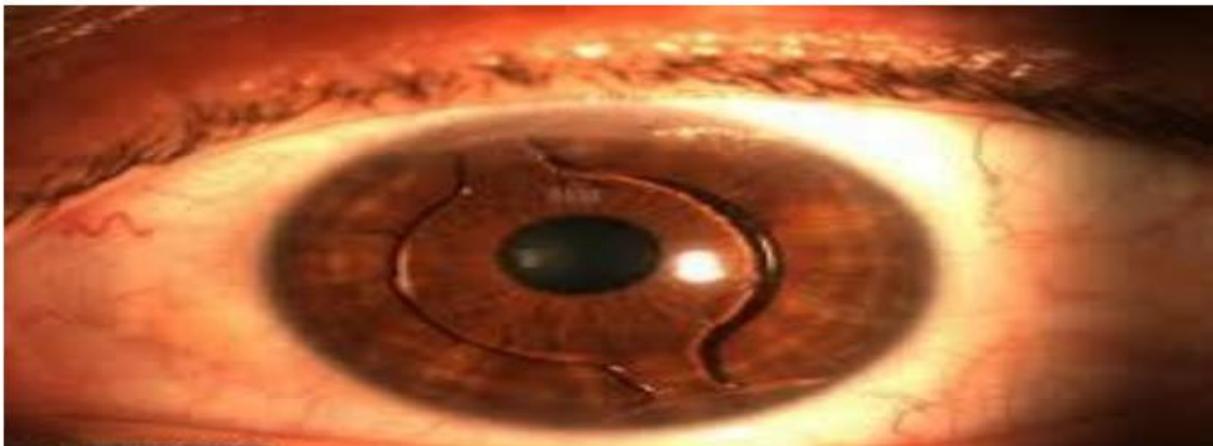


Figure 22 : un implant intraoculaire. [Ophtalmo-agera]

- **La Greffe de la cornée :**

C'est une solution de dernier recours, en cas de kératocône très avancé ou de non-stabilisation du kératocône et de l'échec de l'adaptation de lentilles semi-rigides du Cross-linking et de la possibilité de mise en place d'implants intraoculaires.

Son principe est simple, il s'agit d'échanger la partie centrale de la cornée malade par la même partie de la cornée saine d'un donneur décédé. la greffe de cornée est un geste chirurgical à présent bien maîtrisé.

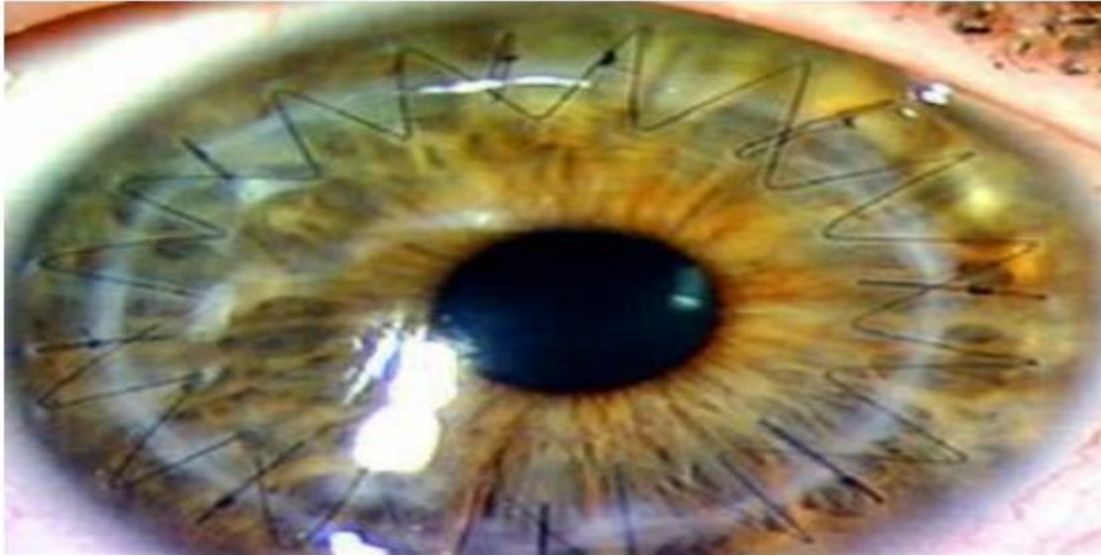


Figure 23 : Greffe cornéenne. [Marc-weiser.fr]

2) Correction optique :

• Les lunettes :

La correction par verres de lunettes est possible à un stade précoce, elles peuvent corriger l'astigmatisme et la myopie mais elles deviennent vite insuffisantes. De plus, elles sont souvent mal supportées, entraînant un inconfort qui force le malade à les retirer fréquemment.

Les lentilles de contact :

Les lentilles restent la clé de la réhabilitation visuelle des patients porteurs de kératocône. Leur adaptation est cependant plus difficile que lors d'une simple myopie. Les lentilles rigides.

Les lentilles jumelées ou piggy-back ou hybrides.

Les lentilles sclérales et mini-sclérales

Chapitre 03 :

Techniques de mesure de l'épaisseur épithéliale.

I. Topographie cornéenne :

L'analyse de la topographie de la cornée fournit des données sur sa courbure, sa régularité et son épaisseur, en utilisant la projection et l'examen du reflet d'un modèle lumineux qui éclaire ou balaie la cornée. Ces informations sont transposées graphiquement en cartes, qui sont ensuite analysées par le praticien. Cette méthode d'analyse offre la possibilité d'examiner minutieusement la structure de la cornée et d'évaluer l'impact de diverses maladies sur sa topographie. La topographie cornéenne complète, un examen essentiel avant toute intervention chirurgicale réfractive, s'ajoute utilement à l'évaluation préopératoire lors des opérations de la cataracte et du segment antérieur de l'œil. [38]

Il existe 2 méthodes d'analyse topographique :

- Topographie spéculaire (de courbure)
- Topographie d'élévation.

Topographie spéculaire :

Les premières cartes topographiques étaient des représentations de courbure, basées sur l'analyse informatisée du reflet d'un disque ou d'une coupole de Placido pour déterminer la courbure. Ce motif est formé d'une succession d'anneaux sombres et éclatants. On peut comparer la cornée à un miroir convexe, et sa courbure peut être déterminée en analysant l'image numérique produite par la réflexion de la lumière provenant du disque de Placido.

Le patient se concentre sur le centre de la coupole (le centre des anneaux). Les disques présentent des anneaux lumineux (qui correspondent aux anneaux blancs visibles sur l'image capturée). L'évaluation se concentre sur l'image cornéenne centrale (image de Purkinje I). Un algorithme mathématique est utilisé pour déterminer la courbure locale (des milliers de points) de la cornée en se basant sur le mouvement relatif des anneaux concentriques dans l'image. [5]

Topographie d'élévation :

Elle permet d'accéder à l'étude de la face postérieure de la cornée et fournit des informations sur l'épaisseur cornéenne (pachymétrie optique). Et recueillir des informations directement relatives à la morphologie spatiale, c'est-à-dire au relief de la surface cornéenne. D'examiner les changements dans la courbure de la cornée.

Elle effectue un balayage optique à l'aide de fentes lumineuses qui « scannent » la cornée, ce qui autorise une reconstruction tridimensionnelle du volume cornéen et l'observation des modifications du relief, tant antérieur que postérieur de la cornée. [5] [39]

Principe de fonctionnement :

Les données de la topographie d'élévation sont : les coordonnées spatiales de la surface analysée, et non celles de sa courbure locale. La cornée ressemble à un maillage dont les points possèdent une abscisse X, une ordonnée Y et une coordonnée d'élévation (Z) (cette dernière dépend de la surface de référence choisie). [5]

Topographie par camera rotative Scheimpflug (Pentacam) :

Les topographes Pentacam disposent d'un système de camera Scheimpflug pour l'étude de l'épaisseur et de l'élévation de la cornée. Ils sont également munis d'un disque de Placido (sauf le Pentacam). L'imagerie Scheimpflug rotative, dispose d'un design optique amélioré et d'une caméra haute résolution permettant l'acquisition de 100 images de fente en 2 secondes, avec 500 points d'élévation distincts. Une focalisation active de l'objectif à vitesse variable permet une fixation facile. [21]

Pachymétrie :

La pachymétrie consiste en l'évaluation de l'épaisseur de la cornée. L'épaisseur cornéenne centrale normale est située entre 520 et 580 μm . Dans une cornée normale, le point le plus fin est situé proche de l'apex et il existe un épaississement concentrique progressif et régulier vers la périphérie. Pour un kératocône évolué, il n'est pas rare de retrouver moins de 400 μm au centre. Le point d'amincissement le plus important ne se situe pas obligatoirement au centre de la cornée, il est en général déporté à la pointe du cône et la répartition de l'épaisseur cornéenne est modifiée. Une épaisseur cornéenne centrale normale n'élimine pas la présence d'un KC. [21]

Tomographie par Cohérence Optique :

Tomographie par Cohérence Optique est un procédé d'imagerie oculaire moderne, permettant d'obtenir en quelques secondes, et de manière non invasive, qui représente une avancée majeure dans le diagnostic et le suivi des maladies de l'œil. Cette technologie, par sa capacité à fournir des images en coupe de la rétine avec une précision microscopique, a révolutionné notre approche du soin oculaire. L'OCT permet de réaliser des diagnostics très précis de pathologies de la rétine, du nerf optique ou de la cornée, sans toucher l'œil ni l'irradier. C'est une méthode utilise des ondes lumineuses pour créer des images haute résolution, semblable à une

échographie utilisant le son, mais avec une bien meilleure résolution grâce à la lumière.[42]

Figure 33 Tomographie par Cohérence Optique. [Medical-deveyes]

Histoire de Tomographie par Cohérence Optique :

L'imagerie par tomographie de cohérence optique (OCT) s'est imposée comme une méthode standard en ophtalmologie, offrant des données rapides, exactes et non invasives sur la structure et le fonctionnement de l'œil. Un des avantages majeurs de l'OCT est sa capacité à offrir aux praticiens une image en coupe transversale d'une précision au niveau du micromètre. De ce fait, les praticiens peuvent tirer profit de l'OCT pour établir un diagnostic de la maladie, surveiller son évolution et examiner les réactions au traitement sur le long terme.

C'est en 1991 que Huang et ses collaborateurs ont développé et mis en œuvre pour la première fois l'OCT. Les premières images rétinienne in vivo ont été obtenues avec succès en 1993 (Huang D, Swanson EA, Lin CP, 1991). Par la suite, des initiatives ont été mises en œuvre pour .[43]

Développement de segment antérieur :

La tomographie par cohérence optique a été mise en œuvre sur la partie antérieure de l'œil en 1994 (Izatt JA, Hee MR, Swanson EA, 1994). Des paramètres comparables à ceux de l'OCT rétinienne ont été utilisés au départ. Toutefois, bien que des longueurs d'onde lumineuse plus courtes puissent offrir une imagerie optimale de la rétine, elles conduisaient aussi à une imagerie moins efficace des structures du segment antérieur, étant donné leur capacité limitée à traverser les tissus conjonctifs tels que la sclère.

Les scientifiques ont vite remarqué que des longueurs d'onde lumineuse plus étendues (1 300 nm) étaient plus appropriées pour l'imagerie de la partie antérieure de l'œil. L'utilisation de ces longueurs d'onde a favorisé une pénétration plus approfondie et une imagerie améliorée des tissus du segment antérieur tout en réduisant la quantité de lumière qui parvient au segment postérieur. Approuvés au cours du milieu des années 2000, l'OCT Zeiss Visante (Carl Zeiss Meditec) et l'OCT à lampe à fente (SL-OCT, Heidelberg Engineering) ont été les premiers dispositifs AS-OCT commercialisés. Ces dispositifs employaient la technologie TD-OCT et étaient ainsi sujets à des contraintes relatives à la résolution (allant de 18 à 25 μm) et aux rythmes d'A-scan (2000 par seconde avec l'OCT Visante et 200 par seconde avec le SL-OCT) (Ang M, Baskaran M, Werkmeister RM, 2018).

Le premier appareil de tomographie par cohérence optique spectrale (SS-OCT) dédié au segment antérieur a été introduit en 2008, sous le nom de (Casia SS OC, par la société Tomey). Ce dispositif propose un rythme A-scan largement supérieur (30 000 par seconde) et une résolution accrue (approximativement 10 μm) (Wieser W, Biedermann BR, Klein T, Eigenwillig CM, Huber R, 2010). [43]

Caractéristique de la tomographie par cohérence optique du segment antérieur :

L'AS-OCT permet d'imager l'ensemble du segment antérieur y compris la surface oculaire et la cornée L'AS-OCT offre une excellente méthode sans contact pour obtenir des informations cliniques objectives sur l'angle du segment antérieur, notamment à des fins de dépistage. Cependant, l'AS-OCT nécessite une cornée relativement claire pour obtenir une image précise de l'angle.

TD-OCT est la technologie originale utilisée en imagerie OCT. Il consiste déplacer un miroir de référence dans l'interféromètre pour mesurer le retard d'écho de la lumière.

