



Royaume du Maroc المملكة المغربية

كلية الطب والصيدلة  
+٠٢٤٧٠١٠١ +٠١٤٤٤٤٤٤ + ٨ +٠٠٠٠٠٠٠٠  
FACULTÉ DE MÉDECINE ET DE PHARMACIE

**COMPARAISON DES MESURES CORNEENNES ENTRE LE PENTACAM®  
ET L'ORBSCAN® CHEZ LES YEUX KERATOCONIQUES :  
A PROPOS DE 72 YEUX**

MEMOIRE PRESENTE PAR :

Docteur Intissar EL JAZOULI  
Né le 30/10/1989 à TAOUNATE

MEMOIRE DE FIN DE SPECIALITE

**OPTION : OPHTALMOLOGIE**

Sous la direction de :

**Professeur BENATIYA ANDALOUSSI Idriss**

Session: juillet 2020

# Table des matières

Introduction :	3
Partie théorique:	9
A Rappels anatomo–physiologiques :	10
I Anatomie de la cornée :	10
II Physiologie de la cornée : propriétés physiques	17
III Géométrie de la cornée :(4)	19
B Kératocône :	22
I Définition et historique :	22
II Physiopathologie :	24
III Epidémiologie :	25
IV Facteurs de risque :	26
2 Frottement oculaire chronique :	26
V Diagnostic clinique et topographique :	32
VI Classifications du kératocône :	42
VII Diagnostic différentiel :	46
VIII Histologie :	48
IX Evolution :	50
X Prise en charge :	50
Partie pratique :	60
A Matériels et méthodes :	61
I Description de l'étude :	61
II Fiche d'exploitation :	63
B Résultats :	67

I	l'Age :	67
II	Le sexe :	67
III	Les antécédents ophtalmologiques :	68
IV	Caractéristiques du kératocône :	69
V	Profil réfractif :	70
VI	Résultats obtenus par le Pentacam :	70
VII	Résultats obtenus par l'Orbscan :	71
VIII	Comparaison des mesures obtenues par le Pentacam et l'Orbscan :	73
IX	TABLEAU RECAPITULATIF :	81
C	Discussion :	82
I	Topographie par caméra rotative Scheimpflug 'Pentacam Oculus' dans le kératocône:	83
II	Topographie par balayage d'une fente lumineuse 'Orbscan' dans le kératocône	89
III	Comparaison des résultats du 'Pentacam' et de l'Orbscan' dans les yeux keratoconiques :	92
	Conclusion :	101
	Références :	103

## Liste des figures :

Figure 1 : Anatomie macroscopique de l'œil. ....	10
Figure 2 : Mensurations d'une cornée normale. ....	11
Figure 3 : schématisation du stroma cornéen (3). ....	14
Figure 4 : Représentation schématique des méridiens cornéens(6).....	19
<i>Figure 5 : ellipse prolate</i> .....	20
Figure 6 : ellipse oblate.....	20
Figure 7 : asymétrie cornéenne .....	21
Figure 8 : répartition des âges de découverte de kératocône (41).....	30
Figure 9 : Signe de munson (49).....	33
Figure 10 : Visibilité anormale des nerfs cornéens. ....	35
Figure 11 : Stries de Vogt.....	35
Figure 12: Cicatrices superficielles réticulaires par rupture de la membrane Bowman. .....	36
Figure 13 : Hydrops cornéen avec œdème cornéen aigu.....	36
Figure 14 : Appareil de topographie cornéenne Pentacam de notre service.....	62
Figure 15 : Appareil de topographie cornéenne Orbscan de notre service.....	63
Figure 16 : Répartition des patients en fonction du sexe.....	67
Figure 17 : Répartition des antécédents ophtalmologiques chez nos patients :.....	68
Figure 18 : Type de kératocône chez nos patients. ....	69

Figure 19 : Tracé de Bland et Altman comparant K1 entre le Pentacam et Orbscan .	73
Figure 20 : Tracé de Bland et Altman comparant K2 entre le Pentacam et Orbscan .	74
Figure 21 : Tracé Bland et Altman comparant les mesures de Kmax entre le Pentacam et Orbscan .....	75
Figure 22 : Tracé Bland et Altman comparant les mesures d'astigmatisme entre Pentacam et Orbscan. ....	76
Figure 23 : Tracé Bland et Altman comparant les mesures de pachymétrie centrale entre les deux appareils.....	77
Figure 24 :Tracé de Bland et Altman comparant les mesures de pachymétrie minimale entre les deux appareils.....	78
Figure 25 : Tracé de Bland et Altman comparant les mesures de l'élévation antérieure entre les deux appareils.....	79
Figure 26 : Tracé de Bland et Altman comparant les mesures de l'élévation postérieure entre le Pentacam et l'Orbscan.....	80

## Liste des tableaux :

Tableau 1 : : classification de krumeich. Un seul critère est suffisant pour appartenir à un stade.....	43
Tableau 2 : Tableau récapitulatif des différents protocoles du cross Linking du collagène cornéen.....	52
<i>Tableau 3 : Critères adoptés pour évaluer la progression d'un kératocône.....</i>	<i>53</i>
Tableau 4 : Tableau récapitulatif des résultats du Pentacam et de l'Orbscan .....	81
<i>Tableau 5 : Récapitulatif de toutes les études confirmant l'efficacité des indices keratoconiques dans la détection du kératocône frustré.....</i>	<i>87</i>
Tableau 6 : tableau comparative de K1 entre notre étude et les études de la littérature. .....	94
Tableau 7 : tableau comparative de K2 entre notre étude et les études de la littérature. .....	94
Tableau 8 : tableau comparative des mesures de la pachymétrie centrale entre les différentes études.....	97
Tableau 9: tableau comparative des mesures de la pachymétrie minimale entre les différentes études.....	98
Tableau 10 : Tableau comparatif des mesures de l'élévation postérieure entre les différentes études.....	100

# INTRODUCTION

Le kératocône est une pathologie dégénérative non inflammatoire de la cornée caractérisée par un raidissement et un amincissement cornéen apparaissant pendant l'adolescence. 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 aux stades avancés. L'évolution de cette pathologie reste imprévisible, l'amincissement progressif de la cornée se fait d'une cinétique variable avec possibilité de survenue de complications.

Il existe plusieurs formes cliniques, le kératocône avéré ne posant pas de problème diagnostique, il est suspecté cliniquement et confirmé par une vidéotopographie cornéenne. Or, un kératocône dit 'frustre' ou 'infraclinique' échappe parfois aux critères diagnostiques standards du kératocône. Sa recherche obsessionnelle après une topographie cornéenne 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.

L'analyse de ces données permet non seulement le diagnostic du kératocône mais aussi, la surveillance de son évolutivité et le choix de la prise en charge thérapeutique, physique, optique et même chirurgicale de cette pathologie ectatique.

Parmi les topographes d'élévation les plus modernes, on trouve le Pentacam et l'Orbscan avec différentes techniques de mesures. L'Orbscan utilise la technologie du disque à fente et du disque Placido alors que le Pentacam se base sur une caméra

Scheimpflug rotative. Ces deux appareils font partie des principales explorations avant toute chirurgie réfractive du fait de leur meilleure pouvoir de détection des formes infracliniques de kératocône et des candidats dits à risque de complications (ectasie post chirurgie).

Le but de notre étude est de comparer les différentes mesures cornéennes entre l'Orbscan II (Bausch & Lomb) et le Pentacam (Oculus) chez les yeux keratoconiques, et d'étudier l'interchangeabilité des mesures entre ces deux appareils.

# PARTIE THEORIQUE

## A Rappels anatomo-physiologiques :

### I Anatomie de la cornée :

#### 1 Anatomie macroscopique (figure 1) :

La cornée est le principal élément réfractif de l'œil. Elle couvre environ un cinquième de sa circonférence. Elle est avasculaire, transparente et enchâssée dans l'orifice antérieur de la sclérotique. Elle est formée de plusieurs types cellulaires d'origine embryologique différente. Elle constitue la partie antérieure du globe oculaire.

Sa face antérieure est convexe, elle est exposée à l'environnement externe par l'intermédiaire du film lacrymal. Elle est protégée par les paupières qui la recouvrent partiellement ou totalement.

Sa face postérieure concave est baignée par l'humeur aqueuse et forme la paroi antérieure de la chambre antérieure de l'œil. En périphérie se trouve le limbe, tissu très vascularisé, réservoir en cellules à haute capacité proliférative.

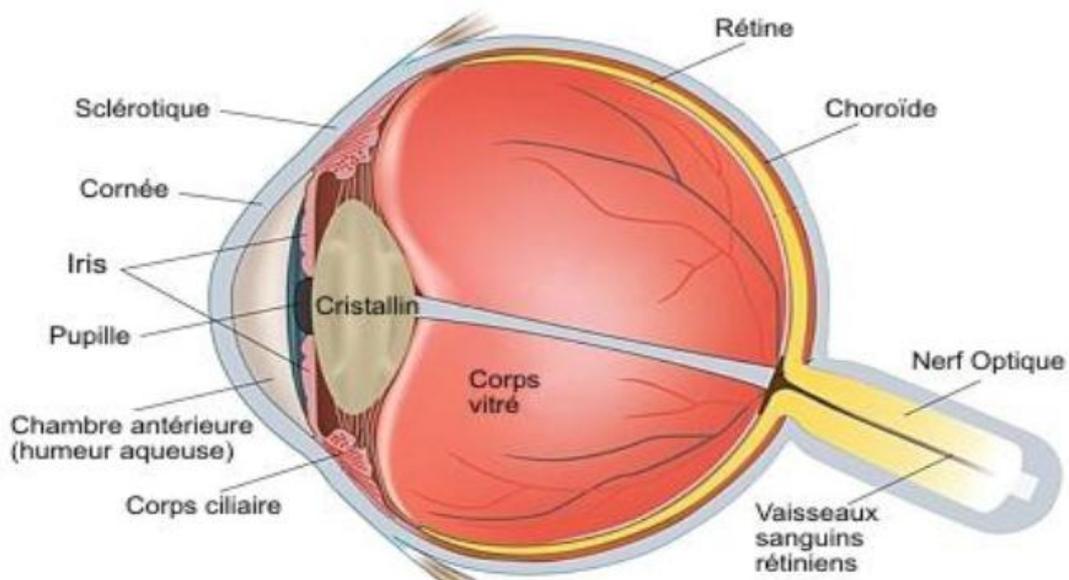


Figure 1 : Anatomie macroscopique de l'œil.

Son diamètre moyen est de 11,5mm, avec un diamètre horizontal de 11,7mm, plus important que le diamètre vertical qui est de 10,6mm (figure 2).

L'épaisseur de la cornée augmente du centre (520  $\mu\text{m}$  en moyenne) vers la périphérie pour atteindre 700  $\mu\text{m}$  au limbe.

La cornée répond en avant au film lacrymal et aux paupières, en arrière à la chambre antérieure. En périphérie, elle répond au limbe cornéo-scléral

La forme de la cornée est prolate c'est-à-dire bombé au centre et plate en périphérie ce qui confère à la cornée un système optique asphérique (1).

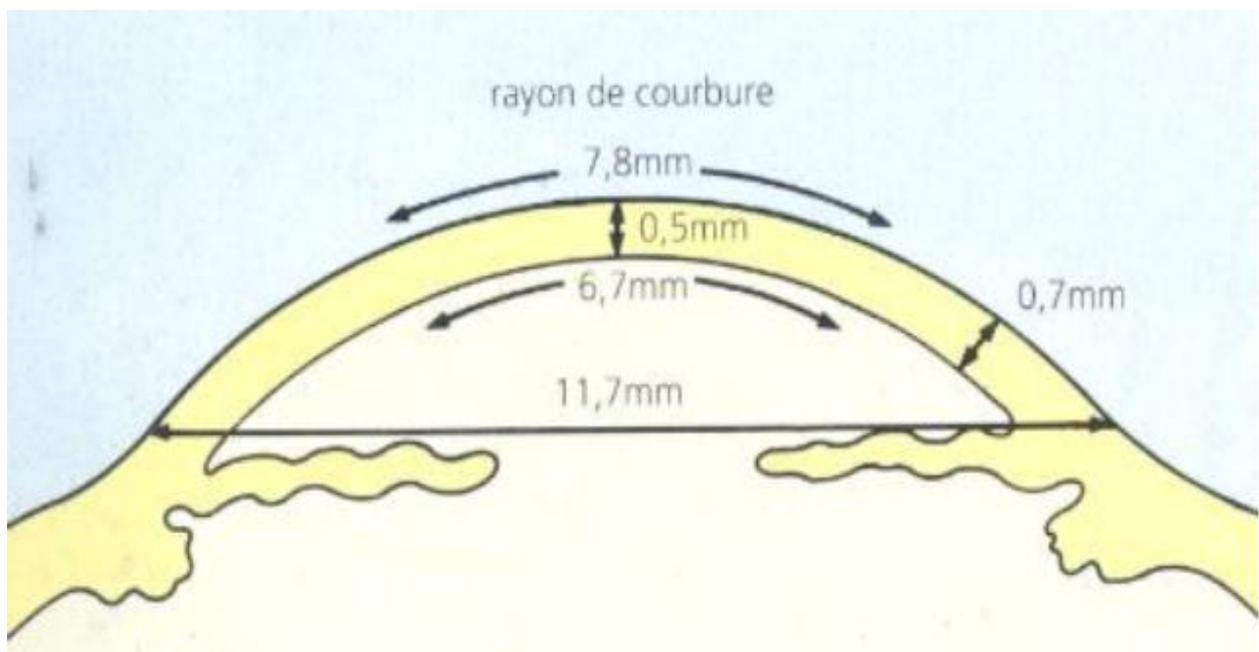


Figure 2 : Mensurations d'une cornée normale.

## 2 Anatomie microscopique (2)

La cornée est classiquement décrite en cinq couches, alors que son rôle réfractif impose d'inclure le film lacrymal dans sa structure normale

### a Le film lacrymal pré-cornéen :

Mesure 7 à 8 micromètres d'épaisseur, composé d'une couche profonde mucinique, intermédiaire aqueuse et externe lipidique. Il tapisse la surface externe cornéenne, la protège contre la dessiccation et participe à la régularité de l'épithélium.

### b L'épithélium cornéen :

C'est un épithélium pavimenteux, poly stratifié (7 à 8 couches), non kératinisé, d'environ 30 à 50 microns d'épaisseur soit 10 % de l'épaisseur cornéenne totale, qu'on peut décrire en 3 couches :

- Assise superficielle, faite de 2 ou 3 couches cellulaires d'autant plus minces qu'elles sont antérieures.
- Assise intermédiaire : 2 à 3 couches cellulaires.
- Assise basale unistratifiée, composée de cellules cubiques reposant sur une membrane basale adhérant fortement à la membrane de Bowman par des microfibrilles d'ancrage (1).

### c Membrane de bowman :

C'est une couche composée de fibres de collagènes réparties dans la substance fondamentale. Elle mesure de 8  $\mu\text{m}$  à 10  $\mu\text{m}$  d'épaisseur. Elle est acellulaire, à l'exception de quelques expansions des cellules de Schwann entourant des terminaisons nerveuses qui rejoignent l'épithélium. Cette couche est synthétisée par les cellules basales de l'épithélium au cours de la vie embryonnaire et n'est pas régénérée au cours de la vie. Toute blessure de celle-ci est définitive et entraîne des opacités.

Des ruptures de la couche de Bowman peuvent s'observer dans le kératocône et se traduisent par des opacités linéaires. La destruction de la couche de Bowman lors de la photokératectomie réfractive de surface peut participer à l'apparition d'un voile sous-épithélial encore appelé haze cornéen.

### d Stroma :

Représente la majeure partie de l'épaisseur cornéenne, soit environ 450  $\mu\text{m}$ , avasculaire, pauci-cellulaire avec moins de 2 ou 3 % du volume en cellules. Il est composé de lamelles de collagène entre lesquelles s'intercalent des fibrocytes cornéens (ou kératocytes), et de la substance fondamentale. On retrouve également des cellules de Schwann, des lymphocytes B et T, des cellules mononuclées et des cellules de Langerhans. Le collagène type I est prédominant (75%) et accessoirement de collagène type V et VI. Le diamètre constant de 35 nm et l'espacement constant de 41 nm des fibrilles de collagène, à l'intérieur des fibres de collagène, ainsi que l'arrangement des fibres en lamelles parallèles entrelacées et reliées par des ponts inter lamellaires, sont indispensables à la transparence cornéenne (figure3).

C'est le collagène du stroma qui assure l'essentiel de la résistance biomécanique de la cornée, maintenant sa forme contre les forces qui s'exercent sur elle (pression intraoculaire en arrière et paupières et pression atmosphérique en avant)

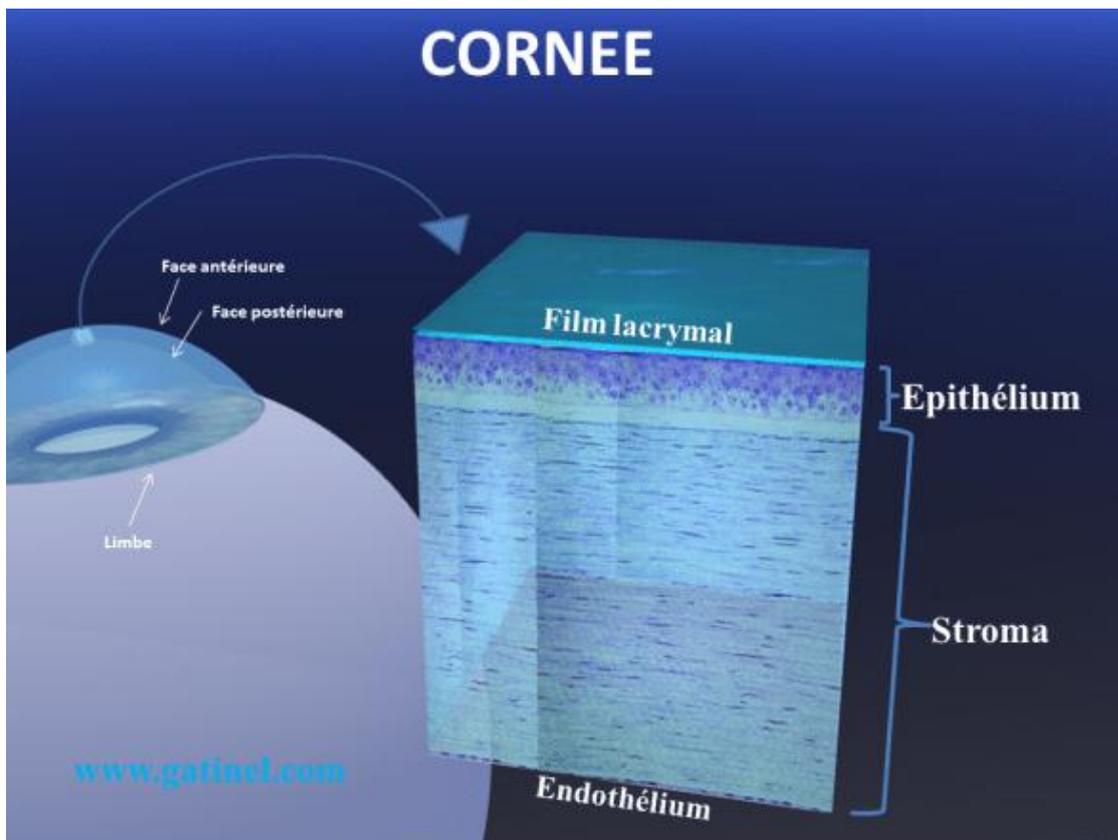


Figure 3 : schématisation du stroma cornéen (3).

#### e Couche de DUA :

Encore mal connue, cette couche a été découverte en 2013 par le Professeur Harminder Dua (Université de Nottingham), située entre le stroma et la membrane de Descemet d'une épaisseur de 15 microns elle est extrêmement résistante. Elle est constituée de lamelles du collagène, qui se prolongent en dehors de la cornée pour se continuer avec les mailles trabéculaires (4).

#### f Membrane de Descmet :

C'est une membrane amorphe, élastique et résistante, faite de fibrilles de collagène de petit diamètre réparties au sein d'une matrice glycoprotéique. Elle mesure environ 10  $\mu\text{m}$ , son épaisseur augmente avec l'âge et dans certaines pathologies.

### g Endothélium :

Il s'agit de la couche la plus postérieure de la cornée ; elle est en contact avec l'humeur aqueuse en arrière. Il est constitué d'une monocouche de 5µm d'épaisseur. Les cellules endothéliales sont uniformes hexagonales plates, régulières. Elles sont unies entre elles par des jonctions serrées à la partie apicale de l'espace intercellulaire et par des jonctions communicantes au niveau des membranes latérales. Cette régularité en « nid-d'abeilles » est caractéristique. La densité cellulaire normale chez un jeune est de 3 500 cellules/mm<sup>2</sup>. Elle est facile à déterminer grâce à la microscopie spéculaire. Une diminution du nombre de cellules est irréversible.(2)

### h Limbe sclérocornéen :

Le limbe est la zone de transition entre la cornée transparente et la sclère opaque. Il joue un rôle fondamental dans la nutrition et le métabolisme de la cornée périphérique grâce à la richesse de sa vascularisation.

Histologiquement.

Il se distingue par différents critères :

- L'épithélium s'épaissit au limbe pour atteindre environ 10 couches de cellules.
- Les fibres de collagène du stroma perdent leur régularité.
- Des vaisseaux sanguins apparaissent dans le stroma.
- La couche de Bowman et la membrane de Descemet disparaissent à son niveau.

### 3 Innervation de la cornée :

#### a Sensitive :

La cornée est le tissu le plus richement innervé. Elle reçoit une innervation sensitive à partir des nerfs ciliaires, branches terminales de la division ophtalmique de la cinquième paire crânienne.

Les plexis nerveux sous épithéliaux se situent sous la membrane de Bowman puis la traversent et perdent leur gaine de Schwann. Leurs terminaisons atteignent toutes les couches de l'épithélium mais aussi le stroma au contact des kératocytes.

#### b Sympathique- Adrénargique :

Elle est moins bien connue. Elle se fait à partir du ganglion cervical supérieur homolatéral. Les fibres s'intègrent aux nerfs ciliaires courts et longs.

## II Physiologie de la cornée : propriétés physiques

### 1 Rôle mécanique :

La cornée protège l'œil contre les agents extérieurs et intervient dans la résistance à la pression intraoculaire.(2)

### 2 Fonction optique :

#### a 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 interfibrillaire.

#### b 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.

#### c Réflexion de la lumière :

La cornée se comporte comme un miroir convexe. Une source lumineuse placée à 50 cm de la cornée donne une première image réfléchi par la face antérieure de la cornée, située à 6mm en arrière de celle-ci, et une deuxième de plus petite taille, réfléchi par la face postérieure (image de Purkinje).

## d La transparence de la cornée :

La transparence cornéenne est due à plusieurs facteurs : facteurs de transparence :

### ◆ Anatomiques :

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 hydrique. On dit qu'elle est en état de déturgescence:

- L'action de l'épithélium est minime, il réduit l'évaporation et diminue l'absorption des fluides à partir des larmes.
- L'endothélium, par contre, joue un rôle très important. Il fonctionne comme une pompe active grâce à la pompe  $\text{Na}^+/\text{K}^+$  ATP ase. Cette dernière expulse le  $\text{Na}^+$  dans l'humeur aqueuse et libère le  $\text{K}^+$  dans la cellule endothéliale, ce qui crée un gradient osmotique assurant la déturgescence du stroma puisque l'eau suit les mouvements du  $\text{Na}^+$ .

Les mouvements ioniques génèrent aussi une différence de potentiel entre le milieu intra et extracellulaire endothélial. Ceux de l'ion bicarbonates sont responsables de la polarisation négative de la face postérieure de l'endothélium. Ce qui intervient aussi dans le phénomène de déturgescence (2).

### III Géométrie de la cornée : (5)

La cornée constitue le support anatomique de la lentille de contact. Sa géométrie influence en grande partie les règles de l'adaptation.

Le méridien cornéen est une ligne courbe formée à l'intersection de la surface de la cornée par un plan antéropostérieur passant par son apex et perpendiculaire à son équateur (figure 4).

