

PLAN

INTRODUCTION :.....	7
Partie théorique	8
A Anatomie du segment antérieure	9
I Chambre antérieure.....	9
1 La cornée.....	9
a Anatomie macroscopique.....	9
b Anatomie microscopique.....	11
c Innervation de la cornée :.....	15
2 L'iris :.....	15
a Face antérieure :	16
b Face postérieure	16
c Muscle :.....	17
d Vascularisation	17
e Innervation :	18
3 Angle irido-cornéen :.....	18
a La ligne de Schwalbe :.....	18
b L'éperon scléral :	18
c La bande ciliaire :.....	19
d La racine de l'iris :.....	19
II CHAMBRE POSTERIEURE	19
1 Cristallin :.....	19
2 La zonule	21
3 Le corps ciliaire	21
a Les procès ciliaires.....	23
b Le muscle ciliaire	23
B Examen du segment antérieur :.....	24

I	Examen biomicroscopique à la lampe à fente	24
1	Cornée :	24
2	Chambre antérieure :	26
3	Iris et la pupille :	27
4	Cristallin :	27
5	Angle irido-cornéenne :	28
a	Ouverture de l'AIC :	29
b	Pigmentation trabéculaire :	30
c	Encombrement trabéculaire :	31
	32
d	Niveau d'insertion de l'iris (apparent et réel) et forme de la périphérie irienne :	32
II	Biomicroscopie ultrasonore du segment antérieur :	33
1	Analyse de la cornée : (application en chirurgie réfractive).....	35
2	Analyse de l'angle irido-cornéen :	36
a	Application en glaucome :	36
	39
III	Topographie cornéenne et camera sheimpflug :	40
1	Différentes type de topographies :	40
a	Topographie par réflexion spéculaire :	40
b	Topographie par balayage par fente lumineuse :	41
c	Topographie par camera rotative Sheimpflug :	42
2	Analyses établies par la topographie :	43
IV	Interférométrie :	48
V	Tomographie par cohérence optique :	51
1	Analyse des mensurations du segment antérieur :	52

2	Analyse de l'angle irido-cornéen :	52
Partie pratique	54
A	Matériels et méthodes :	55
B	Résultats :	59
I	Age :	59
II	Sexe :	59
III	Profil réfractif :	60
IV	Données biométriques :	61
1	Longueurs axiales :	61
2	Les mesures obtenues par le pentacam :	62
a	Kératométrie.....	62
b	Astigmatisme :	62
c	Axe :	62
d	Epaisseur cornéenne centrale :	62
e	Profondeur de la chambre antérieure :	62
f	Diamètre pupillaire :	62
3	Les mesures obtenues par le Lenstar LS 900 :	63
a	Kératométrie.....	63
b	Astigmatisme :	63
c	Axe de l'astigmatisme :	63
d	Epaisseur cornéenne centrale :	63
e	Profondeur de la chambre antérieure :	63
f	Diamètre pupillaire :	63
V	Comparaison entre le pentacam et le lenstar LS 900 :	64
a	Kératométrie.....	64
b	Astigmatisme :	66

c	Axe :	67
d	Epaisseur cornéenne centrale :	68
e	Profondeur de la chambre antérieure :	69
f	Diamètre pupillaire :	70
VII	Tableau récapitulatif :	71
C	Discussion :	72
I	Evaluation du lenstar LS 900 dans les mesures biométriques oculaires :	73
1	Technique de prise de mesure : (image du service)	73
2	Les mesures effectuées par le lenstar LS 900 :	74
a	Epaisseur cornéenne centrale :	74
b	Kératométrie :	74
c	Profondeur de la chambre antérieure :	74
d	Longueur axiale :	74
e	Epaisseur cristallinienne :	74
f	Blanc à blanc :	75
g	Pupillométrie:	75
3	Evaluation du Lenstar LS 900 :	75
II	Evaluation du pentacam :	77
1	Evaluation du pentacam :	78
III	Comparaison entre le Pentacam et le Lenstar LS 900 :	79
1	Kératométrie :	79
2	Epaisseur cornéenne centrale :	82
3	Profondeur de la chambre antérieure :	83
4	Axe de l'Astigmatisme :	85
5	L'astigmatisme :	85
6	Diamètre pupillaire :	86

Conclusion :	87
Annexes :	88
A Liste des Figures :.....	89
B Liste des tableaux :.....	91
C Listes des graphiques :.....	92
RÉFÉRENCES :	93

INTRODUCTION :

Depuis l'avènement de la chirurgie réfractive ; plusieurs appareils ont été développés pour mesurer les propriétés biométriques du globe oculaire. Ces appareils donnent des calculs précis reproductibles avec des marges d'erreurs très faibles.

La mesure des paramètres biométriques du segment antérieur s'avère de plus en plus utile dans différents secteurs en ophtalmologie. En chirurgie de cataracte, les formules nouvelles incluent dans leurs calculs d'autres paramètres autres que la longueur axiale et la kératométrie tel que la profondeur de la chambre antérieure, le blanc à blanc, ceci est d'autant plus sollicité lors de l'utilisation des implants phakes. En chirurgie réfractive soustractive, l'épaisseur cornéenne reste parmi les critères les plus sensibles dans la sélection des malades opérables. En glaucome, la profondeur de la chambre antérieure permet de prédire les patients à risque de fermeture de l'angle, justifiant un traitement préventif.

Parmi les appareils les plus modernes utilisés dans les mesures de la biométrie du segment antérieur, on trouve le Pentacam avec sa caméra Scheimpflug et la biométrie non contact en utilisant la technologie d'interférométrie.

L'objectif de notre étude est de comparer les valeurs biométriques du segment antérieur obtenues par la biométrie non contact et le Pentacam : K1, K2, kératométrie moyenne ; axe de l'astigmatisme ; Profondeur de la chambre antérieure ; le diamètre blanc à blanc, pachymétrie centrale, profondeur de la chambre antérieure.

PARTIE THEORIQUE

A Anatomie du segment antérieure

C'est un espace anatomique qui constitue la partie antérieure de l'œil délimité en avant par la cornée et en arrière par le cristallin. Il est divisé par le diaphragme cristallinien en 2 chambres : une antérieure et l'autre postérieure.

I Chambre antérieure

Cet espace anatomique parfaitement observé en biomicroscopie est délimité par l'endothélium de la cornée en avant, l'iris en arrière et l'angle irido-cornéen en périphérie. Sa profondeur, qui détermine le degré d'ouverture de l'angle irido-cornéen, varie de 2,5 à 3,5 mm, et diminue avec l'âge, ou la présence d'un implant phaque pré-cristallinien. Elle est remplie d'humeur aqueuse qui apporte les éléments nutritifs à la cornée. Elle est un espace anatomique d'importance majeure en chirurgie réfractive, comme voie d'abord de la chambre postérieure ou en tant que site d'implantation.

1 La cornée(1)

a Anatomie macroscopique

La cornée est une structure transparente, avasculaire, formée de plusieurs types cellulaires d'origine embryologique différente. Elle est enchâssée dans la partie antérieure de la sclérotique. 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. Le diamètre vertical de la cornée est de 11 à 11,5 mm et le diamètre horizontal est de 11,5 à 12,0 mm. Elle a une épaisseur de 520 µm au centre et augmente progressivement vers la périphérie. La forme de la cornée est prolate c'est-à-dire bombée au centre et plate en périphérie ce qui confère à la cornée un système optique asphérique.

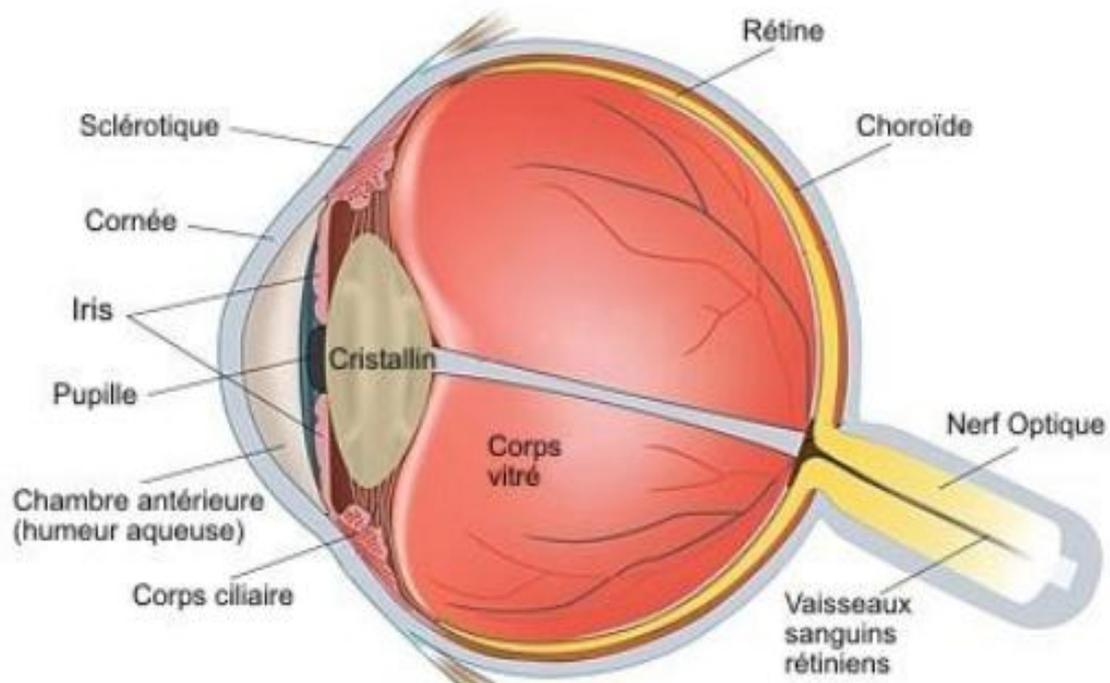


Figure 1 : coupe sagittale donnant une appréciation macroscopique de l'œil

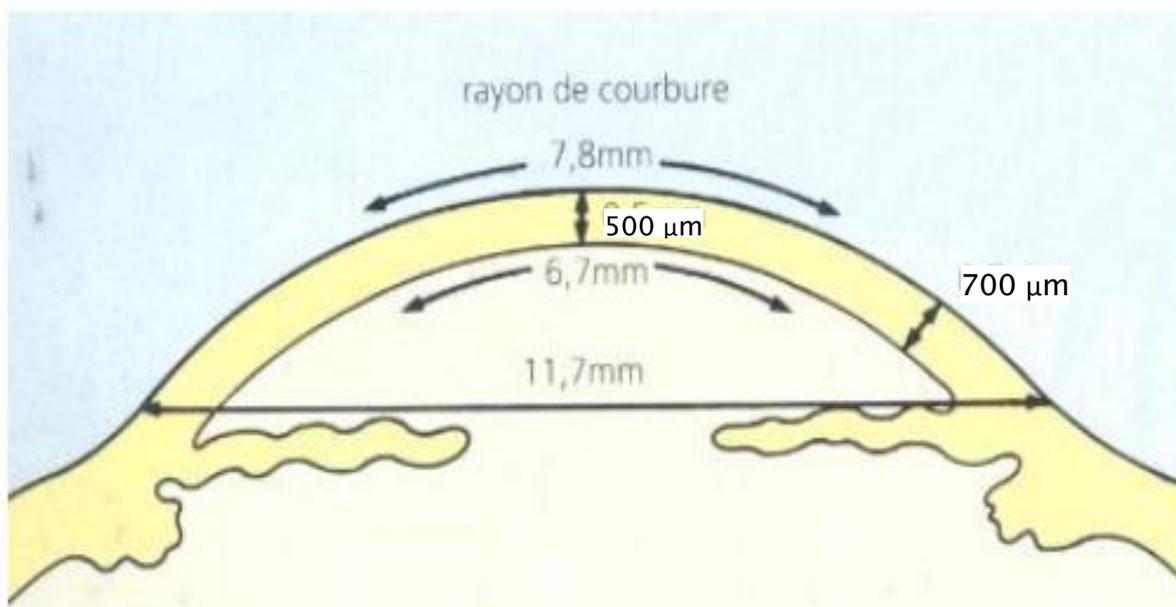


Figure 2 : illustration des courbures antérieures de l'œil (cornée)

b Anatomie microscopique

La cornée se compose d'avant en arrière de six couches successives :

- L'épithélium associé au film lacrymal ;
- La couche de Bowman ;
- Le stroma ;
- La couche de Dua ;
- La membrane de Descemet ;
- L'endothélium.
- **L'épithélium cornéen :**

C'est une structure tissulaire en continuité avec l'épithélium conjonctival. Il est indissociable du film lacrymal et partage avec celui-ci son rôle optique et métabolique. Son épaisseur est de 30 µm à 50 µm, soit 10 % de l'épaisseur cornéenne totale.

L'épithélium est pavimenteux stratifié, non kératinisé. Il comprend cinq à sept assises de cellules dans sa partie centrale et huit à dix dans sa partie périphérique. Il existe trois types de cellules épithéliales : les cellules superficielles, les cellules intermédiaires et les cellules basales qui reposent sur une membrane basale.

Cette membrane basale de l'épithélium est synthétisée par les cellules épithéliales et sépare la couche de Bowman de l'épithélium.

- **Couche de Bowman :**

C'est une couche composée de fibres de collagènes réparties dans la substance fondamentale. Elle mesure de 8 à 10 µm d'épaisseur et est située entre la membrane basale de l'épithélium et le stroma. Elle est acellulaire, excepté 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.

- **Stroma :**

Le stroma mesure environ 500 μm d'épaisseur et constitue à lui seul environ 90 % de l'épaisseur cornéenne. 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. La majorité des caractéristiques de la cornée comme sa solidité, la stabilité de sa forme et sa transparence sont attribuables aux propriétés anatomiques, biochimiques et biomécaniques du stroma cornéen.

Lamelles de collagène :

Le stroma cornéen est composé d'environ 200 à 250 lamelles de collagène empilées les unes sur les autres. Les lamelles de collagène sont parallèles entre elles, et parallèles à la surface cornéenne. Chaque lamelle mesure 2 μm d'épaisseur et 9 μm à 260 μm de largeur. L'organisation lamellaire du stroma produit une force de tension uniforme résistant à la pression intraoculaire et maintenant une courbure cornéenne appropriée aux fonctions optiques et biomécanique de l'œil. Le collagène qui constitue les lamelles est de type I. Les collagènes de type III, V et VI sont également présents dans le stroma en plus petite quantité. Le crosslinking crée des liaisons supplémentaires entre les fibres de collagène de manière à augmenter la force mécanique des tissus.

Substance fondamentale

La substance fondamentale occupe tout l'espace compris entre les fibres de collagène. Elle assure la cohésion des fibres de collagène et est responsable de leur espacement strictement ordonné, ce qui joue un rôle fondamental dans la transparence cornéenne.

Les kératocytes

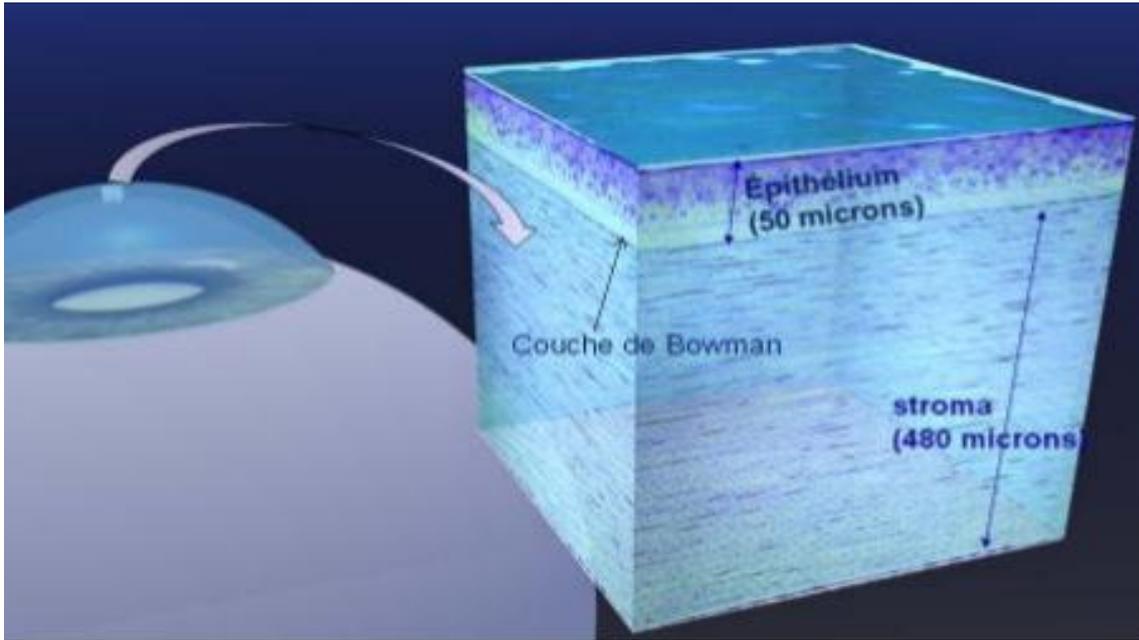


Figure 3 : coupe histologique de la cornée(2)

Elles occupent environ 2 % à 3 % du volume stromal total. Il s'agit de cellules de type conjonctif. Ce sont des cellules plates étoilées, disposées parallèlement à la surface de la cornée et aux lamelles de collagène. La forme et la fonction des kératocytes sont régularisées par le milieu extracellulaire. Leurs propriétés fondamentales sont la biosynthèse de la matrice extracellulaire : mucopolysaccharides et collagène

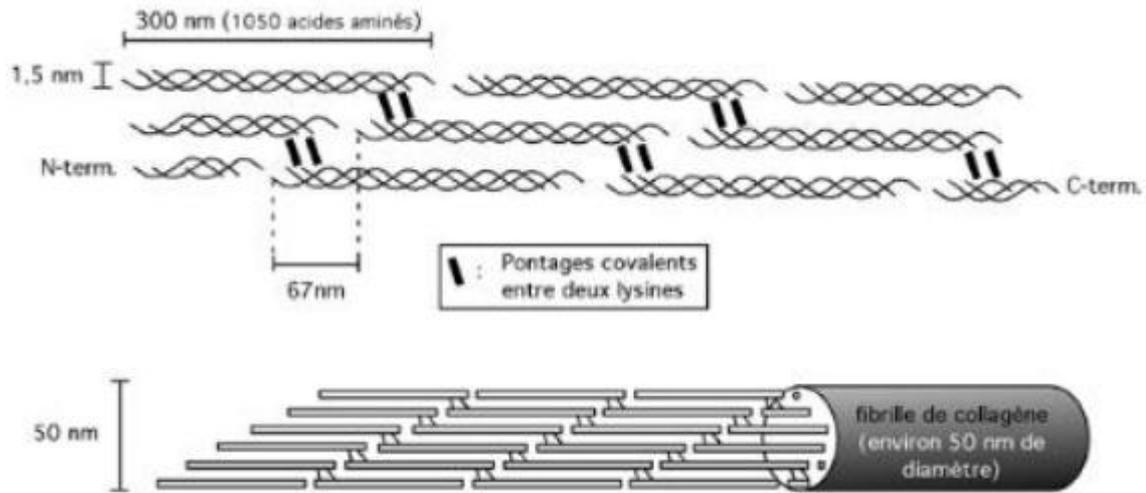


Figure 4 : disposition des fibrede collagène dans le stroma cornéen (3)

- **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 trabéculaire. Ce qui suggère le rôle de cette couche dans le développement du glaucome. Elle pourrait également avoir un intérêt dans la chirurgie de greffe profonde de la cornée (4).