SD-OCT utilise un spectromètre pour capturer le spectre de la lumière ayant interféré entre l'échantillon et les bras de référence, Vitesse d'imagerie bien plus rapide et meilleure.

SS-OCT utilise un laser accordable qui change rapidement (balaye) sa longueur d'onde au fil du temps. Le signal d'interférence est détecté à chaque longueur d'onde. [43] [44]

Rapport de tomographie par cohérence :

Utilise pour analyser l'épaisseur de la cornée et de l'épithélium et représente par :

- Montre l'œil vu de face avec une ligne scan en vert et une coupe transversale de la cornée
 - Un graphique de l'épaisseur de la cornée fonction de la distance à partir du centre en mm. Par exemple dans cette image la cornée est plus fine au centre (424μm) et s'épaissit vers la périphérie (600μm)
 - Pachymetrie tableau à gauche pour comparer différentes zones de la cornée
 - Épithélium mapping montre l'épaisseur de l'épithélium cornéen avec carte de couleur
- ✓ Vert : épaisseur **normale** (~50 μm)
 - ✓ Bleu / violet : **aminci** (< 45 μm)
 - ✓ Jaune / orange / rouge : **épais** (> 55–60 μm)

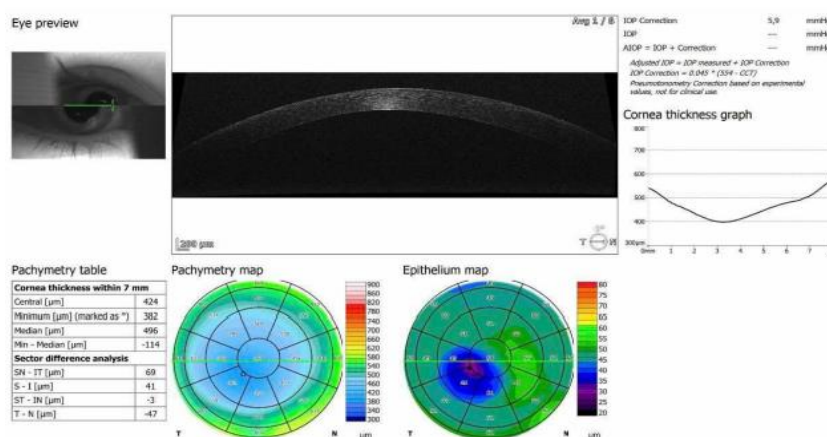


Figure 34: résultats de l'OCT

Chapitre 04 :

Partie pratique.

I. Introduction et problématique :

L'épithélium cornéen joue un rôle clé dans la régulation de la surface antérieure de la cornée. Dans le cadre du kératocône, son épaisseur subit des remaniements caractéristiques, souvent décrits comme un amincissement central compensé par un épaissement périphérique, phénomène connu sous le nom de "masquage épithélial".

Cette capacité adaptative de l'épithélium, bien que transitoire, joue un rôle crucial dans la compensation optique des irrégularités stromales aux premiers stades du kératocône. Toutefois, à mesure que la pathologie progresse, cette compensation devient insuffisante, révélant plus clairement les déformations sous-jacentes. Comprendre comment l'épaisseur épithéliale évolue en fonction du stade de kératocône pourrait donc offrir un outil diagnostique complémentaire, voire prédictif, permettant d'affiner le dépistage, la classification et le suivi de la maladie.

Le but de notre étude est d'évaluer les variations de l'épaisseur épithéliale cornéenne en fonction des différents stades du kératocône, et de comparer les résultats obtenus par Tomographie par Cohérence Optique (OCT) et par topographie cornéenne d'élévation. Nous cherchons à déterminer si la topographie est suffisante pour détecter les modifications épithéliales associées au kératocône, ou si l'OCT est indispensable pour une évaluation complète. Ou, constitue-t-elle une aide précieuse que l'on doit coupler à la topographie dans le dépistage du kératocône

II. Méthodologie :

II.1. Patients :

L'étude comporte deux parties :

La première partie a été réalisée à la clinique IBN AL HAYTHEM. On a pris les données à l'aide de l'OCT REVO NX qui donne le mapping épithélial, et la deuxième partie a été réalisée à la clinique HAMMOU BOUTLILIS l'UHS avec l'OCT Triton qui ne propose pas un module de topographie épithéliale spécialisé, entre 02 février 2025 à 02 mai 2025. **Critères d'inclusion :**

- Patients atteints de kératocône uni ou bilatéral (débutant, modéré, avancé, sévère) : Diagnostic confirmé par topographie Pentacam (OCULUS).
- Patient suspect kératocône.
- Absence de chirurgie oculaire antérieure et pas de pathologie oculaire associée. • Patients coopérants.
- Groupe de contrôle : Un groupe de patients sans pathologie cornéenne. **Critères d'exclusion :**
- Patients ayant d'autres pathologies cornéennes, comme la dystrophie endothéliale ou des cicatrices cornéennes.

- Antécédents chirurgicaux cornéens (chirurgie réfractive, greffes de cornée).
- Infections oculaires actives ou inflammations cornéennes.
- Patients non-coopérants.
- Utilisation récente de lentilles de contact, pouvant interférer avec la mesure de l'épaisseur cornéenne.

Population étudiée :

Les patients seront répartis en groupes en fonction des stades de kératocône. • La première partie de notre étude a été menée sur un total de 32 yeux appartenant à 16 patients, répartis comme suit :

Groupe de contrôle : 11 yeux avec cornée saine.

Groupe 1 : 5 yeux avec kératocône stade 01.

Groupe 2 : 5 yeux avec kératocône stade 02.

Groupe 3 : 6 yeux avec kératocône stade 03.

Groupe 4 : 6 yeux avec kératocône stade 04.

• Pour la deuxième partie de notre étude on a été menée sur un total de 17 yeux appartenant à 10 patients répartis comme suit :

Groupe 1 : 5 yeux avec kératocône stade 01.

Groupe 2 : 5 yeux avec kératocône stade 02.

Groupe 3 : 4 yeux avec kératocône stade 03.

Groupe 4 : 3 yeux avec kératocône stade 04.

Le classement des stades du kératocône a été réalisé selon la classification Belin ABCD (2016), en se basant sur les critères topographiques et pachymétriques.

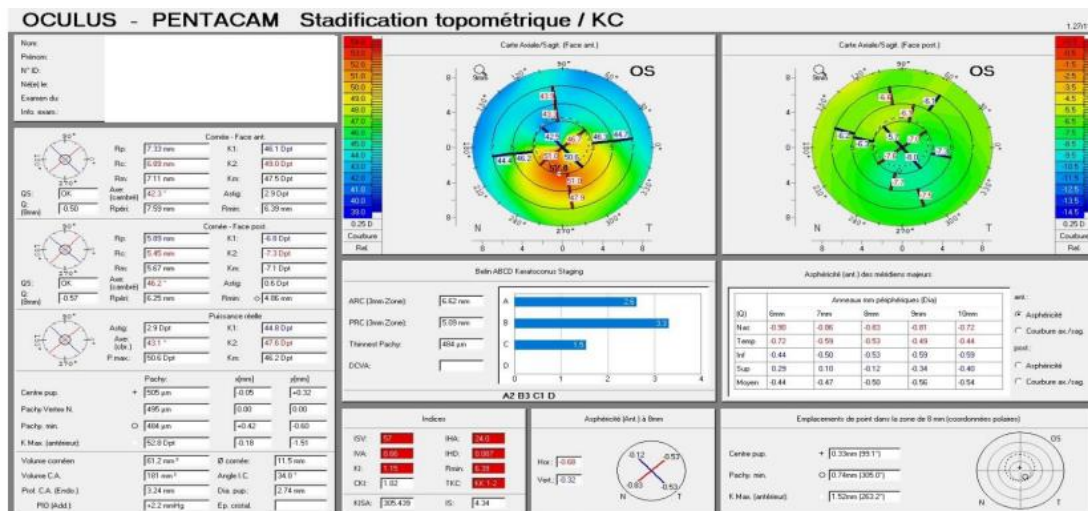
II.2. Appareils :

1. Topographe cornéen-Pentacam® HR (OCULUS) :

Définition de l'appareil :

Pentacam® HR est un appareil de tomographie par caméra Scheimpflug rotative destiné à l'imagerie et à l'analyse du segment antérieur de l'œil. Elle fournit des mesures précises et tridimensionnelles de la cornée, de la chambre antérieure, de l'iris et du cristallin.

Figure 35: topographie Pentacam® HR (oculus) [13]



Principe de fonctionnement :

Le système utilise une caméra Scheimpflug rotative qui capture des images sur 360° autour de l'œil. Pendant moins de 2 secondes, jusqu'à 25 000 points de mesure (138 000 pour la version HR) sont collectés. Ces images permettent de créer un modèle 3D du segment antérieur, à partir duquel sont dérivées les analyses cliniques.

Les mouvements oculaires sont enregistrés et corrigés en temps réel, améliorant la précision et la reproductibilité des mesures. Les clichés sont transmis à un ordinateur pour traitement et affichage graphique.

Fonctions générales :

La Pentacam® propose une gamme étendue d'analyses :

- Topographie cornéenne (face antérieure et postérieure).
- Pachymétrie (épaisseur cornéenne complète).
- Analyse de la chambre antérieure : profondeur, volume, angle irido-cornéen.
- Densitométrie du cristallin et de la cornée.
- Détection du kératocône (avec module Belin-Ambrósio).
- Analyse du profil scléro-cornéen (CSP), utile pour l'adaptation de lentilles sclérales.

- Planification de chirurgie réfractive ou de pose de lentilles intraoculaires.
Elle intègre également des modules logiciels complémentaires comme l'IOL calculator, analyse de cataracte 3D, visualisation dynamique, etc. [13]

2. OCT REVO NX (OPTOPOL) :

Définition de l'appareil :

Le REVO NX est un dispositif OCT (Tomographie par Cohérence Optique) de dernière génération, développé par Optopol, qui intègre une technologie Spectral Domain OCT (SD OCT). Il permet une imagerie ultra-précise et rapide des structures oculaires, du segment postérieur au segment antérieur, ainsi qu'une topographie cornéenne et une biométrie complète.



Figure 37: OCT REVO NX (OPTOPOL) [14]

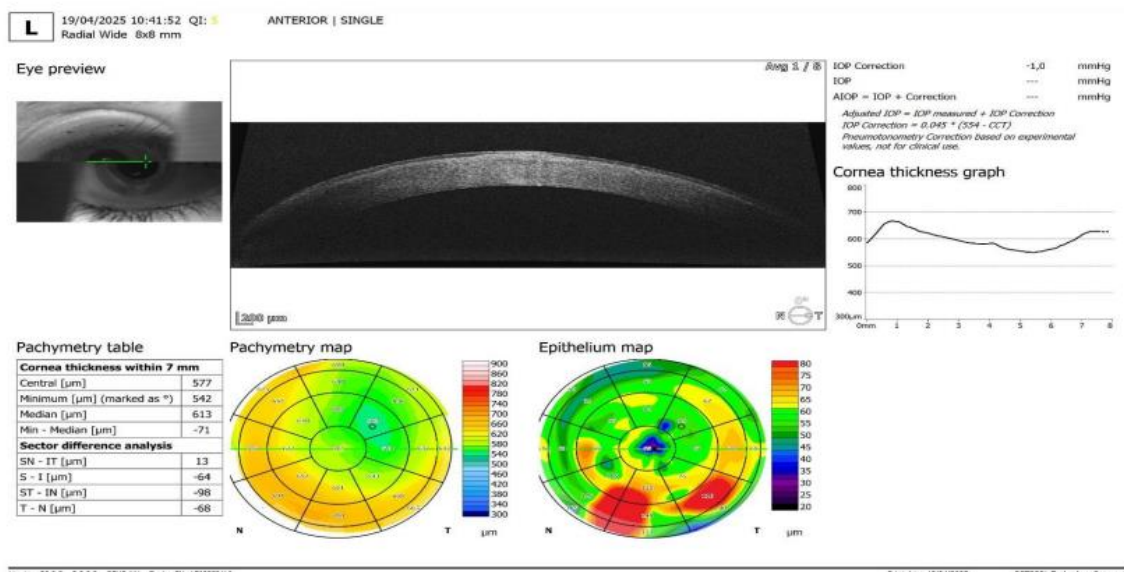


Figure 38: représentation d'une carte obtenue par OCT TEVO NX segment antérieur.

Principe de fonctionnement :

Utilise une source SLED à 830 nm, avec une vitesse de 130 000 A-scans/sec.

La technologie iTracking™ compense les mouvements oculaires et les clignements pour une acquisition stable.

Grâce à des balayages haute résolution (5 µm), l'appareil peut visualiser les différentes couches tissulaires cornéennes, notamment l'épithélium.

Fonctions générales :

• Segment antérieur :

Imagerie de la cornée, la chambre antérieure, et l'angle irido-cornéen sans lentille additionnelle.

Gonioscopie OCT angle-à-angle avec adaptateur.