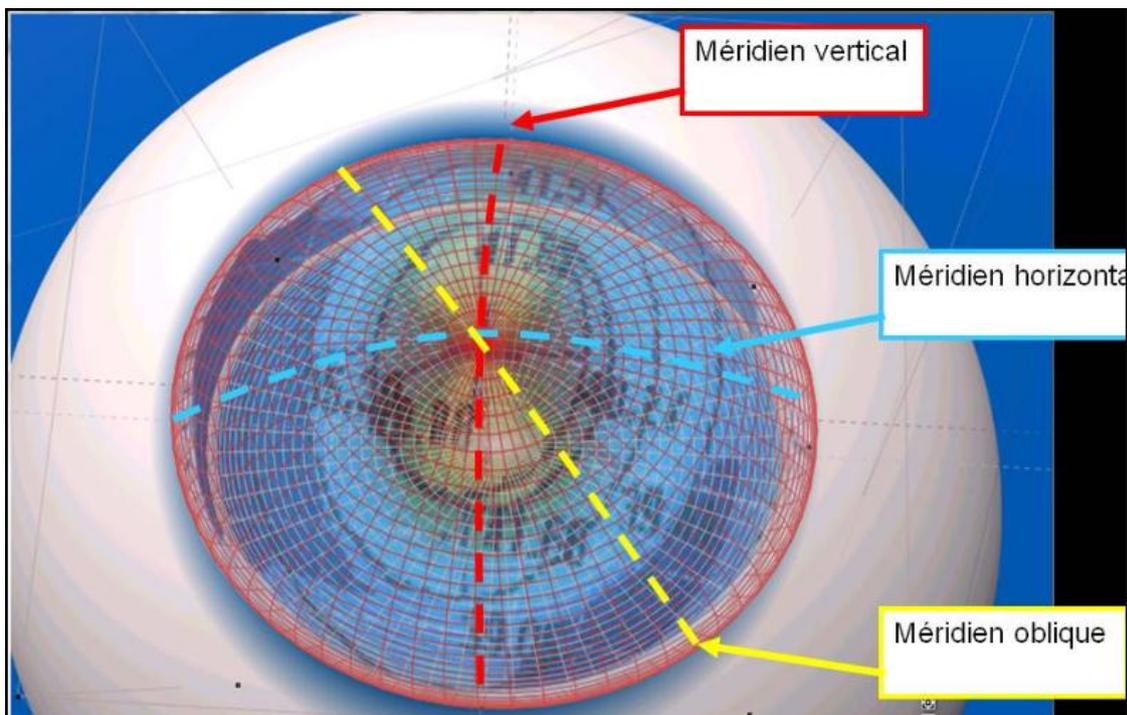


Figure 4 : Représentation schématique des méridiens cornéens(6).

## 1 Propriétés géométriques de la cornée antérieure :

### ♦ L'asphéricité :

Il existe 2 types de cornée :

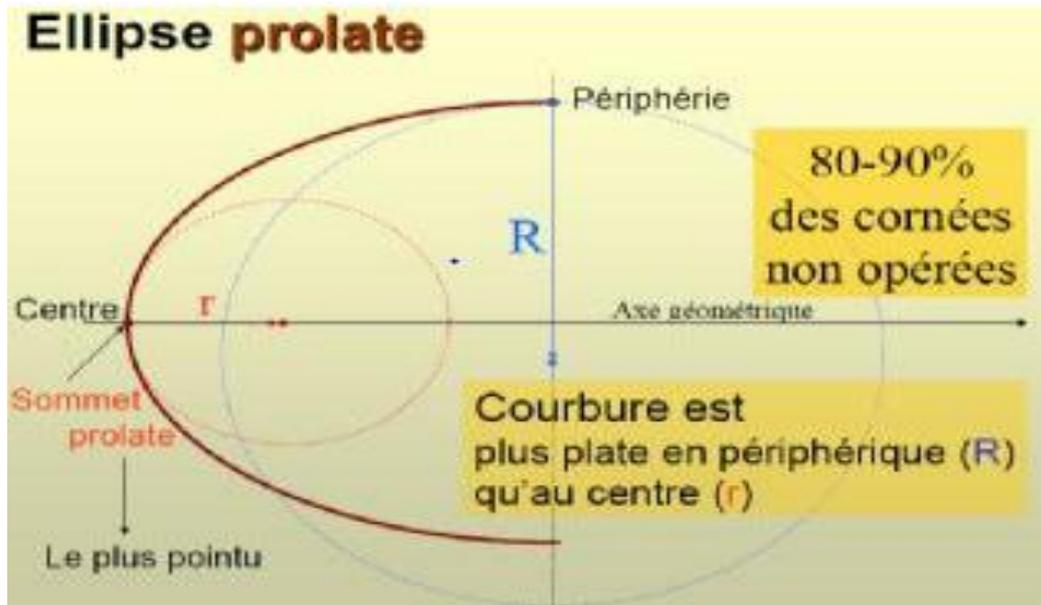


Figure 5 : ellipse prolate

- Une cornée prolate: où la courbure est plus plate en périphérie (R) qu'au centre (r) ( $R > r$ ). C'est le cas des cornées régulières non opérées ainsi que celui des cornées hyper-prolates (exemple du kératocône) (figure 5)

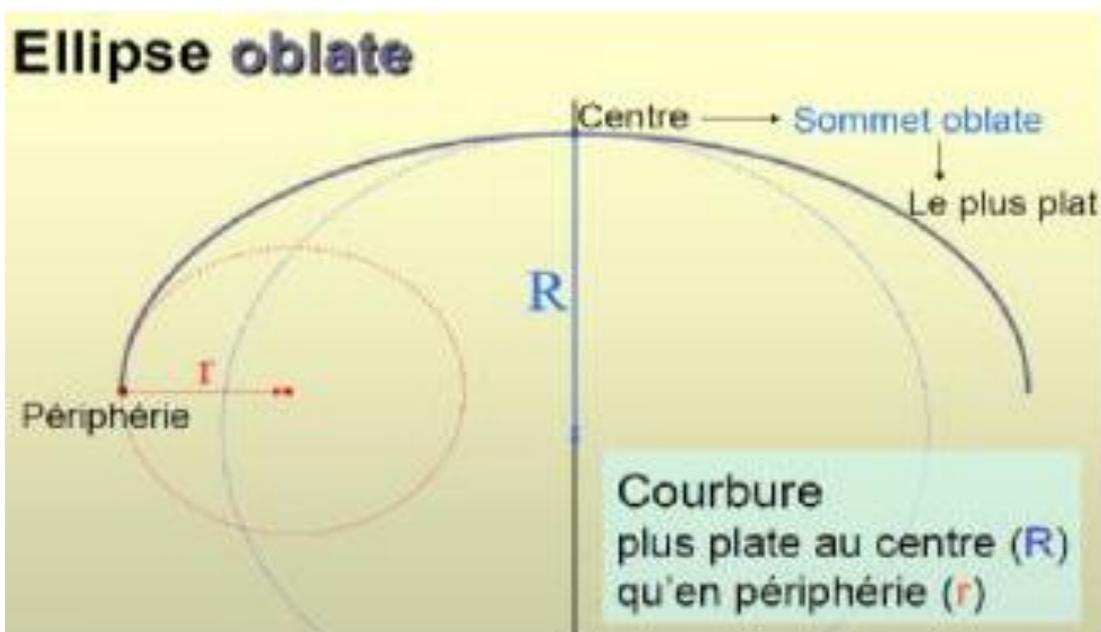


Figure 6 : ellipse oblate

- Une cornée oblate: où la courbure est plus plate au centre (R) qu'en périphérie (r). C'est le cas des cornées ayant subi des chirurgies ablatives (Figure 6)

♦ **La toricité apicale :**

La toricité du sommet cornéen traduit la variation de la courbure apicale de chacun des méridiens cornéens. Il existe une toricité régulière cornéenne physiologique : le plus souvent le rayon de courbure vertical est légèrement inférieur au rayon de courbure horizontal.

♦ **L'asymétrie :**

L'asymétrie est caractérisée par un axe particulier qui délimite les hémiméridiens opposés dont la différence de courbure est la plus importante.

La présence d'une asymétrie marquée doit faire suspecter une pathologie dégénérative de type kératocône ou dégénérescence marginale pellucide (figure 7)

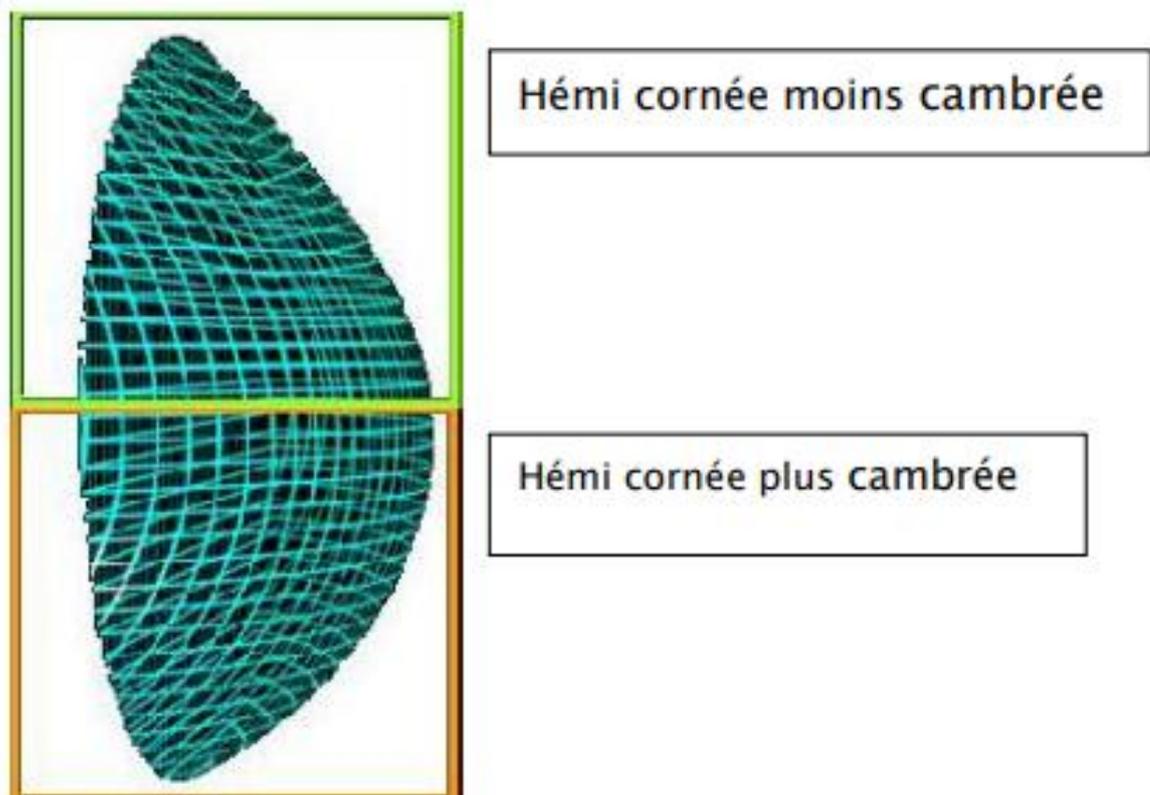


Figure 7 : asymétrie cornéenne

## **B Kératocône :**

### **I Définition et historique :**

#### **1 Définition :**

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 de la fréquente de survenue d'opacités cornéennes.

#### **2 Historique (7) (8) :**

La première description clinique de cette affection date du début du XVIIIème siècle par Duddel en 1729, qui a décrit l'observation d'un adolescent dont les cornées faisaient fortement saillie en avant et qui en outre était porteur d'un nystagmus.

En 1748, l'ophtalmologiste allemand Mauchard a fourni une description du kératocône sous le nom de « staphyloma diaphanum ».

Une description claire de la maladie n'a été donnée qu'en 1854, lorsque le britannique Nottingham a rapporté le cas de cornée sphérique en décrivant plusieurs caractéristiques classiques de la maladie.

En 1859, le chirurgien britannique Bowman a utilisé un ophtalmoscope pour le diagnostic du kératocône et a décrit comment incliner le miroir de l'instrument de manière à mieux distinguer la forme conique de la cornée. Bowman a également essayé de restaurer la vision en tirant sur l'iris à l'aide d'un fin crochet inséré à travers la cornée et en tirant sur la pupille selon une fente sténopéïque verticale. Il a rapporté avoir obtenu un succès avec cette technique en restaurant la vision d'une patiente de 18 ans.

En 1869, lorsque le pionnier Suisse de l'ophtalmologie Johann Horner a rédigé une thèse intitulée « sur le traitement du kératocône », la maladie a déjà acquis sa dénomination actuelle. Le traitement à cette époque était une tentative pour reformer physiquement la cornée par cautérisation chimique via une solution de nitrate d'argent et l'application d'une pression.

L'idée de corriger le kératocône par une lentille de contact, dénommée « lunette de contact » à l'époque, revient à Fick en 1888 marquant le début de la contactologie. C'est le physicien Français Kalt qui a fabriqué par la suite le premier modèle des coquilles de verre qui ont amélioré la vision des patients en comprimant la cornée en une forme plus régulière.

Par la suite, le kératocône a fait l'objet de nombreux travaux dont ceux d'AMSLER.

## II Physiopathologie :

### 1 Théorie biomécanique

Des travaux qui reposent sur l'analyse de la cornée par diffraction aux rayons X suggèrent que le kératocône pourrait être lié à un glissement des fibres de collagène. Une altération de l'arrangement orthogonal des fibres de collagène pourrait contribuer à l'instabilité biomécanique du stroma cornéen. D'autres travaux, incriminent l'insertion des fibres de collagène dans la couche de Bowman.

Les prochaines avancées concevables pour obtenir des informations sur la biomécanique sont dans le champ de l'élastographie dynamique. L'ambition de ces technologies est de déterminer directement la valeur physique du module d'élasticité locale de la cornée à partir de la propagation d'ondes mécaniques dans la cornée. L'hypothèse biomécanique considère le désordre biomécanique comme étant le préalable, le plus souvent localisé, à un cercle vicieux qui induirait l'apparition progressive de l'ectasie cornéenne. Ce désordre impliquerait secondairement les variations de courbure, d'élévation et de pachymétrie.

### 2 Théorie biologique :

L'hypothèse biologique considérant le désordre biologique comme étant le « primum movens » à l'origine du déséquilibre biomécanique. Une première approche expérimentale consiste à incriminer certaines protéines dont le rôle physiologique laissait supposer qu'elles pouvaient être impliquées. 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.

Aucune donnée ne permet actuellement de privilégier une théorie plus que l'autre avec une probable intrication des mécanismes conduisant à l'expression phénotypique du kératocône.

### III Epidémiologie :

L'incidence du kératocône est estimée entre 50 et 230 pour 100 000

Habitants. La prévalence est estimée à 54,5 pour 100 000 soit environ 1/2 000 (9). L'étude de Wheeler et al.[6] reportait une estimation du nombre de patients atteints de kératocône avec une forme familiale d'environ 6 à 23 %. Wang et al. (10) 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.

La plus grande incidence a été rapportée au Liban par Waked et al (11)

dans une population de jeune étudiants et en Iran par Hashemi et al (12) qui atteint 3300/100000.

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 risque :**

### **1 Facteurs environnementaux :**

Il est communément admis que l'étiologie du kératocône est multifactorielle associant des facteurs environnementaux et génétiques (13). En plus, il semble qu'un facteur environnemental peut être essentiel pour déclencher la maladie chez les individus génétiquement prédisposés. Les facteurs environnementaux, qui ont été reconnues sont le frottement oculaire chronique, l'atopie et l'exposition aux UV, bien que la contribution de tous ces facteurs est actuellement inconnue (14). L'excès de l'un de ces facteurs environnementaux causent des dommages oxydatifs à la cornée keratoconiques en raison de son incapacité à éliminer les espèces réactives de l'oxygène «reactive oxygen species» (ROS), ce qui aboutit à un processus de dégradation puis à l'amincissement de la cornée (15).

### **2 Frottement oculaire chronique :**

Une association entre le frottement des yeux et le kératocône a longtemps été décrite et admise comme facteur de risque (16,17). Près de la moitié des patients ayant un kératocône se frottent les yeux, Il y a bien entendu des variations dans cette association, selon qu'il s'agit d'un frottement doux ou vigoureux (18) ou selon le temps de frottement : de 10 à 180 secondes en cas de kératocône, moins de 15 secondes au cours des conjonctivites allergiques ou infectieuses (19) et moins de 5 secondes chez les sujets normaux (16).

Des cas de kératocône asymétrique ont été rapportés dans lesquels l'œil le plus touché est celui qui a été frotté le plus vigoureusement (16,20), Coyle a rapporté un cas d'un garçon de 5 ans qui a découvert qu'il pouvait arrêter sa tachycardie en frottant vigoureusement son œil gauche (jusqu'à 20 minutes par jour) et qui a

développé un kératocône unilatéral à l'âge de 11 ans (20). Une série de cas confirment l'expression asymétrique de la maladie chez les patients qui frottent habituellement l'œil le plus touché (21) (20)

Les études cas-témoins fournissent la preuve la plus convaincante d'une association entre le kératocône et le frottement oculaire. La première était celle de Bawazeer et al. (17), qui a effectué une analyse de régression logistique incluant l'atopie et les antécédents familiaux de kératocône et a constaté que seul le frottement oculaire était significativement associé à la maladie, avec un ratio odds ratio (OR) de 3,98. Cela a été confirmé par d'autres études (22) (23).

Néanmoins, cette association n'est pas nécessairement causale. En effet, certains individus développent le kératocône sans aucune histoire de frottement oculaire. Il se peut que les habitudes de frottement anormaux commencent en même temps que le kératocône, lorsque les troubles visuels s'installent (24). Pourtant le frottement oculaire reste un facteur de risque au moins dans certaines formes tel que le kératocône génétiquement prédisposé (25).

Au cours du frottement oculaire chronique, ou lors du port de lentilles de contact rigides mal adaptées, il y a un traumatisme mécanique (15) (26).

Ces microtraumatismes de l'épithélium cornéens génèrent des niveaux élevés de médiateurs de l'inflammation, y compris l'IL-6, le TNF- $\alpha$  (27) et les métalloprotéinases (MMP-1 et MMP-13) sécrétées par l'épithélium et les cellules stromales (28). La libération de ces facteurs fait partie du processus qui mène au kératocône et sa progression. Les auteurs ont conclu que le frottement oculaire chronique, fréquents chez les patients kératoconiques, peut contribuer à la progression de la maladie par des niveaux élevés de ces protéases et des médiateurs de l'inflammation (29).

### 3 L'atopie :

L'atopie est une réaction d'hypersensibilité, qui comprend l'allergie, l'asthme et l'eczéma. L'association entre le kératocône et l'atopie est controversée. Cette association a été confirmée par de nombreux auteurs (30) (31), mais d'autres n'ont pas trouvé d'association statistiquement significative par rapport au groupe témoin (17) (32). Bawazeer et al. ont conclu que l'atopie n'a pas été significativement associée au kératocône mais au frottement oculaire. Ces auteurs ont suggéré que l'atopie était associée indirectement parce que les démangeaisons qu'elle induit conduit à un frottement oculaire. Kaya et al. (30) 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.

### 4 L'exposition solaire :

Les ultraviolets sont responsables de formation des espèces réactives de l'oxygène «reactive oxygen species» (ROS). Ces espèces entraînent, d'une manière directe ou indirecte, 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 (15). 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. Le kératocône est plus fréquemment retrouvé dans les pays ensoleillés par rapport aux pays non ensoleillés.

Une preuve supplémentaire provient des expériences animales dans lesquelles les souris exposées à la lumière UV ont présenté une dégénérescence du collagène stromal, un amincissement stromal avec une perte de kératocytes (33).

Néanmoins, ce facteur à lui seul ne permet pas d'expliquer la disparité constatée entre des populations d'origine différentes et vivant dans le même environnement; Tels que les personnes d'origine asiatique vivant en Angleterre chez qui la prévalence du kératocône est 4,4 à 7,5 fois plus élevée que la race blanche (34).

Le dommage oxydatif provoqué par les radiations UV associé à un facteur génétique précipite ou accélère probablement le processus de la maladie. Des recherches sont nécessaires pour élucider le rôle de l'exposition au soleil dans le kératocône, éventuellement sous forme d'une enquête cas-témoins à l'aide d'un questionnaire validé.

Cependant, il faut noter que les radiations UV peuvent avoir un effet bénéfique en induisant un Cross Linking du collagène cornéen atténuant ainsi le développement ou la progression de la maladie (35).

## **5 Autres facteurs environnementaux :**

Concernant la pollution, il a été démontré que le kératocône était plus fréquent dans le milieu urbain où le niveau de pollution est supérieur à celui du milieu rural (36).

Cependant, l'exposition à des neurotoxines telle que la nicotine sous forme de cigarette n'est pas un facteur de risque de kératocône (23) (37). En effet, le tabagisme peut être un facteur protecteur contre le kératocône, probablement par un effet Cross-Linking induit par les sous-produits de la fumée de la cigarette (38).

## 6 Facteurs socio-économiques :

### a L'âge :

Le kératocône apparaît habituellement entre les premières années de l'adolescence et l'âge adulte, rarement après l'âge de 35 ans (39). Dans une cohorte de 196 patients, l'âge moyen d'apparition était de 18 ans (10) et de 15.39 ans ( $\pm 3,95$ ) dans une autre étude (40). 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 ont montré que l'âge de survenue du kératocône était 4 à 5 ans plus précoce chez les asiatiques que chez les caucasiens (34) (41). D'autres travaux sur le kératocône pédiatrique ont démontré que la maladie survient à la fin de la première décennie ou au début de l'adolescence (42) (43), au-delà de 50 ans le pourcentage des patients atteints de kératocône est estimé faible, ce constat a été expliqué par la baisse de l'espérance de vie chez ces patients du fait des morbidités associées au kératocône (44) (figure 8).

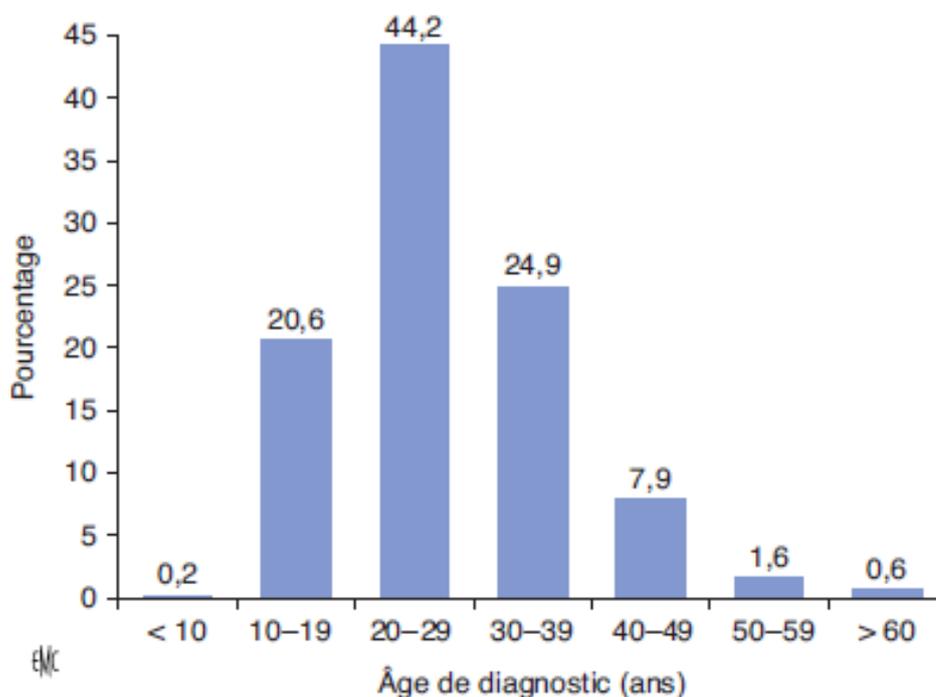


Figure 8 : répartition des âges de découverte de kératocône (41).

### **b L'origine géographique :**

Il est évident, en particulier au cours des dernières décennies, que la prévalence du kératocône n'est pas la même partout dans le monde. La faible prévalence se trouve au niveau de l'Europe (41) (34), le nord des Etats-Unis (9) et le Japon (45), elle est relativement élevée dans les pays du Moyen-Orient (12),(46), et l'Inde (37).