- **Membrane de Descemet**

C'est une membrane très résistante, amorphe, élastique et perméable à l'eau. Elle mesure environ 10 μm , son épaisseur augmente avec l'âge et dans certaines pathologies.

- **Endothélium**

Il s'agit de la couche la plus postérieure de la cornée ; elle est en contact avec l'humeur aqueuse en arrière. La cornée maintient une épaisseur relativement constante et demeure transparente ; elle doit lutter en permanence contre l'imbibition hydrique. Il fonctionne comme une pompe active grâce à la pompe Na^+/K^+ ATPase.

L'endothélium est formé d'une monocouche de cellules uniformes hexagonales plates, régulières. Cette régularité en « nid-d'abeilles » est caractéristique. La densité cellulaire normale chez un jeune est de 3 500 cellules/mm². Elle est facile à déterminer grâce à la microscopie spéculaire.

Innervation de la cornée :

- **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 plexi 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.

- **Sympathique et adrénargique :**

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

2 L'iris (5):

L'iris forme un rideau tendu dans le plan frontal séparant les chambres antérieures et postérieures de l'œil. Il constitue la partie antérieure du tractus uvéal. L'iris mesure 12 à 13 mm de diamètre, et approximativement 37 mm de circonférence(6). L'épaisseur de l'iris est variable puisqu'elle peut aller de 0,1 mm au niveau de sa racine, jusqu'à 0,6 mm au niveau de la collerette. La collerette est située à 2-3 mm de la marge pupillaire et divise la face antérieure de l'iris en deux parties : la zone sphinctérienne et la zone ciliaire périphérique.

La face antérieure de l'iris est au contact de l'humeur aqueuse qui pénètre dans le stroma par les cryptes de Fuchs.

Sur sa face postérieure, l'iris repose sur le cristallin dans l'espace de l'aire pupillaire, alors que les deux tiers restants sont au contact de l'humeur aqueuse de la chambre postérieure.

a Face antérieure :

Les variations individuelles d'aspect de l'iris s'expliquent par les différences de pigmentation. Les iris bruns sont caractérisés par une pigmentation dense. Les iris bleus contiennent moins de pigment dans le stroma. Leur couleur résulte de l'absorption par le stroma des longueurs d'onde élevées, alors que les longueurs d'ondes basses comme le bleu sont réfléchies. Chez les albinos la couleur rose de l'iris est expliquée par l'absence de pigment, aussi bien sur l'épithélium pigmentaire que sur le stroma.

La face antérieure de l'iris contracte des rapports anatomiques étroits avec les implants phake. Elle est le site de fixation des implants phakes iris-claw, et peut entrer en contact avec les haptiques des implants à support angulaire, déterminant des zones d'atrophie et des ovalisations pupillaires.

b Face postérieure

D'origine neuro-ectodermique, le feuillet postérieur est le prolongement de l'épithélium pigmenté de la rétine. Sa coloration noire est expliquée par la présence abondante de pigment mélanique (**figure5**). Il entre en contact avec les implants phakes pré-cristalliniens.

Un frottement répété lors du jeu pupillaire peut entraîner une dispersion pigmentaire vers la chambre antérieure et l'angle irido-cornéen, à l'origine d'hypertonies chroniques secondaires.

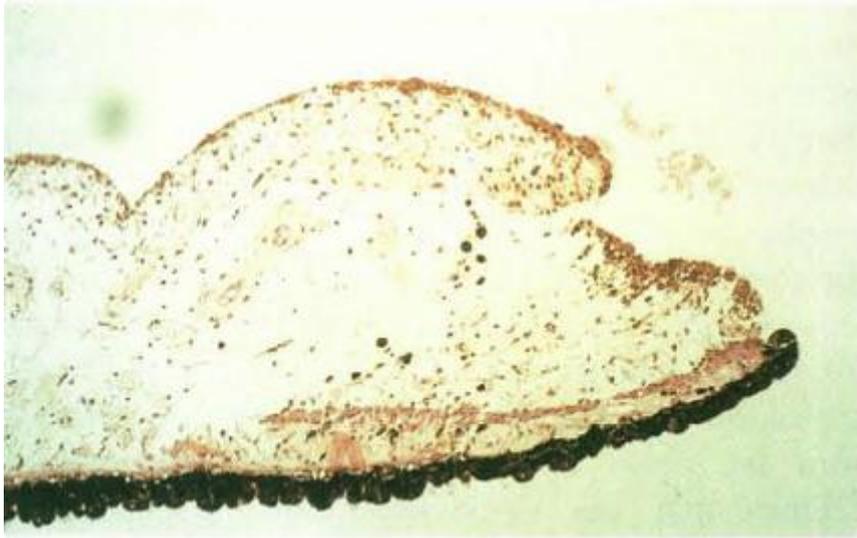


Figure 5 : vue d'ensemble de l'iris. De haut en bas : couche cellulaire antérieure, stroma, épithélium antérieur avec muscle dilatateur et épithélium pigmenté postérieur(7)

c Muscle :

Le muscle sphincter de l'iris est un muscle annulaire plat, entourant la pupille, situé sur la partie postérieure et interne de l'iris, près de la marge pupillaire.

Le muscle dilatateur de l'iris, situé en avant de la couche pigmentée de l'épithélium, s'étend de façon radiaire, de la racine de l'iris vers la pupille.

d Vascularisation

Bien explorée par l'angiographie en fluorescence, elle est assurée par le grand cercle artériel de l'iris.

Les artères et les veines cheminent de façon radiaire, de la racine vers la pupille. Les veines se drainent vers les veines ciliaires antérieures. Certaines atrophies en secteur de l'iris, observées après implantation en chambre antérieure, sont parfois expliquées par des phénomènes ischémiques (compression vasculaire par les haptiques).

e Innervation :

Elle est assurée par des fibres sensibles provenant du nerf trijumeau (nerfs ciliaires), par des fibres sympathiques (action dilatatrice), et par des fibres parasympathiques (action myotique).

3 Angle irido-cornéen (8):

L'angle irido-cornéen est compris entre, en avant la jonction corneo-sclérale et, en arrière le corps ciliaire et l'iris. Cette région anatomique joue un rôle essentiel dans la physiologie et la pathologie de l'excrétion de l'humeur aqueuse.

Grace à la gonioscopie différentes structures peuvent être visualisé d'avant en arrière :

a La ligne de Schwalbe :

La ligne de Schwalbe correspond à une condensation de la membrane de Descemet. Elle apparait sous forme d'une ligne grise faisant discrètement saillie dans la chambre antérieure. Elle précède le trabéculum scléral.

b L'éperon scléral :

Correspond à une condensation des fibres sclérales à trajet circulaire. C'est un véritable bourrelet annulaire, il a la forme d'un triangle a sommet inferieur dirige vers la chambre antérieure. Sur sa face antérieure s'appuie le trabéculum corneo-scléral, sur sa face postérieure s'insèrent des fibres du muscle ciliaire ; son sommet est recouvert de trabéculum uvéal.

c Trabéculum : tissu conjonctif lacunaire qui tapisse tous les élément anatomique de l'angle, rôle primordial dans l'excrétion de l'humeur aqueuse

d La bande ciliaire :

Elle apparait comme une bande brune plus ou mains foncée, occupe le fond de l'angle.

e La racine de l'iris :

C'est la partie la plus mince et la plus fragile.

II CHAMBRE POSTERIEURE

Cet espace anatomique est délimité en arrière par le cristallin, en avant par le feuillet postérieur pigmenté de l'iris, et en dehors par la zonule, qui relie l'équateur cristallinien au muscle ciliaire. La profondeur de la chambre postérieure varie avec les variations de forme du cristallin lors du processus d'accommodation. La chirurgie réfractive intervient à son niveau dans les techniques d'implantation pré-cristalliniennes et dans la chirurgie du cristallin à visée réfractive. La morphologie de la zonule peut être modifiée dans la technique des implants scléraux (remise en tension par expansion sclérale). Cet espace ne peut être exploré en clinique que par les techniques complémentaires utilisant les ultrasons à hautes fréquences.

1 Cristallin (9):

Le cristallin se présente sous forme d'une lentille biconvexe transparente, placée entre l'iris et le vitre.

Il est suspendu au corps ciliaire par l'intermédiaire de la zonule. Avasculaire et non innervé, ses échanges métaboliques se font à travers sa capsule. Ses caractéristiques morphologiques sont les suivantes : lentille biconvexe aplatie d'avant

en arrière, son diamètre frontal est de 9 à 10 mm, son diamètre antéro-postérieur de 4 mm.

Le rayon de courbure de la face antérieure varie de 10 mm au repos, jusqu'à 6 mm lors de l'accommodation.

Le rayon de courbure de la face postérieure varie de 6 mm au repos jusqu'à 5,5 mm lors de l'accommodation.

L'axe équatorial du cristallin est orienté perpendiculairement au plan sagittal.

L'aspect biomicroscopique du cristallin s'explique par son embryologie. Ainsi le noyau est composé schématiquement par la superposition de trois noyaux : le plus interne est le noyau embryonnaire, le plus externe est le noyau adulte, et entre les deux se trouve le noyau fœtal. Chez l'adulte entourant le noyau, on peut observer le cortex lui-même entouré par la capsule cristallinienne ou cristalloïde.

La face antérieure du cristallin répond à l'iris et baigne dans l'humeur aqueuse de la chambre postérieure.

La face postérieure répond à la hyaloïde antérieure du vitre. L'adhérence entre ces deux structures, qui correspond au ligament de Wieger, est variable avec l'âge. Cette adhérence est forte chez l'enfant (d'où l'impossibilité d'une extraction chirurgicale intracapsulaire du cristallin) et devient de plus en plus lâche chez l'adulte.

En dehors, et sur toute sa circonférence, l'équateur du cristallin répond aux fibres zonulaires. Celles-ci s'insèrent sur la face antérieure du cristallin pour les fibres zonulaires antérieures et sur la face postérieure pour les fibres zonulaires postérieures. L'espace délimité par ces deux insertions correspond à l'espace de Petit.

Le cristallin assure la transmission des rayons lumineux vers le segment postérieur (transparence) ;

Il joue un rôle optique important (asphéricité) et surtout réfractif (pouvoir dioptrique modulable pour la vision de loin ou de près grâce à l'accommodation).

2 La zonule

C'est un système de fibres tendues entre le corps ciliaire et l'équateur du cristallin. Leur rôle essentiel, en dehors du maintien du cristallin, est de transmettre à celui-ci la contraction du muscle ciliaire.

L'ensemble de ces fibres a la forme d'un triangle à sommet ciliaire. Elles sont classifiées selon leurs insertions(10).

Les fibres orbiculo-capsulaires postérieures naissent au voisinage de l'ora serrata pour se diriger vers la face postérieure du cristallin.

Les fibres orbiculo-capsulaires antérieures naissent 1,5 mm en avant de l' ora serrata, et se dirigent vers la face antérieure du cristallin.

Les fibres cilio-capsulaires postérieures naissent entre les procès ciliaires, au niveau des vallées ciliaires, et se terminent sur la face postérieure du cristallin.

Les fibres cilio-équatoriales naissent au niveau du sommet des procès ciliaires et s'insèrent sur l'équateur du cristallin.

Enfin, les fibres cilio-ciliaires assurent la solidité de l'Ensemble.

3 Le corps ciliaire (11):

Segment intermédiaire du tractus uvéal, situé entre l'iris en avant et la choroïde en arrière, le corps ciliaire se présente comme un anneau saillant à l'intérieur de la cavité oculaire avec un aspect de bourrelet strié. Par le biais des procès ciliaires il contrôle la sécrétion d'humeur aqueuse, et par le biais du muscle ciliaire il joue un rôle essentiel dans le phénomène d'accommodation. De plus, il donne insertion à l'iris et participe à l'anatomie de l'angle irido-cornéen. Embryologiquement les procès ciliaires dérivent du neuro-ectoderme, alors que le muscle ciliaire dérive du mésoderme.

En anatomie macroscopique le corps ciliaire est un anneau large d'environ 7 à 8 mm en temporal, et 6 à 7 mm en nasal. Il est placé en regard de l'équateur du cristallin, et par l'intermédiaire de la sclère, en regard de l'insertion des muscles droits interne, inférieur et externe.

Lors de la dissection oculaire il présente un aspect triangulaire, avec un sommet qui correspond à l'ora serrata, une base qui répond à l'iris, une face antéro-externe (ou antéro-supérieure) qui répond à la sclère, et une face postéro-interne (ou postéro-inférieure) qui regarde vers l'intérieur du globe. Cette dernière face présente une partie lisse qui correspond à la pars plana, et une partie saillante qui correspond aux procès ciliaires.



Figure 6 : Vue d'ensemble des corps ciliaires montrant de bas en haut la sclère, le muscle ciliaire et les procès ciliaires(7).

a Les procès ciliaires

Les procès ciliaires, au nombre de 80 environ, ont une couleur beaucoup plus pale que celle du reste du corps ciliaire. Leur taille moyenne est de 2 mm de long sur 1,5 mm de large. Ils sont en rapport avec le vitré, la zonule cristallinienne et l'équateur du cristallin, avec lequel ils ne sont jamais en contact direct (séparés toujours par une distance d'au moins un millimètre).

La base du corps ciliaire est la partie la plus antérieure du corps ciliaire. Elle est divisée en deux par l'insertion de la racine de l'iris. Elle participe à l'anatomie de l'angle irido-cornéen, ou elle est recouverte par le trabéculum uvéal.

b Le muscle ciliaire

Le muscle ciliaire adopte la forme d'un triangle rectangle avec une hypoténuse parallèle à la sclère, et deux angles aigus répondant l'un à l'ora serrata (angle postérieur), et l'autre à l'angle irido-cornéen (angle antérieur)(10). Ce muscle est constitué de fibres lisses longitudinales qui forment le muscle de Brucke, et de fibres lisses circulaires qui forment le muscle de Muller. Chacun de ces deux muscles aurait une action différente : rôle sur l'excrétion de l'humeur aqueuse par action sur le canal de Schlemm pour le muscle de Brucke, et rôle sur

L'accommodation par action de type sphinctérienne pour le muscle de Muller. Il est d'ailleurs classique de décrire une hypertrophie de ce muscle chez l'hypermétrope par l'effort d'accommodation qui lui est nécessaire pour voir net de loin.

B Examen du segment antérieur :

I Examen biomicroscopique à la lampe à fente

L'examen à la lampe à fente doit être mené selon une séquence systématique au faible grossissement en lumière diffuse non focalisée dans un premier temps, en fente fine et éclairage direct plan par plan (cornée, chambre antérieure, iris, pupille, cristallin) ensuite. Une augmentation de l'intensité lumineuse, une réduction des dimensions de la fente, une accentuation du grossissement améliorent, si nécessaire, l'analyse d'une anomalie particulière.

L'éventuel troisième temps est réservé à des manœuvres plus particulières : observation de la surface cornéenne après coloration du film lacrymal ; observation en lumière réfléchi pour l'étude de la lueur pupillaire, de l'iris et de la chambre antérieure, ou en éclairage spéculaire (faisceau réfléchi et incident formant un angle identique) pour l'étude de l'endothélium cornéen, enfin observation à l'aide d'un des accessoires précédemment cités.

1 Cornée :

Organe transparent et avasculaire, sa coupe optique obtenue au biomicroscope apparaît comme un rectangle lumineux arciforme à convexité antérieure qui permet de différencier de l'avant vers l'arrière :

- l'épithélium (12)
- le stroma dans lequel l'observation attentive au fort grossissement peut mettre en évidence les fins filets nerveux sous la forme de filaments grisâtres radiaires. Ils assurent la sensibilité cornéenne ;
- la membrane de Bowman, en avant, correspond à la limite épithélio-stromale ;
- la membrane de Descemet, plus épaisse, est objectivée par la limite postérieure du double contour stromal ;

- l'endothélium cornéen n'est pas visible à l'observation directe. Il faut se mettre dans les conditions de l'observation spéculaire pour le visualiser sous la forme d'une mosaïque de cellules jointives régulièrement polygonales, leur densité physiologique étant de l'ordre de 2000/mm².
- La surface épithéliale peut être facilement objectivée en colorant le film lacrymal pré cornéen avec l'utilisation de colorants vitaux.

De tous les colorants vitaux disponibles, seul un petit nombre, parmi lesquels la fluorescéine, le vert de lissamine et (de moins en moins car un peu douloureux) le rose Bengale, occupe une place privilégiée et est utilisable sans risque pour l'examen cornéoconjonctival. Indispensables dans l'observation clinique au biomicroscope, ils aident à l'analyse des lésions épithéliales.