Mapping épithélial :

Le REVO NX offre un module avancé de topographie cornéenne (T-OCT™), basé sur l'OCT postérieur. Ce module fournit des cartes d'épaisseur épithéliale et de pachymétrie. Utiliser pour :

- Le dépistage précoce du kératocône.
- Le suivi post-opératoire (LASIK, lentilles).
- La détection de complications cornéennes (DMD, cicatrices, asymétries).
- Mesures très rapides (jusqu'à 0,2 s), acquisition automatique.
- Représentations de l'épaisseur épithéliale axiale, tangente, nette, et calculs de puissance cornéenne vraie.
- Mode Comparaison entre examens pour détecter les évolutions topographiques et épithéliales.
- Classification automatique du kératocône via indices (KPI, OSI, SAI...). - Visualisation deux yeux ou mono-œil pour une analyse comparative. [14]

3. DRI OCT Triton (Topcon) :

Définition de l'appareil :

Le DRI OCT Triton est un dispositif de Tomographie par Cohérence Optique à balayage Swept Source (SS-OCT) avec longueur d'onde de 1050 nm, fabriqué par Topcon. Il combine une technologie d'imagerie multimodale, OCT-A, rétinographie, et module antérieur (en option), permettant des explorations profondes de l'œil (de la cornée à la sclère), en passant par la rétine, la choroïde et le vitré.



Figure 39: DRI OCT Triton (TOPCON).

Principe de fonctionnement :

- Balayage rapide à 100 000 A-scans/sec, avec un signal plus pénétrant dans la sclère, la choroïde et la cornée.
- Système SMARTTrack™ pour suivi automatique de l'œil et correction de mouvement (X, Y, Z).
- L'algorithme OCTARA™ détecte les flux vasculaires à différents niveaux, mais peut aussi traiter les images du segment antérieur.

Fonctions générales :

- Segment antérieur (optionnel) :
 - Observation de la cornée, chambre antérieure, angle irido-cornéen, iris et sclère.
 - Bien que le Triton ne propose pas un module de mapping épithélial spécialisé comme le REVO NX, il permet :
Une imagerie détaillée de la structure cornéenne, notamment via des B-scans centrés sur la cornée.
Une visualisation couche par couche, utile pour estimer manuellement l'épaisseur de l'épithélium, surtout en cas de cicatrices, chirurgies cornéennes ou anomalies de surface. [15]

II.3. Protocol :

Conditions de mesure :

Les mesures effectuées dans une pièce à lumière tamisée pour limiter l'accommodation, sans collyre ni dilatation. Patient assis, regard fixe sur le point de fixation de l'appareil.

Les deux yeux sont mesurés.

Pour chaque patient on a recueilli les informations démographiques suivantes : le sexe, l'âge, l'œil (droit/gauche), et le stade de kératocône.

Les données sont saisies dans un tableau Excel.
Un identifiant unique est attribué à chaque patient.

Cas	ID	Sexe	Age	Œil	Stade
-----	----	------	-----	-----	-------

Tableau 7: les informations démographiques recueillies.

Partie 01 :

Pour les patients de la première étude on a obtenu les topographies à partir de Pentacam (OCULUS) et on a recueillie :

Pachymétrie Pentacam		
Pachymétrie centrale	Pachymétrie vertex	Pachymétrie minimale

Tableau 8: tableau de la pachymétrie cornéen Pentacam.

Et à partir de l'OCT REVO NX (OPTOPOL) on a obtenu les cartes épithéliales sur une zone de 8 mm, divisée en 25 zones (1 centrale, 8 para-centrales, 8 mi-périphérique, 8 périphériques) et la pachymétrie cornéen (centrale, médian et minimale).

Zone	Diamètre
Centre	0-2 mm
Z 1 (para-centrale)	2-5 mm
Z 2 (mi-périphérique)	5-7 mm
Z 3 (périphérique)	7-8 mm

Tableau 9: le diamètre de chaque zone de la carte épithéliale.

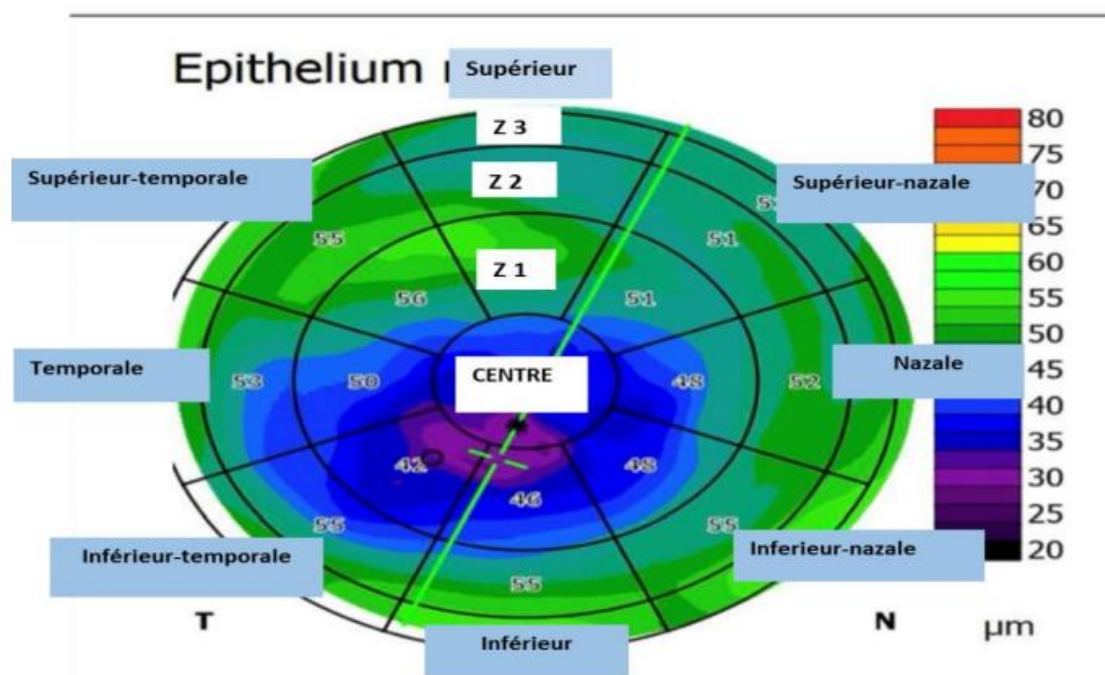


Figure 40: les zones de la carte épithéliale. épitilium map OCT (µm)

épithélium map OCT (µm)																								
centre	superieur			inferieur			nazale			temporale			Superieur nazale			superieur tomporale			inferieur nazal			inferieur tomporale		
	Z1	Z2	Z3	Z1	Z2	Z3	Z1	Z2	Z3	Z1	Z2	Z3	Z1	Z2	Z3	Z1	Z2	Z3	Z1	Z2	Z3	Z1	Z2	Z3

Tableau 11: tableau de la pachymétrie cornéen de l'OCT REVO.

III.Résultat :

- Répartition selon l'âge :

Age (ans)	Nombre d'yeux
10 ans – 19 ans	4
20 ans – 30 ans	13
31 ans – 41 ans	8

Tableau 12: classification selon l'âge.

Représentation de la répartition selon l'âge de l'échantillon étudié a été classifiée en trois Tranches d'âge.

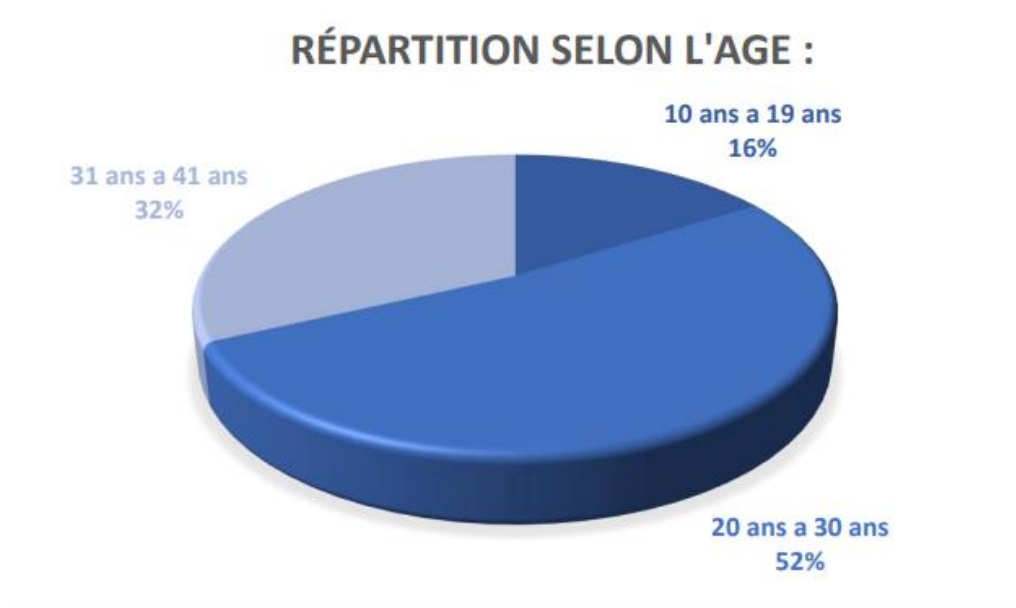


Figure 41: répartition selon l'âge.

Répartition selon le sexe :

La répartition des patients selon le sexe dans notre étude montre que les femmes représentent 60% de kératocône.

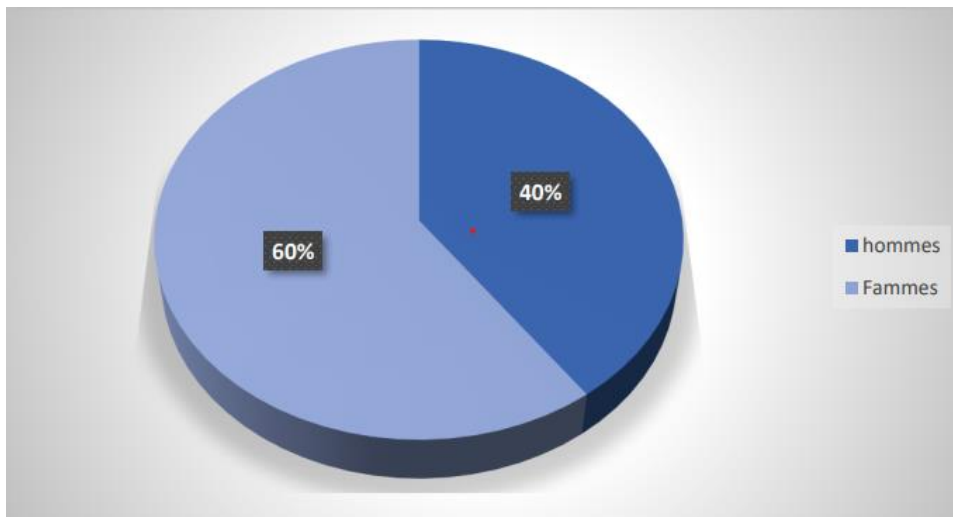


Figure 42:

répartition selon le sexe.

- 1) Dans cette partie de notre étude on compare les déférents stades de kératocône avec le groupe contrôle par l'OCT REVO NX (Optopol) en nous basant sur comparaison les moyennes de 25 zones de chaque stade.

Résultat descriptif :

Les résultats de l'épaisseur épithéliale sont présentés dans des tableaux suivants :

Cornée saine :

Cornée saine					
	Zone	Moyenne	Écart type	Min	Max
	Centre	51,18	3,76	46	57
Supérieur	1	50,18	3,33	46	57
	2	48,45	3,50	43	54
	3	48,27	3,77	43	55
Inferieur	4	50,91	3,48	45	56
	5	51,45	3,42	44	56
	6	53,36	4,46	44	61
Nazale	7	49,91	3,29	44	55
	8	50,36	2,38	44	53
	9	51,27	3,86	42	59
Temporale	10	50,45	3,42	46	55
	11	49,09	2,61	44	53
	12	50,27	2,67	45	53
Sup-nazale	13	50,09	3,20	46	57
	14	49,36	2,87	44	54
	15	50,10	4,41	43	60

Sup temporale	16	49,91	2,78	46	55
	17	48,82	2,76	45	54
	18	49,00	2,09	45	52
Inf-nazale	19	50,91	3,23	45	55
	20	51,27	3,02	44	56
	21	52,73	4,51	43	61
Inf temporale	22	50,91	3,85	45	57
	23	50,64	3,57	43	56
	24	50,73	2,93	44	56

Tableau 13: épaisseur épithéliale de cornée saine.