On n'a pas de statistique sur le Maghreb. 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.

### **c Le niveau intellectuel des parents :**

Une association entre le niveau de l'éducation parentale bas et le kératocône a été suggérée. Mais cette hypothèse n'est pas encore validée à nos jours.

## **7 Terrain génétique :**

Classiquement estimées à 10 % de l'ensemble des kératocônes, les formes familiales représenteraient en fait près de 40 % des cas. Plusieurs travaux suggèrent l'existence de formes infracliniques dites « frustes » parmi les apparentés de patients porteurs d'un kératocône (47), (48). Ces formes frustes pourraient correspondre en fait à des kératocônes d'expressivité faible uniquement détectables par la topographie cornéenne. Wang et al. (10) estiment ainsi 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.

## **8 Les maladies associées :**

Les associations les plus courantes sont la trisomie 21, l'amaurose congénitale de Leber, le prolapsus de la valve mitrale et les maladies du collagène (Ehlers-Danlos, Marfan, ostéogénèse imparfaite). Il est toutefois difficile d'établir un lien direct entre ces pathologies et le kératocône. En effet, la prévalence relativement importante du kératocône, sûrement encore sous-estimée, rend délicate l'interprétation de ces résultats (1).

## V Diagnostic clinique et topographique :

### 1 Diagnostic clinique :

#### a Circonstances de découverte :

Le début de la maladie survient habituellement au cours de la deuxième décennie de la vie, bien que certains cas puissent se voir bien avant. C'est une pathologie progressive qui se stabilise habituellement à la quatrième décade. Les signes fonctionnels sont peu spécifiques et rapportés comme un flou visuel, une photophobie, une impression de brouillard, de baisse d'acuité visuelle progressive surtout de loin, elle est plus ou moins importante et peut aller jusqu'à une cécité cornéenne puisqu'à des stades terminaux, l'acuité visuelle peut être inférieure à 1/20e. Les stades de déficience visuelle entre 1/20e et 4/10e sont extrêmement fréquents avec un retentissement important sur la vie sociale qui est dû à la déformation des images (1).

Il n'est pas rare non plus de porter le diagnostic lors d'un examen systématique, notamment lors d'un bilan préopératoire d'un patient demandeur de chirurgie réfractive. Dans ce cas, sans signes fonctionnels, l'examen vidéotopographique fera le diagnostic de ces formes frustes ou débutantes (1).

**b L'examen clinique :**

L'examen clinique sera contributif à un stade avancé de la maladie :

◆ **L'acuité visuelle :**

- Conservée au stade initial : où la correction optique est possible par verre correcteur.
- Elle peut atteindre 1/20 : l'AV n'est améliorable que par les lentilles rigides.

◆ **L'inspection : Le signe de Munson**

Dans le regard vers le bas : la saillie conique cornéenne se transmet à la paupière inférieure qui épouse cette forme atypique (figure 6) (49).



*Figure 9 : Signe de munson (49)*

♦ L'examen biomicroscopique : (45)

-En fente fine, trouvera l'amincissement cornéen et la saillie conique qui déforme la fente lumineuse, il est surtout riche d'enseignements dans l'analyse des opacités cornéennes qui peuvent éventuellement accompagner la protrusion. La fréquence de ces opacités augmente avec la sévérité du kératocône.

-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, à l'intérieur de l'épithélium cornéen (figure 10).

-Les nerfs cornéens peuvent être anormalement visibles chez ces patients jeunes. Cette visibilité est cependant inconstante et non spécifique (figure 11).

-Les stries de Vogt sont des lignes de contrainte, fines, alignées le long du méridien de plus grande courbure, elles sont profondément 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 (figure 12).

- Les lignes cicatricielles superficielles intéressent le stroma antérieur au sommet du cône. Elles ont souvent un aspect réticulaire et représentent des ruptures de la couche de Bowman comblées par du tissu cicatriciel (figure 13).

-Le kératocône aigu ou l'hydrops cornéen est la traduction d'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 (figure 14).

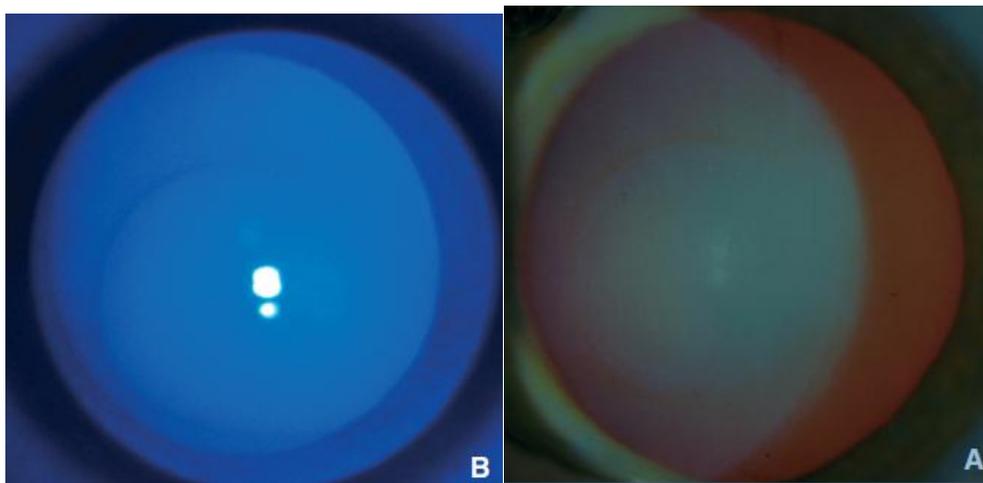


Figure 10 : Visibilité anormale des nerfs cornéens.

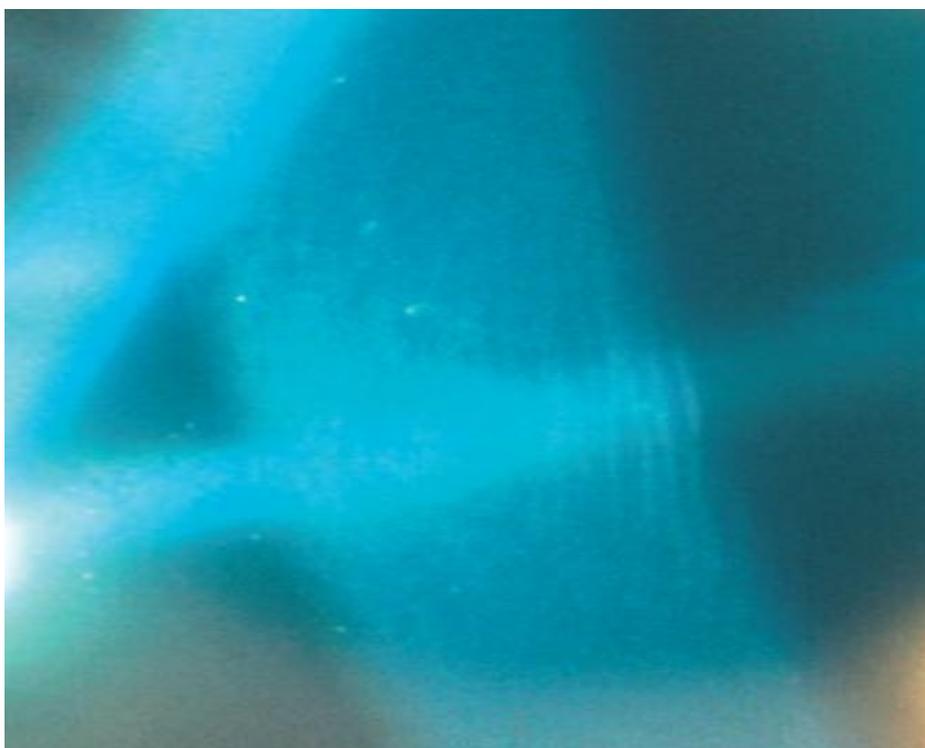


Figure 11 : Stries de Vogt

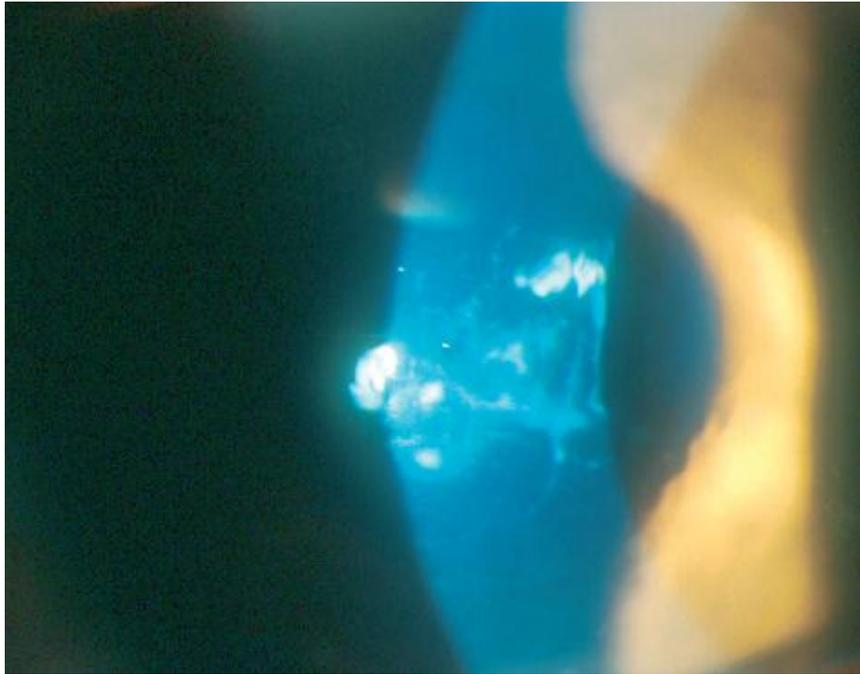


Figure 12: Cicatrices superficielles réticulaires par rupture de la membrane Bowman.



Figure 13 : Hydrops cornéen avec œdème cornéen aigu.

## 2 Diagnostic vidéotopographique :

Le diagnostic précoce d'un kératocône précoce infraclinique se base sur l'analyse de la forme de la cornée par la topographie cornéenne. Elle permet également de faire la surveillance et de détecter la 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 au praticien 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 grands types :

- ✓ Le disque de Placido : utilise des mires réfléchives concentriques.
- ✓ Les enregistreurs d'élévation/dépression : soit par balayage d'une fente lumineuse ou par imagerie Scheimpflug

### a La topographie spéculaire « réfléchive » :

La topographie spéculaire « réfléchive » est fondée sur le disque de Placido. Elle permet d'obtenir une cartographie de la courbure cornéenne en fonction de la distance mesurée entre des mires circulaires concentriques projetées sur la cornée. Les formes topographiques suspectes de kératocône sont (figure 12) :

- ✓ Un bombement cornéen inférieur
- ✓ Une angulation des deux héli-méridiens - celle-ci est à risque lorsqu'elle dépasse  $21^{\circ}$  (50) ,
- ✓ Une asymétrie des deux héli-méridiens et une asymétrie couplée à une angulation des deux héli-méridiens(51).

Rabinowitz et McDonnell ont été les premiers à proposer une méthode numérique de détection systématique du kératocône(52). Cette méthode repose sur :

- ✓ Une asymétrie cornéenne supérieure à 1,5 D calculée par l'indice I-S : qui est la différence de puissance dioptrique entre les zones supérieure et inférieure de la région paracentrale de la cornée sur un cercle de 3mm.
- ✓ Une puissance cornéenne centrale supérieure à 47 D
- ✓ Une asymétrie de keratométrie centrale supérieure à 1 D entre les deux yeux

De nombreux indices ou algorithmes plus ou moins sophistiqués ont été développés pour tenter de discriminer objectivement les topographies de courbure anormales keratoconiques des formes normales (53). Tous peuvent être pris en défaut.

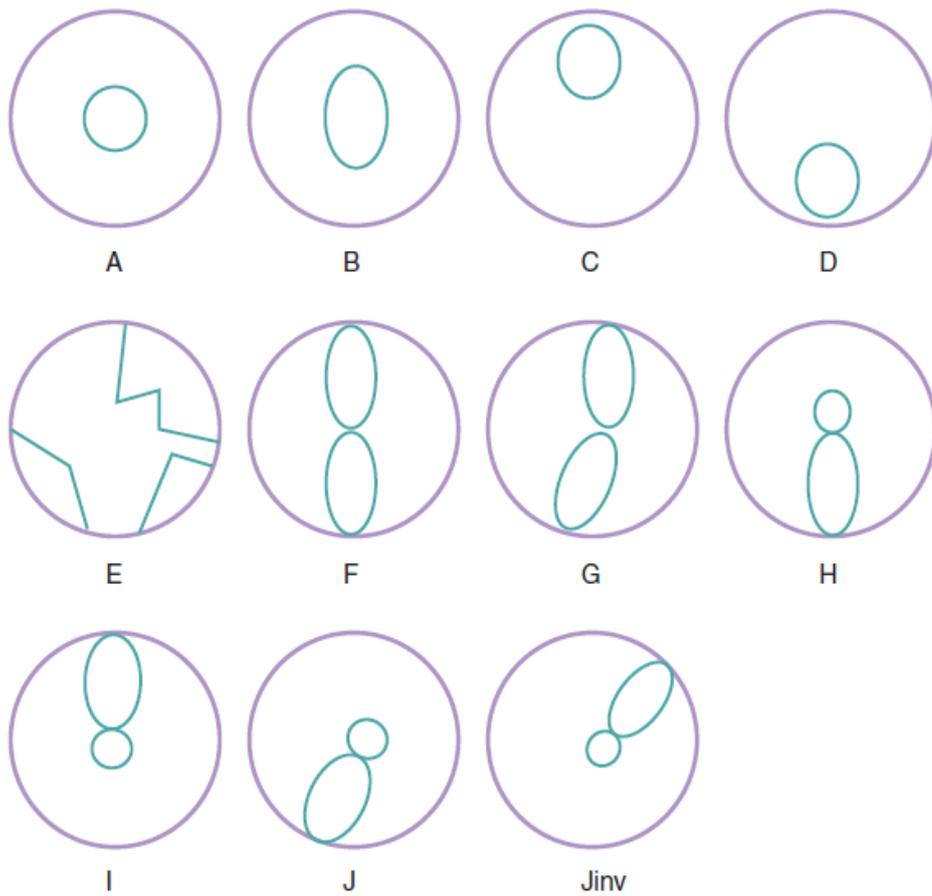


Figure 12 : Parmi les différents aspects retrouvés dans une cornée normale, les anomalies les plus fréquemment retrouvées au cas de kératocône sont D, G, H et J. dans les formes G et J un Srax (skewed radial axis) de plus de  $21^\circ$  est suspect de kératocône

**b La topographie d'élévation :**

La topographie d'élévation mesure la forme exacte des faces antérieure et postérieure de la cornée par rapport à une sphère de référence. L'étude de la face postérieure est importante car sa déformation, analysée par balayage d'une fente lumineuse (Orbscan TM) ou par imagerie Scheimpflug (Pentacam TM), apparaît probablement avant celle de la face antérieure.

De nombreux critères de détection du kératocône infraclinique ont été proposés :

- ✓ Une sphère de référence postérieure supérieure à 50µm,
- ✓ Critères de Roush, d'Efkarpides, de Tanabe (54) : pachymétrie inférieure à 500µm, une convergence et un décalage, souvent inféro-temporal, des points remarquables (plus fin, plus élevé antérieur, plus élevé postérieur) sont souvent retrouvés (figure 13).

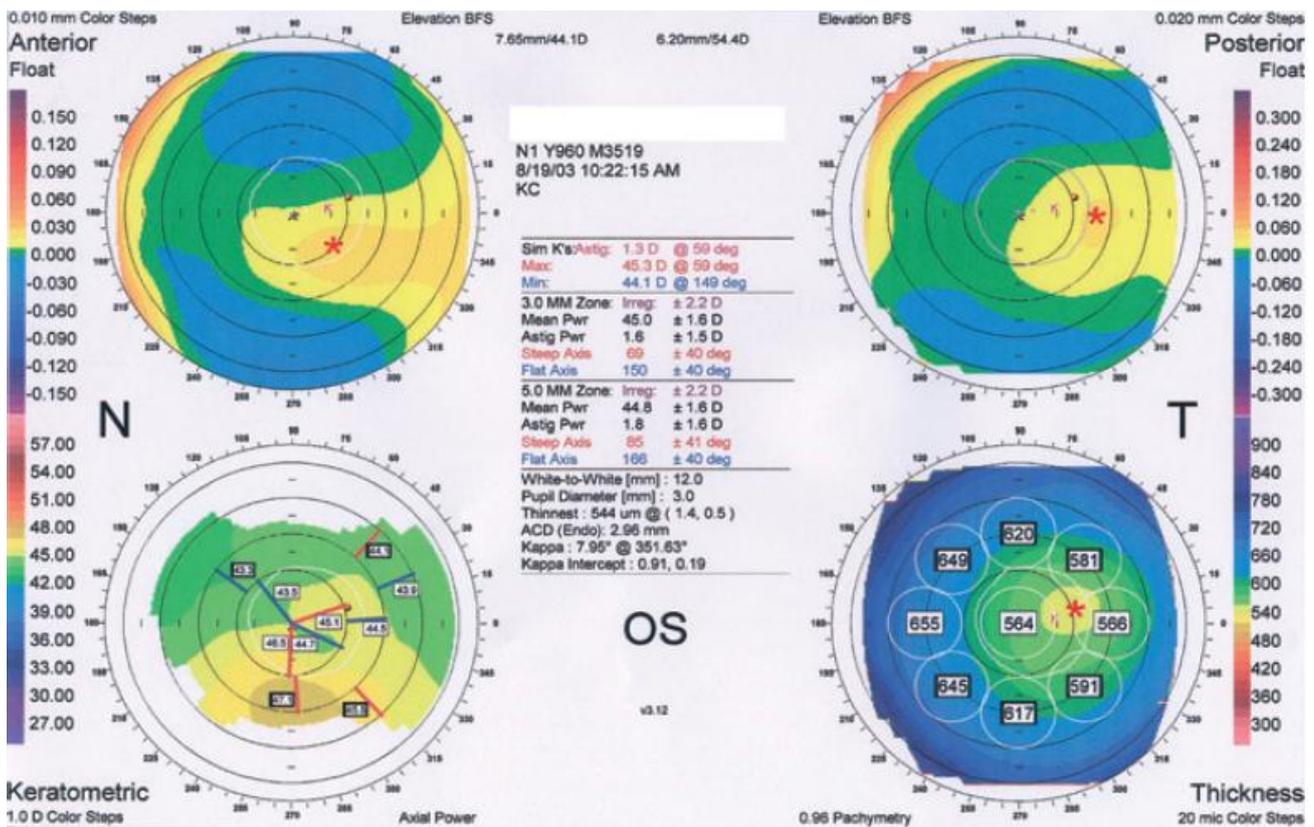


Figure 13 : Décalage et convergence des points remarquables (asterix) malgré une épaisseur cornéenne conservée (point le plus fin à 544µm). L'indice de Tanabe est positif en élévation antérieur avec un nombre de couleurs présentes dans les 3 mm centraux supérieur à 3 avec un pas d'échelle antérieure à 10 µm. L'indice est négatif en face postérieure avec un pas à 20 µm. La sensibilité de ce critère est de 78 %. Sa spécificité est de 90 %.

Aucun paramètre pris isolément n'a une sensibilité ou une spécificité de 100 %.

Il n'existe ainsi aucun critère absolu de détection de kératocône en matière de topographie qu'elle soit spéculaire ou d'élévation. La confrontation des cartes spéculaires et d'élévation et la recherche de différents critères de suspicion sont d'autant d'éléments de présomption en faveur d'un kératocône. Seuls les critères ayant fait l'objet de publication sont à considérer. La surveillance topographique dans le temps sera alors primordiale pour dépister à l'aide ou pas de cartes différentielles, une modification de paramètres, concomitante à l'évolution du kératocône (45).

Plusieurs programmes de détection cumulant plusieurs paramètres sont déjà ou bientôt disponibles selon les appareils et pourraient augmenter la sensibilité et la spécificité de la détection du kératocône.

## VI Classifications du kératocône :

### 1 Classifications topographiques :

Plusieurs classifications faisant intervenir différents paramètres sont disponibles. Il n'existe pas de consensus international pour classer le kératocône.

La classification d'Amsler(8), depuis 1946, classe le kératocône en quatre stades selon des paramètres cliniques :

- ✓ STADE 1 : astigmatisme oblique avec asymétrie perceptible au keratométrie de Javal.
- ✓ STADE 2 : l'astigmatisme est plus marqué, l'asymétrie plus manifeste, avec un amincissement de la cornée qui reste transparente au biomicroscopie
- ✓ STADE 3 : toute mesure au Javal, même approximative, est impossible et l'amincissement cornéen est marqué
- ✓ STADE 4 : en plus des signes précédents, présence d'opacités cornéennes linéaires.

La classification topographique de krumeich (55) quant à elle; repose sur l'analyse de la myopie, l'astigmatisme, la keratométrie, la pachymétrie au sommet et la présence ou non d'opacité cornéenne. Cette classification a pour avantage de fournir des repères chiffrés pour, une part, surveiller une éventuelle progression mais aussi pour classer le kératocône (tableau 1).

**Tableau 1 : : classification de krumeich. Un seul critère est suffisant pour appartenir à un stade.**

stade	caractéristiques
Stade I	Myopie et astigmatisme < 5.00D Kératométrie maximale des 3 mm centraux <48D Absence d'opacité Stries de vogt.
Stade II	Myopie et astigmatisme compris entre 5.00D et 8,00D Kératométrie maximale des 3 mm centraux < 53.00D Absence d'opacité Pachymétrie minimale > 400µm
Stade III	Myopie et astigmatisme compris entre 8.00D et 10,00D Kératométrie maximale des 3 mm centraux > 53.00D Absence d'opacité Pachymétrie minimale comprise entre 300- 400µm
Stade IV	Réfraction non mesurable Kératométrie maximale des 3 mm centraux > 55.00D Opacité cornéenne axiale Pachymétrie minimale < 200µm

## 2 Classifications OCT :

Actuellement, la classification du kératocône par la tomographie par cohérence optique est possible grâce à l'apparition d'une nouvelle génération d'appareil utilisant le domaine spectral, elle permet de réaliser des images en très haute définition dont la précision est inégalée.

C'est une classification anatomique qui permet de dépister le stade précoce du kératocône (sandali et al) : (56) (Figure 14)

✓ Stade I: amincissement des couches cornéennes épithéliales et stromales d'apparence normale au niveau du cône cornéen.

- ✓ Stade II: hyper-réflexivité au niveau de la couche de Bowman et épaissement épithélial en regard au niveau du cône;
- ✓ Stade III: invagination postérieure des structures hyper-réflexives au niveau de la couche de Bowman avec accentuation de l'épaississement épithélial et de l'amincissement stromal.
- ✓ Stade IV: cicatrice pan-cornéenne.
- ✓ Stade V: hydrops
  - Stade Va: stade aigu: rupture de la membrane de Descemet et oedème de toute la cornée avec dilacération des lamelles de collagène et formation de kystes intrastromaux et intraépithéliaux.
  - Stade Vb: stade cicatriciel: cicatrice pan-stromale avec aspect résiduel de rupture de la membrane de Descemet.

Concernant la pachymétrie mesurée par OCT ; elle est plus précise que celle des topographes pour la mesure de la pachymétrie minimale et au niveau des 5-6 mm (dans la perspective de pose d'anneaux intracornéens). Dès le stade 2 de la classification OCT du kératocône, l'épaississement épithélial peut masquer un amincissement stromal si on tient compte seulement de la pachymétrie totale, contre-indiquant ainsi un cross-linking classique, alors qu'elle ne l'est pas si on ne tient compte que de la pachymétrie totale mesurée par la topographie cornéenne ou la pachymétrie ultrasonore.