La fluorescéine représente le colorant vital le plus largement utilisé pour l'observation de l'intégrité anatomique et fonctionnelle de l'épithélium. Après instillation de fluorescéine, en lumière bleue, la surface cornéenne est alors faiblement colorée et uniformément verte. La fluorescéine colore les solutions de continuité épithéliale, rendant évidente toute ulcération épithéliale. Elle ne colore pas les cellules saines ni le mucus.

D'autres colorants sont utilisés. On peut citer :

- le rose Bengale. C'est un dérivé de la fluorescéine qui appartient comme elle aux colorants xanthéniques. Le rose Bengale colore les cellules en voie de kératinisation, les cellules mortes mais non desquamées, le mucus.
- le mélange rose Bengale-fluorescéine. Il peut être intéressant et permettre par une seule instillation, l'observation simultanée de l'altération du film lacrymal, et des solutions de continuité de l'épithélium ;

- le vert de lissamine. Utilisé à 1%, il a les mêmes propriétés que le rose Bengale, mais il a l'avantage que son instillation est totalement indolore. La coloration s'observe directement en lumière blanche.
- le bleu de tétrazolium. Son intérêt essentiel serait la possibilité d'établir un diagnostic différentiel entre conjonctivite bactérienne et conjonctivite non bactérienne. Ce test relativement fiable est en fait peu connu et guère utilisé dans la pratique quotidienne, du moins en France.
- le bleu alcyan pour l'étude des conjonctives. Mais il doit être proscrit dès qu'existe une lésion cornéenne
- On peut citer quelques mesures normales des paramètres cornéens :
 - Rayon de courbure : 7,70 à 7,8 mm ; sa mesure est indispensable dans l'adaptation des lentilles de contact.
 - Épaisseur cornéenne : 0,52 mm au centre, avec d'importantes variations topographiques et nyctémérales. La surveillance de l'épaisseur cornéenne au centre est indispensable dans les hypertonies de découverte récente, pour apprécier la validité de la mesure de la pression oculaire, dans le suivi des troubles de l'endothélium cornéen.
 - Le diamètre cornéen évolue de 10 mm à la naissance pour atteindre vers 2 ans, 10 à 11,5 mm en vertical, 11,5 à 12,5 mm en horizontal. Ces paramètres sont essentiels pour le suivi des glaucomes congénitaux.

2 Chambre antérieure :

Elle est normalement optiquement vide, car l'humeur aqueuse qui la remplit est normalement pure. Le biomicroscope permet d'apprécier la profondeur de la chambre antérieure. Si celle-ci est diminuée (chambre antérieure étroite), il peut y avoir danger de glaucome aigu par fermeture de l'angle. Sa mesure précise est rarement indispensable, excepté dans ce cadre particulier.(13)

Lors de l'examen de la chambre antérieure, on recherche l'existence de cellules, d'un phénomène de Tyndall, toujours difficile à chiffrer subjectivement. Les mesures objectives (laser flare meter) sont préférées lorsqu'elles sont disponibles afin de suivre l'évolution des uvéites.

3 Iris et la pupille :

Avant toute dilatation, on apprécie le diamètre pupillaire, la régularité de la pupille et on étudie les réflexes photomoteurs.

La pupille comme l'iris sont en premier lieu examinés attentivement à la lumière du jour lors de l'inspection. Ils sont en principe symétriques et uniformes.

Au biomicroscope, on étudie le sphincter irien (rupture de ce sphincter dans certains traumatismes), les cryptes du stroma plus ou moins bien dessinées selon que la pigmentation est pauvre ou dominante.

Le bord pupillaire, souligné d'un ourlet pigmentaire, est normalement rond, régulier et réactif.

4 Cristallin :

En l'absence de cataracte, le cristallin est transparent. Il est au mieux analysé après dilatation pupillaire. La biomicroscopie en coupe optique du cristallin a la capacité d'objectiver l'hétérogénéité histologique et structurelle de cette lentille intraoculaire par une succession d'images de densité différente, séparées les unes des autres par des bandes de discontinuité. Les structures les plus âgées sont centrales et les plus jeunes, périphériques.

La coupe biomicroscopique du cristallin globalement biconvexe, peut ainsi être analysée du centre vers la périphérie, ordre dans lequel, elle individualise vers l'avant ou l'arrière :

- le noyau embryonnaire central ;
- le noyau fœtal en « grain de café » ;
- le noyau infantile ;
- le noyau adulte ;
- le cortex inexistant à la naissance, qui va progressivement s'épaissir au cours de la vie ;
- la capsule sous forme d'un fine double contour optiquement vide.

Une éventuelle cataracte est appréciée, selon son évolution (débutante, mûre, blanche totale) et sa situation (corticale, nucléaire, sous capsulaire postérieure, en cavaliers, cataracte congénitale partielle...).

5 Angle irido-cornéenne :

L'examen de l'angle se fait par la gonioscopie. Elle consiste en l'analyse de l'angle irido-cornéen (AIC) au niveau duquel se situent les voies d'écoulement de l'humeur aqueuse.

Elle doit donc être systématiquement réalisée chez tout patient glaucomateux avéré ou suspecté, chez tout hypertone oculaire et en cas d'étranglement de la chambre antérieure afin d'évaluer l'accessibilité de l'humeur aqueuse à ces voies d'évacuation.

Elle permet de déterminer si l'angle est ouvert, fermé de façon transitoire ou définitive, susceptible de fermeture, « encombré » (pigment, synéchies ou autre) ou dysgénésique, et de proposer si besoin un traitement approprié (iridotomie, gonioplastie, trabéculoplastie, chirurgie filtrante).(14)

En pratique courante on réalise à la lampe à fente une gonioscopie indirecte à l'aide d'un verre posé sur la cornée après une anesthésie de contact, verre de Goldmann (un ou trois miroirs) ou verre à quatre miroirs (Posner, Zeiss) ce dernier, de diamètre inférieur à celui de la cornée, permettant une gonioscopie dynamique.

La gonioscopie se doit d'évaluer les points-clés suivants (moyen mnémotechnique « OPEN ») :

O : ouverture de l'AIC ;

P : pigmentation angulaire ;

E : encombrement trabéculaire ;

N : niveau d'insertion de l'iris (apparent et réel) et forme de la périphérie irienne.

a. Ouverture de l'AIC :

Elle doit être appréciée dans tous les cadrans. Elle est fonction de la visibilité des éléments constitutifs de l'AIC qui sont d'avant en arrière :

(1) *l'anneau de Schwalbe* (translucide, parfois hypertrophié – embryotoxon postérieur – ou pigmenté) ;

(2) *le trabéculum* (dont la partie postérieure filtrante est plus ou moins pigmentée) ;

(3) *l'éperon scléral* (bande blanche nacrée, élément le moins variable) ;

(4) *la bande ciliaire* (marron ou rose, plus large chez le myope ou l'aphaque) ;

(5) la racine irienne (mobile).

La classification de Shaffer est la plus utilisée. Elle tient compte de l'angle formé par la partie interne du trabéculum et la face antérieure de l'iris à un tiers de la périphérie irienne :

- Grade 0 (0°) : aucune structure n'est visible, l'angle est fermé ;
- Grade 1 (10°) : seul l'anneau de Schwalbe est visible : la fermeture est probable ;
- Grade 2 (20°) : le trabéculum est visible : la fermeture est possible ;

- Grade 3 (25–35°) : l'éperon est visible : la fermeture est improbable ;
- Grade 4 (35–40°) : la bande ciliaire est visible : la fermeture est impossible.

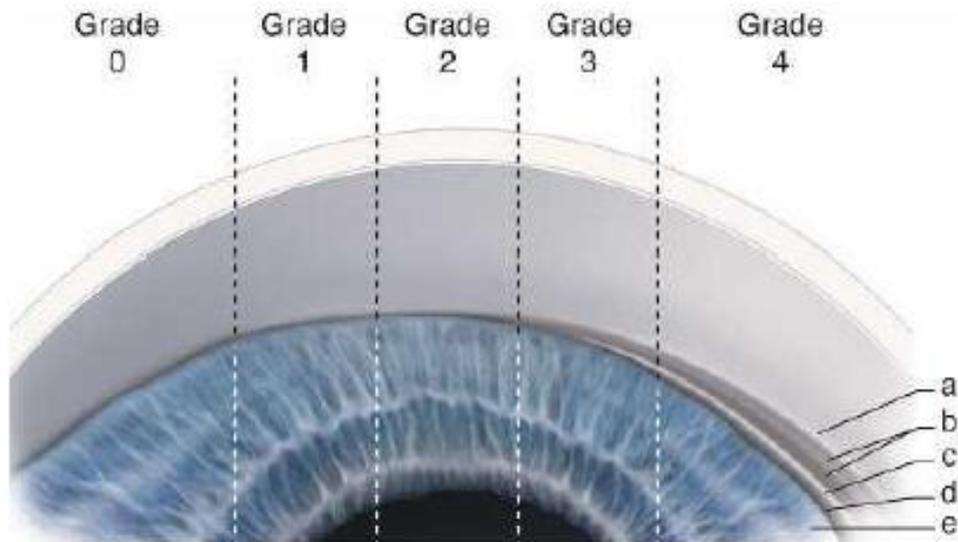


Figure 7 : Représentation de la classification de Shaffer ; a : ligne de shwalbe, b : trabéculum, c : ligne de shwalbe, d : bande ciliaire, e : racine de l'iris (11)

Lorsque l'iris cache tout ou partie des éléments de l'AIC, il faut réaliser une gonioscopie dynamique. L'appui du verre à quatre miroirs sur la cornée chasse l'humeur aqueuse vers l'AIC, l'ouvrant là où cela est possible (manœuvre de Forbes). Cette manœuvre permet de différencier une apposition irienne (transitoire), d'une synéchie iridocornéenne qui est accolement définitif entre la périphérie irienne et le trabéculum. Des synéchies étendues sur plus de 180° compromettent la fonctionnalité de l'AIC.

a Pigmentation trabéculaire :

Physiologiquement elle est modérée, intéresse surtout le trabéculum postérieur et prédomine dans le sinus inférieur, mais la pigmentation varie avec l'âge et l'ethnie. Toute hyperpigmentation trabéculaire est pathologique.

La classification de Scheie apprécie l'intensité de la pigmentation angulaire (cotée de 1 à 4) dans le syndrome de dispersion pigmentaire et permet donc de suivre l'évolution éventuelle de ce dernier.

Les autres causes de pigmentation trabéculaire sont la pseudoexfoliation capsulaire, les traumatismes, les uvéites (pigmentation irrégulière), les tumeurs iriennes ou ciliaires, les suites de crise de fermeture de l'AIC ou d'iridotomie.

b Encombrement trabéculaire :

Les causes d'augmentation de la résistance de l'écoulement de l'humeur aqueuse par encombrement trabéculaire sont, outre le pigment :

Le matériel exfoliatif de la pseudoexfoliation capsulaire

Les néovaisseaux des glaucomes néovasculaires

et surtout les **synéchies iridocristalliniennes**, dont la topographie et la configuration orientent vers l'étiologie (par exemple : plutôt supérieures en cas de crise de fermeture de l'AIC, plutôt inférieures dans les syndromes inflammatoires, atteignant l'anneau de Schwalbe dans les syndromes irido-cornéo-endothéliaux et les glaucomes néovasculaires à un stade tardif). L'étendue des synéchies conditionne le pronostic fonctionnel du trabéculum filtrant.

L'encombrement trabéculaire signe la nature secondaire de l'hypertonie ou du glaucome.



Figure 8 : image gonioscopique montrant des synéchies antérieures périphériques (11)

c Niveau d'insertion de l'iris (apparent et réel) et forme de la périphérie irienne :

La racine irienne est normalement discrètement convexe. Elle peut cependant être : concave (myope, syndrome de dispersion pigmentaire avec bloc pupillaire inverse) ; convexe, de façon limitée (kyste ou tumeur ciliaire) ou globale (bloc pupillaire, cristallin volumineux) ; plane : dans les cas de configuration d'iris plateau.

L'iris est normalement inséré sur la face antérieure du corps ciliaire. Les variantes sont (classification de Spaeth) :

- une insertion en avant du trabéculum ;
- une insertion derrière l'anneau de Schwalbe ;
- une insertion sur l'éperon scléral ;
- une insertion sur le corps ciliaire (normalité) ;

- une insertion postérieure avec visibilité anormale du corps ciliaire, témoignant d'une récession angulaire, généralement traumatique.

En cas de configuration d'iris plateau (chambre antérieure profonde, iris plan, angulation abrupte de la racine irienne vers le sommet de l'angle qui est étroit ou fermé), la gonioscopie dynamique objective le niveau d'insertion réel de l'iris et l'absence de concavité irienne pendant la manœuvre de Forbes permet un diagnostic différentiel avec un blocage pupillaire.

II Biomicroscopie ultrasonore du segment antérieur :

L'échographie de haute fréquence est une technique ultrasonore décrite au début des années 1990 par Pavlin et Foster(15) (16), avec un appareil capable de visualiser le segment antérieur du globe oculaire donnant des coupes de très haute résolution (50 μ m). Contrairement aux sondes classiques utilisées en ophtalmologie, qui sont basées sur des transducteurs de 10 MHz pour observer le segment postérieur, l'innovation de la biomicroscopie ultrasonore (UBM) a été d'utiliser un transducteur de 50 MHz pour augmenter la résolution, mais focalisé à 8–10 mm pour observer le segment antérieur (la distance de focalisation d'un transducteur est la distance comprise entre la sonde et le tissu à étudier avec une zone de meilleure résolution appelée zone focale). La focalisation de 8–10 mm a été choisie car plus la fréquence ultrasonore augmente, plus l'absorption du signal ultrasonore est importante et moins la pénétration dans les tissus est importante. Les premières applications furent dirigées vers l'analyse de l'angle irido-cornéen, avec des indications surtout pour les pathologies glaucomateuses. La pathologie tumorale du segment antérieur ou de la surface oculaire a aussi été décrite. La deuxième étape de l'utilisation de l'échographie de haute fréquence a été proposée par l'équipe de

Coleman avec Reinstein et Silverman qui ont décrit les applications de ce type d'imagerie à la chirurgie réfractive. Leurs travaux ont été développés à partir d'un appareil qui utilise aussi un transducteur de 50 MHz à focale courte, mais avec un balayage arciforme de façon à rester perpendiculaire à la cornée sur toute sa surface. Le développement d'algorithmes spécifiques et d'un traitement d'image très évolué a encore amélioré la résolution et la précision des mesures. L'appareil Artemis qui découle de ces travaux affiche une résolution axiale de 20 μm et une précision des mesures de 2 μm .

La troisième étape de l'exploration échographique de haute fréquence a été franchie par Puech qui a montré par des travaux expérimentaux que l'échographie de haute fréquence pouvait aussi s'appliquer au segment postérieur avec l'utilisation d'une sonde de 50 MHz focalisée à 25 mm pour analyser la région maculaire à une résolution nettement accrue par rapport aux sondes classiques de 10 MHz. Le terme UBM a été longtemps associé à la première unité commercialisée à partir des travaux de Pavlin. L'évolution actuelle de cette technique d'imagerie et l'arrivée de plusieurs appareils de haute fréquence font de l'UBM un terme plus générique décrivant les appareils d'échographie qui utilisent des sondes d'au moins 20 MHz en comparaison aux appareils habituels basés sur des sondes de 10 MHz. À l'heure actuelle, l'UBM princeps est encore distribué aux États-Unis, l'appareil Artemis est produit aux États-Unis, mais d'autres appareils plus polyvalents peuvent être utilisés avec des sondes à la fois de 10 MHz et de 20 à 50 MHz (Aviso, HiScan, Vumax™).

Les applications de l'imagerie ultrasonore de haute fréquence se diversifient avec l'exploration de la cornée et du segment antérieur en cas de chirurgie réfractive par technique cornéenne ou par implant phake. L'exploration des patients glaucomateux représente une application très utile, avec une bonne appréciation de la dynamique de l'angle irido-cornéen en cas de risque de fermeture de l'angle. En

cas de chirurgie filtrante, l'UBM apporte une très bonne visualisation du mécanisme d'action et de la qualité des trabéculotomies et sclérectomies profondes. Les applications en matière de pathologie tumorale sont surtout liées à l'identification et à la mesure des lésions, ainsi qu'à leur surveillance évolutive. La focalisation longue (de 22 à 25 mm) des sondes de haute fréquence donne la possibilité d'observer, en haute résolution, les pathologies du segment postérieur, sans limitation liée à la perte de transparence des milieux et avec un très bon accès à la périphérie rétinienne. L'évolution des techniques d'imagerie par ultrasons donne à l'échographie de haute fréquence une place grandissante dans la palette des explorations oculaires. L'amélioration de la résolution, la disponibilité et la reproductibilité des examens échographiques permettent d'avoir recours assez facilement à cet examen non invasif.

1 Analyse de la cornée :

L'appareil de référence en matière de chirurgie réfractive cornéenne est l'Artemis, qui donne une résolution supérieure aux autres appareils pour l'analyse fine de la cornée(17) dans le cadre des différents traitements proposés en chirurgie cornéenne par incision ou par ablation.

La précision des mesures étant de 2 μm , il est possible de réaliser, en acquisition tridimensionnelle, des cartographies pachymétriques de la cornée avec une analyse en pré- et postopératoire de l'épaisseur des différentes couches de la cornée. Les variations de l'épithélium peuvent être observées, avec la mise en évidence d'un épaissement réactionnel de l'épithélium en regard des zones d'ablation stromale par Lasik ou PKR. Reinstein et al.(18) (19) ont montré ce phénomène par analyse des différentes couches cornéennes sur des yeux opérés de myopie.