Stade 01 de kératocône :

Stade 1					
	Zone	Moyenne	Écart type	Min	Max
	Centre	50,20	3,19	46	54
Supérieur	1	50,20	1,48	48	52
	2	51,40	3,91	46	56
	3	50,33	3,79	46	53
Inferieur	4	49,40	4,72	42	55
	5	53,20	2,95	48	55
	6	52,75	3,86	47	55
Nazale	7	51,40	2,19	48	54
	8	52,60	3,13	48	56

	9	51,25	2,36	48	53
Temporale	10	51,20	5,31	45	59
	11	51,40	2,41	48	54
	12	51,25	2,50	48	54
Sup-nazale	13	51,80	3,27	49	57
	14	52,20	3,70	47	56
	15	51,00	2,71	47	53
Sup temporale	16	51,20	2,95	47	55
	17	51,80	4,15	47	57
	18	50,50	2,65	47	53
Inf-nazale	19	52,20	3,77	46	56
	20	53,40	2,88	49	56
	21	52,75	3,40	48	56
Inf temporale	22	49,40	6,31	39	54
	23	50,40	4,67	43	55
	24	52,00	3,56	47	55

Tableau 14: résultat de la carte épithéliale de stade 01

Stade 02 de kératocône :

Stade 2					
	Zone	Moyenne	Écart type	Min	Max
	Centre	51,80	2,04	49	54
Supérieur	1	51,40	2,42	48	55
	2	49,60	3,44	44	54
	3	49,40	5,04	43	58

Inferieur	4	52,20	4,53	44	57
	5	52,80	3,97	46	57
	6	52,40	4,80	45	59
Nazale	7	54,20	1,83	52	56
	8	52,60	2,94	48	57
	9	51,80	4,12	45	57
Temporale	10	52,00	2,00	49	55
	11	52,60	3,83	48	57
	12	51,60	4,22	46	59
Sup-nazale	13	52,60	1,85	51	56
	14	51,60	3,93	45	56
	15	52,00	4,15	46	58
Sup temporale	16	51,40	2,87	47	55
	17	51,80	3,66	47	57
	18	50,80	3,43	46	56
Inf-nazale	19	52,20	2,48	48	55
	20	52,40	3,01	48	57
	21	53,00	4,29	46	58
Inf temporale	22	50,60	4,22	45	55
	23	51,40	4,76	44	57
	24	52,60	4,96	45	59

Tableau 15: l'épaisseur épithéliale de stade 2.

Stade 03 de kératocône :

Stade 3					
	Zone	Moyenne	Écart type	Min	Max

	Centre	46,50	2,81	42	49
Supérieur	1	46,67	5,47	38	55
	2	44,67	2,88	41	49
	3	44,50	4,73	38	48
Inferieur	4	45,67	5,99	38	54
	5	46,83	1,83	44	48
	6	45,40	2,97	42	49
Nazale	7	46,00	4,15	38	49
	8	44,17	5,78	36	49
	9	48,40	4,98	45	57
Temporale	10	42,83	4,40	38	48
	11	43,50	5,17	36	48
	12	45,40	4,39	38	49
Sup-nazale	13	44,67	5,28	38	53
	14	41,00	4,90	35	48
	15	45,25	4,50	39	49
Sup-temporale	16	44,83	3,71	38	48
	17	46,17	5,56	38	55
	18	45,60	4,51	38	49

Inf-nazale	19	43,17	5,67	38	49
	20	44,50	4,04	38	49
	21	43,60	3,78	38	48
Inf-temporale	22	45,17	2,14	42	48
	23	45,67	3,93	38	48
	24	45,60	2,88	42	49

Tableau 16: l'épaisseur épithéliale de stade 3.

Stade 04 de kératocône :

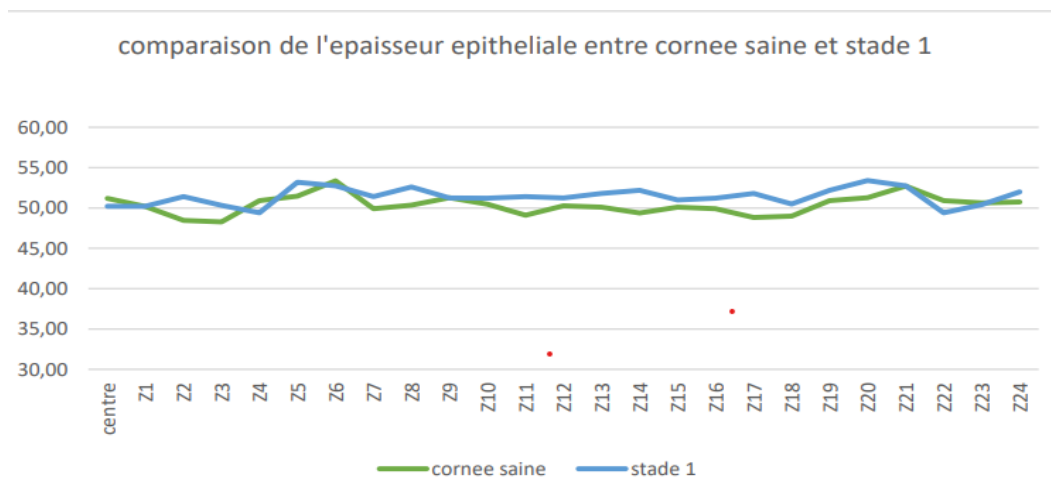
Stade 4					
	Zone	Moyenne	Écart type	Min	Max
	Centre	45,67	4,27	38	50
Supérieur	1	45,17	5,23	36	51
	2	44,17	3,49	38	48
	3	42,50	5,00	36	48
Inferieur	4	44,50	5,39	34	49
	5	45,67	6,62	34	52
	6	44,80	4,60	38	48
Nazale	7	45,33	4,32	38	48
	8	45,00	4,52	38	50
	9	45,50	3,00	42	48
Temporale	10	44,50	3,21	42	49

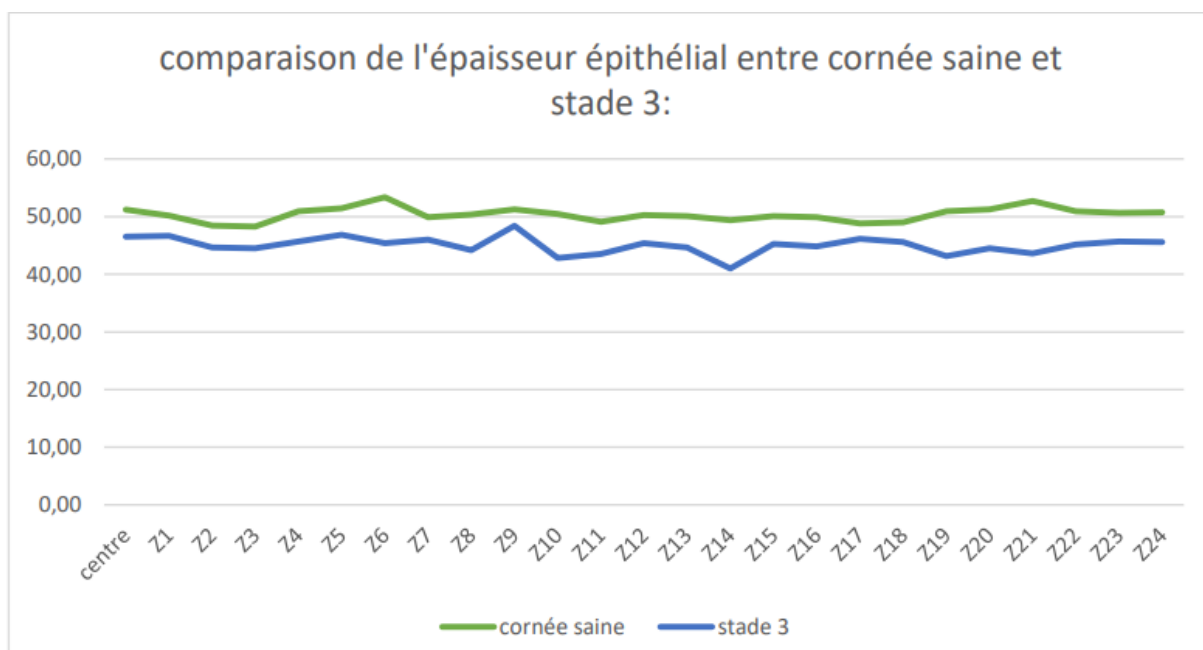
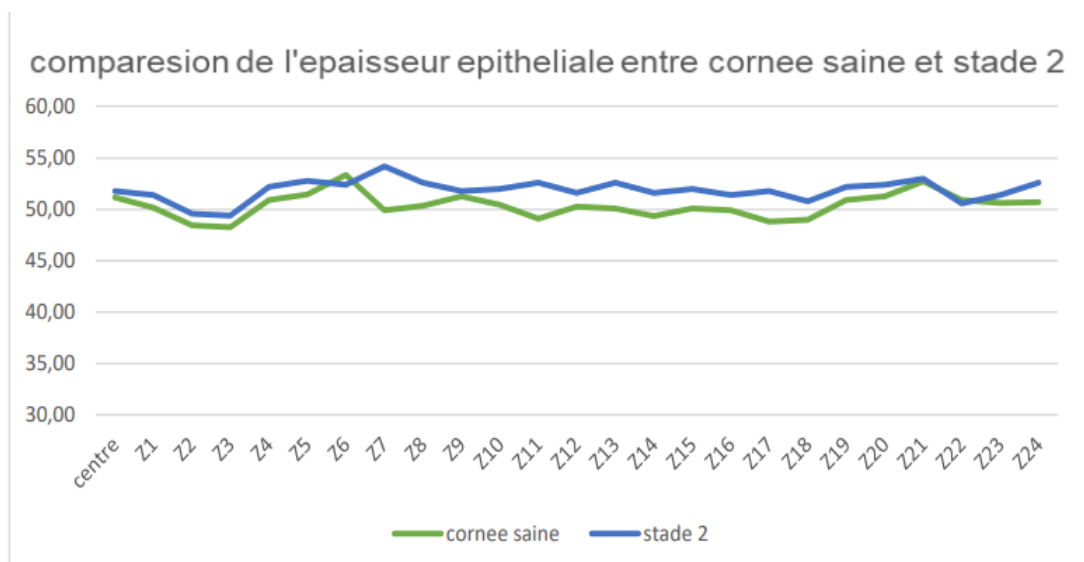
	11	44,67	7,47	34	53
	12	43,20	5,02	38	48
Sup-nazale	13	45,67	2,66	44	50
	14	44,00	5,37	38	50
	15	43,00	7,02	36	50
Sup temporale	16	42,00	5,37	36	48
	17	45,33	3,93	38	48
	18	40,50	3,00	38	44
Inf-nazale	19	45,67	4,63	38	50
	20	43,17	4,75	38	49
	21	44,50	4,73	38	48
Inf-temporale	22	42,67	1,03	42	44
	23	45,17	3,92	42	50
	24	45,20	1,64	44	48