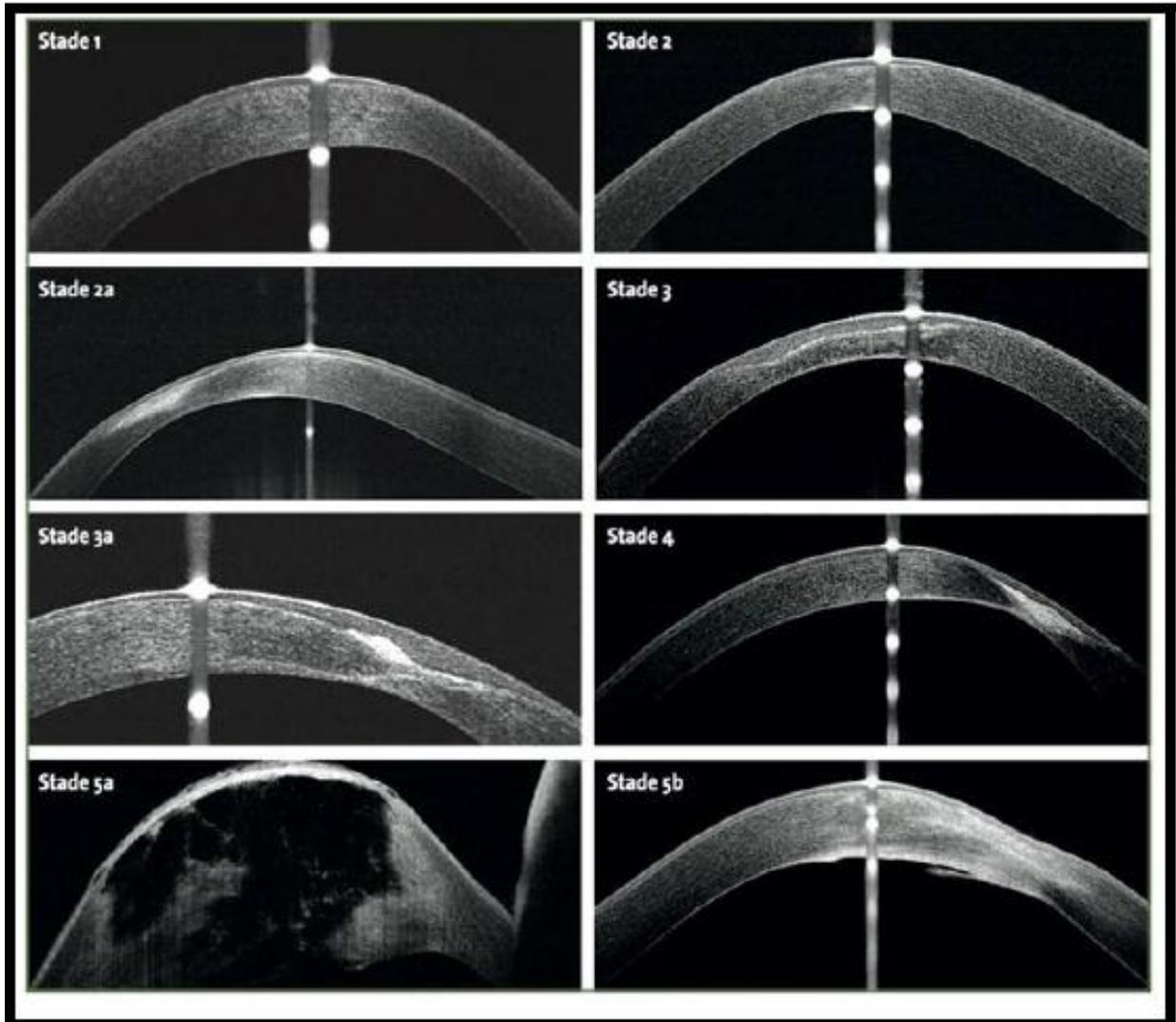


Figure 14 : classification OCT du kératocône basé sur les modifications OCT du cône (56)

### 3 Autres classifications :

À la marge de ces classifications, sont apparus les termes de kératocône « suspect », « fruste » ou « débutant ». Si un kératocône débutant est une forme avérée, les terminologies de suspect ou fruste varient selon les auteurs et sont souvent confondues. L'intérêt réside dans la détection de ces formes à risque dans un bilan préopératoire d'un patient demandeur de chirurgie réfractive. En effet, 2 à 6 % de ces candidats seraient porteurs d'une forme fruste ou suspecte de kératocône.

## VII Diagnostic différentiel :

Il se pose avec les autres causes d'ectasies et d'amincissements cornéens. Le diagnostic est le plus souvent clinique. (1)

### 1 Corneal warpage

C'est le syndrome de déformation cornéenne induite par les lentilles qui est une modification de la forme de la cornée induite par la pression exercée par une lentille essentiellement rigide, plus rarement souple. L'aspect vidéotopographique est proche de celui d'un kératocône.

### 2 Dégénérescence pellucide marginale

Elle se traduit par un amincissement cornéen périphérique inférieur. L'amincissement intéresse une bande étroite de 1 à 2mm de large, elle-même séparée du limbe par une zone de cornée normale de 1 à 2mm de large. La cornée centrale est d'épaisseur normale et fait saillie au-dessus de la zone d'amincissement. Souvent diagnostiquée entre 40 et 50ans. L'aspect vidéotopographique est typique, mais non pathognomonique, avec une image en « pincés de crabe » ou « en moustaches gauloises ».

### 3 Kératoglobe

C'est un amincissement diffus de la cornée, plus marqué dans sa périphérie. Contrairement au kératocône où il existe, même dans les formes avancées, une zone supérieure d'épaisseur normale, dans le kératoglobe, l'amincissement cornéen intéresse toute la cornée qui prend un aspect globuleux .

### 4 Ectasie post-LASIK

L'ectasie post-LASIK est un amincissement progressif avec bombement de la cornée et évolution similaire à celle d'un kératocône. Les signes cliniques évocateurs sont une modification de la réfraction post-LASIK, progressive, sphéro-cylindrique myopique. La baisse d'acuité visuelle avec correction est concomitante de l'apparition d'un astigmatisme irrégulier avec une topographie cornéenne évocatrice d'un kératocône. L'analyse de la littérature montre que la plupart des cas présentaient un tableau de kératocône fruste ou suspect. Deux mécanismes peuvent expliquer l'apparition d'une ectasie postopératoire : un affaiblissement biomécanique de la cornée par non-respect du lit stromal postérieur résiduel minimal, classiquement de 250 microns, ou la décompensation d'un kératocône méconnu.

Les recommandations actuelles contre-indiquant la réalisation d'un LASIK sont :

- ✓ Une épaisseur cornéenne centrale inférieure à 500 microns ;
- ✓ Un lit stromal résiduel calculé préopératoire ou après mesure pachymétrique peropératoire inférieur à 250 microns (mais sans preuve définie). Il faut donc se méfier du traitement des myopies fortes et des reprises chirurgicales ;
- ✓ Un patient porteur d'une anomalie cornéenne, topographique notamment, évoquant un kératocône fruste ou suspect ;

- ✓ Un antécédent familial de kératocône.

## VIII Histologie :

Selon le stade de la maladie, toutes les couches de la cornée peuvent être atteintes (57). La triade histologique classique repose sur l'amincissement stromal, les ruptures de la couche de Bowman et les dépôts de ferritine au sein de l'épithélium.

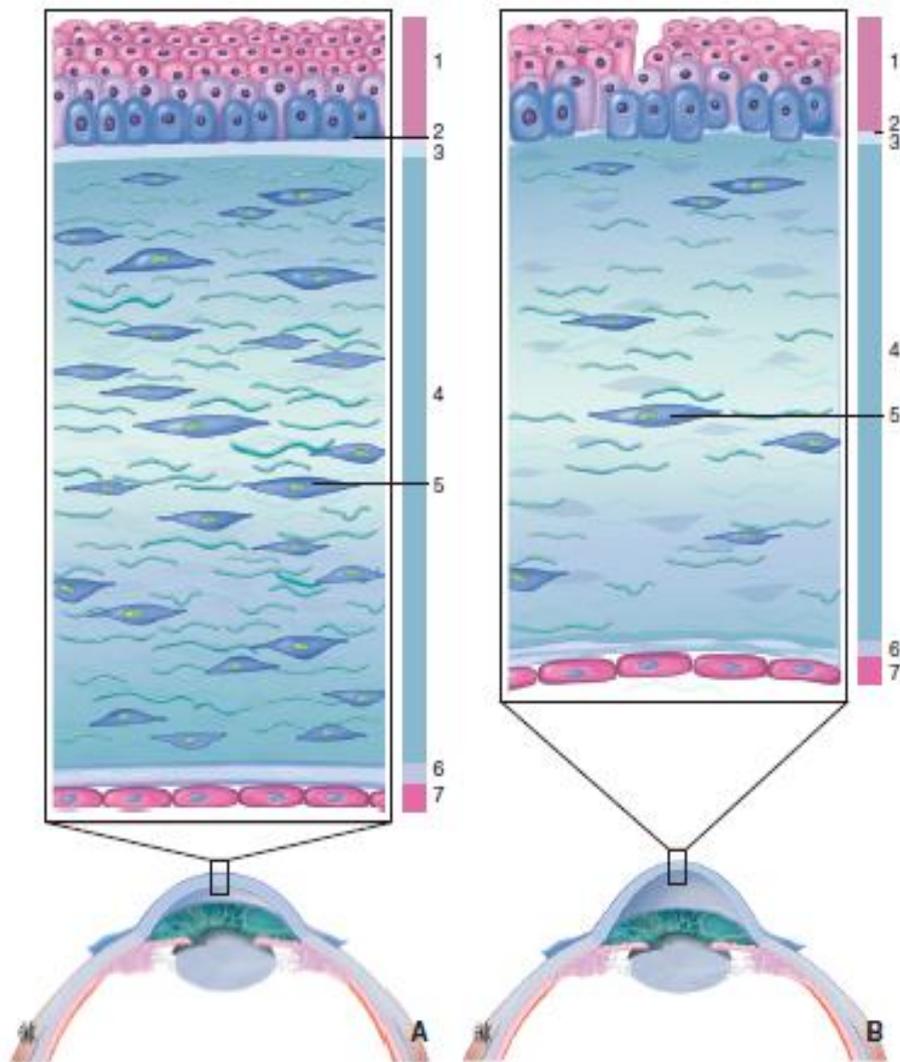


Figure 15 : schéma histologique. Même si toutes les couches cornéennes peuvent être intéressées, l'atteinte prédomine, au niveau du sommet du cône, de la couche de Bowman interrompue, et du stroma aminci

1 : épithélium, 2 : membrane basale, 3 : couche de Bowman, 4 : stroma, 5 : kératocytes, 6 : membrane de Descmet, 7 : endothélium

A : cornée normale, B : kératocône (57)

## IX Evolution :

L'évolution de la maladie 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.

## X Prise en charge :

### 1 Correction optique (1)

#### a Correction optique par verres de lunettes

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

#### b Les lentilles de contacts

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.

#### ◆ Les lentilles rigides perméables aux gaz :

La lentille rigide est connue depuis fort longtemps dans le traitement médical du kératocône et demeure son traitement optique de choix. 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.

◆ Les 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.

## 2 Chirurgie du kératocône

### a Cross-linking du collagène cornéen

Le cross-linking du collagène cornéen a pour but de « rigidifier » une cornée biomécaniquement 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 (58) (59) (figure 16)

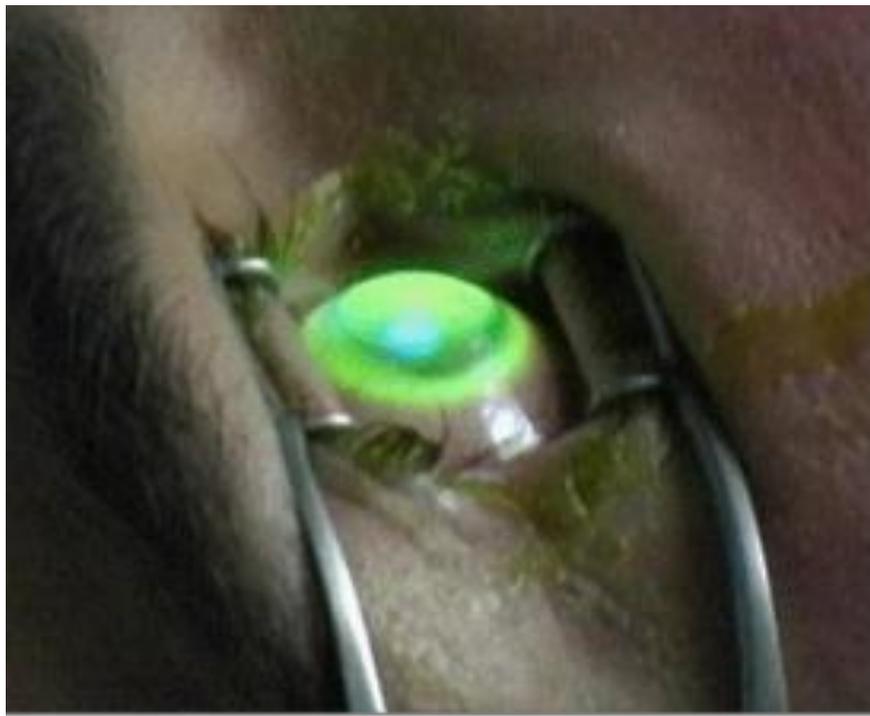


Figure 16 : Cross linking du collagène cornéen

Plusieurs protocoles sont rapportés dans la littérature, par ailleurs actuellement le protocole conventionnel (épi-off) est le seul à avoir prouvé son efficacité et son innocuité(35).

**Tableau 2 : Tableau récapitulatif des différents protocoles du cross Linking du collagène cornéen**

	Désépithélialisation	Riboflavine	Imprégnation	UVA
Protocole conventionnel	+	Riboflavine 0,1 % dextran 20 % Ricrolin®	20 minutes	30 minutes 3 mW/cm <sup>2</sup>
Protocole conventionnel modifié	+	Riboflavine 0,1 % dextran 20 % Ricrolin®	20 minutes	9 minutes 10 mW/cm <sup>2</sup>
Protocole conventionnel pour cornées fines	+	Riboflavine 0,1 % hypotonique Ricrolin TE®	20 minutes Pachymétrie peropératoire	30 minutes 3 mW/cm <sup>2</sup>
Protocole accéléré	+	Riboflavine 0,1 % dextran 20 % Vibex®	10 minutes	3 minutes 30 mW/cm <sup>2</sup>
Protocole transépithélial	-	Riboflavine 0,1 % dextran, trométamol, EDTA Ricrolin TE®	20 minutes	9 minutes 10 mW/cm <sup>2</sup>
Protocole iontophorèse	-	Riboflavine 0,1 % hypotonique Ricrolin +®	5 minutes	9 minutes 10 mW/cm <sup>2</sup>

mW : milliwatt.

Les indications du cross-linking concernent le kératocône évolutif différent selon les auteurs. Ces critères sont indicatifs et la surveillance reste primordiale.

*Tableau 3 : Critères adoptés pour évaluer la progression d'un kératocône.*

		Raiskup-Wolf et al (60)	Wittiq-Silva et al (61)	Hersh et al(62)	Asri et al (63)
keratométrie > 1D	6mois				*
	1 an	*			
Keratométrie > 2D	1 an				*
K max ≥ 1D	1 an		*		
	2ans			*	
Adaptation en lentilles de contact	2ans	*			
BAV rapportée par le patient	-	*			
Diminution sphère ≥ 0,5D	1 an		*		
	2ans			*	
Diminution cylindre ≥ 1D	1 an		*		
	2ans			*	
Perte de ligne d'AV	1 an				*

Il existe cependant deux exceptions où l'indication d'un cross-linking peut être posée dès la découverte d'un kératocône : chez l'enfant (<18ans ) et après LASIK. Dans ces deux cas, l'aggravation quasi certaine et parfois explosive de la maladie incite à ne pas retarder le cross-linking.

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.

L'association du cross-linking à d'autres procédures est possible. L'effet additif du cross-linking sur l'implantation d'anneaux intra-cornéens est à démontrer ainsi que l'ordre des deux interventions. Les indications de la photokératectomie réfractive au laser excimer couplée au cross-linking doivent être affinées. Enfin, les techniques de contraction du collagène cornéen (Keraflex™) couplée au cross-linking doivent être évaluées.

Enfin, d'autres approches du cross-linking sont en évaluation pour limiter les complications : cross-linking transépithélial ou iontophorèse pour éviter l'abrasion

épithéliale et donc la douleur et le haze postopératoire, ou le cross-linking rapide pour raccourcir la durée opératoire.

### b Anneaux intra-cornéens

L'objectif majeur des anneaux est d'améliorer la qualité de vision des patients en remodelant l'architecture cornéenne, en diminuant l'astigmatisme asymétrique, sans enlever de tissu cornéen et sans toucher le centre de la cornée (64) (65). Les INTACS™ « conventionnels » ont une zone optique de 7mm et une section hexagonale (figure 17). Les INTACS™ SK ont une zone optique de 6mm et une section ovale. Les anneaux de Ferrara™ ou Keraring™ ont une zone optique de 5 ou de 6mm et une section triangulaire (figure 17). La dissection des tunnels intrastromaux peut se faire mécaniquement à l'aide de dissecteurs ou par laser femtoseconde. Le choix de l'anneau dépendra de l'équivalent sphérique préopératoire, de la localisation du cône, de l'asymétrie de la déformation et de la pachymétrie. Une correction optique par lunettes ou lentilles est souvent nécessaire après anneaux.

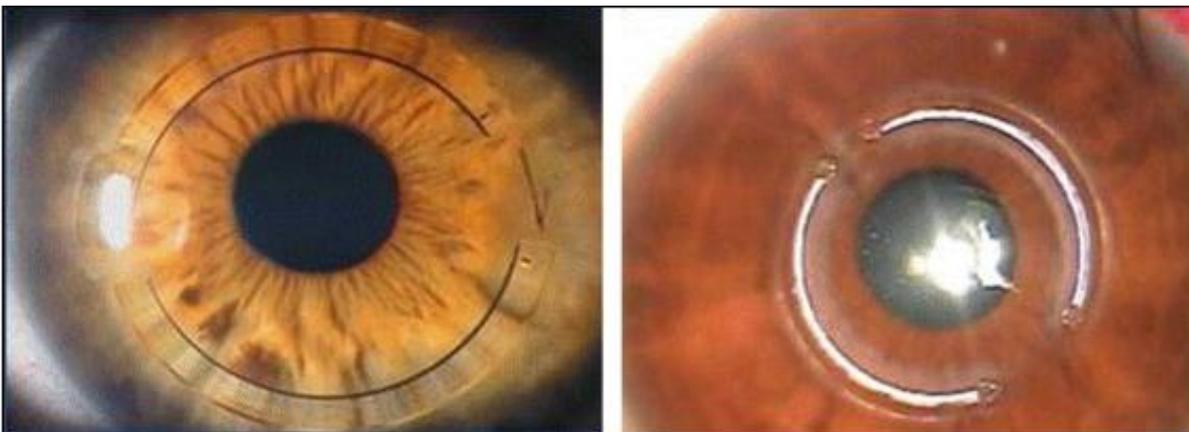


Figure 17 : anneaux intra-cornéens INTACs à gauche avec une zone optique de 7mm, et Ferrara TM, keraring TM à droite avec une zone optique de 5mm

### c Laser excimer

Une 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 au mieux guidée par la topographie, avec une optique d'épargne tissulaire et une photoablation n'excédant donc pas 50 microns (66) (67). L'objectif du traitement est de « régulariser » la surface cornéenne. La détermination d'indications et de protocoles de traitement ainsi que la validation des résultats préliminaires sur le long terme sont nécessaires.

### d Implants intra-oculaires

La myopie dans le kératocône peut être axiale, par allongement de la longueur axiale de l'œil ou de courbure par augmentation de la puissance de convergence de la cornée. Sa correction par un implant intra-oculaire interviendra sur une « cornée stable » spontanément ou après cross-linking. L'implantation pourra être phaïque ou pseudophaïque 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 (1).

### e Greffes de cornée

L'indication chirurgicale de greffe est à la fois optique pour restaurer l'acuité visuelle, mais aussi tectonique pour restaurer l'intégrité cornéenne en épaisseur et en forme. La greffe n'intervient qu'en dernier recours, lorsque les autres moyens de correction à notre disposition ont été épuisés. 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 (68) (69). 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 technique (70) (71) (figure 18), la KLAP présente des complications propres dont la principale, la perforation peropératoire des couches profondes endothélio-descemétiques, peut nécessiter une conversion en KT.

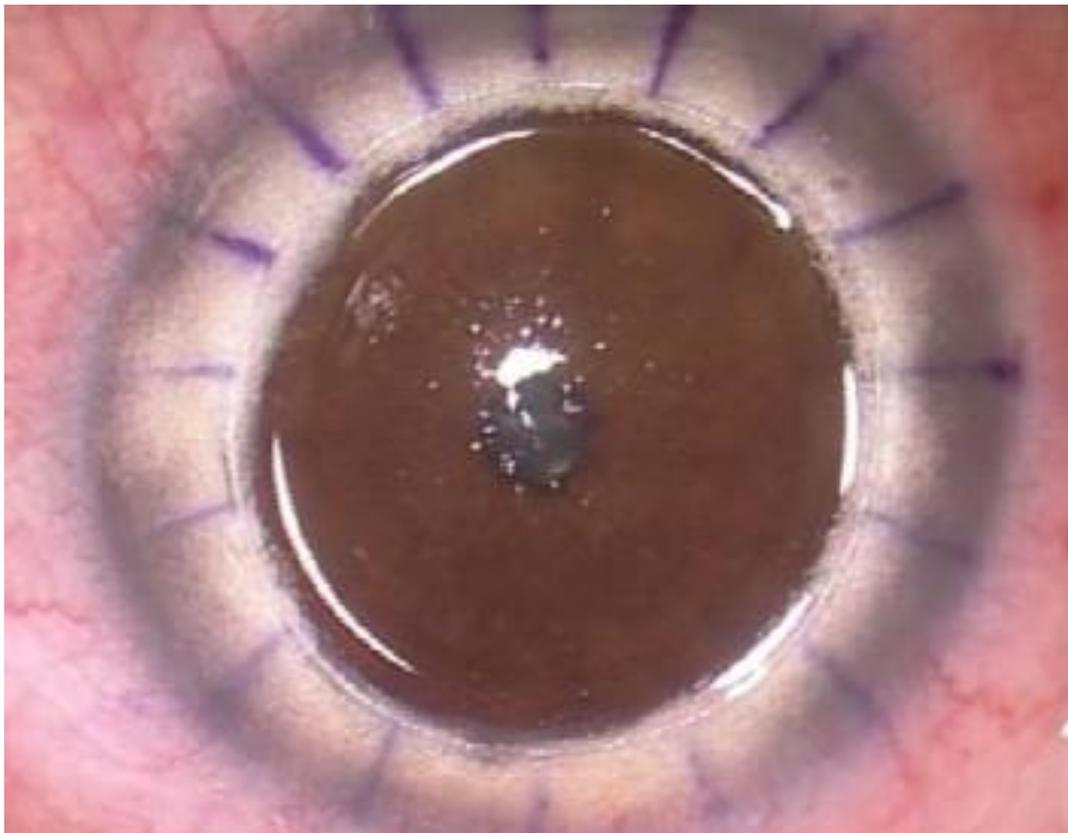


Figure 18 : technique de big bubble

### 3 Arbre décisionnel

L'arbre décisionnel est controversé, évolutif et indicatif seulement (Figure 19). 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, kératométrie maximale, myopie axiale associée, tolérance aux lentilles de contact, cataracte
- ✓ Généraux : atopie, pathologies générales associées, trisomie 21
- ✓ Personnels : âge, activités professionnelles, activités de loisir, observance, attentes raisonnées et raisonnables du patient

Cet arbre repose sur une logique de stabiliser un kératocône évolutif, de corriger au maximum par des moyens optiques avant d'envisager la solution chirurgicale la plus adaptée au patient, la greffe de cornée étant réalisée en dernier recours.

### 4 Arbre décisionnel

L'arbre décisionnel est controversé, évolutif et indicatif seulement (Figure 19). 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, kératométrie maximale, myopie axiale associée, tolérance aux lentilles de contact, cataracte
- ✓ Généraux : atopie, pathologies générales associées, trisomie 21
- ✓ Personnels : âge, activités professionnelles, activités de loisir, observance, attentes raisonnées et raisonnables du patient

Cet arbre repose sur une logique de stabiliser un kératocône évolutif, de corriger au maximum par des moyens optiques avant d'envisager la solution chirurgicale la plus adaptée au patient, la greffe de cornée étant réalisée en dernier recours.