2 Analyse de l'angle irido-cornéen :

a Application en glaucome :

- **Glaucome par fermeture de l'angle :**

L'UBM met bien en évidence les éléments anatomiques de l'angle irido-cornéen(11) L'éperon scléral est un repère stable, ses variations lors de accommodation ou de la dilatation pupillaire sont bien observées en UBM (20) (21). L'angle d'ouverture normal permet à l'humeur aqueuse de cheminer entre la cornée face antérieure de l'iris jusqu'au trabéculum. En présence d'un angle étroit, ce passage est plus réduit et il est souhaitable d'observer cet angle en ambiance photopique puis en ambiance scotopique. La visualisation de l'angle irido-cornéen en myosis puis en mydriase physiologique représente un test dynamique de l'état du risque de crise de glaucome aigu. En effet, pour certains angles étroits, la mydriase resserre l'angle qui reste cependant ouvert, ce qui permet d'évoquer un risque faible de glaucome par fermeture de l'angle. Dans d'autre cas, la mydriase physiologique par obscurcissement de la pièce est à l'origine d'un aspect très étroit, fermé, de l'angle irido-cornéen sur la plupart des méridiens témoignant d'un risque élevé de glaucome par fermeture de l'angle. Les indications d'iridotomie au YAG sont ainsi plus précises et documentées. Dans certains cas, l'insertion de la racine de l'iris et la position des procès ciliaires sont assez nettement décalées vers l'avant, avec une bascule des procès ciliaires en avant de l'éperon scléral, témoignant d'un mécanisme d'iris plateau. L'angle se resserre par appui des procès ciliaires sur la racine de l'iris qui est repoussée vers la cornée (**Figure9**). Dans d'autres cas, l'examen met en évidence des kystes iridociliaires qui contribuent à la fermeture de l'angle, soit de façon localisée, soit de façon circonférentielle en cas de glaucome à cystose ciliaire. Parfois, l'examen met en évidence la présence d'une lésion de l'iris, comme par exemple un mélanome ciliaire qui repousse l'iris vers la cornée.



Figure 9 : Aspect d'iris plateau avec bascule antérieure de la racine de l'iris et des procès ciliaires en avant de l'éperon scléral (flèche) avec fermeture de l'angle(22)

- **Glaucome pigmentaire :**

L'aspect de l'angle irido-cornéen en cas de glaucome pigmentaire est caractérisé en UBM par une large ouverture de l'angle irido-cornéen (23) associée à une inversion de la courbure de l'iris qui présente une surface de contact majorée entre la face postérieure de l'iris et la cristalloïde antérieure (**Figure10**). En cas de blocage pupillaire inverse assez prononcé, un traitement par iridotomie périphérique peut être proposé, pour redonner une position plus rectiligne à l'iris et réduire le risque de contact avec les structures postérieures.

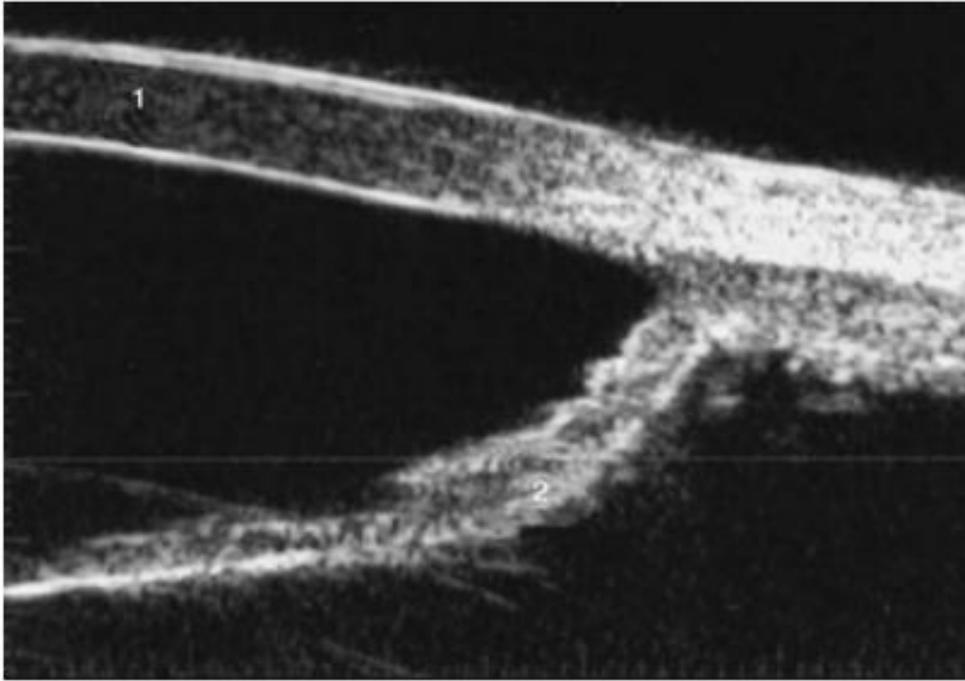


Figure 10 : Aspect d'inversion de la courbure de l'iris en cas de glaucome pigmentaire avec majoration du contact entre la face postérieure de l'iris et la cristalloïde postérieure. 1.cornée ; 2.iris (22)

- **Pathologie tumorale de l'angle :**

- **Kyste irido-ciliaire :**

L'UBM est l'examen de choix en cas de voussure de l'iris diagnostiquée par la lampe à fente(24). La bonne pénétration du faisceau ultrasonore permet d'obtenir une image en coupe méridienne et en coupe coronale de la partie incriminée. Un kyste irien ou ciliaire apparaît, en échographie, comme une structure très hypoéchogène entourée d'une fine membrane légèrement échogène à contours réguliers. L'UBM donne des indications sur la taille du kyste, son retentissement sur l'ouverture de l'angle, qui peut être étroit voire fermé en regard du kyste. Il est possible de localiser le ou les kystes répartis sur différents méridiens et qui peuvent être développés soit sur l'iris, soit sur le corps ciliaire. Dans de rares cas, les kystes iridociliaires peuvent être présents de façon circonférentielle, réalisant un aspect de polykystose ciliaire. L'échographie permet aussi de réaliser assez facilement le diagnostic différentiel avec une lésion solide de l'iris ou du corps ciliaire.

Lésions solides de l'iris et du corps ciliaire :

Les lésions solides de l'iris ou du corps ciliaire apparaissent en UBM comme un épaissement localisé avec une échogénicité souvent moyenne(25) (16). Un épaissement de l'iris limité sans perte de régularité de sa face postérieure peut faire plutôt évoquer un nœvus irien. Une lésion plus volumineuse, à limite périphérique irrégulière, avec empiètement de la lésion sur le corps ciliaire et un aspect irrégulier de la face postérieure de l'iris fait plutôt évoquer le diagnostic de mélanome (26).

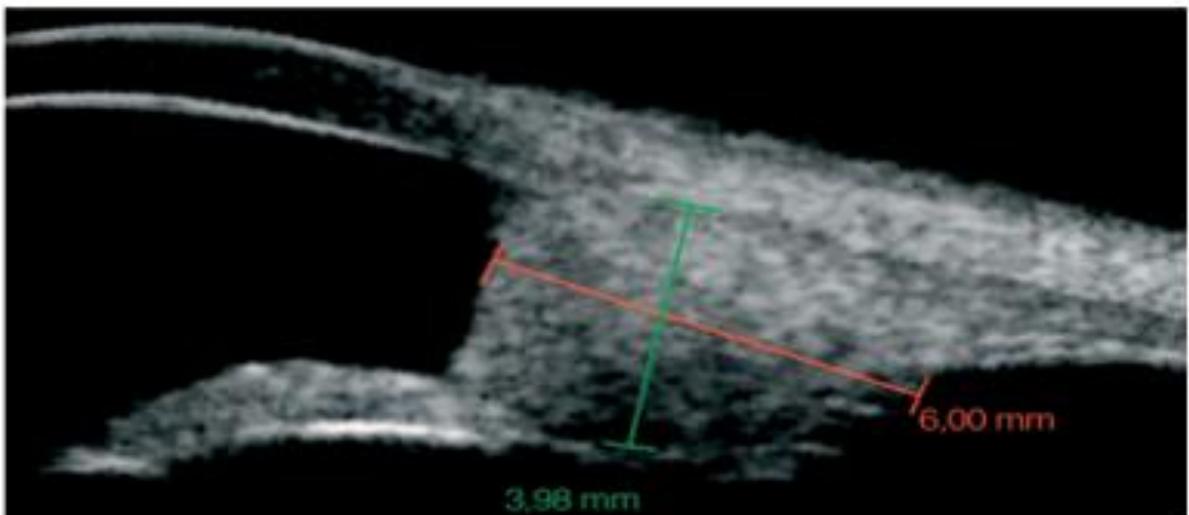


Figure 11 : Important épaissement iridociliaire par mélanome. La biomicroscopie ultrasonore permet de mesurer cette lésion assez précisément(22)

III Topographie cornéenne et camera sheimpflug :

La topographie cornéenne 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 an

alysées de façon automatisée par un logiciel, et des cartes en couleur sont fournies au praticien pour interprétation. Il existe actuellement de nombreuses méthodes d'évaluation pour la topographie cornéenne, qui peuvent essentiellement être considérées comme autant de développements autour du même thème fondamental : fournir au clinicien une image en deux dimensions pertinente et représentant avec fidélité une propriété de la surface tridimensionnelle de la cornée. Les instruments qui mesurent et décrivent avec le plus de précision les propriétés topographiques de la surface cornéenne peuvent être classés en trois grands types : Topographie cornéenne par réflexion spéculaire, par balayage par fentes lumineuses et par camera rotative Sheimpflug.

1 Différentes type de topographies :

a Topographie par réflexion spéculaire :

Une photographie numérique de l'image du reflet cornéen des mires est ensuite effectuée et l'appareil calcul la courbure en chaque point de l'appareil selon la déformation des mires (cette déformation est induite par la géométrie de la cornée explorée). L'utilisation du topographe « OPD scan III» (Nidek) (**Figure**) permet par exemple une analyse fine des variations de courbure de la face antérieure de la cornée (ce topographe permet également le recueil de données aberrométriques). Il est équipé d'un logiciel bâti autour d'un réseau neuronal capable de réaliser un diagnostic

automatisé (logiciel corneal navigator, indices de Klyce & Maeda). Le calcul des cartes de courbure est accompli à partir de l'image numérisée du reflet cornéen du disque de Placido.



Figure 12 : OPD SCAN III : Disque placido(2)

b Topographie par balayage par fente lumineuse :

Le topographe Orbscan (Bausch and Lomb/Technolas perfect vision) (**Figure**) permet également d'étudier les variations de la courbure de la cornée. Il réalise un balayage optique grâce à des fentes lumineuses qui « scannent » la cornée, ce qui permet de reconstruire tridimensionnellement le volume cornéen, et d'étudier les variations du relief cornéen non seulement antérieur mais également postérieur. L'épaisseur « point par point » de la cornée (pachymétrie optique) peut être calculée. Cette épaisseur correspond simplement à la « distance » entre les faces antérieure et postérieure de la cornée. Il est également muni d'un disque de Placido qui permet un recueil direct de données de la courbure antérieure de la cornée.

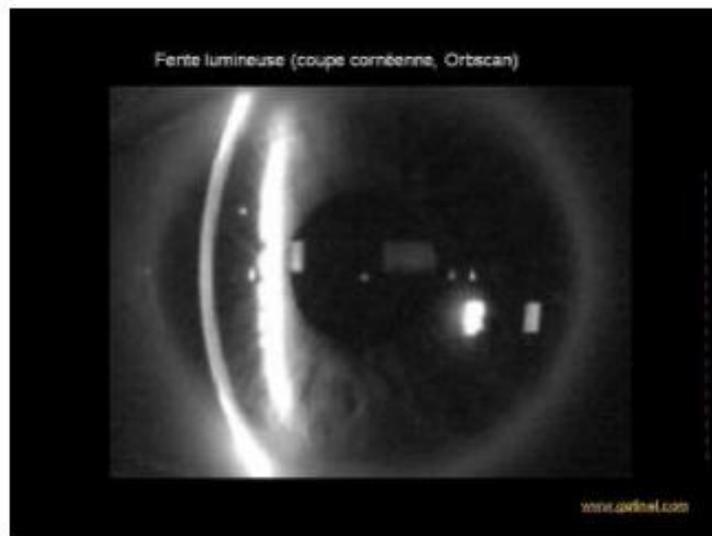


Figure 13 : Fente lumineuse (coue cornéenne , Orbiscan) (2)

c Topographie par camera rotative Sheimpflug :

Les topographes Pentacam (Oculus) (**Figure**), TMS 5 (Tomey) et Galilei (Ziemer) disposent d'un système de camera Sheimpflug pour l'étude de l'épaisseur et de l'élévation de la cornée. Ils sont également munis d'un disque de Placido (sauf le Pentacam). Comme avec l'Orbiscan, le balayage (rotatif) par une fente lumineuse permet d'établir des relevés de tomographie cornéenne, qui s'intéresse aux cartes de l'épaisseur cornéenne en chaque point, et l'étude de ses variations. Le dépistage précoce des formes infra cliniques de kératocône repose en partie sur le recueil de ces données.

2 Analyses établies par la topographie :

- **L'image sheimpflug et densitométrie :** L'image sheimpflug est affichée. Sur cette image apparaît une ligne verticale pointillée blanche. La courbe de densitométrie le long de cette image est affichée sous forme d'un graphique vert et indique le degré d'opacité du cristallin. •
- **La représentation tridimensionnelle :** la représentation tridimensionnelle des surfaces principales du segment antérieur est affichée, c'est-à-dire les faces antérieures et postérieures de la cornée, l'iris et la face antérieure du cristallin.
- **La valeur kératométrique :** Les rayons de courbures centraux de la cornée, l'astigmatisme et l'axe correspondant ainsi que l'excentricité sont affichés.
- L'excentricité moyenne et le diamètre pupillaire moyen sont aussi indiqués.
- **Les cartes de Pachymétrie et de topographies :** des cartes de topographie et de Pachymétrie sont affichées pour une visualisation et une analyse rapide. Ces informations sur la cornée sont données sous forme de cartes colorées. Toutes ces cartes sont centrées sur l'apex cornéen. L'apex est défini comme la portion de la cornée ayant un gradient mathématique égal à zéro.
- **Les cartes de courbure sagittale et tangentielle :** Les cartes en échelle millimétriques attribuent en général une couleur d'autant plus chaude (orange, rouge) que les rayons de courbure mesurés sont petit (et donc que la cornée y est plus courbe localement). A l'inverse, les couleurs froides (bleu) correspondent à des zones moins courbes. L'utilisation de cartes en rayon de courbure est naturellement préférée en contactologie, quand il s'agit de guider le choix du rayon d'une lentille d'essai. Au sommet de la cornée, le rayon de courbure est généralement compris entre 7.2 mm (cornées cambrées) et 8.4 mm (cornées plates), avec une moyenne proche de 7.8 mm dans une population saine.

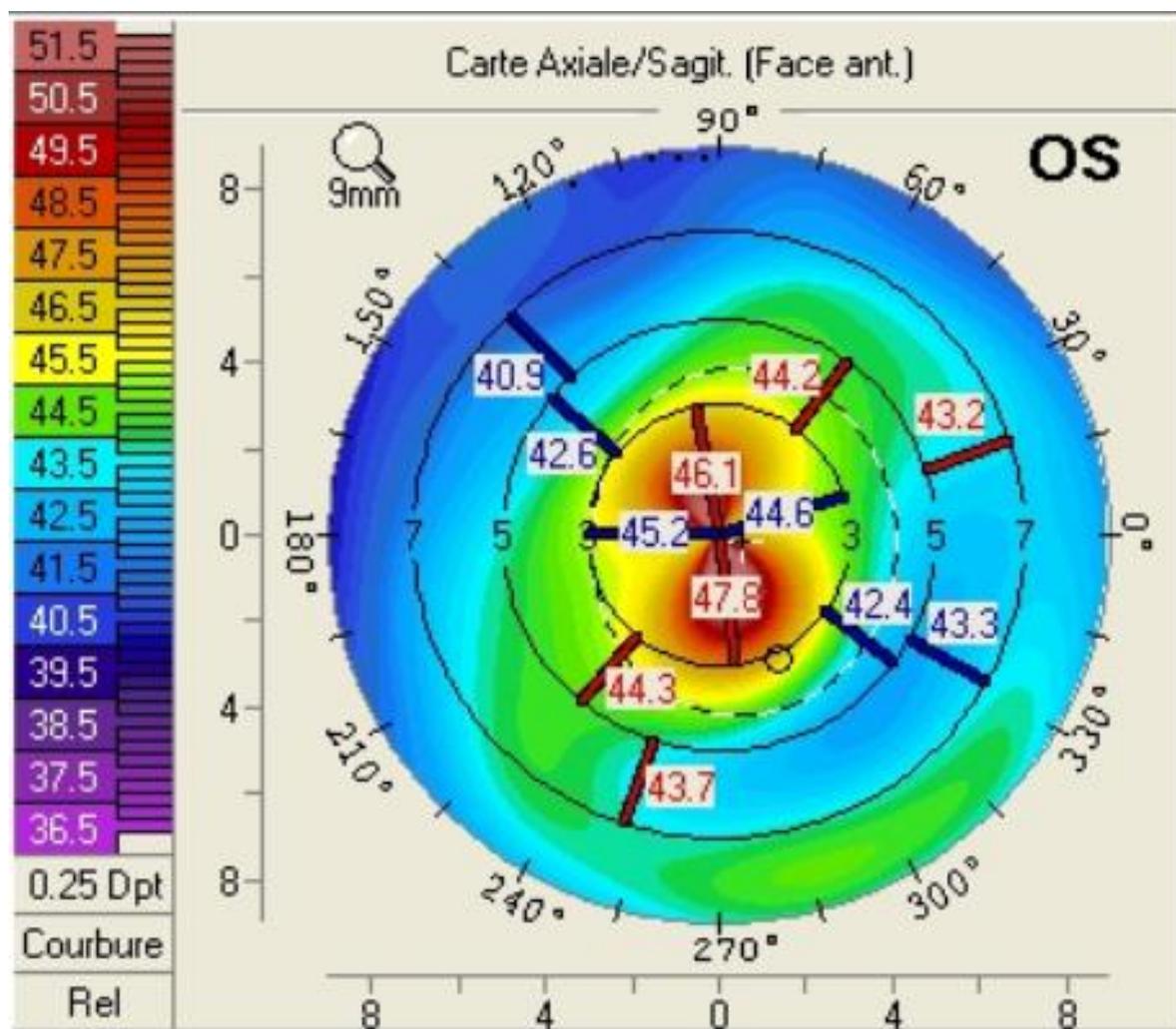


Figure 14 : carte de courbure sur pentacam (image du service)

- **Cartes d'élévations** : La topographie cornéenne d'élévation permet de recueillir des informations directement relatives à la morphologie spatiale, c'est-à-dire au relief de la surface cornéenne. La mesure du relief cornéen permet une représentation en élévation, vis à vis d'une surface de référence, qui est le plus souvent sphérique par défaut.