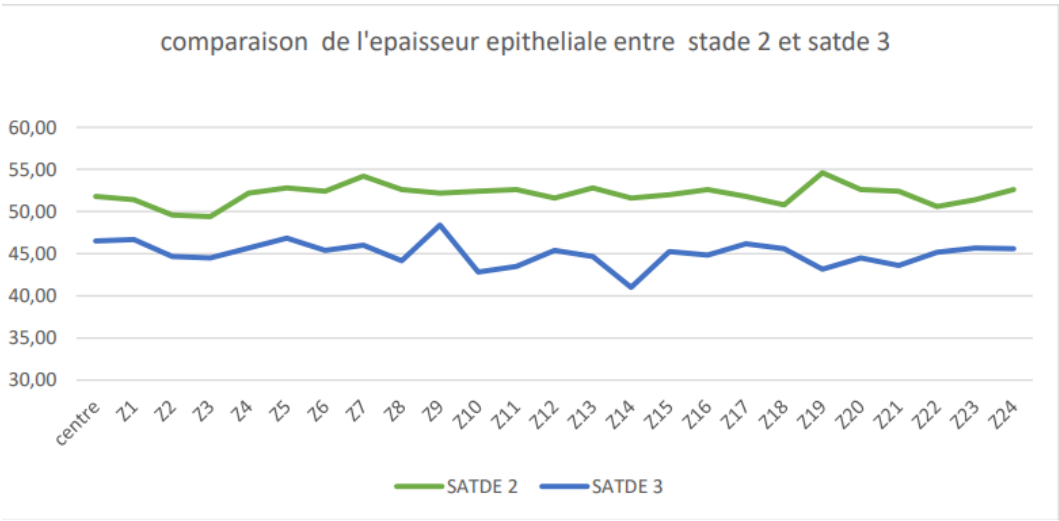
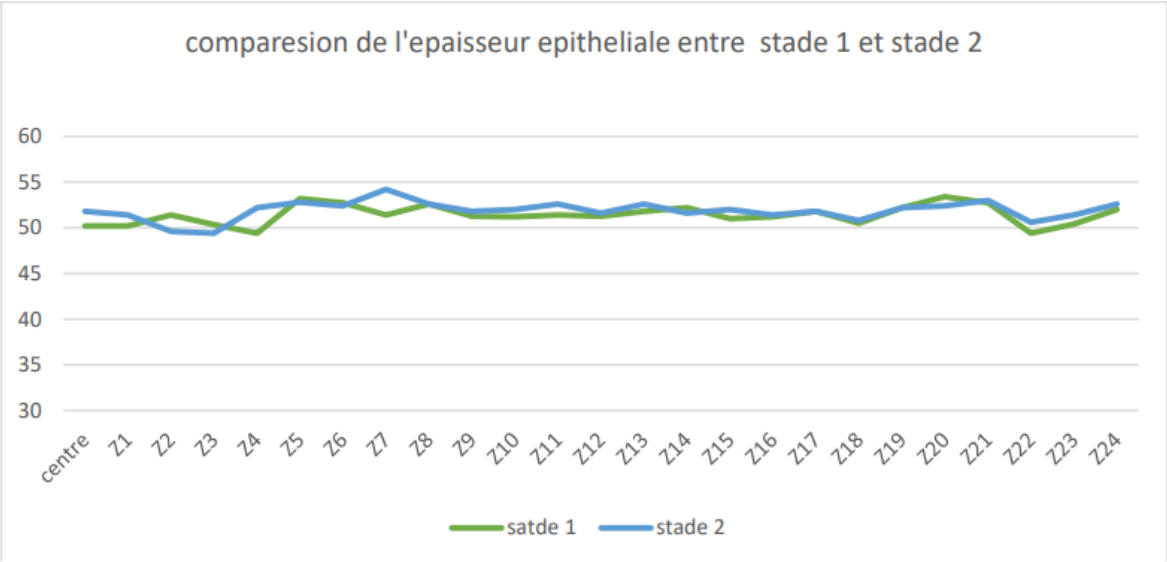
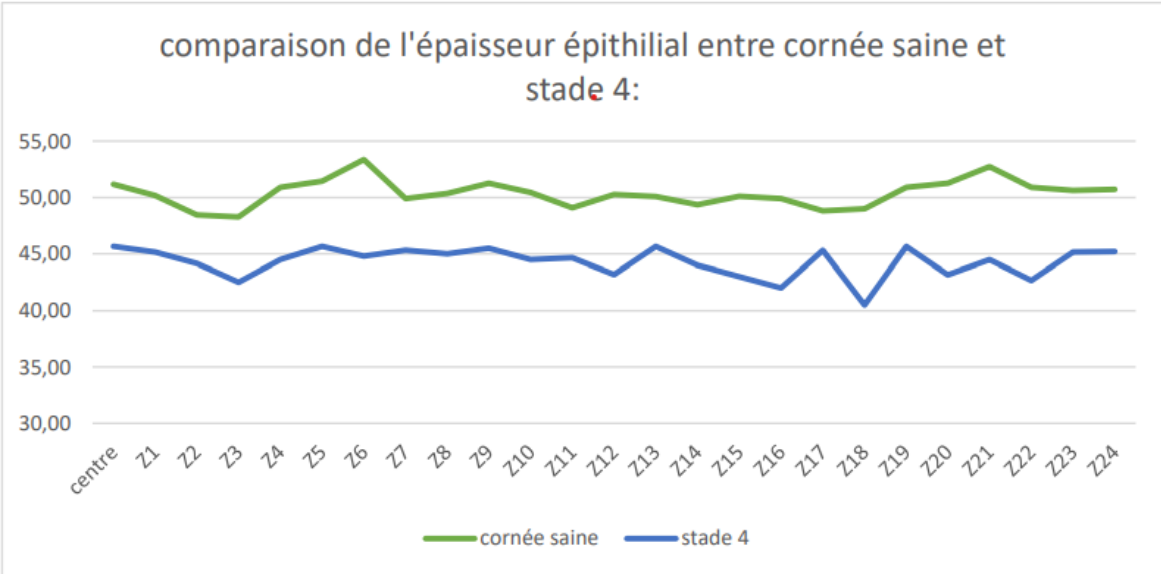
Tableau 17: l'épaisseur épithéliale de stade 4.

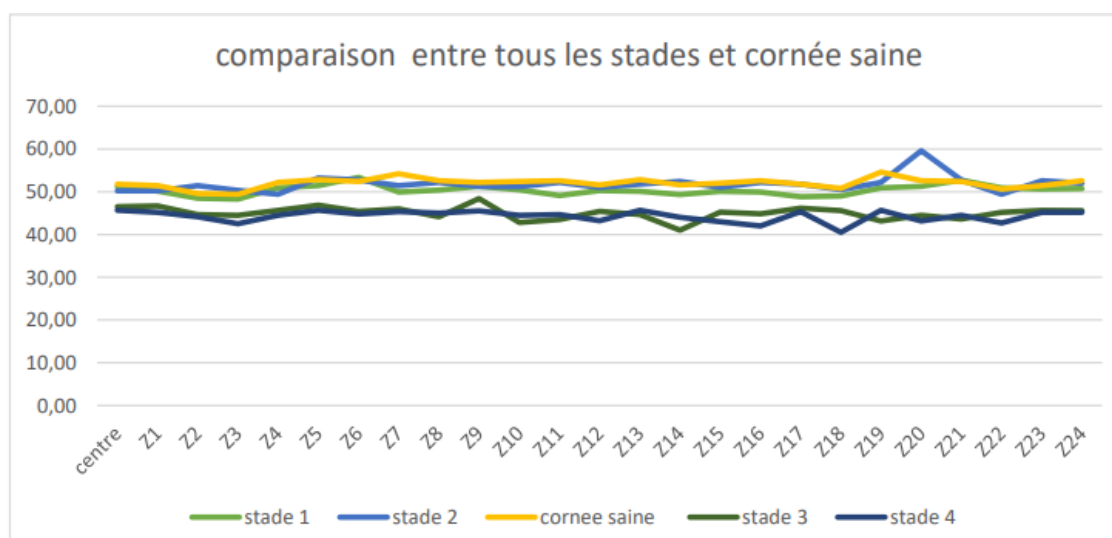
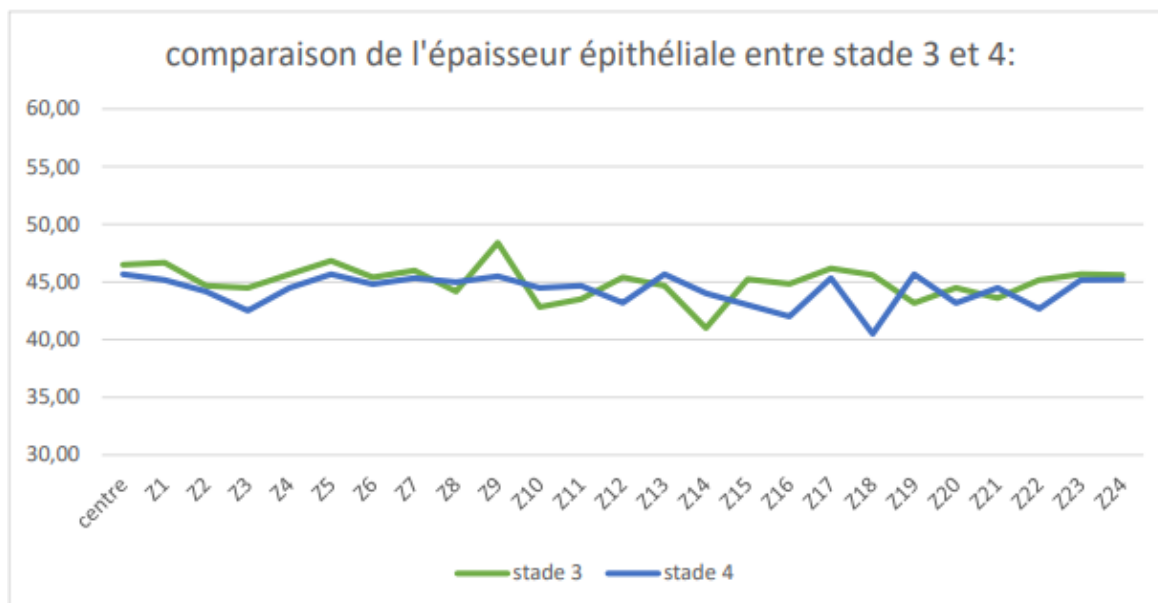
Les résultats sont présentés sous forme des courbes, ce qui nous permet de les comparer plus facilement.

Graphe 01 : Comparaison entre cornée saine et stade 01.









Dans la deuxième partie de notre étude, on a comparé les mesures de pachymétrie cornéenne obtenues par l'OCT REVO NX (Optopol) et la topographie Pentacam (Oculus) selon trois paramètres : épaisseur centrale, épaisseur minimale et épaisseur médiane, répartis sur cinq groupes de patients correspondant à groupe de contrôle et les différents stades du kératocône (1 à 4).

Résultats descriptifs :

Cornée saine						
	OCT REVO			Topographie Pentacam		
	Central	Min	Médian	Centre	Min	Médian
Moyenne	523,55	514,91	564,27	532,09	528,90	532,54

Écart type	29,27	29,40	26,35	28,27	30,13	29,45
Min	477	461	531	481	471	478
Max	566	549	611	568	567	570

Tableau 18: la pachymétrie cornéen de cornée saine.

Stade 1						
	OCT REVO			Pentacam		
	Central	Min	Médian	Centre	Min	Médian
Moyenne	443,80	410,20	505,00	465,80	440,80	464,00
Écart type	59,71	71,04	38,80	47,66	54,83	44,71
Min	344	290	461	393	354	396
Max	499	476	552	506	491	505

Tableau 19: la pachymétrie cornéen de stade 1.

Stade 2						
	OCT REVO			Pentacam		
	Central	MIN	MADIEN	Central	MIN	MEDIAN
Moyenne	447,4	415,4	509,2	449,8	434,2	449,8
Écart type	21,48	25,71	33,47	24,98	22,65	24,98
Min	424	382	452	413	400	413
Max	487	459	551	484	470	484

Tableau 20 : la pachymétrie cornéen de stade 2.

Stade 3						
	OCT REVO			Pentacam		
	Central	Min	Médian	Centre	Min	Médian

Moyenne	416,00	382,33	506,50	428,00	411,00	408,33
Écart type	38	35	26	51	59	48
Min	374	339	474	366	349	351
Max	464	425	535	502	495	465

Tableau 21: la pachymétrie cornéen de stade 3.

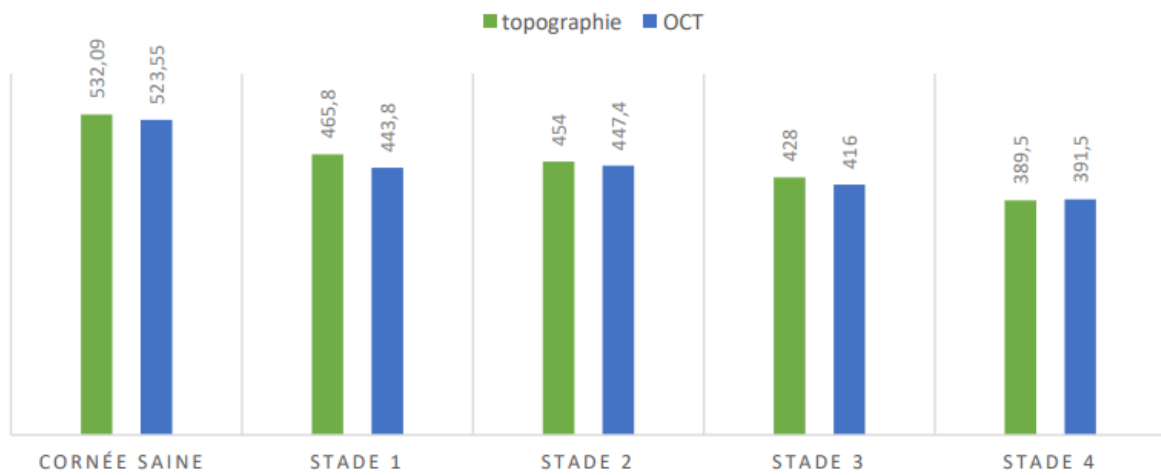
	STADE 4					
	OCT REVO			PENTACAM		
	Central	MIN	MADIEN	CENTRAL	MIN	MEDIAN
Moyenne	391,5	338,6	486,8	389,5	355,5	381,25
Écart type	54,25	54,25	54,25	54,25	54,25	54,25
Min	294	192	418	329	272	327
Max	439	410	539	453	414	437

Tableau 22: la pachymétrie cornéen de stade 4.

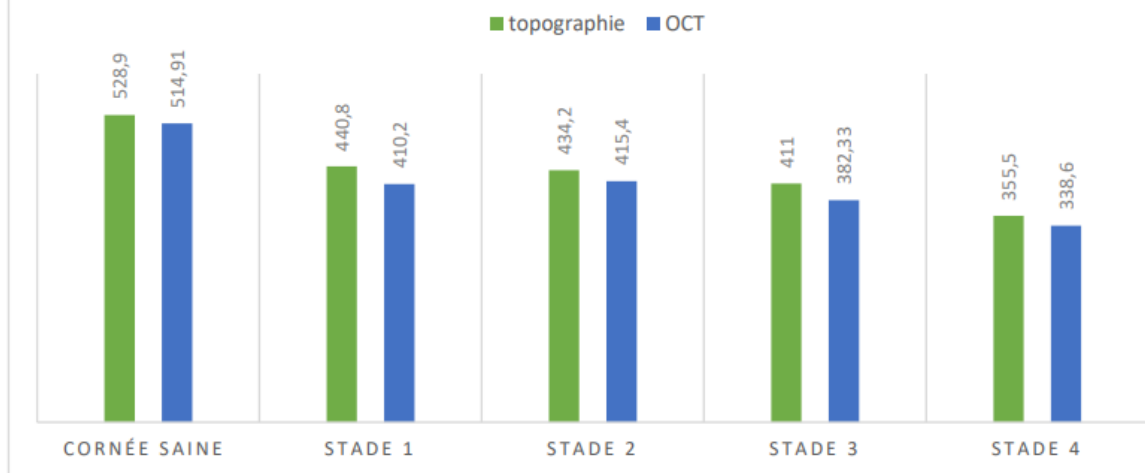
Les résultats sont présentés sous forme de graphiques en barres groupées, facilitant la comparaison directe entre les deux instruments au sein de chaque groupe.