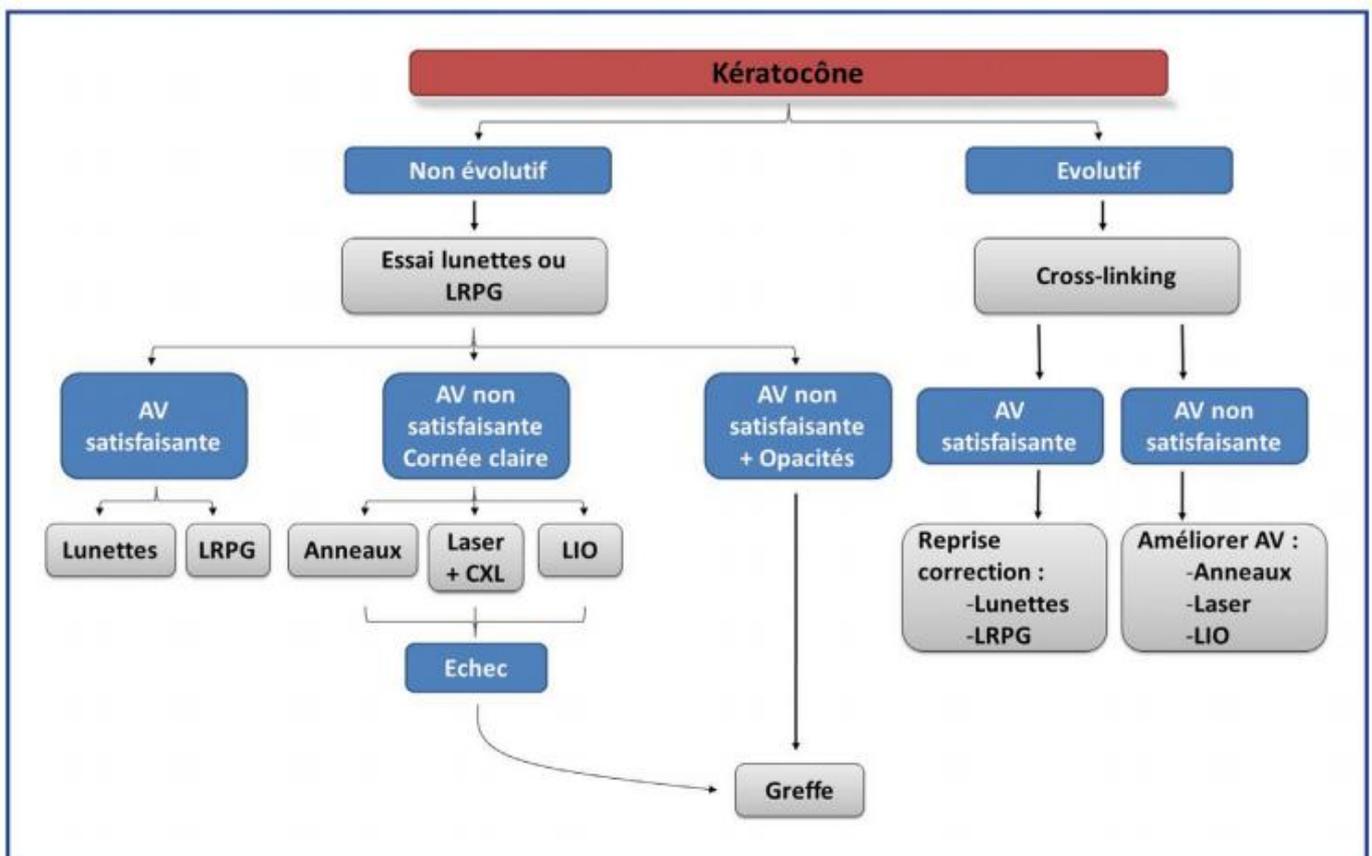


Figure 19 : arbre décisionnel simplifiée de la prise en charge du kératocône.

# PARTIE PRATIQUE

## A Matériels et méthodes :

### I Description de l'étude :

Nous avons réalisé une étude prospective colligée au service d'ophtalmologie du CHU HASSAN II de, hôpital Omar Idrissi, sur une période de 4 mois du 01/02/2019 au 01/06/2019.

Tous nos patients ont bénéficié d'un examen ophtalmologique complet, d'une réfraction subjective et objective, d'une mesure de la meilleure acuité visuelle, et d'une prise de mesure par le Pentacam et l'Orbscan.

A noté que les valeurs retenues par les 2 appareils n'ont été collectées qu'après avoir le message OK par les logiciels utilisés, et que toutes les mesures ont été prises par le même opérateur.

Les critères diagnostiques du kératocône retenus dans l'étude :

- ◆ Kératométrie maximale  $>47D$
- ◆ Pachymétrie minimale  $<470 \mu m$  avec une déviation standard du point le plus fin
- ◆ Rapport I-S  $> 1,5$
- ◆ Elevation postérieure  $>$

Les mesures prises en considérations sont :

- ◆ **Critères d'inclusion :**

- ✓ Age  $>16$  ans
- ✓ Patients suivis pour kératocône
- ✓ Cristallin clair
- ✓ Acquisition satisfaisante par le Pentacam et l'Orbscan

- ◆ **Critères d'exclusion :**

- ✓ Age  $<16$  ans
- ✓ Les patients ayant bénéficié d'un Cross Linking

- ✓ Les patients ayant bénéficié d'un traitement photoréfractif.
- ✓ Les sujets qui présentent une cataracte
- ✓ Patients dont les acquisitions ne sont pas satisfaisantes

## 2 L'étude statistique :

L'analyse statistique des différents paramètres étudiés a été effectuée au service d'épidémiologie du CHU Hassan II de Fès à l'aide du logiciel SPSS version 19 (SPSS Inc., Chicago, IL, ETATS-UNIS). Une valeur de  $p \leq 0,05$  a été statistiquement significative. La comparaison des résultats entre les deux appareils est faite selon la méthode de Bland et Altaman.



Figure 14 : Appareil de topographie cornéenne Pentacam de notre service.



Figure 15 : Appareil de topographie cornéenne Orbscan de notre service.

## II Fiche d'exploitation :

### ◆ Examen clinique:

- Nom :
- Age :
- Sexe :
  - Masculin : 1
  - Féminin : 2
- Bilatéralité :
  - Bilatéral : 1
  - Unilatéral : 2
- ATCDs personnels :
  - Aucun :1
  - Atopie : 2
  - Conjonctivite allergique : 3
  - Autres : 4
- ATCDs familiaux :
  - Aucun :1
  - Cas similaire dans la fratrie : 2
  - Greffe de cornée : 3
- Forme clinique du KK :
  - Frustré :2
  - Avéré :1
- Classification Kurmeich :
  - Stade 1
  - Stade 2
  - Stade 3

- Stade 4
- Type du cône
  - Rond :1
  - Oval :2
  - Mamloné :3
- Localisation
  - Inferieur : 1
  - Inféro-temporal : 2
  - Supéro-nasal : 3
  - Supérieur : 4
  - Inféro temporal : 5
  - Supéro nasal : 6
  - Central : 7
- Réfraction :
  - Sphère
  - Cylindre
  - Axe
- Caractéristique de la réfraction :
  - Myopie :1
  - Astigmatisme myopique :2
  - Astigmatisme mixte :3
  - Astigmatisme :4
- Equivalent sphérique
- Keratométrie objective :
  - K1
  - K2

○ Axe

◆ Topographies cornéennes :

- Mesures obtenues par les 2 topographes :

	Pentacam	Orbscan
Keratométrie plate (K1)		
Keratométrie combrée (K2)		
Keratométrie maximale (Kmax)		
Astigmatisme		
Axe de l'astigmatisme		
Pachymétrie centrale		
Pachymétrie minimale		
Déviation standard		
Élévation antérieure		
Élévation postérieure		

## **B Résultats :**

Notre étude inclut 72 yeux de 36 patients diagnostiqués porteurs d'un kératocône.

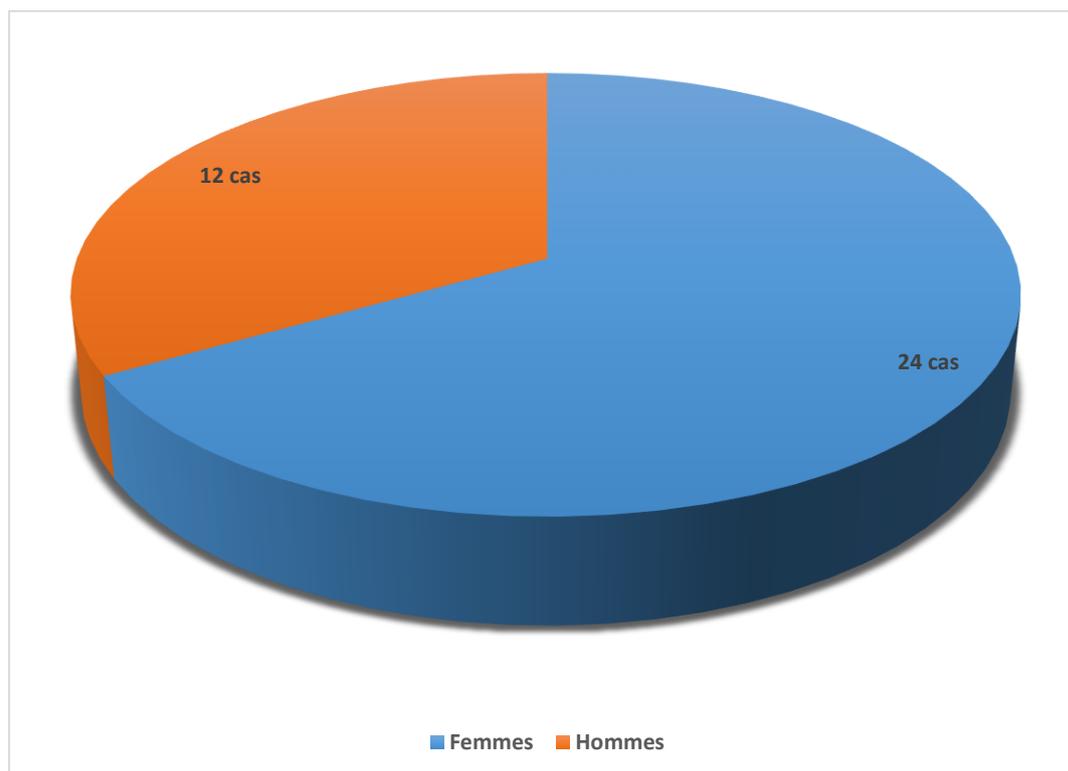
### **I l'Age :**

L'âge moyen de nos patients est de  $32,16 \pm 10,98$  ans.

### **II Le sexe :**

L'étude du sexe des patients de notre série retrouve une prédominance féminine de 66,66 %.

Le sexe ratio H/F 0,5.

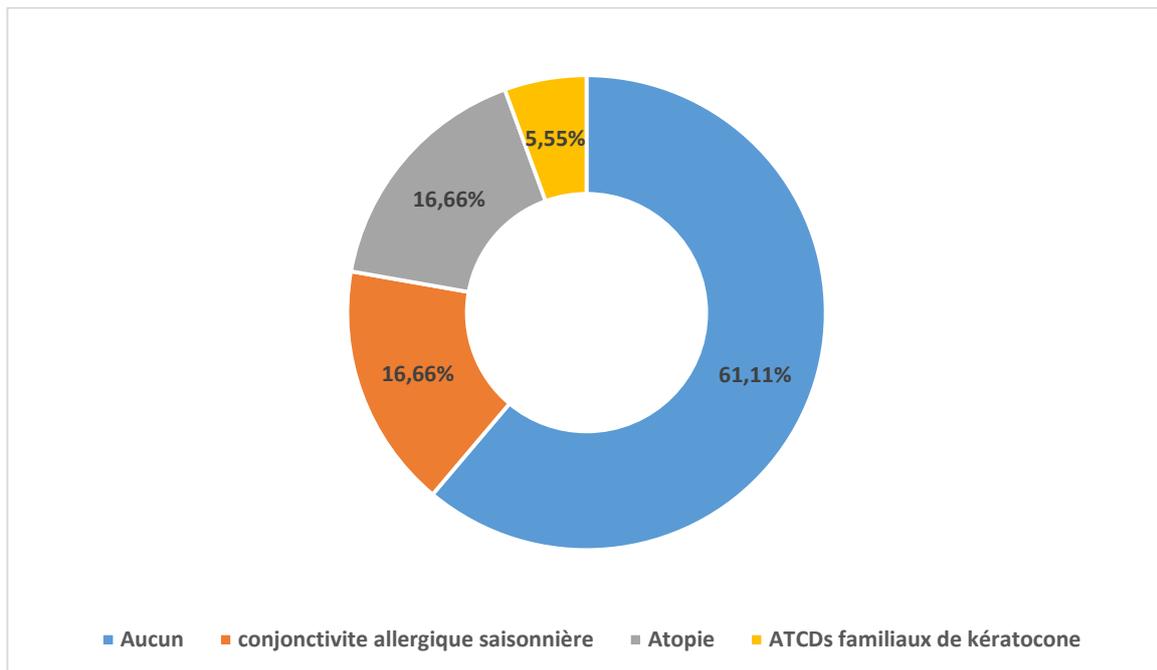


*Figure 16 : Répartition des patients en fonction du sexe*

### III Les antécédents ophtalmologiques :

Les principaux antécédents ophtalmologiques sont représentés par la présence d'une :

- ✓ Conjonctivite allergique saisonnière chez 6 patients 16,66%
- ✓ Atopie chez 6 patients soit 16,66%
- ✓ Histoire de kératocône dans la fratrie chez 2 patients

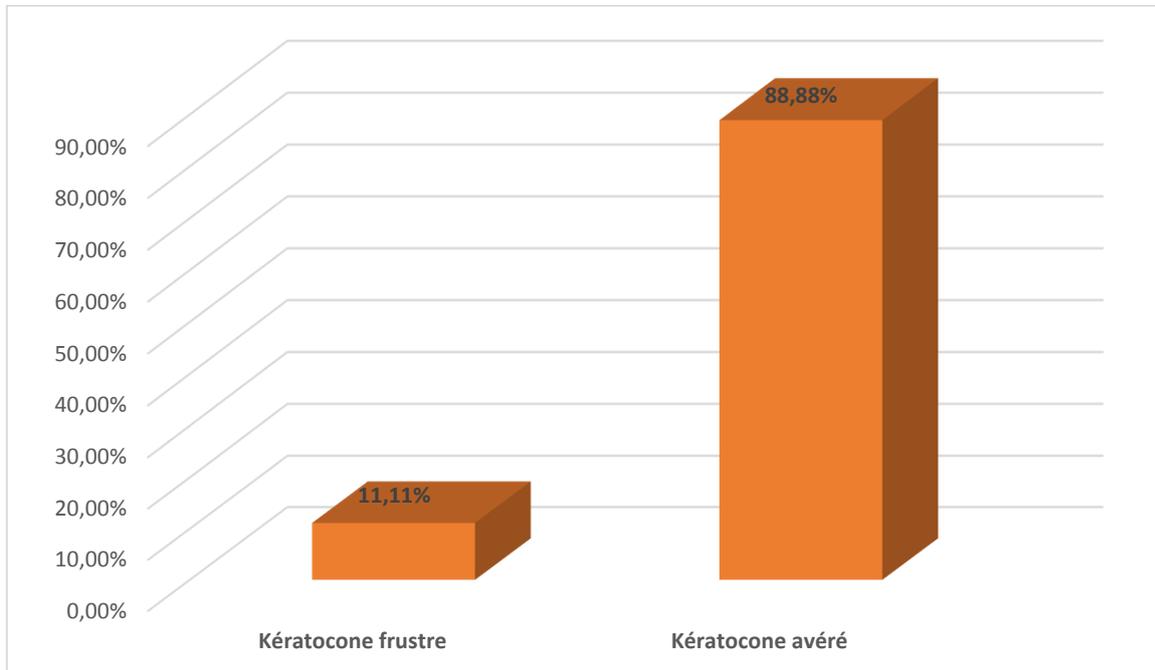


*Figure 17 : Répartition des antécédents ophtalmologiques chez nos patients :*

## IV Caractéristiques du kératocône :

Le kératocône est bilatéral chez tous nos patients

Il est avéré dans 64 yeux (soit 88,88 %) et frustre dans 8 yeux (soit 11,11 %).



*Figure 18 : Type de kératocône chez nos patients.*

## V Profil réfractif :

Tous nos patients avaient un astigmatisme myopique.

L'équivalent sphérique moyen est de  $-7,68 \pm 5,97$  D.

## VI Résultats obtenus par le Pentacam :

### 1 Keratométrie plate : K1 :

La moyenne des mesures de la keratométrie la plus plate obtenue par le Pentacam est de  $47,53 \pm 5,54$  D.

### 2 Keratométrie cambrée : K2 :

La valeur moyenne de l'ensemble des mesures de la keratométrie cambrée est de  $50,29 \pm 6,07$  D.

### 3 Keratométrie maximale

La moyenne des mesures de la keratométrie la plus plate obtenue par le Pentacam est de  $54,82 \pm 7,71$  D.

### 4 Astigmatisme

La valeur moyenne de l'astigmatisme mesuré par le Pentacam, exprimé en valeur négative, est de  $3,8 \pm 1,6$  D.

### 5 Axe de l'astigmatisme

La moyenne d'axe est de  $104,05 \pm 64,06$  °.

### 6 Pachymétrie centrale

La valeur moyenne de la pachymétrie centrale obtenue par le Pentacam est de  $438,3 \pm 64,34$  µm.

## **7 Pachymétrie minimale et déviation verticale**

La moyenne des mesures de la pachymétrie minimale du point le plus fin est de  $419,54 \pm 56,56 \mu\text{m}$  avec une déviation verticale moyenne de  $-0,44 \pm 0,38 \mu\text{m}$ .

## **8 Elévation antérieure**

La valeur moyenne de l'élévation antérieure selon le Best Fit Sphere obtenue par le Pentacam est de  $25,44 \pm 15,78 \mu\text{m}$ .

## **9 Elévation postérieure**

La valeur moyenne de l'élévation antérieure selon le Best Fit Sphere obtenue par le Pentacam est de  $57,36 \pm 30,67 \mu\text{m}$ .

## **VII Résultats obtenus par l'Orbscan :**

### **1 Keratométrie plate : K1 :**

La moyenne des mesures de la keratométrie la plus plate obtenue par l'Orbscan est de  $46,78 \pm 5,27 \text{ D}$ .

### **2 Keratométrie cambrée : K2 :**

La valeur moyenne de l'ensemble des mesures de la keratométrie cambrée est de  $51,25 \pm 6,56 \text{ D}$ .

### **3 Keratométrie maximale**

La moyenne des mesures de la keratométrie la plus plate obtenue par l'Orbscan est de  $54,03 \pm 6,21 \text{ D}$ .

### **4 Astigmatisme**

La valeur moyenne de l'astigmatisme mesuré par l'Orbscan, exprimé en valeur négative, est de  $4,04 \pm 1,67 \text{ D}$ .

## 5 Axe de l'astigmatisme

La moyenne d'axe est de  $87,19 \pm 63,44$  °.

## 6 Pachymétrie centrale

La valeur moyenne de la pachymétrie centrale obtenue par l'Orbscan est de  $414,55 \pm 56,47$  µm.

## 7 Pachymétrie minimale et déviation verticale

La moyenne des mesures de la pachymétrie minimale du point le plus fin est de  $391,72 \pm 55,38$  µm avec une déviation verticale moyenne de  $-0,53 \pm 0,43$  µm.

## 8 Élévation antérieure

La valeur moyenne de l'élévation antérieure selon le Best Fit Sphere obtenue par l'Orbscan est de  $42,28 \pm 26,2$  µm.

## 9 Élévation postérieure

La valeur moyenne de l'élévation antérieure selon le Best Fit Sphere obtenue par l'Orbscan est de  $90,36 \pm 42,99$  µm.

## VIII Comparaison des mesures obtenues par le Pentacam et l'Orbscan :

### 1 Keratométrie plate : K1 :

Les mesures obtenues par le Pentacam sont supérieures à celles mesurées par l'Orbscan (respectivement  $47,35 \pm 5,55$  D contre  $46,78 \pm 5,27$  D).

L'étude statistique n'a pas montré de différence statistiquement significative entre les deux appareils avec  $p=0,52$ .

La comparaison de ces deux appareils de mesure selon la méthode de Bland et Altman objective une différence moyenne (Pentacam–Orbscan) de 0,57 D et un intervalle de concordance allant de -1,14 à 2,29 D.

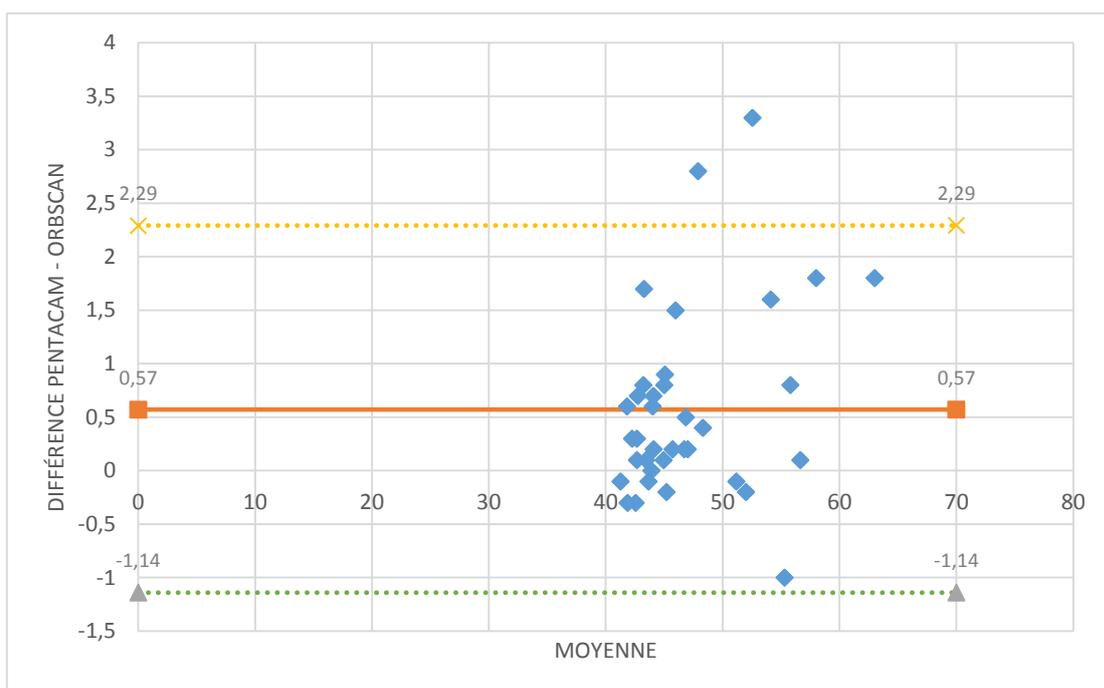


Figure 19 : Tracé de Bland et Altman comparant K1 entre le Pentacam et Orbscan

## 1 Keratométrie cambrée : K2 :

Les mesures obtenues par le Pentacam sont inférieures à celles mesurées par l'Orbscan (respectivement  $50,29 \pm 6,07$  D contre  $51,25 \pm 6,56$  D).

L'étude statistique n'a pas montré de différence statistiquement significative entre les deux appareils avec  $p=0,36$ .

La comparaison de ces deux appareils de mesure selon la méthode de Bland et Altman objective une différence moyenne (Pentacam-Orbscan) de  $-0,96$  D et un intervalle de concordance allant de  $-4,9$  à  $2,98$  D.