La topographie d'élévation est un outil diagnostique complémentaire à la topographie spéculaire (topographie de courbure). Elle permet d'accéder à l'étude de la face postérieure de la cornée et fournit des informations sur l'épaisseur cornéenne (pachymétrie optique, permettant d'établir une étude de la tomographie de la cornée) qui est déduite de la distance entre les surfaces antérieures et postérieures. Sa généralisation relativement récente a été favorisée par l'essor de la chirurgie réfractive, où elle est particulièrement utile pour la planification de la chirurgie photo-ablative cornéenne, ainsi que le dépistage des contre-indications au LASIK (dépistage des formes infra-clinique débutante de kératocône, comme le kératocône fruste).

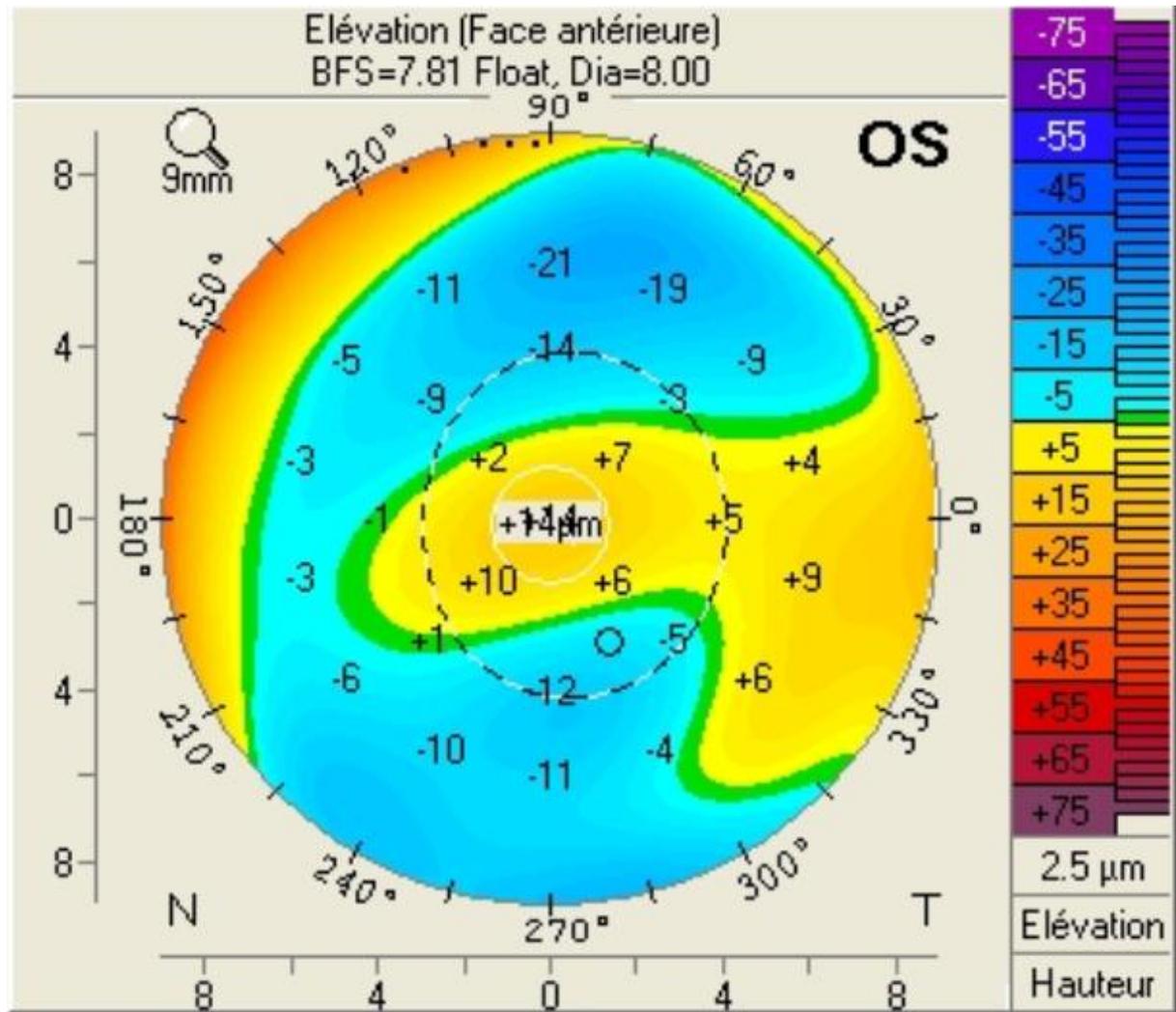


Figure 15 : Carte d'élevation sur pentacam (image du service)

- **L'échelle de couleur** : l'échelle de couleur indique l'équivalence entre les couleurs de la cartographie ainsi que les valeurs numériques.
- **L'analyse de la chambre antérieure** : l'épaisseur cornéenne et de la chambre antérieure y sont représentées. L'analyse de la chambre antérieure comprend les données suivantes :
 - Pachymétrie de la cornée au centre de la pupille : coordonnées du centre pupillaire par rapport à l'apex cornéen.
 - Pachymétrie minimale : plus petite valeur de pachymétrie de toute la cornée et ses coordonnées par rapport à l'apex cornéen.
 - Volume de la chambre antérieure : est délimité par la face postérieure de la cornée, l'iris ainsi que le cristallin.
 - Profondeur de la chambre antérieure : Profondeur calculée à la verticale de l'apex, mesurée à partir de l'endothélium (resp. Epithélium, suivant le réglage choisi) jusqu'à la face antérieure du cristallin.
 - Pression intraoculaire corrigée : Les formules de correction de Shah et Ehlers, ainsi que celle de Dresden estiment que la valeur réelle de tonométrie dépend de la valeur de tonométrie mesurée et de la pachymétrie. La correction est obtenue en additionnant une valeur constante fonction de la pachymétrie : $PIO \text{ corrigée} = PIO \text{ mesurée} + \text{Correctif PIO}$.
 - Facteurs KPD : Il calculé entre les anneaux de diamètre 0,8 mm et 1,6 mm autour de l'apex et donne une indication de l'influence de la face postérieure de la cornée sur la carte de puissance cornéenne. Les valeurs inférieures à 0,5 dioptries sont en général normales, une valeur supérieure à 0,5 et dioptries indique une cornée anormale, c'est-à-dire par exemple, ayant subi une chirurgie PKR ou Lasik ou bien porteuse d'un kératocône.

- L'angle irido cornéen est calculé à partir du modèle 3D.
- Le diamètre pupillaire : le diamètre pupillaire indiqué est la valeur moyenne obtenue pendant toute la durée de l'acquisition.
- Épaisseur du cristallin : épaisseur du cristallin à la verticale de l'apex de la cornée.

IV Interférométrie :

En utilisant le principe de l'interférométrie déjà intégré dans la tomographie en cohérence optique (OCT), il est possible de prendre une mesure de longueur axiale par la voie d'un système optique. Cette technique, plus récente, est pratiquée en position assise avec une aide à la fixation du patient qui donne une meilleure coïncidence avec l'axe visuel. La précision de cette méthode de mesure dépend de la possibilité du système de traverser un cristallin cataracté, dont l'indice de réfraction optique peut varier en fonction du type de cataracte. La mesure de longueur axiale est réalisée entre la face antérieure de la cornée et l'interface entre photorécepteurs et épithélium pigmentaire. Ceci correspond à une longueur axiale plus longue que celle mesurée par échographie.

Une compensation est alors apportée systématiquement par les différents systèmes actuellement sur le marché.

Le premier appareil commercialisé a été l'appareil IOL Master® (Zeiss-Meditec), avec une importante avance technologique au moment de son lancement : cet appareil compact est capable de prendre toutes les mesures nécessaires pour le calcul d'implant et de réaliser les différents calculs en incluant les principales formules. La kératométrie est mesurée sur six points, la longueur axiale est mesurée par interférométrie avec une reproductibilité et une précision très élevées, la profondeur de chambre antérieure est mesurée par reconnaissance de forme, la mesure de blanc à blanc est possible et les différents calculs sont possibles avec une interface conviviale.

Cet appareil ne mesurant pas exactement les mêmes valeurs que la biométrie classique, l'intelligence a été de proposer une personnalisation de la constante A et une formule entièrement adaptée à cette machine, en l'occurrence la formule de Haigis(27).

Un appareil plus récent, le Lenstar® (Haag–Streit), apporte un plus grand nombre de mesures par interférométrie (épaisseur cornéenne, profondeur de chambre antérieure, épaisseur du cristallin et longueur axiale) (**Figure 14**). Toutes ses mesures sont également mesurées par le mode ultrasonore, mais l'interférométrie, grâce à sa meilleure résolution, apporte un gain en précision très appréciable. La mesure de kératométrie se fait aussi différemment de l'appareil IOLMaster®. Ces éléments poussent à utiliser les constantes A avec prudence en début d'utilisation de cet appareil. La possibilité de mesurer l'épaisseur du cristallin ouvre la voie à l'utilisation des formules les plus récentes, comme la formule de Holladay 2 ou la formule d'Olsen, pour prévoir au mieux la position de l'implant après chirurgie de la cataracte.

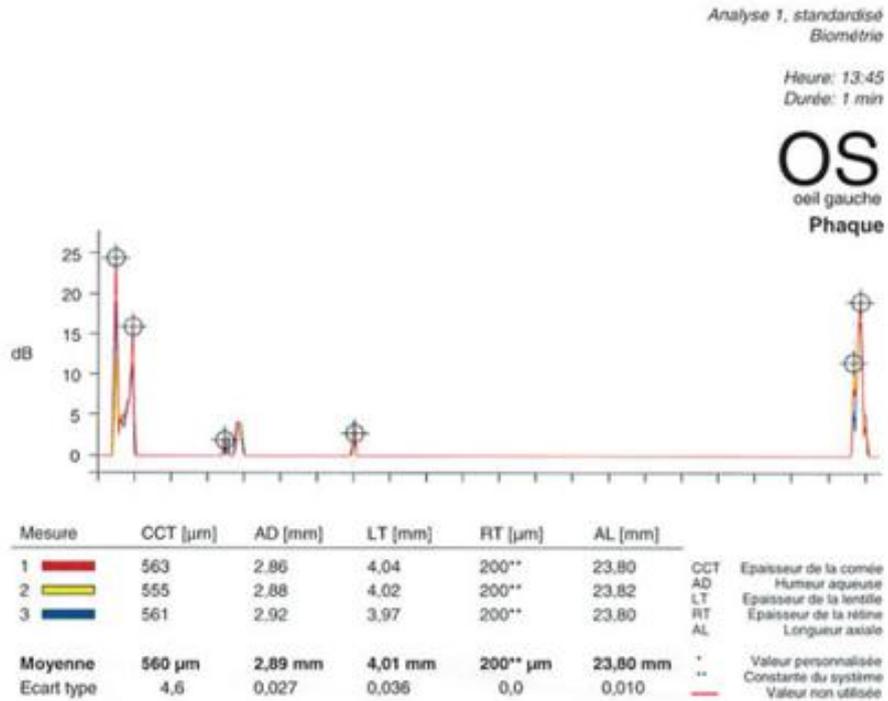


Figure 16 :Acquisition de mesure avec l'appareil Lenstar (image du service)

Les appareils de mesure de longueur axiale fondés sur le principe de l'interférométrie souffrent cependant d'une limitation des possibilités de mesure en cas de perte de transparence des milieux (cataracte, hémorragie) ou de nystagmus. L'absence de réponse varie de 5 % à 12 % en fonction des séries publiées, avec une dépendance notable par rapport au recrutement de patients présentant des cataractes plus ou moins denses.

Il est probable que les avancées techniques actuelles sont annonciatrices d'autres évolutions de ces appareils et de l'arrivée d'autres fabricants pour le plus grand bénéfice de l'amélioration du calcul d'implant.

L'avantage du Lenstar® est de donner des mesures de toutes les distances habituellement obtenues par le mode ultrasonore : la pachymétrie, la profondeur de la chambre antérieure, l'épaisseur du cristallin, la longueur axiale et même l'épaisseur de la rétine.

En 2017 Zeiss a mis en vente son nouveau biomètre non contact le IOL master 700, cet appareil utilise la technologie swept source, permettant d'augmenter la performance de prise par rapport aux anciens appareils. Les avantages de cet appareils c'est la rapidité des acquisitions permettant de surpasser les pertes de fixation par le malade, une répétabilité de mesures supérieurs aux autres appareils, l'appareil est doté de nouvelle formule de calcul d'implant et peut aussi être connecté au système callisto pour un meilleur repérage des axes lors d'utilisation d'implant torique(28).

V Tomographie par cohérence optique :

La tomographie en cohérence optique (OCT) est une technique d'imagerie très largement utilisée pour l'exploration du segment postérieur(29) (30). Basée sur le principe dit d'interférométrie à basse cohérence, son principe de fonctionnement est similaire à celui de l'échographie, mais avec l'émission d'une onde lumineuse au lieu d'un son.

Les premières images du segment antérieur en tomographie à cohérence optique ont été réalisées en 1994 à l'aide d'un OCT ayant une longueur d'onde de 820 nm et destiné à l'étude du segment postérieur(31) (32). Ce n'est qu'en 2001 qu'est apparu un OCT utilisant une longueur d'onde de 1 310 nm permettant une visualisation optimale du segment antérieur (AC OCT). Initialement, plusieurs applications ont été préférentiellement développées, comme le contact entre le cristallin et des implants réfractifs *phakes* ainsi que des mesures de la profondeur de la chambre antérieure (33).

Plus récemment la firme CSO itlalia a mis sur le marché un nouvel oct **MS 39** qui combine la technologie oct et la tomographie par disque placido ; permettant de s'aquerir d'un topographie corééne avec une resolution d'image plus nette(34).

1 Analyse des mensurations du segment antérieur :

L'OCT de segment antérieur utilise une longueur d'onde de 1 310 nm et réalise environ 2 048 acquisitions à la seconde, permettant ainsi de réaliser des images en temps réel et de bonne résolution, de l'ensemble de la chambre antérieure et de la cornée. La taille des images obtenues à l'aide de l'OCT-Visante® est de 6 mm de profondeur par 16 mm de large pour les vues d'ensemble du segment antérieur et de 3 mm de profondeur par 10 mm de large pour les examens de haute résolution. La résolution optique des images est de 18 µm en axial et de 60 µm en transversal. La durée d'acquisition est de 0,125 s par coupe pour les examens du segment antérieur dans son ensemble, et de 0,25 s par coupe pour les examens cornéens de haute résolution (OCT-Visante®, Carl Zeiss Meditec, manuel d'utilisation). D'utilisation simple et d'apprentissage rapide, l'examen ne nécessite aucun contact avec l'œil du patient.

2 Analyse de l'angle irido-cornéen :

Une des premières applications de l'OCT de segment antérieur dans le glaucome a été évidemment l'analyse de l'angle irido-cornéen(21) (35). Le degré d'ouverture de l'angle (**figure17**), la position de l'iris, l'existence de synéchies (**figure18**) ou encore le caractère perforant d'une iridotomie peuvent être aisément analysés grâce à cet appareil. De même, bien que le faisceau lumineux soit atténué en grande partie par le pigment irien, il est parfois possible de visualiser le corps ciliaire et de faire le diagnostic d'iris plateau. Cette évaluation présente également l'avantage d'être dynamique en faisant varier la luminosité de la pièce. Outre l'analyse morphologique des structures angulaires, des mesures biométriques de la profondeur de la chambre antérieure ou du degré d'ouverture de l'angle irido-cornéen sont facilement réalisées.

D'acquisition rapide et simple, ces images représentent aussi un élément important pour l'information et la compréhension du patient de sa pathologie et du traitement éventuel (laser, chirurgie filtrante...).

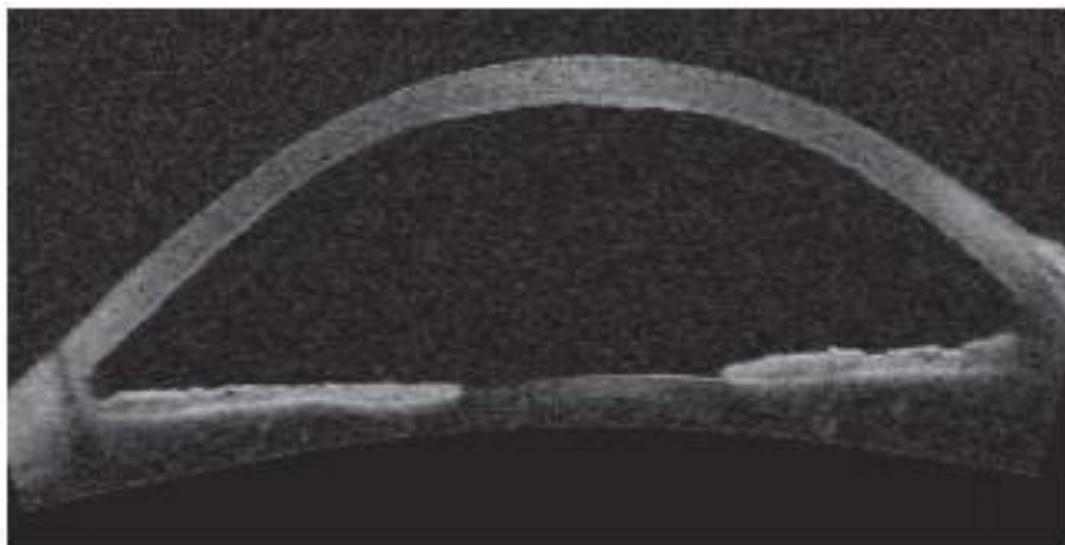


Figure 17 : Image OCT du segment antérieur montrant un angle irido-cornéen ouvert (36)

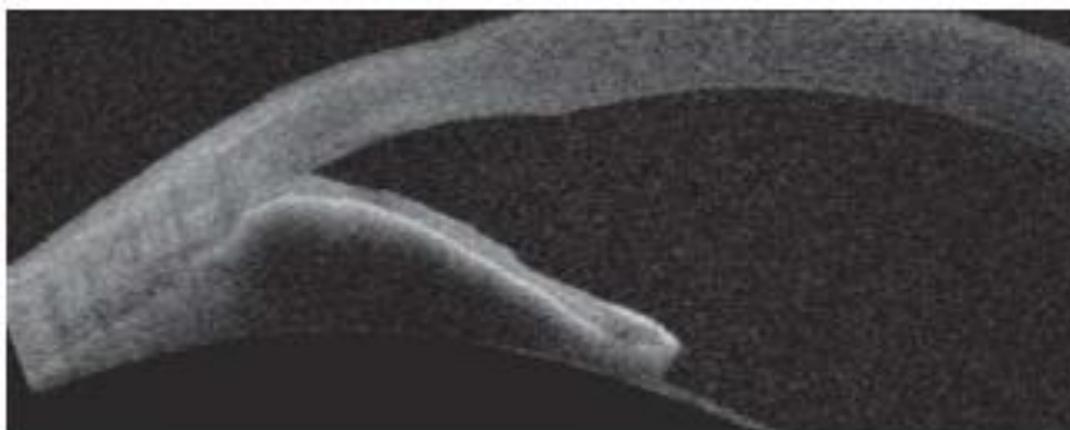


Figure 18 : image OCT montrant une apposition irido-trabéculaire (36)

PARTIE PRATIQUE

A Matériels et méthodes :

Nous avons réalisé une étude prospective colligée au service d'ophtalmologie du CHU HASSAN II ; étalée sur une période de 5 mois du 05/01/2019 au 05/06/2019.