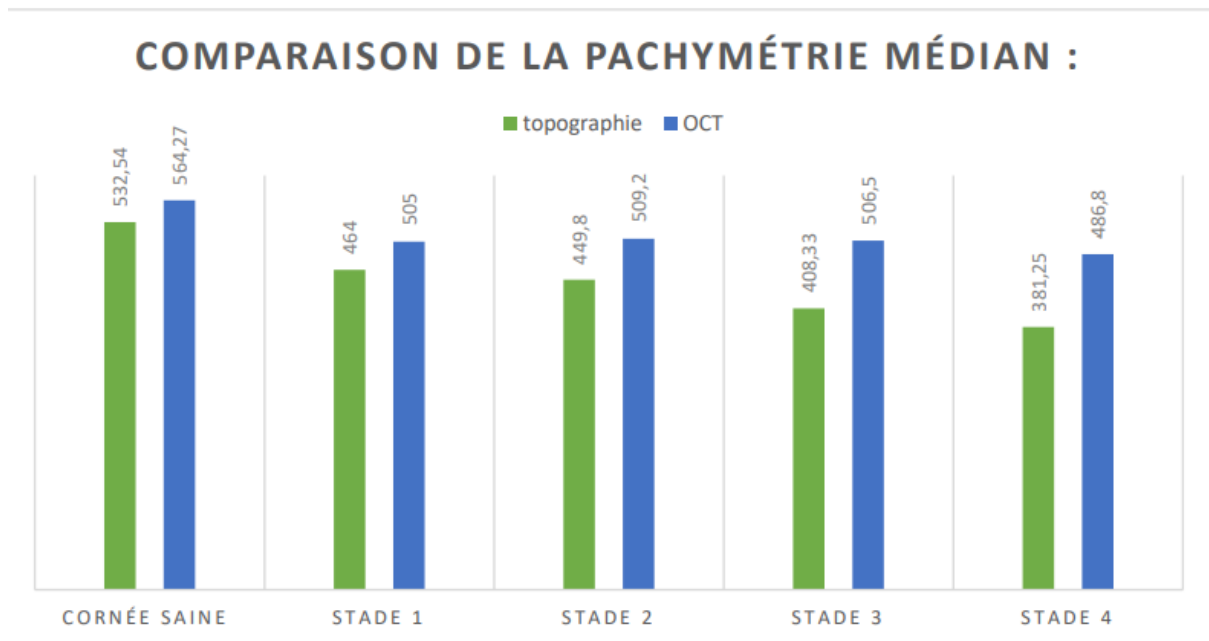
Grphe 01 : comparaison de la pachymétrie cornéen centrale obtenue par topographie Pentacam et l'OCT REVO.

COMPARAISON DE LA PACHYMÉTRIE CORNÉEN CENTRALE



COMPARAISON DE LA PACHYMÉTRIE MINIMALE:





Partie 02 :

Dans cette partie de notre étude, nous avons calculée l'épaisseur épithéliale manuellement sur cinq zones distinctes de la cornée (centre, mi-périphérie nasale et temporale et périphérie nasale et temporale) en utilisant l'OCT Triton qui ne fournit pas de carte épithéliale automatisée.

Voici une carte obtenue par l'OCT Triton :

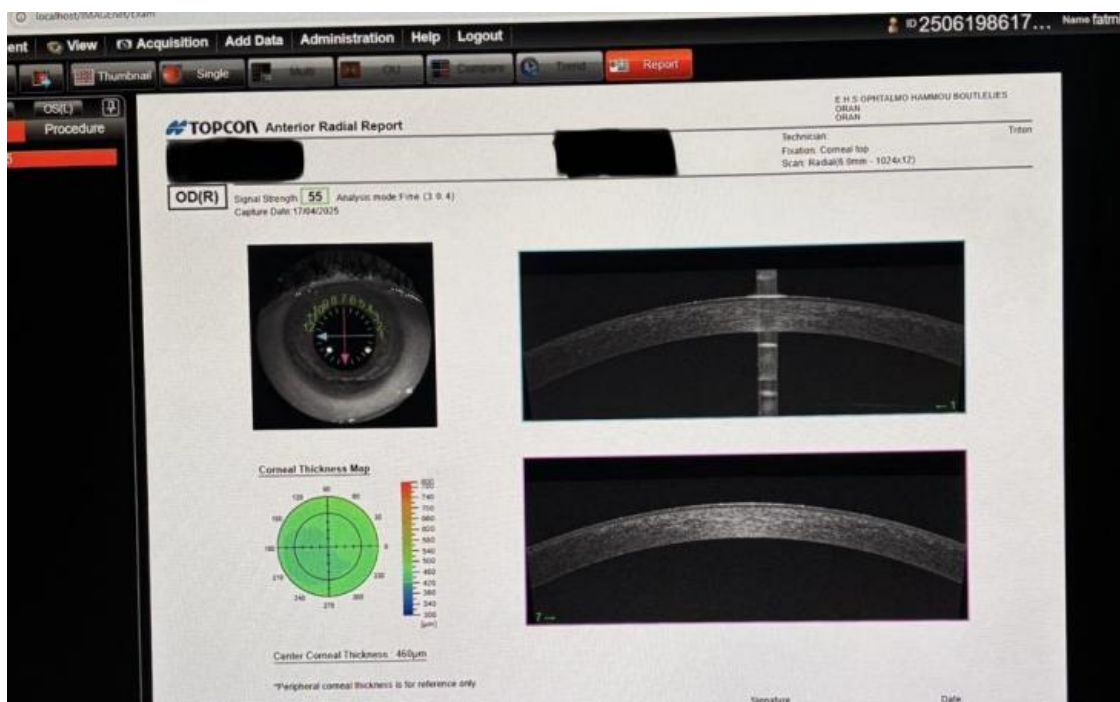


Figure 43: une carte obtenue par l'OCT Triton segment antérieur.



Epaisseur épithéliale OCT Triton				
Z 1(Périphérique nazale)	Z 2(mi péripherique nazale)	Z 3(centre)	Z 4(Mi péripherique temporale)	Z 5(Périphérique temporale)

Tableau 23: les zones de mesure de l'épaisseur cornéen.

Les résultats :

- Répartition selon l'âge :

Age (ans)	Nombre d'yeux
15 à 30	2
31 à 45	5
46 à 75	6

Tableau 24: répartition selon l'age.

Représentation de la répartition selon l'âge de l'échantillon étudié a été classifiée en trois Tranches d'âge.

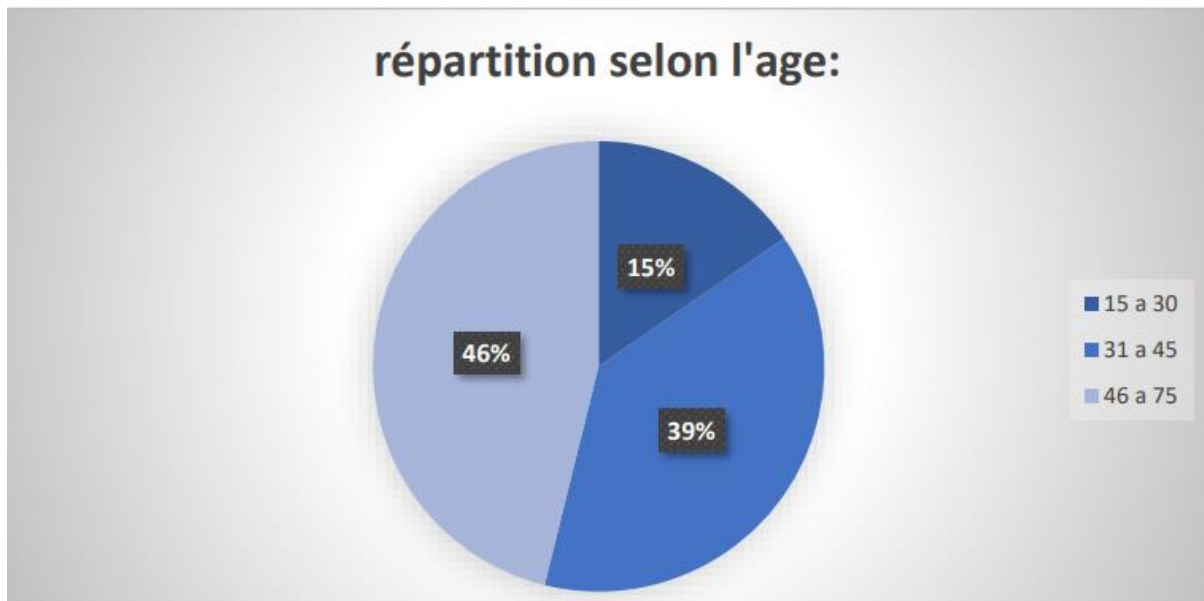


Figure 45: répartition selon l'âge.

- Répartition selon le sexe :

La répartition des patients selon le sexe dans notre étude montre que les femmes représentent 63% de kératocône



Figure 46: répartition selon le sexe.

Les résultats sont classes dans les tableaux suivant : **Stade 01 :**

Stade 01				
Les zones	Moyenne	Écart type	Min	Max
Z1	53,4	3,29	51	57
Z2	39,6	5,50	32	45
Z3	38,4	0,55	38	39
Z4	42,2	7,33	32	51
Z5	53,4	3,29	51	57

Tableau 25: l'épaisseur épithéliale de stade 01.

Stade 02 :

stade 02				
les zones	moyenne	écart type	min	max
Z 1	46,2	2,68	45	51
Z 2	43,8	2,68	39	45
Z 3	41	7,25	32	51
Z 4	42,2	3,83	38	45
Z 5	44,8	4,60	38	51

Tableau 26: l'épaisseur épithéliale de stade 02.

Stade 03 :

stade 03				
les zones	moyenne	écart type	min	max
Z 1	52,5	9	39	57
Z 2	48	8,52	38	58
Z 3	41,5	8,27	32	51
Z 4	51,25	8,96	45	64
Z 5	55,5	3	51	57

Tableau 27: l'épaisseur épithéliale de stade 03.

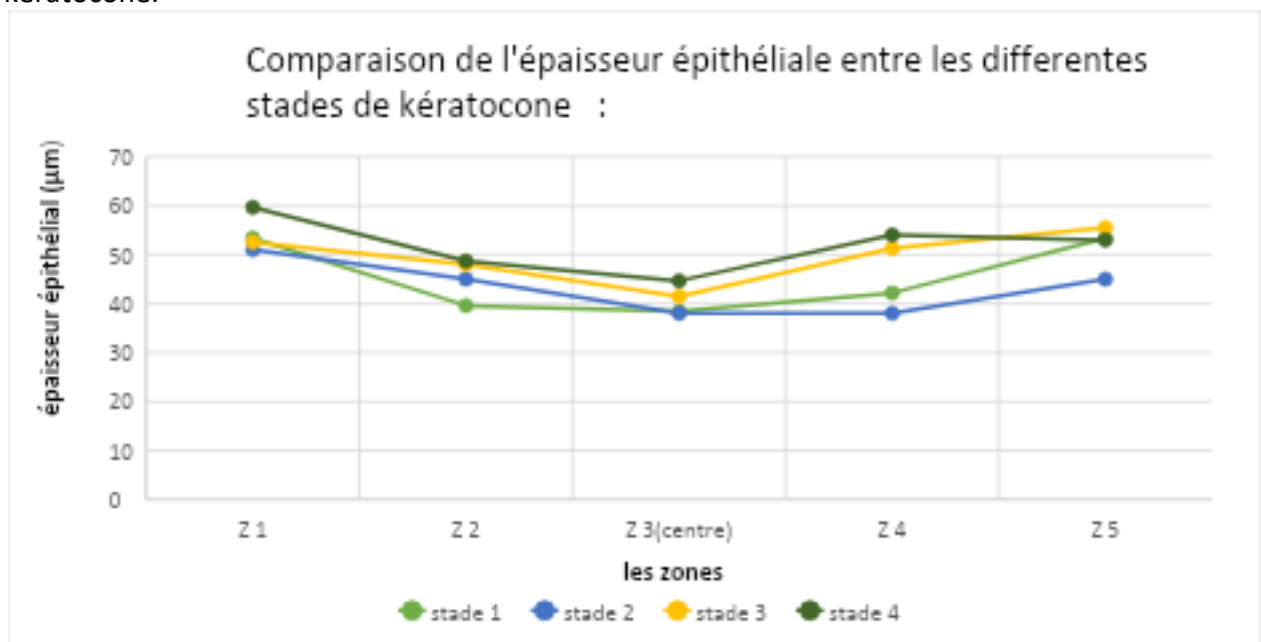
Stade 04 :

stade 04				
les zones	moyenne	écart type	min	max
Z 1	59,67	5,13	54	64
Z 2	48,67	9,71	38	57
Z 3	44,67	3,51	41	48
Z 4	54,00	3,00	51	57
Z 5	53,00	6,93	45	57