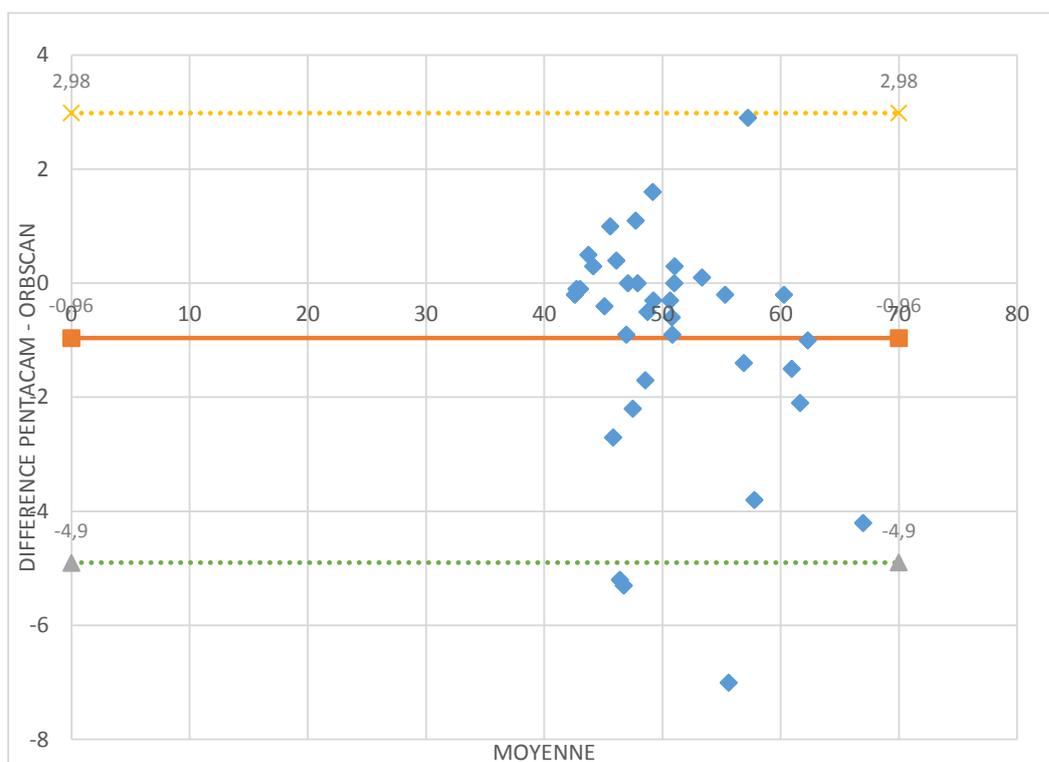


Figure 20 : Tracé de Bland et Altman comparant K2 entre le Pentacam et Orbscan

## 2 Keratométrie maximale

Les mesures obtenues par le Pentacam sont supérieures à celles mesurées par l'Orbscan (respectivement  $54,83 \pm 7,71$  D contre  $54,03 \pm 6,21$  D).

L'étude statistique n'a pas montré de différence statistiquement significative entre les deux appareils avec  $p=0,49$ .

La comparaison de ces deux appareils de mesure selon la méthode de Bland et Altman objective une différence moyenne (Pentacam–Orbscan) de 0,79 D et un intervalle de concordance allant de  $-5,83$  à  $7,41$  D.

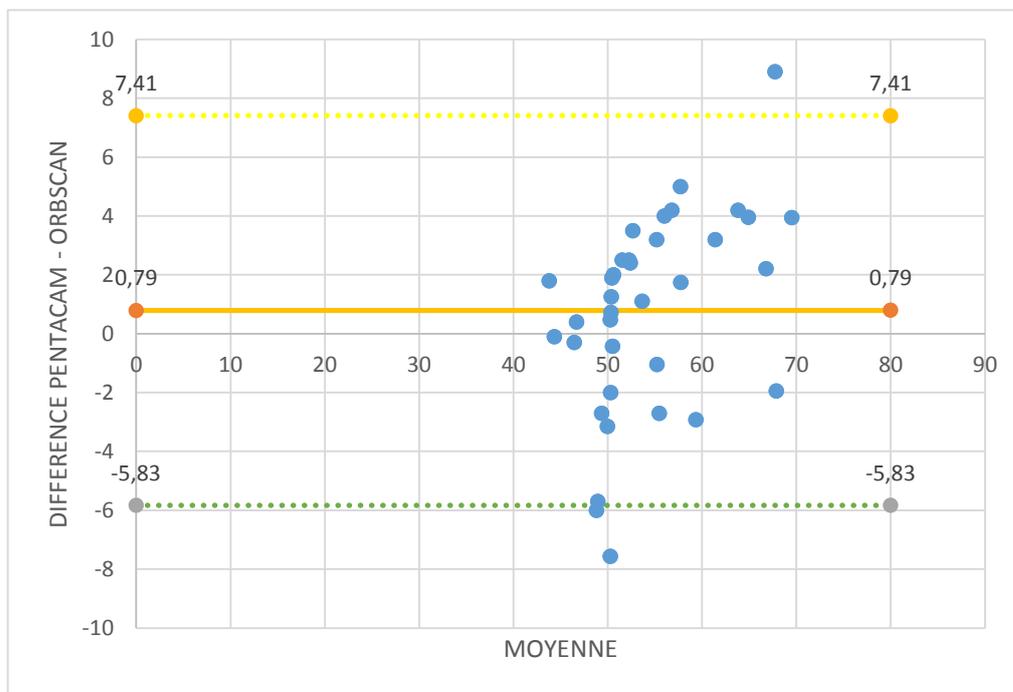


Figure 21 : Tracé Bland et Altman comparant les mesures de Kmax entre le Pentacam et Orbscan

### 3 Astigmatisme

La valeur moyenne de l'astigmatisme cornéen obtenue par le Pentacam est supérieure à celle mesurées par l'Orbscan (respectivement  $3,8 \pm 1,6$  D contre  $4,04 \pm 1,67$  D).

L'étude statistique n'a pas montré de différence statiquement significative entre les deux appareils avec  $p=0,38$ .

La comparaison de ces deux appareils de mesure selon la méthode de Bland et Altman objective une différence moyenne (Pentacam–Orbscan) de  $-0,23$  D et un intervalle de concordance allant de  $-2,84$  à  $2,37$  D.

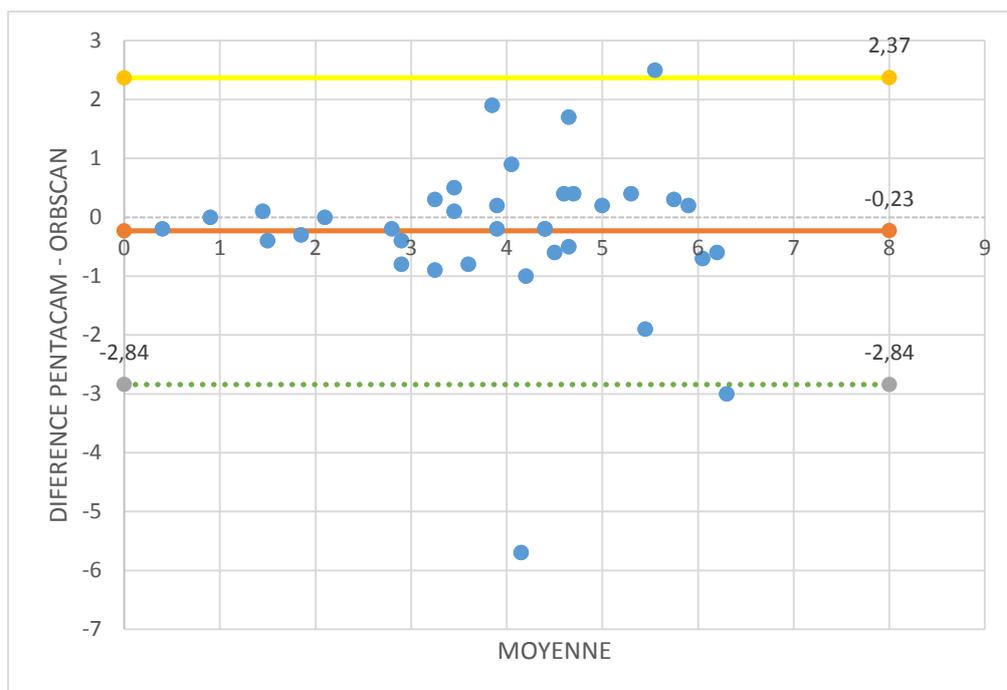


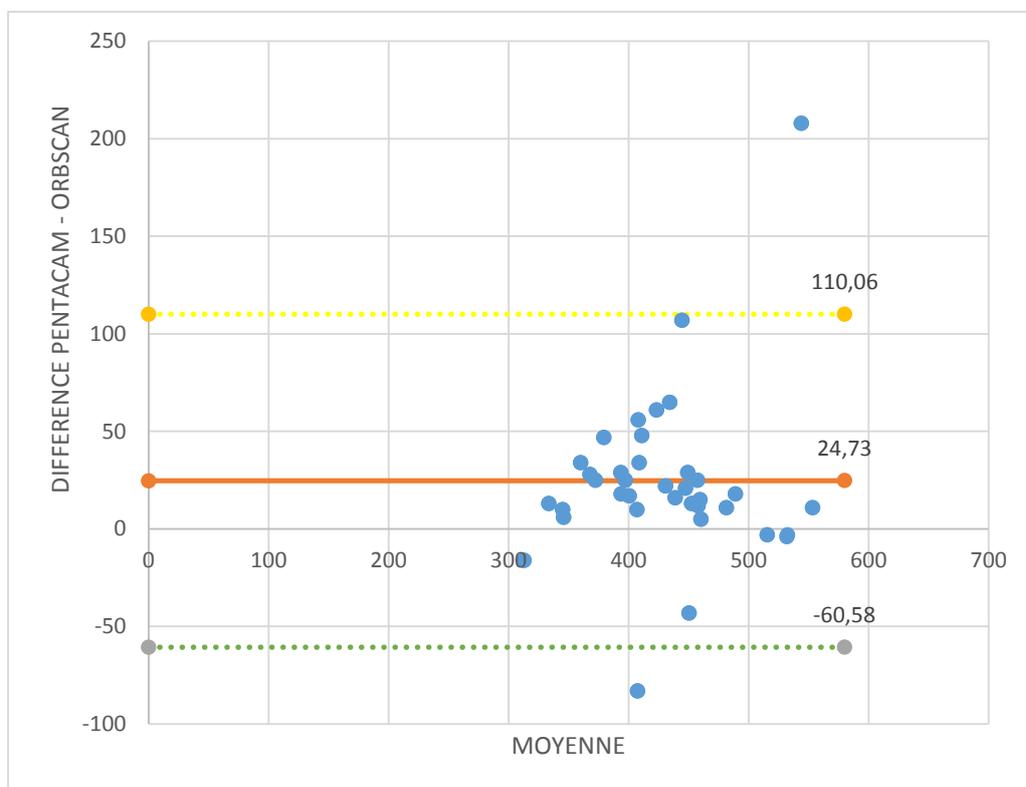
Figure 22 : Tracé Bland et Altman comparant les mesures d'astigmatisme entre Pentacam et Orbscan.

#### 4 Pachymétrie centrale

Le Pentacam surestime la valeur de la pachymétrie centrale par rapport à l'Orbscan (respectivement  $438,3 \pm 46,36\mu\text{m}$   $414,55 \pm 56,47 \mu\text{m}$ ).

L'étude statistique montre une différence statistiquement significative entre les deux appareils avec  $p=0,02$  ( $p<0,05$ ).

La comparaison de ces deux appareils de mesure selon la méthode de Bland et Altman objective une différence moyenne (Pentacam–Orbscan) de  $24,73 \mu\text{m}$  et un intervalle de concordance allant de  $-60,58$  à  $110,06 \mu\text{m}$ .



**Figure 23 : Tracé Bland et Altman comparant les mesures de pachymétrie centrale entre les deux appareils.**

## 5 Pachymétrie minimale :

Le Pentacam surestime la valeur de la pachymétrie minimale par rapport à l'Orbscan (respectivement  $419,54 \pm 56,56 \mu\text{m}$  contre  $391,72 \pm 55,38 \mu\text{m}$ ).

L'étude statistique montre une différence statistiquement significative entre les deux appareils avec  $p=0,003$  ( $p < 0,05$ ).

La comparaison de ces deux appareils de mesure selon la méthode de Bland et Altman objective une différence moyenne (Pentacam–Orbscan) de  $31,11 \mu\text{m}$  et un intervalle de concordance allant de  $-31,84$  à  $93,86 \mu\text{m}$ .

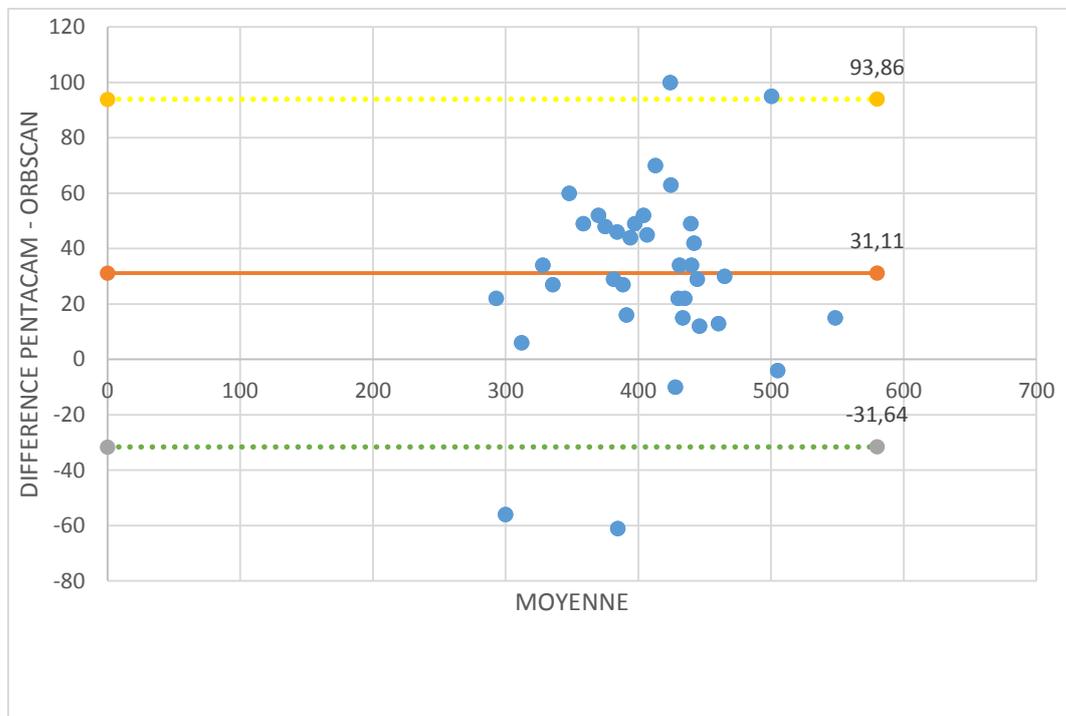


Figure 24 :Tracé de Bland et Altman comparant les mesures de pachymétrie minimale entre les deux appareils.

## 6 Élévation antérieure

Le Pentacam retrouve une valeur moyenne d'élévation antérieure inférieure à celle de l'Orbscan (respectivement  $25,44 \pm 15,78 \mu\text{m}$  contre  $42,28 \pm 26,2 \mu\text{m}$ )  
L'étude statistique ne montre de différence statistiquement significative entre les deux appareils avec  $p=3,02$  ( $p>0,05$ ).

La comparaison de ces deux appareils de mesure selon la méthode de Bland et Altman objective une différence moyenne (Pentacam-Orbscan) de  $-16,83 \mu\text{m}$  et un intervalle de concordance allant de  $-49,46$  à  $15,8 \mu\text{m}$ .

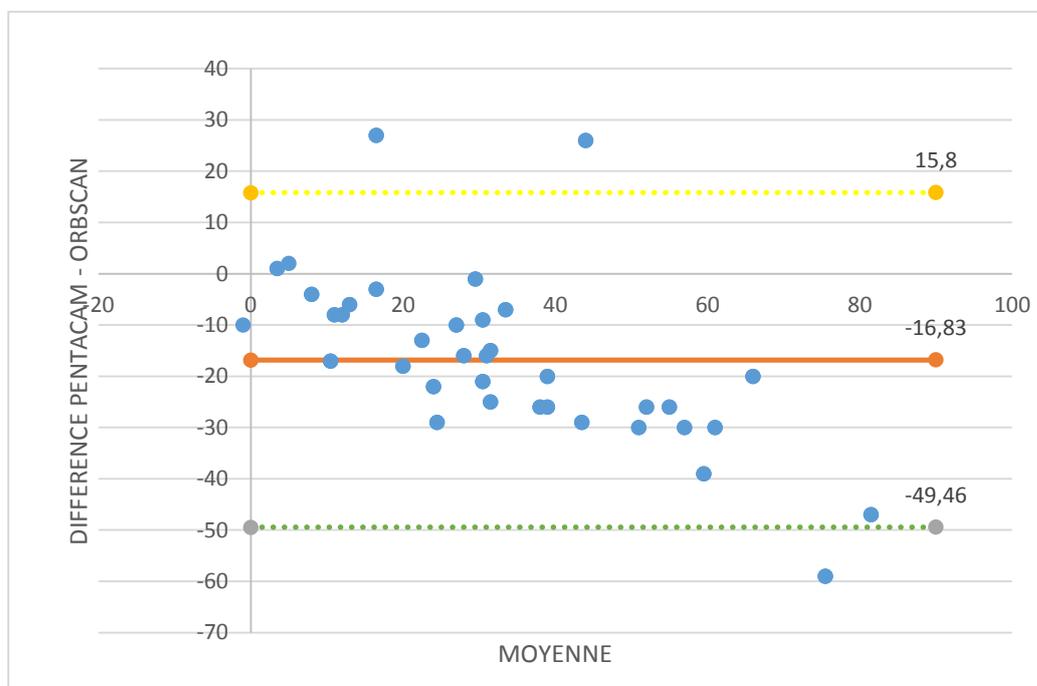


Figure 25 : Tracé de Bland et Altman comparant les mesures de l'élévation antérieure entre les deux appareils.

## 7 Élévation postérieure

Le Pentacam retrouve une valeur moyenne d'élévation antérieure inférieure à celle de l'Orbscan (respectivement  $57,36 \pm 30,67 \mu\text{m}$  contre  $90,36 \pm 42,99 \mu\text{m}$ )  
 L'étude statistique ne montre de différence statistiquement significative entre les deux appareils avec  $p=1,14$  ( $p>0,05$ ).

La comparaison de ces deux appareils de mesure selon la méthode de Bland et Altman objective une différence moyenne (Pentacam–Orbscan) de  $-33 \mu\text{m}$  et un intervalle de concordance allant de  $-78,41$  à  $12,41 \mu\text{m}$ .

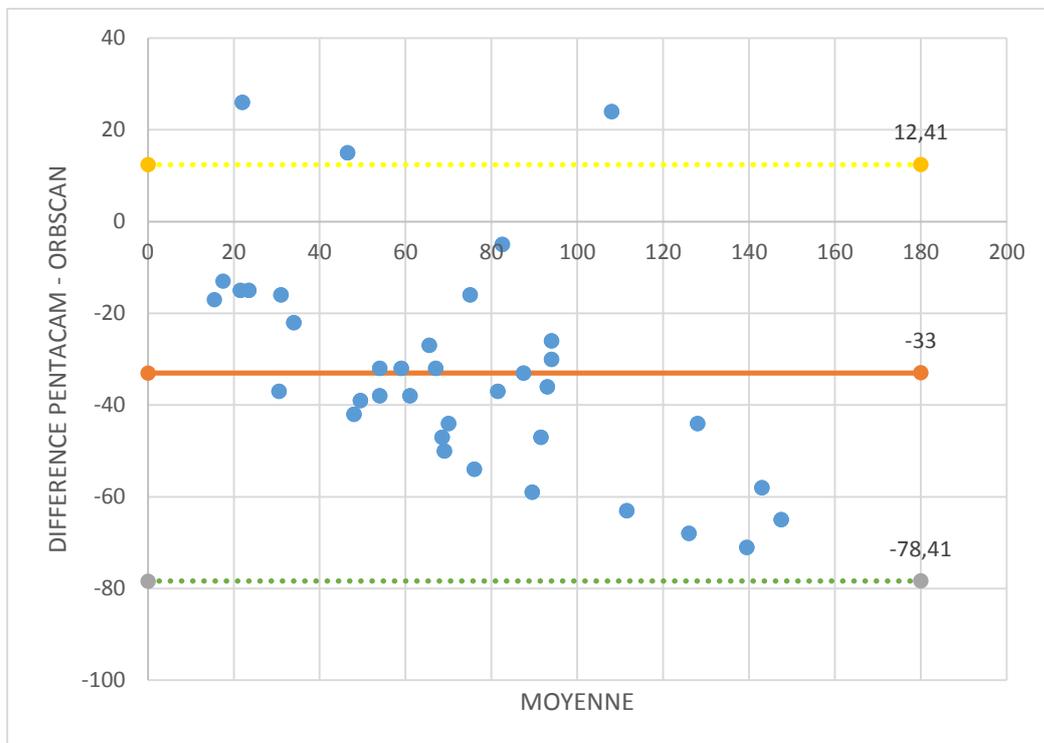


Figure 26 : Tracé de Bland et Altman comparant les mesures de l'élévation postérieure entre le Pentacam et l'Orbscan.

## IX TABLEAU RECAPITULATIF :

Tableau 4 : Tableau récapitulatif des résultats du Pentacam et de l'Orbscan

Paramètres	Pentacam	Orbscan	Différence	95% LoA	P value
K1	47,53±5,54	46,78±5,27	0,57	-1,14 à 2,29	0,52
K2	50,29±6,07	51,25±6,56	-0,96	-4,9 à 2,98	0,36
K max	54,82±7,71	54,03±6,21	0,79	-5,83 à 7,41	0,49
Pachymétrie Centrale	438,3±64,34	414,55±56,47	24,73	-60,58 à 110,06	0,02
Pachymétrie Minimale	419,54±56,56	391,72±55,38	31,11	-31,64 à 93,86	0,003
Astigmatisme	3,8±1,6	4,04±1,67	-0,23	-2,84 à 2,37	0,38
Elévation Antérieure	25,44±15,78	42,28±26,2	-16,83	-49,46 à 15,8	3,02
Elévation Postérieure	57,36±30,67	90,36±42,99	-33	-78,41 à 12,41	1,14

## C Discussion :

Aux cours des 20 dernières années, l'évolution de la chirurgie réfractive en termes de sécurité et d'efficacité, a fait de l'imagerie cornéenne et du segment antérieur une nouvelle spécialité et un centre d'intérêt de la société savante en ophtalmologie. L'amélioration continue de ces techniques d'imagerie a permis non seulement une meilleure sélection des candidats dits à risque de complications (ectasie post chirurgie), mais aussi une planification et une personnalisation des traitements au laser de ces patients par de nouvelles techniques chirurgicales(72).

Plusieurs techniques modernes d'imagerie cornéenne sont capables de fournir plusieurs détails sur les caractéristiques anatomiques et optiques de la cornée.

La topographie cornéenne a été introduite dans le milieu des années 1980 et reste jusqu'à présent le gold standard du bilan de dépistage des patients avant toute chirurgie réfractive. Elle correspond à une représentation graphique des propriétés géométriques de la surface cornéenne y compris la forme, la puissance réfractive et l'épaisseur cornéenne.

La videotopographie d'aujourd'hui a été précédé par des systèmes topographiques dites de courbure 'disque placido' qui permet une étude de la courbure et de la réfraction cornéenne mais ne permet pas une description directe de la forme réelle spatiale de la cornée. L'acquisition directe du relief cornéen n'a été rendue possible que par l'introduction des enregistreurs dites d'élévation/dépression, initialement grâce à la technologie du balayage d'une fente lumineuse introduite dans les années 1990 [8], par la suite par La technique d'imagerie de Scheimpflug et finalement grâce à la technique de stéréographie par Trame. Ces topographes dites d'élévation établissant ainsi une « vraie » carte en trois dimensions de la forme de la surface cornéenne antérieure et postérieure(72).