Tous nos patients ont bénéficié d'un interrogatoire minutieux, d'un examen clinique complet, d'une réfraction objective et subjective, d'une prise de mesure réalisé par le pentacam, et une prise réalisé par le biomètre non contact le lenstar LS 900.

A noter que les valeurs retenus par le pentacam n'ont été collecté qu'après avoir le message OK par le logicielle utilisé, par ailleurs pour le lenstar il s'agit d'une moyenne de 5 prises avec une déviation moyenne acceptable entre les valeurs pour le logiciel utilisé.

Les mesures prise en considération sont : K1, K2, K moyenne (**à noter que pour le Pentacam on a collecté les kératométries des 3 mm centraux**), La profondeur de la chambre antérieure, l'épaisseur cornéenne centrale, L'astigmatisme et son axe, et le diamètre pupillaire.

A noter que toutes les mesures effectuées par le lenstar LS 900 et le pentacam ont été réalisé par le même operateur, ceci afin d'éviter les variabilités de prise interindividuelle.

- **Critères d'inclusions :**

- ✓ Age >16 ans
- ✓ Sujet en bon état
- ✓ Cornée clair
- ✓ Réfraction mesurable à l'auto refractomètre
- ✓ Cristallin clair
- ✓ Fond d'œil normal
- ✓ Acquisition satisfaisante par le Pentacam et le Lenstar LS 900

- Critères d'exclusions :

- ✓ Age < 16 ans
- ✓ Sujet diabétique
- ✓ Les antécédents de kératocône
- ✓ Les sujets opérée pour chirurgie réfractive
- ✓ Sujet suivi pour une pathologie rétinienne
- ✓ Les sujet suivi pour un kératocône avérée ou frustré
- ✓ Les sujet qui présente une cataracte
- ✓ Un fond d'œil anormal à l'examen clinique

Les données ont été recueillies sur une fiche d'exploitation comportant les données joint ci-dessous :

L'analyse statistique a été réalisé par logicielle SPSS et logiciel Excel 2013.

La comparaison a été réalisé par l'utilisation de la méthode de Bland et Altman (concordance de 2 variables) : le principe de la méthode proposée par Bland et Altman est d'apprécier l'écart observé entre les deux valeurs obtenues pour la même mesure et d'en déduire, sur l'ensemble de la population observée, le biais, la précision et les limites de l'intervalle de confiance à 95 % qui permettront de statuer sur la concordance des deux séries de valeurs. Il est donc « normal » d'observer des différences entre les deux séries de mesure, car il n'y a pas de raison a priori de s'attendre à une identité de valeur chez un sujet donné. L'étude de la concordance examine à quel point la « nouvelle » méthode peut conduire à la sur-estimation ou sous-estimation des résultats qui auraient été obtenus chez un individu donné avec « l'ancienne méthode », et si ces phénomènes varient sur la gamme de mesure considérée(37).

- **Fiche d'exploitation :**
 - AGE :
 - Sexe :
 - Masculin
 - Féminin
 - Réfraction :
 - Equivalent sphérique :
 - Mesures par la Pentacam :
 - K1 dans les 3 mm centraux :
 - K1 dans les 3 mm centraux :
 - Km dans les 3 mm centraux :
 - Profondeur de la chambre antérieure :
 - Astigmatisme :
 - Axe de l'astigmatisme :
 - Pachymétrie centrale :
 - Diamètre pupillaire :
 - Mesures par le Lenstar LS 900 :
 - K1 :
 - K1 :
 - Km :
 - Profondeur de la chambre antérieure :
 - Astigmatisme :
 - Axe de l'astigmatisme :
 - Pachymétrie centrale :
 - Diamètre pupillaire :



Figure 19 : topgraphe pentacam utilisé pour le recueil des données (image du service)

B Résultats :

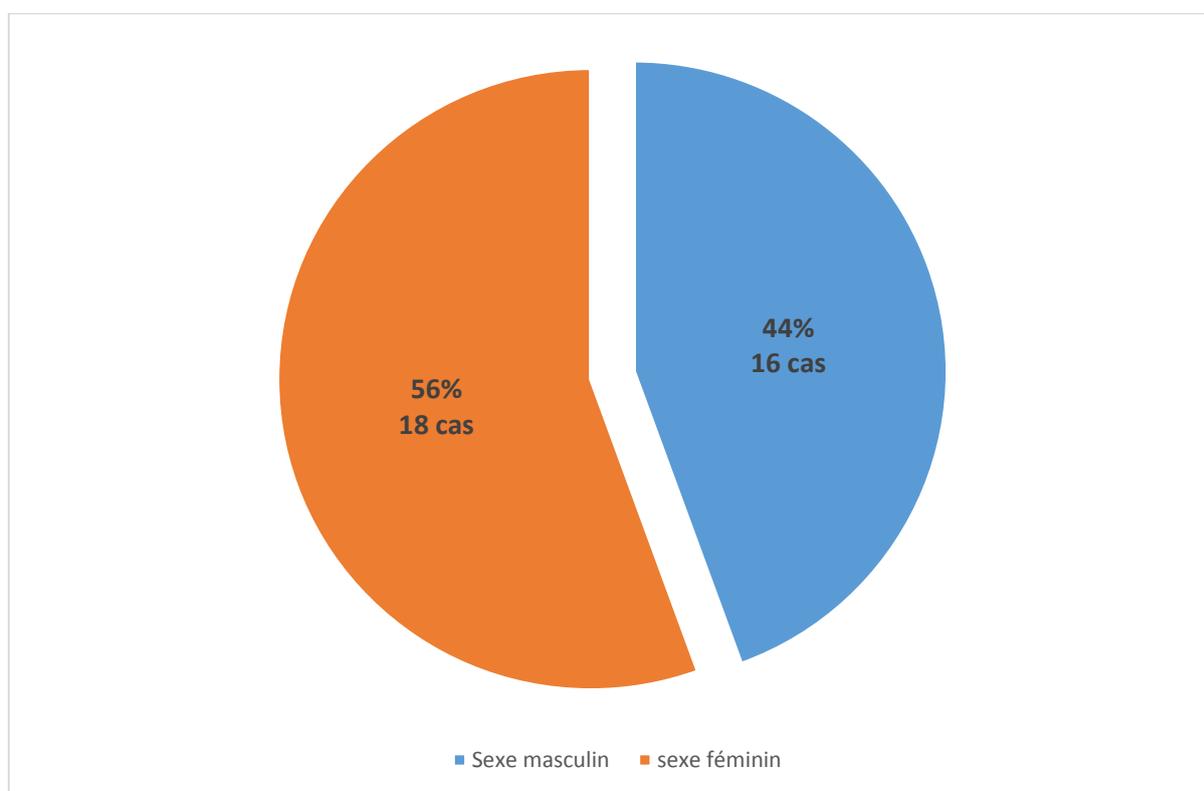
Notre travail avait inclus 34 patients soit 68 yeux.

I Age :

L'Age moyen de nos malades est de 34,38 ans \pm 9,78.

II Sexe :

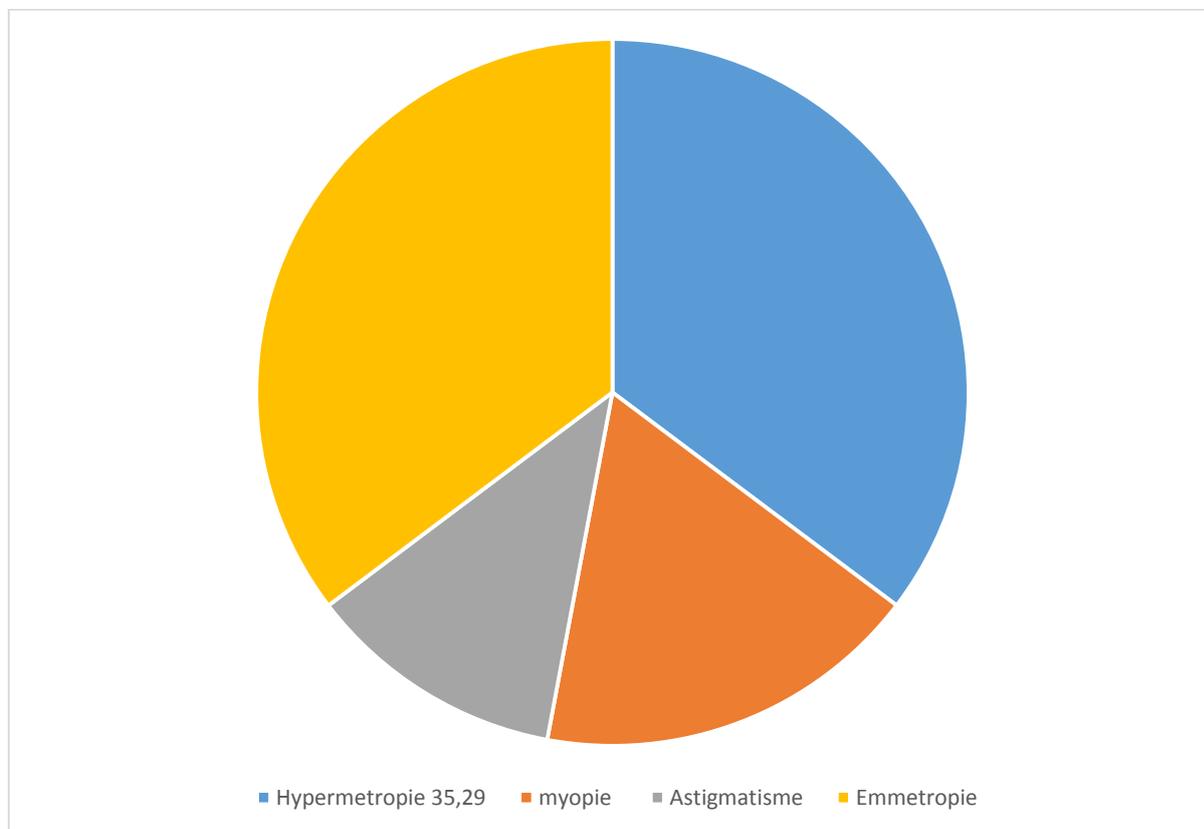
Le sexe ratio est de 0,88 H/F



Graphique 1: Répartition du sexe

III Profil réfractif :

L'équivalent sphérique moyen est de 0,17 dioptrie ± 2 .

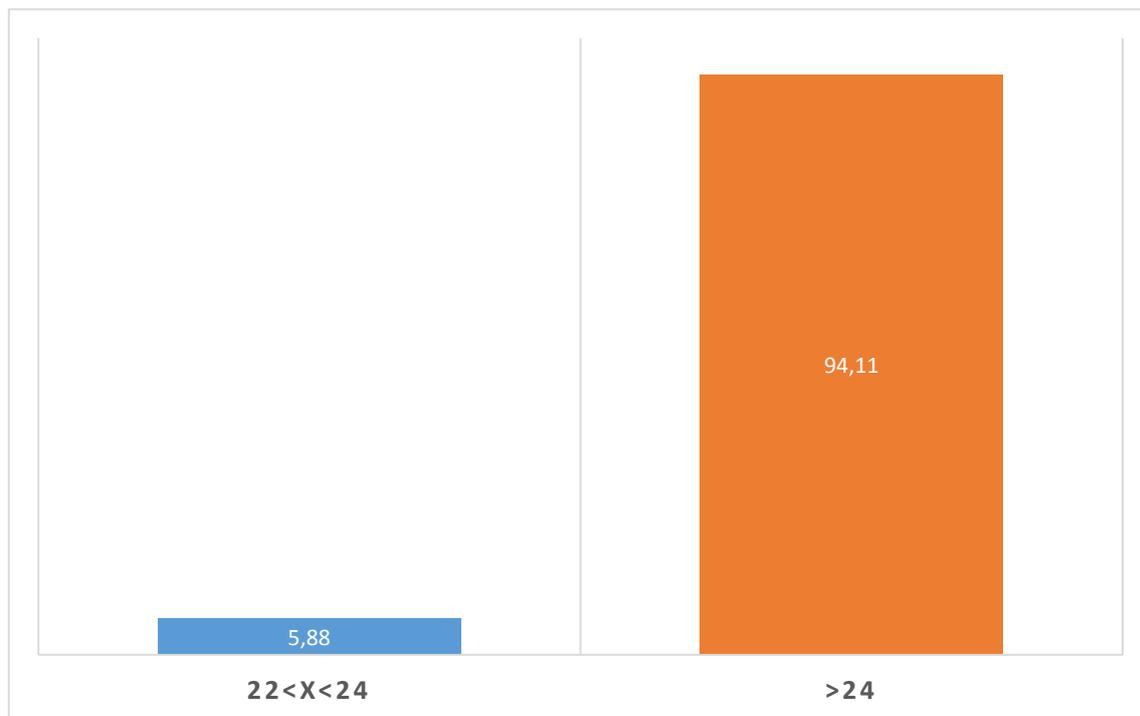


Graphique 2 : Repartition en fonction du profil réfractif

IV Données biométriques :

1 Longueurs axiales :

La longueurs axiale moyennes est de $23,13 \pm 0,69$ mm.



Graphique 3 : Répartition en fonction de la longeure axiale

2 Les mesures obtenues par le pentacam :

a Kératométrie

- **Kératométrie la plus plate :**

La moyenne des mesures de la kératométrie la plus plate est de $42,73 \pm 1,16$ dioptrie.

- **Kératométrie la plus cambrée :**

La moyenne des mesures de la kératométrie la plus cambrée est de $43,86 \pm 1,62$ dioptrie.

- **Kératométrie moyenne :**

La moyenne des mesures de la kératométrie moyennes est de $43,28 \pm 1,33$ Dioptries.

b Astigmatisme :

L'astigmatisme moyen est de $1,14 \pm 0,77$

c Axe :

L'axe moyen est $102,3 \pm 75,56$.

d Epaisseur cornéenne centrale :

L'épaisseur cornéenne centrale moyenne est de $541,61 \pm 31,35$ μm .

e Profondeur de la chambre antérieure :

La profondeur moyenne de la chambre antérieure est $3,16 \pm 0,41$ mm.

f Diamètre pupillaire :

Le diamètre pupillaire moyen est $2,84 \pm 0,44$ mm

3 Les mesures obtenues par le Lenstar LS 900 :

a Kératométrie

- **Kératométrie la plus plate :**

La moyenne des mesures de la kératométrie la plus plate est de $42,9 \pm 1,21$ dioptrie

- **Kératométrie la plus cambrée :**

La moyenne des mesures de la kératométrie la plus cambrée est de $44,05 \pm 1,70$ dioptrie.