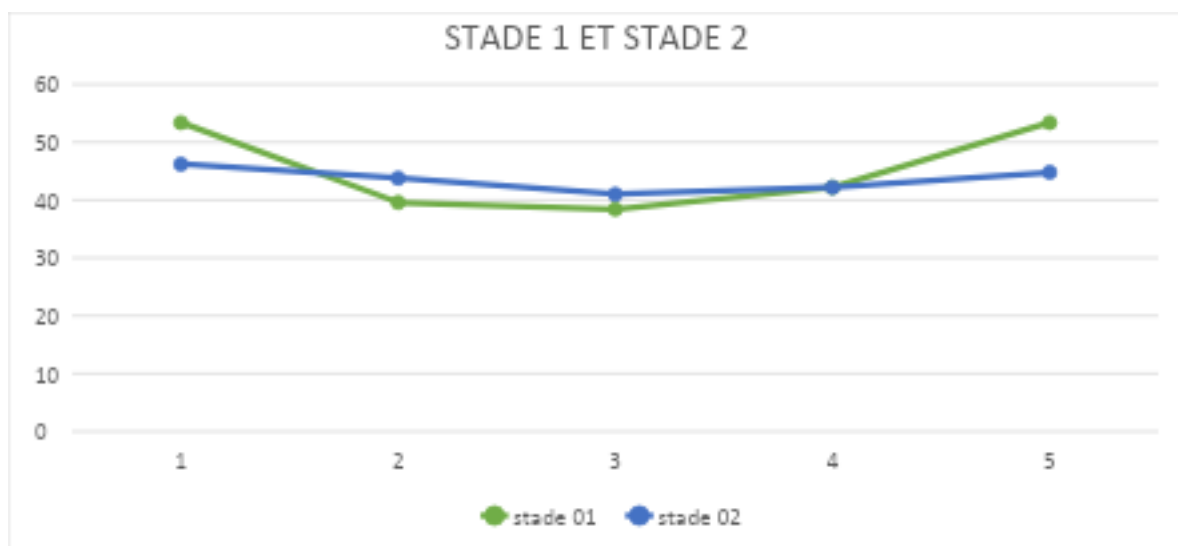
Tableau 28: l'épaisseur épithéliale de stade 04.

Les résultats sont présentés sous forme de courbe, ce qui nous permet de les comparer plus facilement.

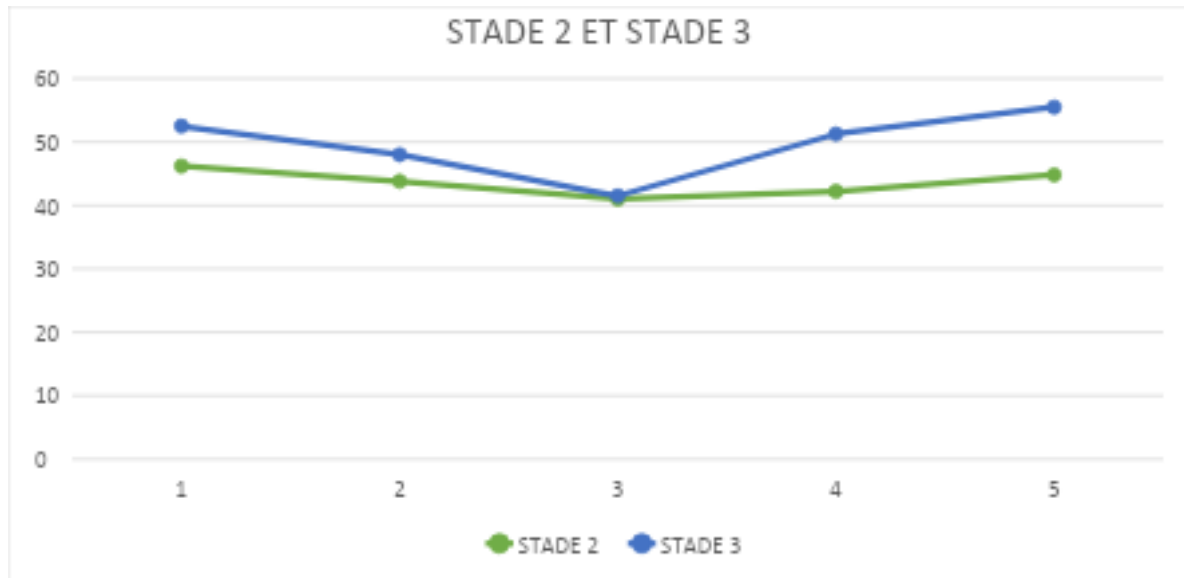
Graphe 01 : comparaison de l'épaisseur épithéliale cornéen dans les différents stades de kératocône.



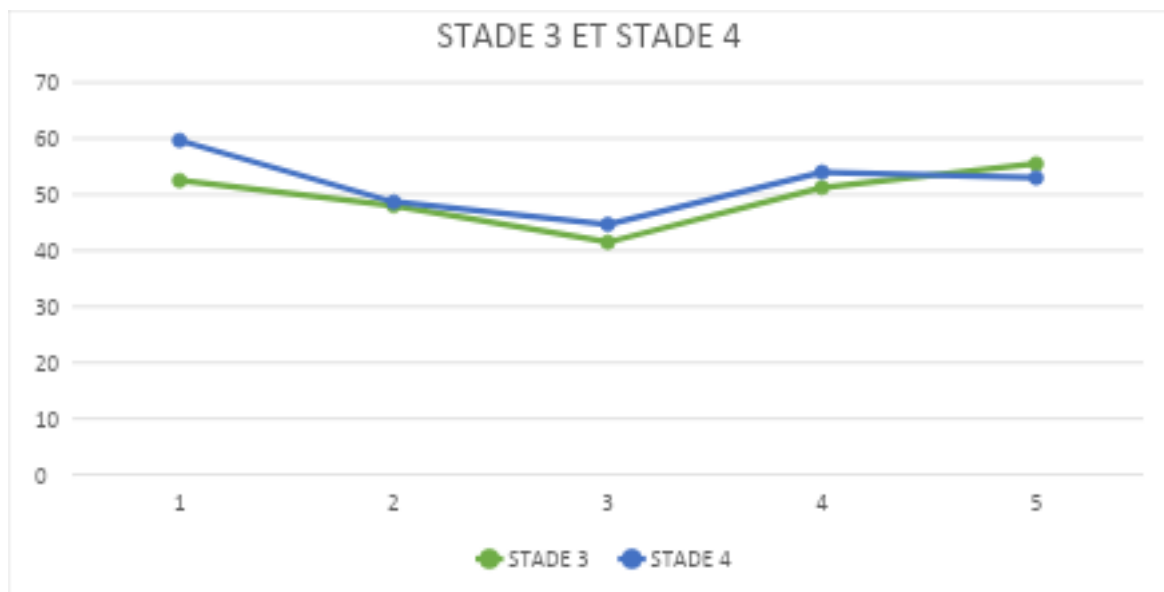
Graphe 02 : comparaison entre l'épaisseur épithéliale de stades 01 et 02.



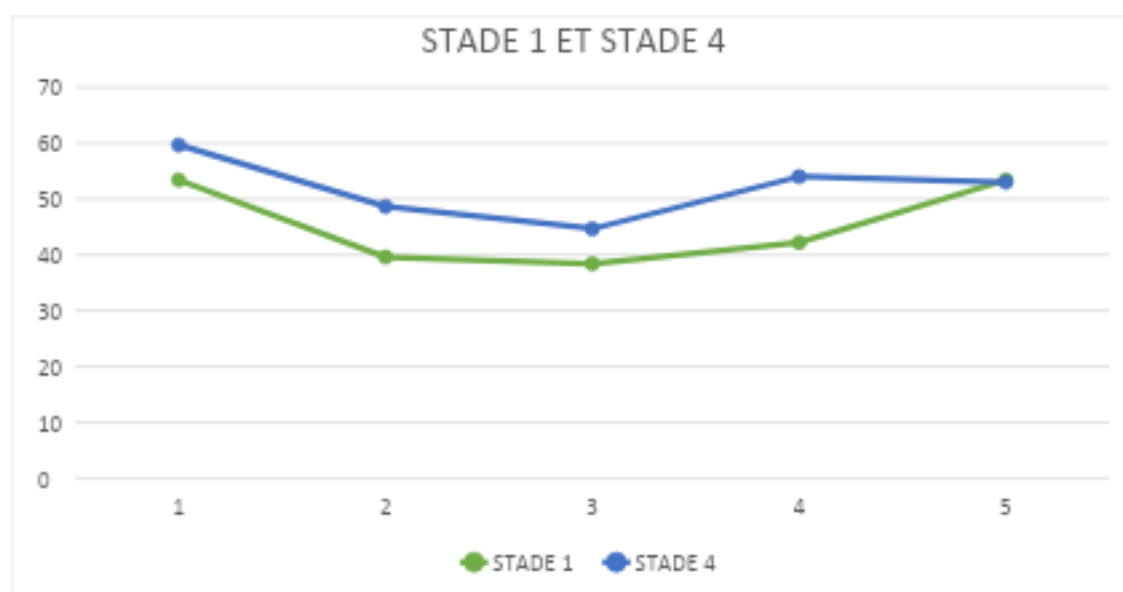
Graphe 03 : comparaison entre l'épaisseur épithéliale de stades 02 et 03.



Graphe 04 : comparaison entre l'épaisseur épithéliale de stades 03 et 04.



Graphe 05 : comparaison entre l'épaisseur épithéliale de stades 01 et 04.



Discussion :

L'épaisseur de l'épithélium cornéen, mesurée par tomographie en cohérence optique (OCT), diminue progressivement avec l'aggravation du kératocône. Cet amincissement est particulièrement prononcé au sommet du cône, où l'épithélium s'affine, alors qu'un épaissement périphérique compensatoire est souvent observé. Ce schéma forme un motif caractéristique en « donut inversé », illustrant le remodelage épithélial adaptatif face aux altérations stromales sous-jacentes. L'analyse des données graphiques confirme cette évolution : l'épaisseur épithéliale est plus importante chez les sujets sains, et décroît progressivement aux stades 1, 2, 3, puis 4 du kératocône. Les courbes montrent clairement que chaque stade avancé présente une épaisseur inférieure au précédent, avec des différences significatives, notamment entre les stades précoces (1-2) et avancés (3-4). Le stade 4, en particulier, révèle l'épithélium le plus aminci de tous les groupes étudiés. Ces observations sont en accord avec les résultats de la littérature. Par exemple, une étude publiée dans *Frontiers in Neuroscience* (2021), intitulée *Dissecting the Profile of Corneal Thickness With Keratoconus Progression Based on Anterior Segment Optical Coherence Tomography*, rapporte une diminution progressive de l'épaisseur de la cornée et de l'épithélium avec l'évolution du kératocône. L'étude souligne notamment que l'amincissement est plus marqué au niveau de l'apex cornéen chez les patients atteints, avec des écarts significatifs dans toutes les régions mesurées par OCT, en particulier autour du centre pupillaire (Zhang et al., 2021).