# I Topographie par caméra rotative Scheimpflug 'Pentacam Oculus' dans le kératocône:

## 1 Technique d'imagerie Scheimpflug :

Le Pentacam d'Oculus associe une caméra Scheimpflug rotative à une caméra statique pour acquérir plusieurs photographies du segment antérieur de l'œil. Cette technique atteint une grande profondeur de mise au point, fournissant des images nettes qui incluent des informations allant de la surface antérieure de la cornée jusqu'à la capsule cristalline postérieure. La caméra tourne avec une source de lumière monochromatique autour de l'axe optique pour obtenir les images en fente. Ce système rotatif effectue un balayage cornéen de zéro à 180 ° et chacun des photographies est une image de la cornée à un angle spécifique. La caméra statique est placée au centre pour détecter les contours de la pupille et contrôler la fixation (ceci capture et corrige les mouvements des yeux). Les photographies sont utilisées dans la reconstruction des topographies cornéennes antérieures et postérieures à partir de données de hauteur. Le Pentacam fournit également des analyses de la pachymétrie cornéenne, des aberrations du front d'onde cornéenne, de la densitométrie et de la chambre antérieure complète. Trois modèles Pentacam sont disponibles: Basic, Classique et Haute Résolution (HR)(73).

## 2 Evaluation de la précision du Pentacam dans le kératocône

Le Pentacam est parmi les nouvelles technologies d'imagerie permettant le diagnostic précoce des désordres ectatiques de la cornée. 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.

◆ **Pachymétrie cornéenne :**

Les cartes d'épaisseur complète de la cornée fournissent beaucoup d'informations supplémentaires qui n'étaient pas possibles avec la pachymétrie par ultrasons. Les cartes d'épaisseur de cornée dérivées de Scheimpflug identifient l'emplacement et la magnitude du point le plus mince de la cornée (74). Dans une précédente étude publiée, les différences entre les pachymétries apicales et celle des points les plus minces peuvent atteindre 100  $\mu\text{m}$  considérés auparavant comme « normaux » par la pachymétrie par ultrasons et par l'analyse antérieure de la courbure dérivée du placido (75).

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 grâce à un logiciel intégré 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. Les cornées anormales (c'est-à-dire les cornées présentant un changement ou une tendance ectatique ont un amincissement plus rapide de la périphérie de la cornée au point le plus mince (76).

Plusieurs écrits ont montré que le Pentacam sous-estime légèrement les pachymétrie centrale des yeux keratoconiques 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 (77). 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.

◆ **Keratométrie :**

Le calcul des puissances cornéennes revêt d'une importance cruciale dans le diagnostic du kératocône (78) (79) grâce aux cartes de courbure keratométriques qui fournissent des informations sur la courbure au niveau de chaque point de la surface cornéenne. Ce calcul peut se faire soit en se basant sur une courbure sagittale ou tangentielle, ayant une des significations et des apports différents.

Dans les cornées saines, il existe une différence statiquement significative entre le Pentacam et l'Orbscan II en termes de mesures de courbures antérieures et postérieures (80). Les études rapportent aussi des mesures similaires de la puissance cornéenne antérieure, mais un accord modéré en termes de puissance cornéenne postérieure et totale (81).

En outre, les yeux keratoconiques 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 keratométriques très élevées (82).

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 (78), d'où l'intérêt du Pentacam qui permet l'analyse des deux surfaces séparément.

◆ **Élévation antérieure et postérieure :**

L'étude de l'élévation cornéenne par le Pentacam est représentée sous forme de carte d'élévation antérieure et postérieure, qui correspondent à des comparaisons des surfaces cornéennes avec des surfaces de références (best fit sphere, toric ellipsoid) (83).

La sensibilité de la mesure de l'élévation cornéenne dans le diagnostic du kératocône a été démontré par plusieurs études. De façon plus précise, la mesure de l'élévation postérieure est un indicateur précoce des pathologies ectatiques de la cornée (74) et constitue le paramètre le plus effectif pour la détection des yeux kératoconiques. Kata Miha' Itz 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(78).

♦ **Les indices keratoconiques :**

Le principal intérêt des topographies cornéennes, y compris le Pentacam, est le calcul d'un certain nombre d'indices qui permettent la quantification du niveau d'irrégularité de la cornée. D'après ces données il existe plusieurs études cliniques qui ont tenté de déterminer des valeurs limites permettant la distinction entre les cornées normales et pathologiques et la définition des degrés de sévérité du kératocône. En outre, le problème majeur de ces indices est lié au fait que chacun d'entre eux a une grande spécificité pour le topographe par lequel il a été établi et ne peut en aucun cas être exporté et réutilisé avec un autre topographe. Par ailleurs, de nombreux indices ont été développés pour améliorer la sensibilité pour la détection des yeux keratoconiques et des formes infracliniques du kératocône. Ils sont basés sur les mesures de la courbure antérieure et postérieure, de la pachymétrie cornéenne et de l'élévation antérieure et postérieure, et ils peuvent s'agir soit d'une analyse d'un seul paramètre ou d'une combinaison de plusieurs (83).

Parmi ces indices, on trouve KPI, I-S index, KISA % index, et SARX (skewed radial axis) index qui sont connus pour leur grande sensibilité diagnostic (84) (52).

Un nouveau paramètre développé, l'indice D amélioré par Belin/ Ambrosio (indice BAD-D), qui est dérivé des données kératométriques, pachymétriques et

d'élévation postérieur et décrit par les fabricants en tant que paramètre individuel utilisable pour l'identification des patients présentant un kératocône précoce et un risque de progression en ectasie après une chirurgie réfractive (85).

Cependant, à nos jours aucun d'entre eux n'a pu atteindre, à lui seul, un pouvoir discriminant suffisant pour différencier les formes les plus discrètes de la maladie des cornées normales (86).

**Tableau 5 : Récapitulatif de toutes les études confirmant l'efficacité des indices keratoconiques dans la détection du kératocône fruste**

Study	Total number of eyes	Sample country	Age (years)	Pentacam parameters (AUC; cut-off)
Uçakhan et al. <sup>17</sup>	151	Turkey	28.3±7.3	PPI average (0.84; > 1.15) AED (0.77; > 18.5) PED (0.77; > 46.5) IVA (0.76; > 0.195) ISV (0.79; > 24.5)
Muftuoglu et al. <sup>18</sup>	112	Turkey	29.0±8.8	PE (0.71; > 11 µm) PED (0.76; > 8 µm) D (0.83; > 1.31) PPI average (0.62; > 1.15)
Bae et al. <sup>19</sup>	48	South Korea	25.08±6.4	AED (0.734; > 5.5 µm) PED (0.735; > 11.1 µm) IVA (0.733; > 0.16) IHD (0.748; > 0.008)
Ruisenor Vazquez et al. <sup>20</sup>	244	Argentina	32.5±11.7	D (0.93; > 1.61) PPI max (0.92; > 1.4) PPI average (0.86; > 1.09)
Hashemi et al. <sup>21</sup>	359	Iran	32.02±10.5	D (0.86; > 1.54) IVA (0.86; > 0.14) ISV (0.80; > 22)
de Sanctis et al. <sup>25</sup>	164	Italy	35±14	PE (0.93; > 29.0 µm)
Du et al. <sup>26</sup>	213	China	20.7±5.5	PE (0.882; > 7.5 µm) AE (0.774; > 3.5 µm) CCT (0.852; < 523.5 µm)
Current study <sup>†</sup>	213	Azerbaijan	21.5±3.13	D (0.904; 1.59) PE (0.87; > 8.0 µm) AE (0.815; > 5.0 µm) PPI average (0.834; > 1.14) IVA (0.844; > 0.15) KI (0.810; > 1.03)

<sup>†</sup>This table contains comparison between fellow eyes subclinical keratoconus vs normal eyes from this study  
AUC: Area under curve, D: Overall deviation, IVA: Index of vertical asymmetry, ISV: Index of surface variance, PPI: Pachymetric progression index

◆ **Aberrations optiques cornéennes :**

Plusieurs études ont montré que les cornées keratoconiques présentent des taux d'aberrations plus importantes que les cornées normaux (87) (88). En effet, le Pentacam grâce au polynôme de Zernike, affiche des valeurs de RMS de toutes les aberrations optiques de haut grade (RMS-HOAs) dans les yeux keratoconiques supérieurs à celles normaux (89).

D'ailleurs, Bühren et al (90) montrent des taux élevés des coefficients du Coma , de l'aberration sphérique et du Trefoil dans les kératocônes infracliniques avec une différence significative en terme du coefficient du coma vertical, et en conséquence l'asymétrie verticale a été interprétée comme un symptôme précoce de la maladie.

En effet, Alio and Shabayek (91), ont même démontré que le coma vertical est un bon indicateur pour le 'grading' du kératocône du fait de la présence d'une corrélation positive et significative entre l'augmentation des taux de keratométrie et du coma et la classification modifiée de Amsler-Krumeich en utilisant cette aberration.

En termes de fiabilité, le Pentacam garde une mauvaise répétabilité dans la mesure des aberrations du front d'onde cornéennes antérieures et postérieures dans les yeux kératoconiques (92) et même dans les yeux normaux (93). Ceci peut être expliqué par la grande variabilité des données de l'élévation antérieure et postérieure notamment pour les formes situées dans la périphérie de la décomposition du polynôme de Zernike (73).

## II Topographie par balayage d'une fente lumineuse 'Orbscan' dans le kératocône

### 1 Description de la technique d'imagerie de Orbscan :

Le dispositif de Orbscan combine des technologies de disque de Placido et de balayage à fente pour effectuer une analyse complète et non invasive du segment antérieur de l'œil (94) (73)

#### ◆ **Le disque placido :**

Le disque placido permet une mesure directe de la courbure antérieure de la cornée par l'analyse des images réfléchies des anneaux sur la cornée capturée par une caméra vidéo.

#### ◆ **Balayage par fente lumineuse :**

Le système de balayage à fente évalue directement les élevations de la surface de la cornée antérieure et postérieure, ainsi que la surface du cristallin et iris. Deux balayages verticaux sont effectués via la projection de 40 fentes optiques, 20 de droite et 20 de la gauche, sur la cornée à un angle fixe (45 degrés) par rapport à l'axe de l'instrument. Ensuite, la caméra vidéo numérique capture les fentes et ses faces antérieure et postérieure sont ensuite analysées. Les points de données obtenus à partir de chaque fente sont utilisés pour reconstruire la topographie réelle de chaque surface du segment antérieur, ainsi que celle de l'épaisseur de la cornée et l'analyse de la chambre antérieure (73).

La dernière version améliorée d'Orbscan II, l'Orbscan IIz, peut être intégrée à l'aberrom tre de front d'onde Zywave II dans la station de travail Zyoptix (73).

## 2 Evaluation de la précision de l'Orbscan dans le kératocône :

### ◆ Pachymétrie cornéenne

De nombreuses études ont démontré que la mesure de l'épaisseur cornéenne centrale dans les yeux normaux était comparable entre l'échographe mode A et Orbscan Ilz lorsque le facteur de correction approprié était utilisé (95) (96).

Mukesh et al a montré que l'Orbscan Ilz (facteur acoustique corrigé) surestime significativement l'épaisseur cornéenne centrale de 21  $\mu\text{m}$  en moyenne dans les yeux keratoconiques (97). Par ailleurs, une autre étude a révélé que la mesure de la pachymétrie cornéenne centrale effectuée par Orbscan Ilz était significativement plus basse dans les yeux keratoconiques que celles obtenues par ultrasons (98).

Cette différence pourrait être due, dans un premier lieu au fait que les données d'élévation de la cornée obtenues dans Orbscan se font à l'aide d'algorithmes utilisant des polynômes d'ordre inférieur et dans un second lieu vu que la clarté de la cornée est un facteur important pour obtenir des mesures précises avec cet appareil (97).

### ◆ Keratométrie :

Dans des yeux normaux, plusieurs études ont montré que l'Orbscan possède une précision acceptable dans la mesure de la courbure de la surface de la cornée antérieure et postérieure (99).

Módis et al (100) ont mené des évaluations de l'Orbscan sur des yeux kératoconiques par rapport à des cornées saines normales, la comparaison des valeurs de puissance cornéenne axiale et moyenne sur les surfaces antérieure et postérieure a révélé une différence statistiquement significative entre les deux groupes de patients .

Huang et al. (101) ont souligné que la carte de courbure moyenne est supérieure à la carte axiale pour la détection et la caractérisation de l'ectasie cornéenne, car elle est créée en faisant la moyenne de deux courbures principales de la cornée point à point.

La mesure de la pachymétrie cornéenne au niveau du point le plus fin révèle d'un grand intérêt diagnostique de kératocône. Une étude menée par Mórdis et al (100), montre qu'une valeur limite de la pachymétrie la plus fine  $\leq 480 \mu\text{m}$ , garanti une spécificité maximale (avec une sensibilité de 53,85%, une spécificité de 100%). Une valeur seuil avec la spécificité la plus élevée et une valeur prédictive la plus positive est utile pour la confirmation, mais pas pour le dépistage du kératocône.

◆ **Élévation antérieure et postérieure**

La mesure de l'élévation par balayage à la fente constitue une avancée significative dans le domaine de la topographie oculaire. Cette méthode est la première à fournir des données d'altitude globales sur les surfaces avant et arrière de la cornée (102).

Dans une étude récente, Jafarinasab et al (103) retrouvent qu'un seuil de  $\geq 51 \mu\text{m}$  était spécifique (98,58%) et sensible (89,23%) pour l'élévation cornéenne postérieure et un seuil de  $\geq 19 \mu\text{m}$  était très spécifique (97,16%) et sensible (93,85%) pour l'élévation de la cornée antérieure à différencier le kératocône clinique des sujets normaux.

◆ **Indices kératoconiques :**

À l'aide des données obtenues à partir d'Orbscan, au moyen d'une analyse discriminante linéaire, le 'SCORE analyser' construit un modèle permettant de distinguer les cornées saines des cornées présentant un kératocone fruste (104) (105).

Cependant, malgré sa fiabilité et sa répétabilité, l'Orbscan IIz, sans entrée de l'analyseur SCORE, ne permet pas fournir tout indice objectif pour la détection de formes fruste de kératocone (106).

### III Comparaison des résultats du 'Pentacam' et de l'Orbscan' dans les yeux keratoconiques :

#### 1 Keratométrie :

La keratométrie a plusieurs utilités en kératocône ; le diagnostic, la stadification de la maladie, le suivi de la progression, la planification du traitement et le suivi des patients. Des mesures keratométriques sont souvent nécessaires chez les patients atteints de kératocône, permettant de déterminer la progression de la maladie ou l'effet du traitement après une intervention chirurgicale. L'exactitude et la précision de la keratométrie sont donc très importantes chez ces patients.

Afin de pouvoir compter sur ces résultats, la répétabilité des mesures entre les différents appareils doit être étudiée.

##### ♦ Keratométrie plate : K1 :

Dans notre série :

Le Pentacam montre une moyenne de keratométries plates supérieure à celle obtenue par l'Orbscan (Pentacam  $47,53 \pm 5,54D$  > Orbscan  $46,78 \pm 5,27 D$ )

L'étude statistique n'a pas montré de différence statistiquement significative avec  $p=0,52$ .

La différence moyenne est de 0,57 avec une limite de concordance à 95% allant de -1,14 à 2,29 D.

##### ♦ Keratométrie cambrée : K2 :

Dans notre étude :

L'Orbscan montre une moyenne de keratométries plates supérieure à celle obtenue par le Pentacam (Orbscan  $50,29 \pm 6,07$  > Pentacam  $51,25 \pm 6,56$ )

L'étude statistique n'a pas montré de différence statistiquement significative avec  $p=0,36$ .

La différence moyenne est de  $-0,96$  avec une limite de concordance à 95% allant de  $-4,9$  à  $2,98$ .

♦ **Keratométrie maximale :**

Dans notre série :

L'Orbscan montre une moyenne de keratométries maximale supérieure à celle obtenue par le Pentacam ( $\text{Orbscan } 50,29 \pm 6,07 > \text{Pentacam } 51,25 \pm 6,56$ )

L'étude statistique n'a pas montré de différence statistiquement significative avec  $p=0,49$ .

La différence moyenne est de  $0,79$  avec une limite de concordance à 95% allant de  $-5,83$  à  $7,41$  D.

A la lumière de ces résultats nous constatant que même s'il n'y a pas de différence significative entre les valeurs obtenues par les 2 appareils, l'interchangeabilité des mesures ne peut être effectué pour K2 et Kmax vu le large intervalle de concordance.

Par contre pour K1, l'intervalle serait acceptable pour les kératocône avancés (stade 3 ou 4), par contre pour les kératocônes infracliniques frustres et débutants cette variation de différence pourrait avoir un impact clinique dans le kératocône.

Les limites de notre étude se situe en l'absence de comparaison des valeurs en fonctions des stades du kératocône.

Jay J. Meyer et al, a aussi démontré la présence d'une différence signification du K1, par contre dans K2 il confirmé nos résultats avec l'absence de différence significative, néanmoins il a conclus en la non interchangeable des mesures entres les 2 appareils vu les large intervalle de concordance (107). Hassan hashemi et al a

montré des valeurs keratométriques différentes avec aussi des axes différents, ce résultat l'avait expliqué par les différentes techniques d'imagerie et l'image de référence prise par chaque appareil (108).

Par contre dans les yeux normaux, la comparaison des keratométries plates n'a pas montré de différence significative entre ces 2 appareils, suggérant ainsi que la détérioration de la qualité d'image lors des ectasies cornéennes qui peut affecter les mesures acquises par les logiciels (109).

Tableau 6 : tableau comparative de K1 entre notre étude et les études de la littérature.

	Orbscan	Pentacam	Différence	LoA	P Value
<b>Notre étude</b>	47,53	46,78	0,57	-1,14 à 2,29	0,52
<b>Jay J. Meyer et al</b>	44,80	45,30	-0,89	-3,21 à 1,42	<0,01

Tableau 7 : tableau comparative de K2 entre notre étude et les études de la littérature.

	Orbscan	Pentacam	Différence	LoA	P Value
<b>Notre étude</b>	50,29±6,07	51,25±6,56	-0,96	-4,9 à 2,98	0,36
<b>Jay J. Meyer et al</b>	50,22	50,31	-0,05	-2,47 à 2,38	0,792

## 2 Pachymétrie :

L'amincissement cornéen est l'une des principales caractéristiques du kératocône. En effet la mesure de la pachymétrie cornéenne est 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.

À la lumière, de nouvelles interventions thérapeutiques telles que les anneaux intra-cornéens, le cross-linking du collagène cornéen et la kératoplastie lamellaire, il s'avère de plus en plus primordial d'étudier la précision et la répétabilité de ces techniques de mesure de pachymétrie dans le kératocône.

### a Pachymétrie centrale :

Dans notre étude, le Pentacam montre une moyenne d'épaisseur cornéenne centrale supérieure à celle obtenue par l'Orbscan (Pentacam  $438,3 \pm 64,34 \mu\text{m}$  > Orbscan  $414,55 \pm 56,47 \mu\text{m}$ )

L'étude statistique a montré une différence statistiquement significative entre les deux appareils avec  $p=0,02$ .

La différence moyenne est de  $24,73 \mu\text{m}$  avec une limite de concordance à 95% allant de  $-60,58$  à  $110,06 \mu\text{m}$ .

### b Pachymétrie minimale et déviation verticale :

Chez nos patients, le Pentacam montre une moyenne de pachymétrie minimale (du point le plus fin) supérieure à celle obtenue par l'Orbscan (Pentacam  $419,54 \pm 56,56 \mu\text{m}$  > Orbscan  $391,72 \pm 55,38 \mu\text{m}$ )

L'étude statistique a montré une différence statistiquement significative avec  $p=0,003$ .

La différence moyenne est de 31,11  $\mu\text{m}$  avec une limite de concordance à 95% allant de -31,64 à 93,86  $\mu\text{m}$ .

En somme, le Pentacam surestime les mesures de pachymétrie cornéenne centrale et minimale par rapport à l'Orbscan, avec la non possibilité d'interchangeabilité des mesures. Une comparaison avec le pachymètre à ultrasons s'avère intéressante afin de comparer la fiabilité des mesures de ces deux appareils.

Les résultats de Amiri et al (110) concordent avec les notre en terme de non interchangeabilité des mesures entres les deux appareils qui devient plus importante dans les stades avancés du kératocône.

Par ailleurs, Naderan et al (111) ne retrouve pas de différence statistiquement significative entre les deux appareils avec une surestimation du Pentacam à la pachymetrie minimale et une sous-estimation de la pachymétrie centrale.

La variété des résultats rapportés dans les différentes études n'est pas claire, d'autant plus qu'on sait que les mesures d'épaisseurs obtenues à l'Orbscan sont corrigé par un facteur multiplicatif (0,92) (112). certains auteurs ont comparé les résultats de différents appareils en soustrayant le facteur multiplicatif González et al (113) a étudié l'impact de ce facteur multiplicatif sur la comparaison des mesures de la pachymétrie cornéenne centrale et minimale entre l'Orbscan et le Pentacam, celui-ci a montré qu'en soustrayant ce facteur, l'Orbscan surestime les valeurs par rapport aux initiaux et ceux du Pentacam .

Il a été démontré qu'un haze cornéen même minime (114), un œdème de cornée ou une opacification cornéenne (115) peut affecter le système de balayage de Orbscan avec une modification de la célérité du son dans la cornée et par conséquent une modification des mesures de la pachymétrie. Un haze ou une opacification infraclinique pourrait ainsi expliquer cette différence de mesures entre les 2 appareils.

Cette différence de mesure de pachymétrie peut avoir d'importantes implications cliniques, à titre d'exemple le CXL ne peut pas être effectué chez les yeux dont la mesure de la pachymétrie cornéenne est faite par l'Orbscan alors qu'ils pourraient en bénéficier en cas de mesure par Pentacam ou même après soustraction du facteur multiplicatif avec Orbscan.

**Tableau 8 : tableau comparative des mesures de la pachymétrie centrale entre les différentes études**

	Orbscan	Pentacam	Différence	LoA	P Value
<b>Notre étude</b>	414,55±56,47	438,3±64,34	24,73	-60,58 à 110,06	0,02
<b>Jay J. Meyer et al</b>	479,18	484,29	5,11	-43,7 à 53,910	0,1561
<b>Naderan et al</b>	472,6	473,6	1,06	-57,20 à 59,3	0,826
<b>Kumar et al</b>	447	458	3,3	-7,07 à 13,67	P<0,001
<b>Aghazadeh et al</b>					
<b>Grade 1</b>	485,7	496,83	3,09	-25,5 à 47,4	P<0,001
<b>Grade 2</b>	442,25	462,64	3,97	-9,8 à 50,6	P<0,002
<b>Grade 3</b>	418,25	440,58	4,96	-20,0 à 64,6	P<0,003

Tableau 9: tableau comparative des mesures de la pachymétrie minimale entre les différentes études.

	Orbscan	Pentacam	Différence	LoA	P Value
Notre étude	391,72±55,38	419,54±56,56	31,11	-31,64à 93,86	0,003
Jay J. Meyer et al	459,51	453,89	5,59	-47,62 à 58,8	0,152
Naderan et al	458	447	3,3	-7,07 à 13,67	P<0,001
Quisling et al	443,6	445,9	-2,28	-71,95à 7,39	0,7303
Aghazadeh et al					
Grade 1	481,40	481,14	2,43	-33,3à32,8	P<0,001
Grade 2	432,23	440,96	3,17	-26,2à43,7	P<0,002
Grade 3	385,50	400,06	4,87	31,4à60,5	P<0,003

### 3 Élévation cornéenne :

La topographie cornéenne a facilité le diagnostic des pathologies ectatiques de la cornée notamment le kératocône. L'amincissement cornéen caractéristique correspond à une augmentation de l'élévation et du bombement de la surface postérieure par rapport à une sphère de référence ajustée au préalable dans le topographe. Ceci pourrait servir pour la discrimination des formes de kératocône infraclinique et fruste avant l'apparition d'autres signes révélateurs de la maladie.

Vue que l'Orbscan mesure mathématiquement l'élévation postérieure, il y a eu beaucoup de prudence dans la lecture de la courbure postérieure par certains auteurs (116). La comparaison des mesures de l'élévation cornéenne s'avère alors importante.

**a Élévation antérieure :**

Chez nos patients, le Pentacam montre une moyenne d'élévation cornéenne antérieure inférieure à celle obtenue par l'Orbscan (Pentacam  $25,44 \pm 15,78 \mu\text{m}$  < Orbscan  $42,28 \pm 26,2 \mu\text{m}$ ).