- **Kératométrie moyenne :**

b Astigmatisme :

L'astigmatisme moyen est de $1,22 \pm 0,77$

c Axe de l'astigmatisme :

L'astigmatisme moyen est de $88,36 \pm 31,02$

d Epaisseur cornéenne centrale :

L'épaisseur cornéenne centrale moyenne est de $539,84 \pm 34,14$ μm .

e Profondeur de la chambre antérieure :

La profondeur moyenne de la chambre antérieure est $3,05 \pm 0,43$ mm

f Diamètre pupillaire :

Le diamètre pupillaire moyen est $5,07 \pm 0,99$ mm

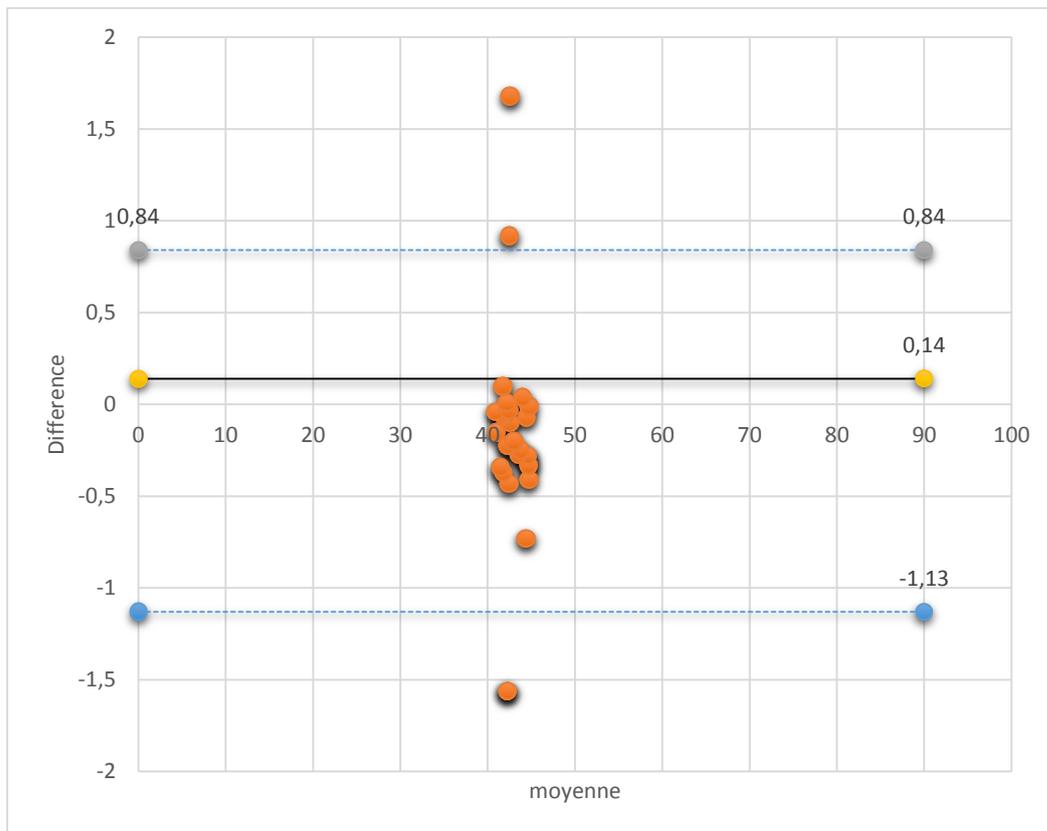
V Comparaison entre le pentacam et le lenstar LS 900 :

a Kératométrie

- Kératométrie la plus plate :

Le lenstar affiche des mesures supérieures au pentacam (Lenstar $42,9 \pm 1,21 >$ Pentacam $42,73 \pm 1,16$)

L'étude n'a montré de différence statistiquement significative ($p = 0,4$)

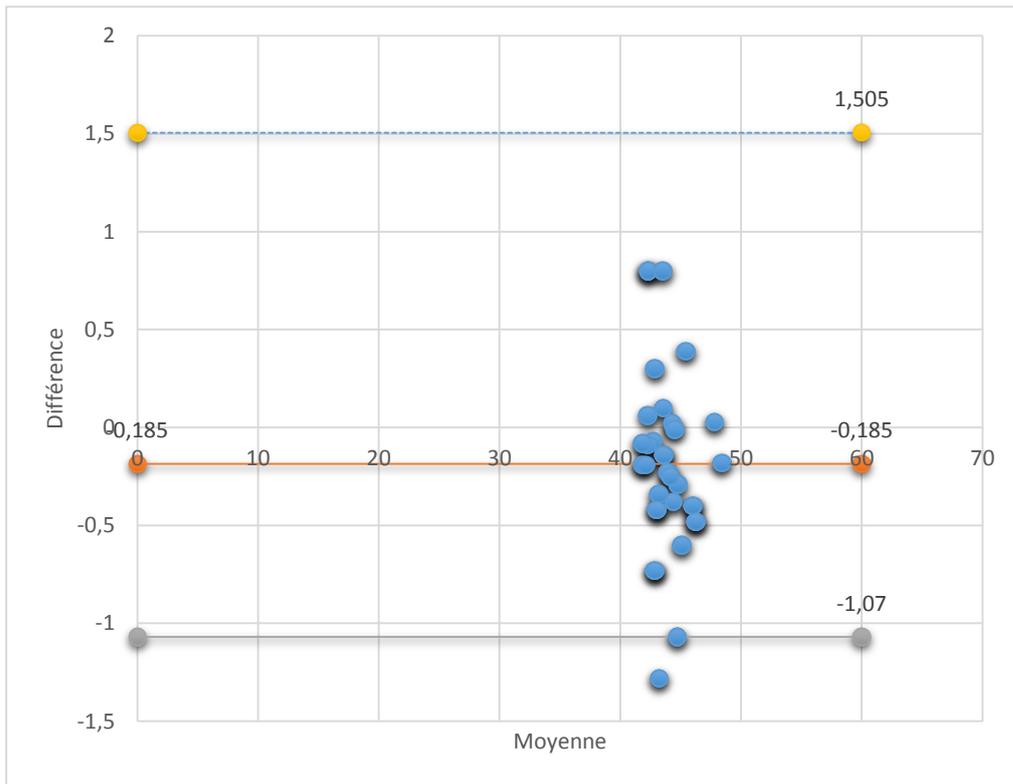


Graphique 4 : Bland–Altman plot montrant une concordance entre le K1 du pentacam et le lenstar LS900

- Kératométrie la plus cambrée :

Le lenstar affiche des mesures supérieures au pentacam (Lenstar $44,05 \pm 1,70$ > Pentacam $43,86 \pm 1,62$)

L'étude n'a montré de différence statistiquement significative ($p = 0,51$)

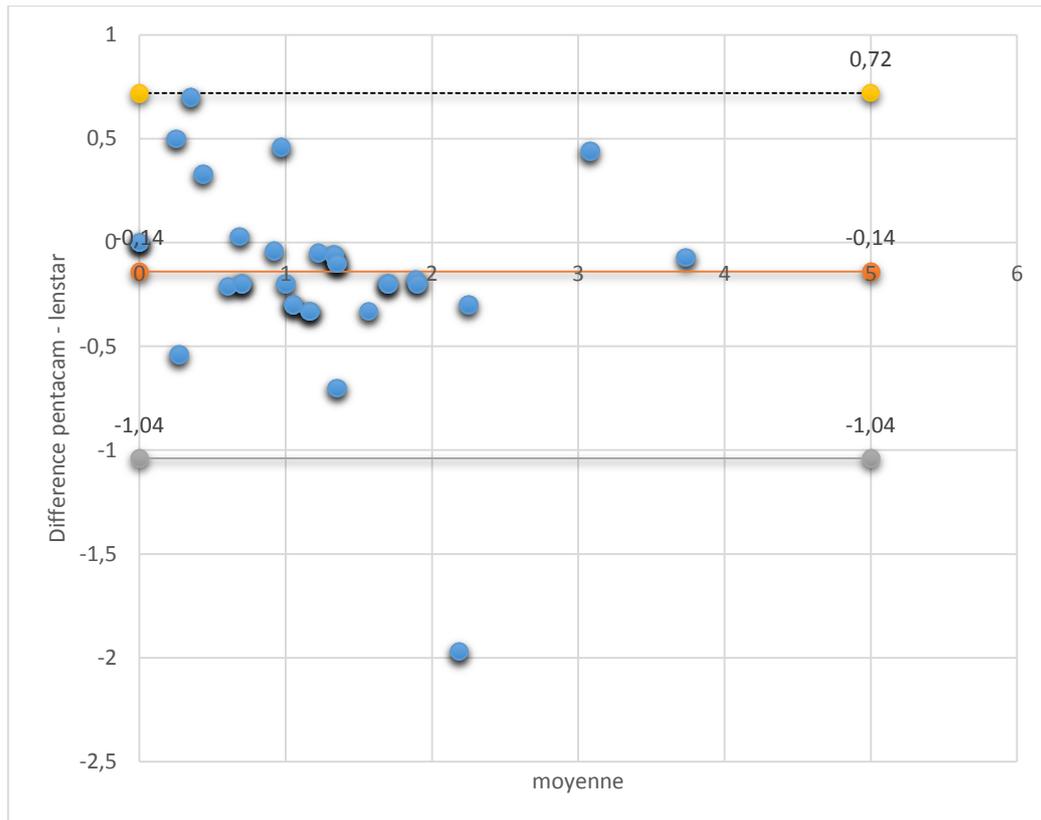


Graphique 5 : Bland-Altman plot montrant une concordance entre le K2 du pentacam et le lenstar LS900

b Astigmatisme :

Le Pentacam affiche des mesures supérieures au lenstar (Pentacam $1,14 \pm 0,77$ > Lenstar $1,22 \pm 0,77$)

L'étude n'a montré de différence statistiquement significative ($p = 0,32$)

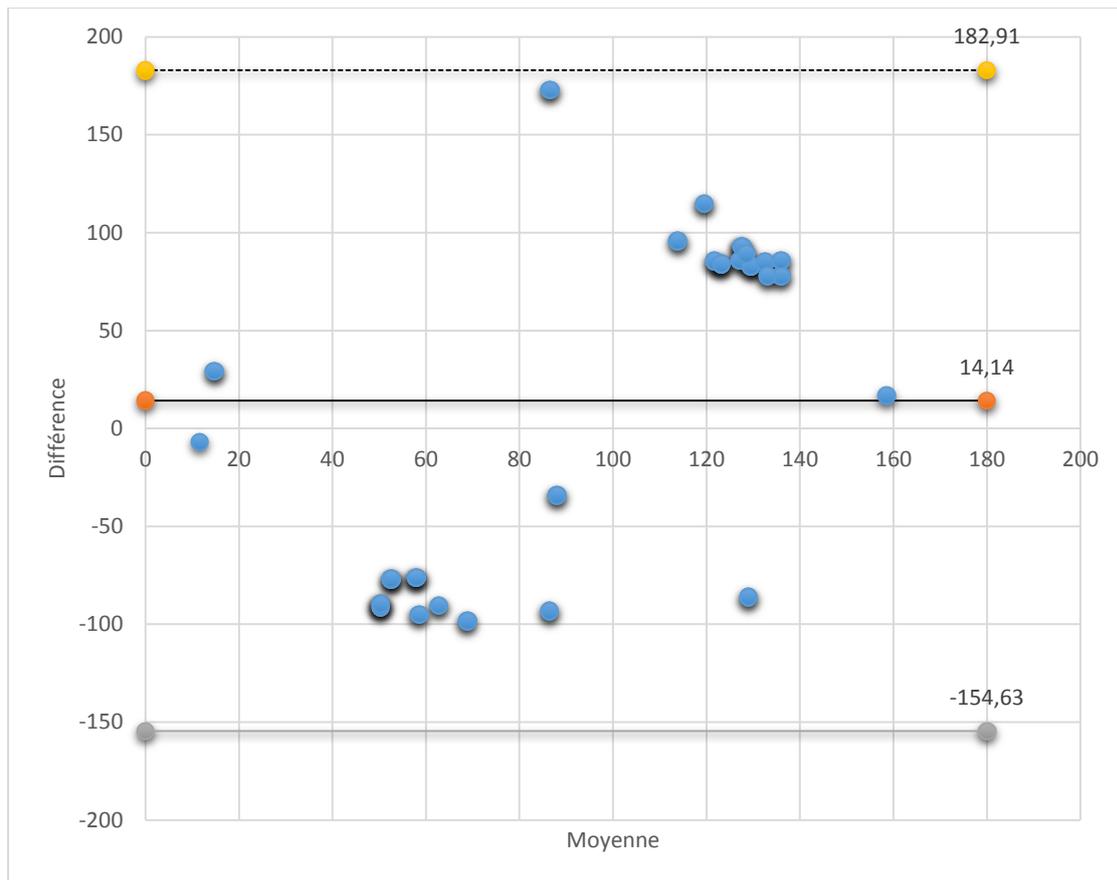


Graphique 6 : Representation Bland–Altman plot comparant l’astigmatisme retenu par le pentacam et le Lenstar LS900

c Axe :

Le Pentacam affiche des valeurs différentes au lenstar (Pentacam $102,3 \pm 75,56$ // Lenstar $88,36 \pm 31,02$)

L'étude n'a montré de différence statistiquement significative ($p = 0,17$)

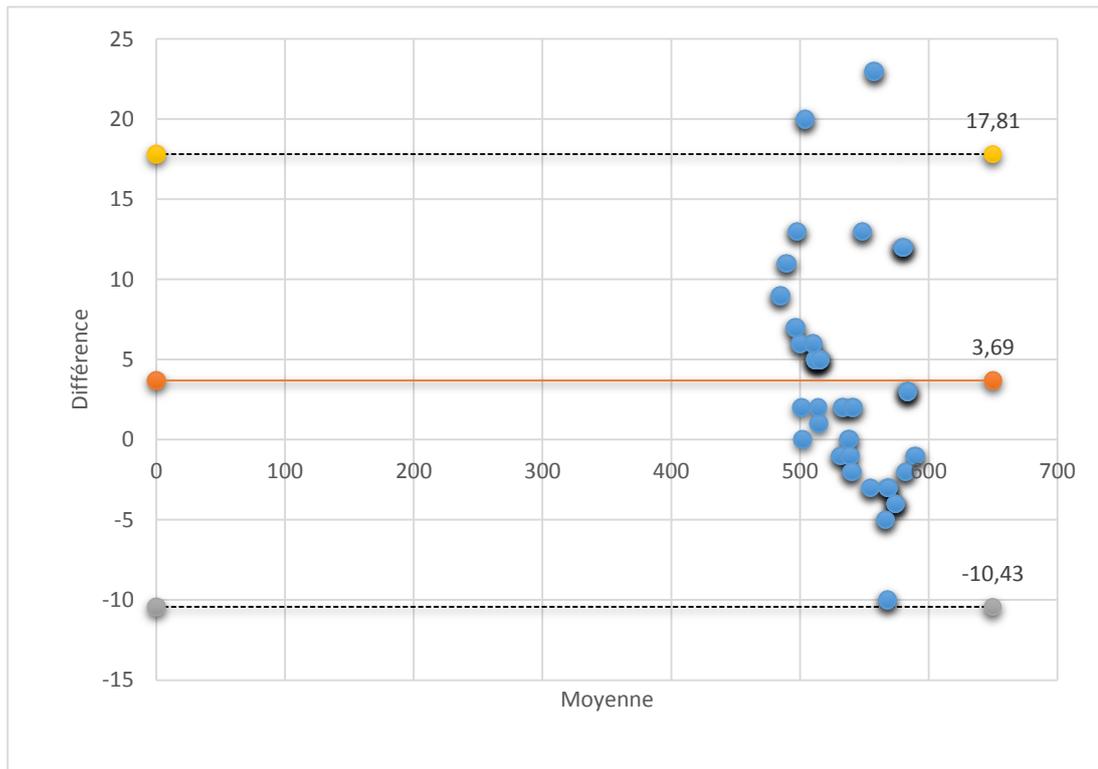


Graphique 7 : Bland–Altman plot montrant une concordance entre l’axe du pentacam et le lenstar LS900

d Epaisseur cornéenne centrale :

Le Pentacam affiche des mesures supérieures au lenstar (Pentacam $541,61 \pm 31,35 >$ Lenstar $539,84 \pm 34,14$)

L'étude n'a montré de différence statistiquement significative ($p = 0,51$)

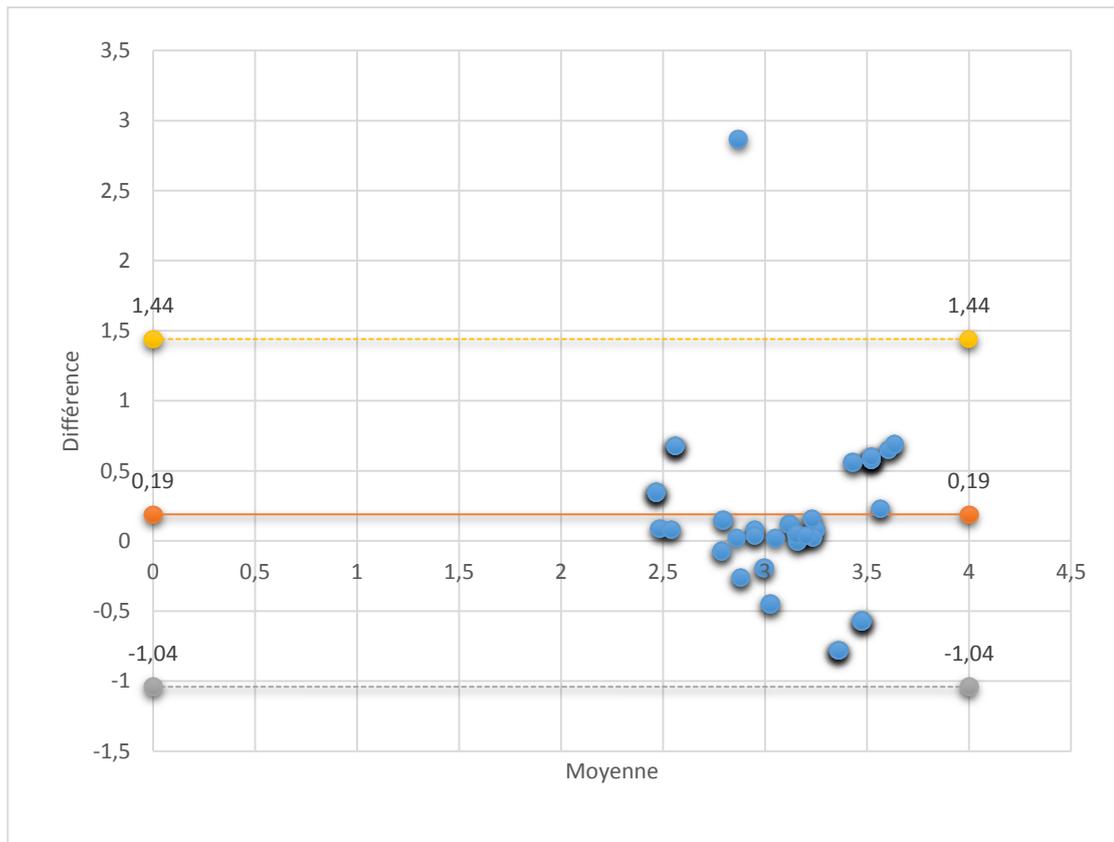


Graphique 8 : Bland–Altman plot montrant une concordance entre l'épaisseur cornéenne centrale mesurée par le pentacam et le lenstar LS900

e Profondeur de la chambre antérieure :

Le Pentacam affiche des mesures supérieures au lenstar (Pentacam $3,16 \pm 0,41 \text{ mm}$ > Lenstar $3,05 \pm 0,43$)

L'étude n'a montré de différence statistiquement significative ($p = 0,12$)