[46] Les résultats de notre étude, réalisée à l'aide de l'OCT REVO NX (Optopol), montrent que l'épaisseur cornéenne centrale (ECC) moyenne dans une population algérienne est de 523,55 μm , avec une valeur minimale de 477 μm . Cette valeur, bien que dans la norme attendue, est légèrement inférieure à celle souvent rapportée dans les populations caucasiennes, où l'ECC est généralement comprise entre 530 et 550 μm . Cette observation est cohérente avec la littérature, notamment l'étude de Rampersad et Hansraj (2019) qui a rapporté une ECC moyenne de 501,91 μm (min : 495,73 μm) chez de jeunes adultes sud-africains à l'aide de l'OCT Optovue iVue100. [40]

Ces données suggèrent l'existence d'une variabilité ethnique et géographique de l'épaisseur cornéenne. Dans notre étude, les valeurs observées sont légèrement supérieures à celles mesurées en Afrique australe mais inférieures à celles des populations européennes ou asiatiques. Cela conforte l'importance d'établir des références biométriques spécifiques à chaque population, notamment pour la sélection des candidats à la chirurgie réfractive, l'interprétation des pressions intraoculaires corrigées et le diagnostic précoce de pathologies cornéennes comme le kératocône. Par ailleurs, on a mis en évidence des divergences significatives entre les mesures d'ECC obtenues par OCT REVO NX (Optopol) et celles issues de la topographie cornéenne Pentacam (Oculus). Chez les patients à cornée saine, l'ECC mesurée par OCT était de $523,55 \mu\text{m}$ contre $532,09 \mu\text{m}$ avec le Pentacam, indiquant une surestimation moyenne de $8,5 \mu\text{m}$ par la topographie. Cette tendance est plus marquée chez les patients atteints de kératocône, et varie selon le stade de la maladie (exemple : pour le stade 1 : $443,80 \pm 22 \mu\text{m}$ (OCT) contre $465,80 \pm 22 \mu\text{m}$ (Pentacam), stade 2 : $447,4 \pm 2,4 \mu\text{m}$ (OCT) vs $449,8 \pm 2,4 \mu\text{m}$ (Pentacam), stade 3 : $416 \pm 12 \mu\text{m}$ (OCT) vs $428 \pm 12 \mu\text{m}$ (Pentacam)). Ces résultats confirment les travaux publiés qui rapportent une surestimation systématique de l'ECC par la topographie Pentacam par rapport à l'OCT. Par exemple, Toker et al. (2021) ont observé une ECC moyenne de $533,8 \pm 30,2 \mu\text{m}$ par Pentacam contre $519,8 \pm 30,1 \mu\text{m}$ par OCT spectral-domain (Optovue), soit une surestimation moyenne de $14 \mu\text{m}$ [44]. De même, Gokhale et al. (2018) ont comparé les mesures obtenues par RTVue (AS-OCT) et Pentacam, montrant une différence moyenne de $4,5 \mu\text{m}$ en faveur de la topographie ($550,4 \pm 30,5 \mu\text{m}$ vs $545,9 \pm 30,5 \mu\text{m}$) [45]. Cette surestimation peut s'expliquer par des limitations propres à la technologie Scheimpflug, notamment sa moindre sensibilité aux amincissements focaux et irréguliers, comme ceux observés dans les premiers stades du kératocône. En revanche, l'OCT, grâce à ses coupes tomographiques haute résolution, offre une évaluation plus précise de l'architecture cornéenne, même dans les zones déformées ou amincies. Nos résultats confirment ainsi l'intérêt de l'OCT dans l'évaluation de l'épaisseur cornéenne, tant pour la détection précoce du kératocône que pour le suivi évolutif de la pathologie. En pratique clinique, le choix de l'instrument de mesure doit être adapté au contexte pathologique, afin d'éviter des biais d'interprétation qui pourraient compromettre la décision thérapeutique. Dans la deuxième partie de notre étude, L'un des principaux obstacles méthodologiques rencontrés réside dans le mode de mesure manuel de l'épaisseur épithéliale cornéenne. En l'absence de carte épithéliale automatisée sur l'OCT Triton, les mesures ont dû être réalisées manuellement sur cinq zones distinctes de la cornée : le centre, la mi-périphérie nasale et temporale, ainsi que la périphérie nasale et temporale. Cette approche présente plusieurs limites majeures. D'une part, elle exige un haut niveau de concentration et de précision de la part de l'opérateur ; d'autre part, elle est sujette à de nombreuses erreurs de manipulation, notamment en matière de positionnement des repères, de la délimitation manuelle des couches épithéliales sur les coupes OCT et d'interprétation visuelle. De ce fait, les valeurs obtenues sont non seulement difficilement reproductibles, mais aussi aléatoires, peu fiables et ne peuvent être considérées comme des données justes ni valides scientifiquement. Cela constitue une faiblesse majeure de la méthode utilisée, qui limite la portée des conclusions pouvant être tirées de cette analyse

Conclusion :

L'épaisseur épithéliale cornéenne constitue un biomarqueur pertinent pour le suivi du kératocône. Sa diminution progressive, particulièrement au sommet du cône, et le motif en « donut inversé » qu'elle dessine, reflètent directement la sévérité de la maladie. L'OCT permet ainsi de visualiser de façon fiable ces altérations et de différencier les stades du kératocône, contribuant à un diagnostic plus précoce et à une meilleure planification thérapeutique. Cette étude menée sur une population algérienne a permis d'établir que l'épaisseur cornéenne centrale (ECC), mesurée par OCT REVO NX, est en moyenne de 523,55 μm , une valeur légèrement inférieure à celles observées dans les populations caucasiennes. Elle confirme ainsi l'existence de variations ethniques et géographiques importantes, justifiant la nécessité de références biométriques adaptées localement. La comparaison avec la topographie cornéenne Pentacam a révélé une surestimation systématique de l'ECC par cette dernière, en particulier chez les patients atteints de kératocône. Ces écarts soulignent la supériorité de l'OCT, plus précis pour détecter les amincissements focaux, et confirment son intérêt dans le dépistage et le suivi du kératocône. La mesure manuelle de l'épaisseur épithéliale, imposée par l'absence de cartographie automatisée sur l'OCT, constitue une limite majeure. Elle introduit des biais importants et remet en question la fiabilité des données recueillies dans cette partie de l'étude.

Bibliographie :

- [1] Lemosson C, Renard G. Anatomie et histologie de l'oeil. Edition masson 1982 p. 102-103.
- [2] Rocher N. Anatomie et physiologie de l'oeil humain. Soins 2010 ; p744
- [3] Borderie V, Touzeau D, Bourcier T, Laroche L. Physiologie de la cornée. EMC Ophtalmologie 2005 ; p103-117.
- [4] Bernard B, Thérèse T. Contactologie. 2ème édition. La voisier. P22
- [5] N.B. CASSETTE Nicolas Docteur Damien Gatinel – Ophtalmologie sur : <https://www.gatinel.com/> [6] Krachmer JH, Feder RS, Belin MW. Keratoconus and related non-inflammatory corneal thinning disorders. Surv Ophthalmol. [1984].
- [7] Kennedy RH, Bourne WM, Dyer JA. A 48-year clinical and epidemiologic study of keratoconus. Am J Ophthalmol. [1986].
- [8] M. Sridhar et al. "Pellucid Marginal Corneal Degeneration", Ophthalmology [2004]
- [9] L. Sandy [2012] Contactologie : Le kératocône chez l'enfant, Edition : European contact lens and ocular surface congress 42nd ECLSO.
- [10] S. Luigina & al. Correction du kératocône avec des lentilles RPG, Edition : centre de recherche des lentilles de contact école d'optométrie, Université de Waterloo, Canada.
- [11] N. Mesplié, & al [2011] Dépistage aberrométrique du kératocône, Edition : ELSEVIER MASSON. [12] L. Eschmann & al. [2010] Le Kératocône, Une brochure d'information pour les praticiens et les personnes concernées.
- [13] OCULUS Optikgeräte GmbH. (2022). Pentacam® / Pentacam® HR – Mode d'emploi (Rév. 02). Disponible sur : <https://documents.oculus.de/G-70700-0807-FR-02.pdf>
- [14] OPTOPOL Technology. (s.d.). Brochure REVO NX 130. Disponible sur : <https://ophtalmologie.essishop.fr/images/uploaded/Brochures/Optopol%20-%20brochure%20REVO%20NX%20130.pdf>
- [15] Topcon Healthcare. (2021). DRI OCT Triton™ Series – Brochure. <https://topconhealthcare.eu/uploads/media/60cb7b98ea585/topcon-triton-brochure-rev5-27-05-21-e325-lores.pdf>
- [16] Dr Michaël Assouline, Comment faire le diagnostic du kératocône ? Ophtalmologie Paris. Sur : <https://ophtalmologie-paris.pro/qu-est-ce-que-le-keratocone/comment-faire-le-diagnostic-du-keratocone/>
- [17] Y Pouliquen et al. Degenerescence pellucide marginale de la cornée ou kératocône marginale. J Français D'ophtalmol. [1980].

- [18] F Malet, « Les lentilles de contact ». Rapport SFO Edition Elsevier Masson 2009.
- [19] P Tzelikis et al. Management of pellucid marginal corneal degeneration. *Cornea*. [2005].
- [20] J François et al. Dégénérescence marginale pellucide de la cornée. *Ophthalmological*. 1968.
- [21] Pierre FOURNIE et David TOUBOUL. Protocole National de Diagnostic et de Soins : Kératocône [2021], Centre de Référence National Kératocône pdf.
- [22] Reinstein DZ, Gobbe M, Archer TJ, Silverman RH, Coleman DJ. Epithelial, stromal, and total corneal thickness in the normal human eye. *J Refract Surg*. 2008 Apr;24(4):571-9.
- [23] Rabinowitz YS. Keratoconus. *Surv Ophthalmol*. 1998 Jan-Feb;42(4):297-319.
- [24] Kennedy RH, Bourne WM, Dyer JA. A 48-year clinical and epidemiologic study of keratoconus. *Am J Ophthalmol*. 1986 Mar 15;101(3):267–273.
- [25] Godefrooij DA, de Wit GA, Uiterwaal CS, Imhof SM, Wisse RP. Incidence and Prevalence of Keratoconus: A Nationwide Registration Study in the Netherlands. *Am J Ophthalmol*. 2017 Oct; 175:169-172.
- [26] Sherry DR, Kaye SB. Keratoconus in association with systemic diseases. *Br J Ophthalmol*. 1989;73(2):120.
- [27] Mountford J, Ruston D. Contact lens-induced corneal warpage: a review. *Clin Exp Optom*. 2005 Jan;88(1):12–15.
- [28] Kumar S, et al. Keratoconus and floppy eyelid syndrome: a significant association. *Cornea*. 2007 Oct;26(9):975–978.
- [29] McMonnies CW. Abnormal rubbing and keratoconus. *Eye Contact Lens*. 2007 May;33(5):265–271.
- [30] Street DA, ET al. Prevalence of keratoconus in persons with Down syndrome, EhlersDanlos syndrome, Marfan syndrome, and atopic dermatitis. *Ophthalmology*. 1990 Feb;97(2):161–165.
- [31] Wang Y, Rabinowitz YS, Rotter JI, Yang H. Genetic epidemiological study of keratoconus: evidence for major gene determination. *Am J Med Genet*. 2000;93(5):403–409.
- [32] Klyce SD, Wilson SE. Pachymetry-based classification of keratoconus severity. *Cornea*. 2015;34(5):451-5
- [33] Belin MW, Khachikian SS. Keratoconus morphology and classification. *Curr Opin Ophthalmol*. 2010;21(4):232-7.
- [34] Belin MW, Duncan JK. Keratoconus: the ABCD grading system. *Klin Monbl Augenheilkd*. 2016 Jul ;233(7) :701-7.

- [35] Eliasy A, Chen K-J, Vinciguerra R, et al. "Determination of Corneal Biomechanical Behavior in-vivo for Healthy Eyes Using CorVis ST Tonometry: Stress-Strain Index." *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 2019.
- [36] Valbon BF, et al. "The Role of Corneal Biomechanics for the Evaluation of Ectasia Patients." *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020.
- [37] Remond, M., & Monin, C. (2014). *Physiologie de l'œil et bases de l'examen ophtalmologique* (4e éd.). Paris : Masson.
- [38] Topographie cornéenne, Damien Gatinel, 2014, Elsevier Masson, VG Librairies sur : <https://www.vg-librairies.fr/specialites-medicales/2395-topographie-corneene.html>
- [39] Topographie cornéenne. Analyser forme de la cornée à Toulouse ». Sur : <https://www.centreophtalmologiejeanjaures.fr/centre-ophtalmologie-jean-jaurestoulouse/plateau-technique-ophtalmologie/topographie-corneenne-toulouse.html>
- [40] Rampersad N, Hansraj R. Distribution of corneal thickness measured using optical coherence tomography in South African young adults. *Afr Vision Eye Health*. 2019;78(1): a467.doi: 10.4102/aveh. v78i1.467
- [41] « Tomographie en Cohérence Optique (OCT) Qu'est-ce que c'est ? » sur : <https://hugobourdon.com/examens/oct/>
- [42] B. Levinson, F. Woreta, et K. Riaz, *Clinical Atlas of Anterior Segment OCT: Ocular Coherence Tomography - E-Book*. Elsevier Health Sciences, 2024.
- [43] M. Baykara, B. Akova, et M. Ö. Kırıştioğlu, *Anterior Segment Optical Coherence Tomography: A Clinically Oriented Atlas*. Elsevier, 2024.
- [44] Toker E, et al. Comparison of central corneal thickness measurements with four different new devices and ultrasound pachymetry. *Turk J Ophthalmol*. 2021 ;51(1) :17–22. Doi : 10.4274/tjo.galenos.2021.22465
- [45] Gokhale NS, et al. Comparison of corneal thickness measurements using Pentacam and RTVue spectral-domain OCT. *J Refract Surg*. 2018;34(3):196–200. doi:10.3928/1081597X20180301-09 [46] Zhang, Y., Chen, S., Li, Y., Wang, X., Yang, L., & Yang, Y. (2021). Dissecting the profile of corneal thickness with keratoconus progression based on anterior segment optical coherence tomography. *Frontiers in Neuroscience*, 15, 692561. <https://doi.org/10.3389/fnins.2021.692561>