L'étude statistique ne montre pas de différence statistiquement significative entre les deux appareils avec  $p=3,02$ .

La différence moyenne (Pentacam–Orbscan) est de  $-16,83 \mu\text{m}$  avec une limite de concordance à 95% allant de  $-49,46$  à  $15,8 \mu\text{m}$ .

**b Élévation postérieure :**

Dans notre série, le Pentacam montre une moyenne d'élévation cornéenne postérieure inférieure à celle obtenue par l'Orbscan (Pentacam  $57,36 \pm 30,67 \mu\text{m}$  < Orbscan  $90,36 \pm 42,99 \mu\text{m}$ )

L'étude statistique ne montre pas de différence statistiquement significative entre les deux appareils avec  $p=1,14$ .

La différence moyenne (Pentacam–Orbscan) est de  $-33 \mu\text{m}$  avec une limite de concordance à 95% allant de  $-78,41$  à  $12,41 \mu\text{m}$ .

Il ressort de ces résultats que, les mesures des élévations antérieure et postérieure obtenues par le Pentacam et l'Orbscan sont incomparables avec surestimation de ce dernier pour ces valeurs. Dès lors l'intergeanchabilité des mesures est inadmissible malgré que la différence ne soit pas statistiquement significative.

Les limites de notre étude pourraient être liée à l'échantillonnage qui est petit expliquant les limites larges de concordance selon l'analyse de Bland et Altman alors que l'analyse statistique ne retrouve pas de différence statistiquement significative.

Tout de même, Quisling et al (116) ont décelé une différence significative entre les mesures de l'élévation postérieure selon BFS au niveau de l'apex entre l'Orbscan et le Pentacam.

Certains auteurs rattachent cette variété de mesure aux anomalies du film lacrymal et aux cicatrices stromales antérieures présentes dans le kératocône(116). D'autres l'ont justifié par la différence de technique d'imagerie entre les deux appareils (117).

Les seules autres études qui ont comparé les élévations cornéennes entre les différents appareils chez les patients keratoconiques, ont été réalisé chez des patients porteurs de lentilles de contact (116).

Tableau 10 : Tableau comparatif des mesures de l'élévation postérieure entre les différentes études.

	Orbscan	Pentacam	Différence	LoA	P Value
<b>Notre étude</b> (Elévation au niveau du point le plus fin)	47,53	46,78	0,57	-1,14 à 2,29	0,52
<b>Quisling et al</b> (Élévation postérieure au niveau de l'apex)	34,86	48,40	-13,64	-64,75 à 37,48	0,003

# CONCLUSION

Le Pentacam et l'Orbscan sont des nouvelles technologies d'imagerie permettant le diagnostic précoce des désordres ectatiques de la cornée notamment le kératocône avéré et frustré.

Il ressort de notre étude que l'interchangeabilité de toutes les mesures cornéennes ; keratométrie, pachymétrie et élévations antérieure et postérieure ; est inadmissible entre l'Orbscan et le Pentacam vue le large intervalle de concordance entre les deux appareils. Une différence significative est retrouvée dans les mesures de pachymétrie minimale et centrale avec une sous-estimation de l'Orbscan à ces dernières par rapport au Pentacam. Néanmoins notre étude ne remet en doute en aucun cas l'utilité et la sensibilité diagnostique de chacun des deux appareils.

Une étude comparant les différentes mesures cornéennes en fonction de la sévérité du kératocone avec un échantillonnage plus grand serait plus utile pour conclure la possibilité d'une interchangeabilité des résultats entre ces deux appareils.

## Références :

1. Fournié P, Touboul D, Arné J-L, Colin J, Malecaze F. Kératocône. /data/revues/01815512/v36i7/S0181551213002337/ [Internet]. 14 sept 2013 [cité 25 août 2019]; Disponible sur: <https://www.em-consulte.com/en/article/835098>
2. Allouch-Nahmias C, Goldschmit P, Borderie V, Touzeau O, Gaujoux T, Laroche L, et al. Anatomie de la cornée. Wwwem-Premiumcomdatatraitesop21-44155 [Internet]. 18 mai 2011 [cité 25 sept 2019]; Disponible sur: <https://rbu.univ-reims.fr:2188/article/292150/resultatrecherche/6>
3. CASSETTE NB Studio. La cornée – Docteur Damien Gatinel [Internet]. [cité 25 sept 2019]. Disponible sur: <https://www.gatinel.com/recherche-formation/la-cornee/>
4. Dua HS, Faraj LA, Said DG, Gray T, Lowe J. Human corneal anatomy redefined: a novel pre-Descemet's layer (Dua's layer). *Ophthalmology*. sept 2013;120(9):1778-85.
5. JFO-asphericite.pdf [Internet]. [cité 23 août 2019]. Disponible sur: <https://www.gatinel.com/wp-content/uploads/2010/01/JFO-asphericite.pdf>
6. CASSETTE NB Studio. Méridien – Docteur Damien Gatinel [Internet]. [cité 23 août 2019]. Disponible sur: <https://www.gatinel.com/glossaire/meridien/>
7. Pearson RM. Kalt, keratoconus, and the contact lens. *Optom Vis Sci Off Publ Am Acad Optom*. sept 1989;66(9):643-6.
8. PayPerView: Kératocône classique et kératocône fruste; arguments unitaires – Karger Publishers [Internet]. [cité 23 août 2019]. Disponible sur: <https://www.karger.com/Article/PDF/300309>

9. Kennedy RH, Bourne WM, Dyer JA. A 48-year clinical and epidemiologic study of keratoconus. *Am J Ophthalmol.* 15 mars 1986;101(3):267-73.
10. Wang Y, Rabinowitz YS, Rotter JI, Yang H. Genetic epidemiological study of keratoconus: evidence for major gene determination. *Am J Med Genet.* 28 août 2000;93(5):403-9.
11. Waked N, Fayad AM, Fadlallah A, El Rami H. [Keratoconus screening in a Lebanese students' population]. *J Fr Ophtalmol.* janv 2012;35(1):23-9.
12. Hashemi H, Khabazkhoob M, Fotouhi A. Topographic Keratoconus is not Rare in an Iranian population: the Tehran Eye Study. *Ophthalmic Epidemiol.* déc 2013;20(6):385-91.
13. Sugar J, Macsai MS. What causes keratoconus? *Cornea.* juin 2012;31(6):716-9.
14. Davidson AE, Hayes S, Hardcastle AJ, Tuft SJ. The pathogenesis of keratoconus. *Eye Lond Engl.* févr 2014;28(2):189-95.
15. 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.
16. McMonnies CW, Boneham GC. Keratoconus, allergy, itch, eye-rubbing and hand-dominance. *Clin Exp Optom.* nov 2003;86(6):376-84.
17. Bawazeer A, Hodge W, Lorimer B. Atopy and keratoconus: a multivariate analysis. *Br J Ophthalmol.* août 2000;84(8):834-6.
18. McMonnies CW. Mechanisms of rubbing-related corneal trauma in keratoconus. *Cornea.* juill 2009;28(6):607-15.
19. Expanding our understanding of eye rubbing and keratoconus. – PubMed – NCBI [Internet]. [cité 23 août 2019]. Disponible sur: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20098158>

20. Asymmetric keratoconus attributed to eye rubbing. – PubMed – NCBI [Internet]. [cité 23 août 2019]. Disponible sur: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15256993>
21. Zadnik K, Steger-May K, Fink BA, Joslin CE, Nichols JJ, Rosenstiel CE, et al. Between-eye asymmetry in keratoconus. *Cornea*. oct 2002;21(7):671-9.
22. Kim H, Joo C-K. Measure of keratoconus progression using Orbscan II. *J Refract Surg Thorofare NJ* 1995. 2008;24(6):600-5.
23. JAMALI H, BEIGI V, SADEGHI-SARVESTANI A. Consanguineous Marriage as a Risk Factor for Developing Keratoconus. *Med Hypothesis Discov Innov Ophthalmol*. 2018;7(1):17-21.
24. Gordon-Shaag A, Millodot M, Shneur E, Liu Y. The genetic and environmental factors for keratoconus. *BioMed Res Int*. 2015;2015:795738.
25. McMonnies CW. Abnormal rubbing and keratectasia. *Eye Contact Lens*. nov 2007;33(6 Pt 1):265-71.
26. McMonnies CW. The biomechanics of keratoconus and rigid contact lenses. *Eye Contact Lens*. mars 2005;31(2):80-92.
27. Lema I, Sobrino T, Durán JA, Brea D, Díez-Feijoo E. Subclinical keratoconus and inflammatory molecules from tears. *Br J Ophthalmol*. juin 2009;93(6):820-4.
28. Mackiewicz Z, Määttä M, Stenman M, Konttinen L, Tervo T, Konttinen YT. Collagenolytic proteinases in keratoconus. *Cornea*. juin 2006;25(5):603-10.
29. Balasubramanian SA, Pye DC, Willcox MDP. Effects of eye rubbing on the levels of protease, protease activity and cytokines in tears: relevance in keratoconus. *Clin Exp Optom*. mars 2013;96(2):214-8.
30. 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.

31. 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.
32. Lowell FC, Carroll JM. A study of the occurrence of atopic traits in patients with keratoconus. *J Allergy.* juill 1970;46(1):32-9.
33. 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.
34. Georgiou T, Funnell CL, Cassels-Brown A, O'Connor R. Influence of ethnic origin on the incidence of keratoconus and associated atopic disease in Asians and white patients. *Eye Lond Engl.* avr 2004;18(4):379-83.
35. Chan E, Snibson GR. Current status of corneal collagen cross-linking for keratoconus: a review. *Clin Exp Optom.* mars 2013;96(2):155-64.
36. Gorskova EN, Sevost'ianov EN. [Epidemiology of keratoconus in the Urals]. *Vestn Oftalmol.* août 1998;114(4):38-40.
37. 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.* nov 2009;148(5):760-5.
38. Spoerl E, Raiskup-Wolf F, Kuhlisch E, Pillunat LE. Cigarette smoking is negatively associated with keratoconus. *J Refract Surg Thorofare NJ* 1995. sept 2008;24(7):S737-740.
39. Krachmer JH, Feder RS, Belin MW. Keratoconus and related noninflammatory corneal thinning disorders. *Surv Ophthalmol.* févr 1984;28(4):293-322.
40. 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.

41. Does ethnic origin influence the incidence or severity of keratoconus? – PubMed – NCBI [Internet]. [cité 24 août 2019]. Disponible sur: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11040911>
42. 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.
43. 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.
44. Pobelle-Frasson C, Velou S, Huslin V, Massicault B, Colin J. [Keratoconus: what happens with older patients?]. *J Fr Ophtalmol*. sept 2004;27(7):779-82.
45. 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*. juin 2002;106(6):365-72.
46. Clinical and epidemiological features of keratoconus genetic and external factors in the pathogenesis of the disease. – PubMed – NCBI [Internet]. [cité 25 août 2019]. Disponible sur: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/3019073>
47. Salabert D, Cochener B, Mage F, Colin J. [Keratoconus and familial topographic corneal anomalies]. *J Fr Ophtalmol*. 1994;17(11):646-56.
48. Videokeratographic anomalies in familial keratoconus. – PubMed – NCBI [Internet]. [cité 25 août 2019]. Disponible sur: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15121361>
49. CASSETTE NB Studio. Keratocone signe de Munson – Docteur Damien Gatinel [Internet]. [cité 21 sept 2019]. Disponible sur: <https://www.gatinel.com/recherche-formation/keratocone-2/keratocone-signe-de-munson/>

50. Besharati MR, Shoja MR, Manaviat MR, Kheirandish M, Rad MZ. Corneal topographic changes in healthy siblings of patients with keratoconus. *Int J Ophthalmol.* 18 mars 2010;3(1):73-5.
51. Rabinowitz YS, Yang H, Brickman Y, Akkina J, Riley C, Rotter JI, et al. Videokeratography database of normal human corneas. *Br J Ophthalmol.* juill 1996;80(7):610-6.
52. Rabinowitz YS, McDonnell PJ. Computer-assisted corneal topography in keratoconus. *Refract Corneal Surg.* déc 1989;5(6):400-8.
53. Rabinowitz YS, Rasheed K. KISA% index: a quantitative videokeratography algorithm embodying minimal topographic criteria for diagnosing keratoconus. *J Cataract Refract Surg.* oct 1999;25(10):1327-35.
54. Tanabe T, Oshika T, Tomidokoro A, Amano S, Tanaka S, Kuroda T, et al. Standardized color-coded scales for anterior and posterior elevation maps of scanning slit corneal topography. *Ophthalmology.* juill 2002;109(7):1298-302.
55. Krumeich JH, Daniel J, Knülle A. Live-epikeratophakia for keratoconus. *J Cataract Refract Surg.* avr 1998;24(4):456-63.
56. Apports de l'OCT dans le diagnostic du kératocône - Hôpital Ophtalmologique de la Fondation Bouamatou [Internet]. [cité 24 sept 2019]. Disponible sur: <https://fondationbouamatou.com/apports-de-loct-dans-le-diagnostic-du-keratocone/>
57. Rabinowitz YS. Keratoconus. *Surv Ophthalmol.* févr 1998;42(4):297-319.
58. Spoerl E, Huhle M, Seiler T. Induction of cross-links in corneal tissue. *Exp Eye Res.* janv 1998;66(1):97-103.
59. 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.

60. Raiskup-Wolf F, Hoyer A, Spoerl E, Pillunat LE. Collagen crosslinking with riboflavin and ultraviolet-A light in keratoconus: long-term results. *J Cataract Refract Surg.* mai 2008;34(5):796-801.
61. Wittig-Silva C, Whiting M, Lamoureux E, Lindsay RG, Sullivan LJ, Snibson GR. A randomized controlled trial of corneal collagen cross-linking in progressive keratoconus: preliminary results. *J Refract Surg Thorofare NJ* 1995. sept 2008;24(7):S720-725.
62. Hersh PS, Greenstein SA, Fry KL. Corneal collagen crosslinking for keratoconus and corneal ectasia: One-year results. *J Cataract Refract Surg.* janv 2011;37(1):149-60.
63. Asri D, Touboul D, Fournié P, Malet F, Garra C, Gallois A, et al. Corneal collagen crosslinking in progressive keratoconus: multicenter results from the French National Reference Center for Keratoconus. *J Cataract Refract Surg.* déc 2011;37(12):2137-43.
64. Colin J, Malet FJ. Intacs for the correction of keratoconus: two-year follow-up. *J Cataract Refract Surg.* janv 2007;33(1):69-74.
65. 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.
66. 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.
67. Stojanovic 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.

68. 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.
69. 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.
70. 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.
71. Fournié P, Malecaze F, Couillet J, Arné J-L. Variant of the big bubble technique in deep anterior lamellar keratoplasty. *J Cataract Refract Surg*. mars 2007;33(3):371-5.
72. Ambrósio R, Valbon BF, Faria-Correia F, Ramos I, Luz A. Scheimpflug imaging for laser refractive surgery. *Curr Opin Ophthalmol*. juill 2013;24(4):310-20.
73. Oliveira CM, Ribeiro C, Franco S. Corneal imaging with slit-scanning and Scheimpflug imaging techniques. *Clin Exp Optom*. janv 2011;94(1):33-42.
74. Scheimpflug imaging for keratoconus and ectatic disease. – PubMed – NCBI [Internet]. [cité 19 nov 2019]. Disponible sur: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/23925323>
75. Intrasubject corneal thickness asymmetry. – PubMed – NCBI [Internet]. [cité 19 nov 2019]. Disponible sur: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/18581786>
76. 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.

77. 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.
78. 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.
79. 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.
80. Corneal changes after laser refractive surgery for myopia: comparison of Orbscan II and Pentacam findings. – PubMed – NCBI [Internet]. [cité 19 nov 2019]. Disponible sur: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17466859>
81. Repeatability, reproducibility, and agreement characteristics of rotating Scheimpflug photography and scanning-slit corneal topography for corneal ... – PubMed – NCBI [Internet]. [cité 19 nov 2019]. Disponible sur: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19101435>
82. 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.
83. 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>
84. Evaluation of keratoconus in Asians: role of Orbscan II and Tomey TMS-2 corneal topography. – PubMed – NCBI [Internet]. [cité 20 nov 2019]. Disponible sur: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17224118>

85. Belin MW, Khachikian SS, Jr RA, Salomão M. Keratoconus / Ectasia Detection with the Oculus Pentacam: Belin / Ambrósio Enhanced Ectasia Display. 35(6):8.
86. Belin MW, Villavicencio OF, Ambrósio RRJ. Tomographic Parameters for the Detection of Keratoconus: Suggestions for Screening and Treatment Parameters. Eye Contact Lens. nov 2014;40(6):326.
87. Total, corneal, and internal ocular optical aberrations in patients with keratoconus. – PubMed – NCBI [Internet]. [cité 20 nov 2019]. Disponible sur: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19848377>
88. Jafri B, Li X, Yang H, Rabinowitz YS. Higher order wavefront aberrations and topography in early and suspected keratoconus. J Refract Surg Thorofare NJ 1995. oct 2007;23(8):774-81.
89. Aksoy S, Akkaya S, Özkurt Y, Kurna S, Açıkalin B, Şengör T. Topography and Higher Order Corneal Aberrations of the Fellow Eye in Unilateral Keratoconus. Turk J Ophthalmol. oct 2017;47(5):249-54.
90. Bühren J, Kook D, Yoon G, Kohlen T. Detection of subclinical keratoconus by using corneal anterior and posterior surface aberrations and thickness spatial profiles. Invest Ophthalmol Vis Sci. juill 2010;51(7):3424-32.
91. Alió JL, Shabayek MH. Corneal higher order aberrations: a method to grade keratoconus. J Refract Surg Thorofare NJ 1995. juin 2006;22(6):539-45.
92. Shankar H, Taranath D, Santhirathelagan CT, Pesudovs K. Repeatability of corneal first-surface wavefront aberrations measured with Pentacam corneal topography. J Cataract Refract Surg. mai 2008;34(5):727-34.
93. Read SA, Collins MJ, Iskander DR, Davis BA. Corneal topography with Scheimpflug imaging and videokeratography: comparative study of normal eyes. J Cataract Refract Surg. juin 2009;35(6):1072-81.

94. Orbscan computerized topography: attributes, applications, and limitations. – PubMed – NCBI [Internet]. [cité 20 nov 2019]. Disponible sur: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15721715>
95. Anterior ocular biometry using 3-dimensional optical coherence tomography. – PubMed – NCBI [Internet]. [cité 20 nov 2019]. Disponible sur: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19410946>
96. Amano S, Honda N, Amano Y, Yamagami S, Miyai T, Samejima T, et al. Comparison of central corneal thickness measurements by rotating Scheimpflug camera, ultrasonic pachymetry, and scanning-slit corneal topography. *Ophthalmology*. juin 2006;113(6):937-41.
97. Kumar M, Shetty R, Jayadev C, Dutta D. Comparability and repeatability of pachymetry in keratoconus using four noncontact techniques. *Indian J Ophthalmol*. sept 2015;63(9):722-7.
98. Corneal pachymetry in normal and keratoconic eyes: Orbscan II versus ultrasound. – PubMed – NCBI [Internet]. [cité 20 nov 2019]. Disponible sur: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15177603>
99. Hashemi H, Mehravaran S. Day to Day Clinically Relevant Corneal Elevation, Thickness, and Curvature Parameters Using the Orbscan II Scanning Slit Topographer and the Pentacam Scheimpflug Imaging Device. *Middle East Afr J Ophthalmol*. 2010;17(1):44-55.
100. Módis L, Németh G, Szalai E, Flaskó Z, Seitz B. Scanning-slit topography in patients with keratoconus. *Int J Ophthalmol*. 18 nov 2017;10(11):1686-92.
101. Huang D, Tang M. Gaussian fitting on mean curvature maps of parameterization of corneal ectatic diseases [Internet]. US7497575B2, 2009 [cité 20 nov 2019]. Disponible sur: <https://patents.google.com/patent/US7497575B2/en>

102. Cairns G, McGhee CNJ, Collins MJ, Owens H, Gamble GD. Accuracy of orbscan II slit-scanning elevation topography. *J Cataract Refract Surg.* déc 2002;28(12):2181-7.
103. Jafarinasab. Sensitivity and specificity of posterior and anterior corneal elevation measured by Orbscan in diagnosis of clinical and subclinical keratoconus [Internet]. [cité 20 nov 2019]. Disponible sur: <http://www.jovr.org/article.asp?issn=2008-322X;year=2015;volume=10;issue=1;spage=10;epage=15;aulast=Jafarinasab>
104. Saad A, Gatinel D. Topographic and tomographic properties of forme fruste keratoconus corneas. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* nov 2010;51(11):5546-55.
105. CASSETTE NB Studio. Saad A Gatinel D. Validation of a new scoring system for the detection of early forme of keratoconus. – Docteur Damien Gatinel [Internet]. [cité 21 nov 2019]. Disponible sur: <https://www.gatinel.com/2012/09/saad-a-gatinel-d-validation-of-a-new-scoring-system-for-the-detection-of-early-forme-of-keratoconus-int-j-kerat-ect-cor-dis-2012-12100-108/saad-a-gatinel-d-validation-of-a-new-scoring-system-for-the-detection-of-early-forme-of-keratoconus/>
106. Chan C, Ang M, Saad A, Chua D, Mejia M, Lim L, et al. Validation of an Objective Scoring System for Forme Fruste Keratoconus Detection and Post-LASIK Ectasia Risk Assessment in Asian Eyes. *Cornea.* sept 2015;34(9):996-1004.
107. Meyer JJ, Gokul A, Vellara HR, Prime Z, McGhee CNJ. Repeatability and Agreement of Orbscan II, Pentacam HR, and Galilei Tomography Systems in Corneas With Keratoconus. *Am J Ophthalmol.* mars 2017;175:122-8.
108. Hashemi H, Yekta A, Khabazkhoob M. Effect of keratoconus grades on repeatability of keratometry readings: Comparison of 5 devices. *J Cataract Refract Surg.* mai 2015;41(5):1065-72.

109. Crawford AZ, Patel DV, McGhee CNJ. Comparison and repeatability of keratometric and corneal power measurements obtained by Orbscan II, Pentacam, and Galilei corneal tomography systems. *Am J Ophthalmol.* juill 2013;156(1):53-60.
110. Corneal thickness measurements with Scheimpflug and slit scanning imaging techniques in keratoconus [Internet]. [cité 22 nov 2019]. Disponible sur: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5362393/>
111. Naderan M, Shoar S, Naderan M, Kamaledin MA, Rajabi MT. Comparison of corneal measurements in keratoconic eyes using rotating Scheimpflug camera and scanning–slit topography. *Int J Ophthalmol.* 18 avr 2015;8(2):275-80.
112. Touzeau O, Allouch C, Borderie V, Laroche L. Biométrie oculaire par Orbscan. /data/revues/01815512/00280006/660/ [Internet]. 8 mars 2008 [cité 22 nov 2019]; Disponible sur: <https://www.em-consulte.com/en/article/113038>
113. González–Pérez J, González–Méijome JM, Rodríguez Ares MT, Parafita MA. Central corneal thickness measured with three optical devices and ultrasound pachometry. *Eye Contact Lens.* mars 2011;37(2):66-70.
114. Boscia F, La Tegola MG, Alessio G, Sborgia C. Accuracy of Orbscan optical pachymetry in corneas with haze. *J Cataract Refract Surg.* févr 2002;28(2):253-8.
115. Masson E. Topographie d'élévation et analyse du segment antérieur par balayage d'une fente lumineuse (Orbscan) [Internet]. EM–Consulte. [cité 23 nov 2019]. Disponible sur: <https://www.em-consulte.com/es/article/7667/topographie-d-elevation-et-analyse-du-segment-ante>
116. Quisling S, Sjoberg S, Zimmerman B, Goins K, Sutphin J. Comparison of Pentacam and Orbscan IIz on posterior curvature topography measurements in keratoconus eyes. *Ophthalmology.* sept 2006;113(9):1629-32.
117. Quisling S, Sjoberg S, Zimmerman B, Goins K, Sutphin J. Comparison of Pentacam and Orbscan IIz on Posterior Curvature Topography Measurements in Keratoconus Eyes. *Ophthalmology.* 1 sept 2006;113(9):1629-32.