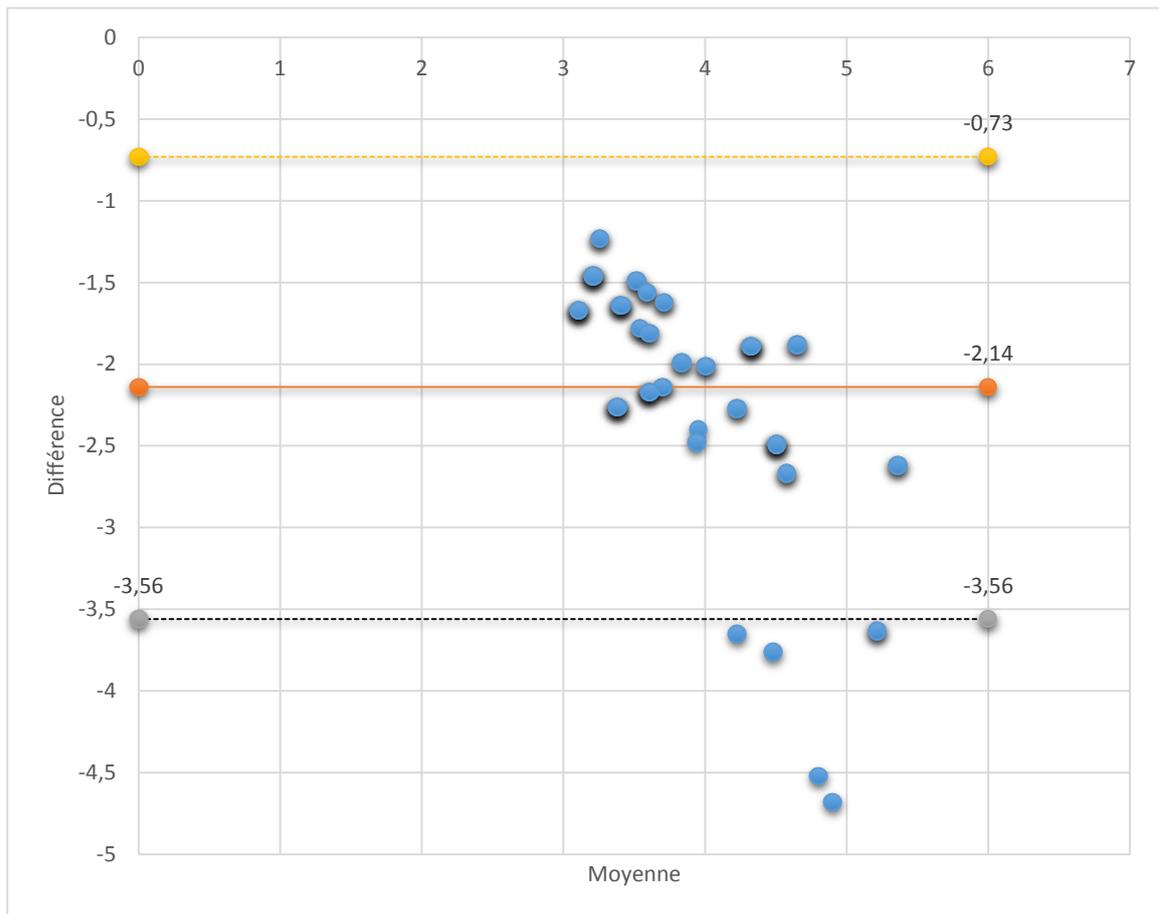


Graphique 9 : Bland–Altman plot montrant une concordance entre la profondeur de la chambre antérieure mesurée par le pentacam et le lenstar LS900

f Diamètre pupillaire :

Le lenstar affiche des mesures supérieures au pentacam (Lenstar $5,07 \pm 0,99$ > Pentacam $2,84 \pm 0,44$)

L'étude a montré une différence statistiquement significative ($p = 0$)



Graphique 10 Bland–Altman plot montrant une concordance entre le diamètre pupillaire mesurée par le pentacam et le lenstar LS900

VII Tableau récapitulatif :

Tableau 1 : Tableau récapitulatif de notre étude comparative entre le Pentacam et le Lenstar LS 900

Paramètre	Pentacam	Lenstar LS 900	Différence	25% LoA	P. value
K1	42,73±1,16	42,9±1,21	-0,14± 0,5	-1,13 à 0,84	p = 0,4
K2	43,86±1,62	44,05± 1,70	-0,18± 0,45	-1,07 à 1,5	p = 0,51
Astigmatisme	1,14±0,77	1,22±0,77	-0,14	-1,04 à 0,72	p = 0,32
Axe	102,3±75,56	88,36±31,02	14,14± 86,1	-154,63 à 182,9	p = 0,17
Pachymétrie centrale	541,61±31,35	539,84±34,14	3,69 ± 7,2	-10,43 à 17,81	p = 0,51
Profondeur de la chambre antérieure	3,16±0,41mm	3,05±0,43	0,19± 0,63	-1,04 à 1,44	p = 0,12
Diamètre pupillaire	2,84±0,44	5,07±0,99	-2,14± 0,72	-3,56 à -0,73	p = 0

DISCUSSION

VIII Evaluation du lenstar LS 900 dans les mesures biométriques oculaires :

L'introduction de la biométrie optique en 1990 a révolutionné la chirurgie de cataracte. Cette nouvelle technique utilise les propriétés de cohérence optique d'un faisceau lumineux (interférométrie à cohérence partielle) ou (Partial Coherence Interferometry –PCI) ; il s'agit d'une nouvelle technique de biométrie non contact. Cet appareil de biométrie optique permet en outre une mesure de la kératométrie et de la profondeur de la chambre antérieure. Cet appareil intègre en outre certaines formules de calcul de puissance d'implant telles que des formules de régression, et des formules de nouvelle génération incluant des paramètres supplémentaires les rendant plus fiables.(38)

La technique de biométrie optique, quant à elle, est bien plus précise et représente un avantage majeur chez le myope fort puisque la mesure se fait selon la fixation du patient.

Le lenstar LS 900 est un nouvel appareil développé par (Haag–Streit AG, Koeniz, Switzerland). Il permet de mesurer : l'épaisseur cornéenne centrale ; la profondeur de la chambre antérieure ; l'épaisseur du cristallin ; la longueur axiale ; ainsi que les valeurs kératométrique de la cornée et le diamètre cornéen (blanc à blanc). Le principe du lenstar LS 900 est basé sur la réflectométrie à basse cohérence optique ; utilisant une source lumineuse de (20–30mm) avec une moyenne de longueur d'onde à 820 nm

1 Technique de prise de mesure : (image du service)

L'examen s'effectue sur un globe immobile, pupille non dilatée. Le patient doit garder la fixation, puis on réalise successivement : une mesure de la

kératométrie, une mesure de la profondeur de la chambre antérieure puis enfin 3 mesures de la longueur axiale.

Ces différents résultats sont mémorisés puis intégrés dans le calcul de puissance d'implant suivant la formule qui a été au préalable sélectionnée.

IX Les mesures effectuées par le lenstar LS 900 :

a Epaisseur cornéenne centrale :

L'appareil permet de mesurer l'épaisseur cornéenne centrale avec une reproductibilité de $\pm 2\mu\text{m}$.

b Kératométrie :

Avec la plateforme torique T-cone ; la keratometre, l'astigmatisme et son axe peuvent calculés avec une extension de 11 disque placido. Ceci permet d'optimiser la précision de calcul des implants toriques dans la chirurgie premium de cataracte

c Profondeur de la chambre antérieure :

La mesure de la profondeur de la chambre antérieure se fait de façon précise et reproductible(39). Cette mesure permet de préciser la distance entre l'endothélium et la surface antérieur du cristallin. Ceci est adaptée aux yeux phiques et pseudophakes.

d Longueur axiale :

L'utilisation d'une source à diode supra-lumineux, permet de mesurer la longueur axiale ; précisément dans le trajet de la longueur axiale. Ceci offre un avantage considérable chez les fort myope ou le pole postérieur est déformé(38).

e Epaisseur cristallinienne :

Cette mesure s'avère utile essentiellement pour le calcul de puissance d'implant en utilisant la formule Oslen ou Holladay 2.

Cette épaisseur cristallinienne améliore de façon significative la précision de la formule holladay.(40)

f Blanc à blanc :

Cette mesure est basée sur les photographies couleurs de l'œil en haute résolution. Elle s'avère nécessaire pour l'estimation de la taille d'implant phake.

g Pupillométrie:

Le lenstar peut aussi estimer le diamètre des pupilles dans des conditions photopiques.

2 Evaluation du Lenstar LS 900 :

L'évaluation de la reproductibilité du lenstar a été évaluée dans plusieurs publications scientifiques, attribuant ainsi à l'appareil une notoriété et une précision d'usage pour différentes mesures du segment antérieur.

La reproductibilité de l'appareil est excellent avec un coefficient de variation de 0,1(41).

Variable	Overall mean (SD) (mm)	SD ^{within} (SD)	CV (SD) (%)	Precision (SD)
Central corneal thickness	0.533 (0.028)	0.0015 (0.001)	0.3 (0.2)	0.003 (0.002)
Anterior chamber depth	3.13 (0.29)	0.03 (0.05)	0.9 (1.5)	0.05 (0.09)
Lens thickness	3.69 (0.29)	0.03 (0.05)	0.9 (1.3)	0.06 (0.09)
Pupil diameter	5.53 (1.08)	0.46 (0.69)	7.8 (7.3)	0.9 (1.4)
Corneal diameter	12.17 (0.53)	0.18 (0.48)	1.6 (4.3)	0.36 (0.94)
Axial length	23.92 (1.23)	0.01 (0.01)	0.1 (0.03)	0.03 (0.02)
K1 reading	7.80 (0.20)	0.02 (0.02)	0.2 (0.2)	0.04 (0.03)
K2 reading	7.65 (0.20)	0.02 (0.02)	0.3 (0.3)	0.05 (0.05)

CV, coefficient of variation; K, keratometry; SD^{within}, mean standard deviation between three consecutive measurements.

Figure 20 : évaluation de la fiabilité de mesures entre différents observateurs en utilisant le Lenstar LS 900 (41)

Par ailleurs, la comparaison des mesures du lenstar avec d'autres appareils a montré une légère différence, ce qui empêche l'utilisation des mesures de façon interchangeable entre les différents appareils.

Epaisseur cornéenne centrale : la comparaison entre le Lenstar LS 900 et visant anterior segment OCT (zeiss) a montré une variation minime mais statistiquement significative(41), une explication possible a été avancée par Li et al ; le Visant AS oct utilise un logiciel qui place la limite antérieure du curseur de mesure légèrement en arrière de la face antérieure de la cornée, donnant ainsi une mesure légèrement amoindrie par rapport aux autres appareils(42).

Profondeur de la chambre antérieure : le lenstar enregistre des profondeurs de chambre antérieure comparative a l'IOL master(43), mais inférieurs au Visant AC OCT(41).

Cette différence ne peut être que le résultat des méthodes de prise entre les biomètres non contacts et l'oct du segment antérieurs. La particularité des biomètres non contact c'est qu'il n'utilise pas de point de fixation non accommodative contrairement à l'oct ; ainsi la chambre antérieure est un peu réduite par mouvement irido-lenticulaire vers l'avant lors de l'accommodation. Un autre facteur contributive à cette variation résulte en la différence de l'axe de mesure, les biomètres non contact utilisent l'axe visuels alors que l'OCT utilise l'axe géométrique.

Kératométrie : les études ont montré une légère différence mais non significative(43).

Longueur axiale : la plupart des études ne note pas une grande différence de mesure de longueurs axiale entre le Lensar et l'IOL master, une différence de 0,03 mm statistiquement non significative, donnant une différence non significative en cas de calcul d'implant en utilisant la formule SRK-T entre 0,08 dioptrie à 0,13 dioptrie(41,43).

X Evaluation du pentacam :

Le pentacam (oculus, Inc.) est un dispositif d'imagerie ; opérationnel depuis son autorisation d'utilisation par les états unis en 2004(44).



Figure 21 : image montrant une colonne pentacam (oculus)

C'est un appareil utilisant le système caméra rotatif de Sheimpflug, il permet d'acquérir jusqu'à 50 image du segment antérieur lors d'un scan rotatif de 2 secondes.

Le pentacam permet de mesurer :

- ✓ La cornée du limbe au limbe
- ✓ Evaluation des cartes topographiques
- ✓ Analyse des cartes de courbures antérieures et postérieures
- ✓ Mesure de la profondeur et du volume de la chambre antérieure

- ✓ Mesure des indices topographiques de détection automatique du kératocône.

1 Evaluation du pentacam :

- **Elévation cornéenne :**

Différentes études ont comparé la différence des valeurs de l'élévation antérieure et postérieure obtenues par le pentacam et l'orbiscan ; ayant montré que l'orbiscan affichait des valeurs significativement plus élevées(45). Par contre la comparaison entre le pentacam et le Galilei ont mis en évidence que le pentacam donnait des valeurs plus élevées ; essentiellement pour l'élévation postérieure(46). De surcroît le pentacam montre une grande répétabilité entre différentes mesure(47).

- **Kératométrie :**

Le pentacam affiche des valeurs kératométrique fiable entre différents observateurs(48). En plus, la comparaison entre le pentacam et l'orbiscan a montré que le premier était plus reproductible en différents usagers(49).

Plusieurs études ont montré que l'orbiscan affichait des valeurs kératométrique statistique significatives plus élevées que le pentacam dans les cornées saines(45).

- **Pachymétrie cornéenne :**

Le pentacam a démontré une répétabilité excellente(48) ; avec une reproductibilité beaucoup plus supérieure que l'orbiscan(50).

En post chirurgie réfractive (post-lasik, post PKR) le pentacam affiche une concordance excellente avec le Pachymètre ultrasonique, avec aussi une bonne reproductibilité en post chirurgie(51) (26).

Par contre dans les cornées avec un kératocône avancé ; il y a une grande discordance statistiquement significative entre les mesures obtenues par le pentacam et le Pachymètre ultrasonique(52).

XI Comparaison entre le Pentacam et le Lenstar LS 900 :

1 Kératométrie :

La mesure de la kératométrie représente une étape essentielle dans le calcul d'implant lors de la chirurgie de cataracte. Toute erreur même minime aurait des répercussions sur le calcul d'implant ainsi que sur la réfraction post-opératoire finale.

Plusieurs appareils permettent ce calcul ; l'intérêt de la comparaison permet de vérifier la fiabilité de l'appareil étudié et ainsi et chercher l'interchangeabilité des mesures entre les différent appareils.

Kératométrie la plus plate : notre étude a montré que le lenstar affiche des mesures supérieures au pentacam sans différence significative entre les 2 appareils ($p = 0,4$), la différence moyenne est $-0,14$ avec une limite de concordance à 95% allant de $-1,13$ à $0,84$.

Kératométrie la plus cambrée : l'étude a aussi montré que notre étude a montré que le lenstar affiche des mesures supérieures au pentacam sans différence significative ($p = 0,51$), la différence moyenne est $-0,18$ avec une limite de concordance à 95% allant de $-1,07$ à $1,5$.

A la lumière de ces résultats, nous constatons que les 2 appareils affichent des valeurs très proches, néanmoins l'interchangeabilité entre les 2 ne serait pas possible vu le large intervalle des limites de concordance.

Plusieurs études ont comparé les valeurs kératométriques obtenues par le pentacam et le lenstar. Pereira JMM et al. a montré aussi que le lenstar affiche des valeurs supérieures que le pentacam avec une différence statistiquement significative ($K1 : p = <0,001$) ($K2 : p = <0,001$)(53), Ucakhan et al a reporté des valeurs supérieures pour le lenstar avec un large intervalle pour l'analyse bland-altman(54), Huang et al a aussi démontré des kératométries supérieures pour le biomètre avec une concordance

à 95% de $-0,54$ à $-0,54$ à $0,32$ pour le K2 ; et de $-0,63$ à $0,45$ pour le K1(55). La conclusion de tous les auteurs est la non interchangeabilité des mesures entre le pentacam et le Lenstar LS 900.

Cette grande variance de mesures peut être expliquée soit dans l'échantillonnage un peu restreint de notre étude, soit par la non reproductibilité des résultats par le même appareil donnant ainsi des mesures disparates entre chaque prise. Ceci peut être aussi expliqué par le temps d'acquisition différents, les saccades, le clignement des paupières (film lacrymale) qui changerait de la même façon la topographie de la surface oculaire ainsi que des valeurs kératométrique.

Tableau 2 : K1 : comparaison de notre étude avec les autres études de la littérature

Paramètre	Pentacam	Lenstar LS 900	Différence	25% LoA	P. value
Notre étude	42,73±1,16	42,9±1,21	-0,14± 0,5	- 1,13 à 0,84	p = 0,4
Pereira JMM et al.	43,99	43,86	0,14	- 1,25 à 1,25	p <0,01
Ucakhan et al	43,22	42,78	0,41	- 0,42 à 1,23	p <0,01
Zhao J el al	42,93	42,5	0,44	- 1,13 à 2,02	
Huang et al	42,77	42,66	-0,11	- 0,54 à 0,32	p <0,01

Tableau 3 : K2 : comparaison de notre étude avec les autres études de la littérature

Paramètre	Pentacam	Lenstar LS 900	Différence	25% LoA	P. value
Notre étude	43,86±1,62	44,05± 1,70	-0,18± 0,45	-1,07 à 1,5	p = 0,51
Pereira JMM et al.	44,80	44,56	0,25	-0,49 à 1,1	p <0,01
Ucakan et al	43,98	43,68	0,37	-0,29 à 1,20	p <0,01
Zhao J el al	43,86	43,73	0,122	-1,31 à 1,55	
Huang et al	43,9	43,82	-0,09	-0,63 à 0,45	p <0,01

2 Épaisseur cornéenne centrale :

La mesure de l'épaisseur cornéenne au centre de la cornée correspond à la surface entre la face antérieure de l'épithélium et la face postérieure de l'endothélium ; dont le gold standard dans cette mesure reste l'échographie mode A. Par ailleurs plusieurs appareils développés pour d'autres usages spécifiques permettent aussi de mesurer l'épaisseur cornéenne, et permettent aussi de donner une cartographie de l'épaisseur cornéenne. Cette mesure revêt une importance dans plusieurs domaines d'ophtalmologie ; en post chirurgie de cataracte pour le suivi des œdèmes cornéens post opératoires, en chirurgie réfractive, et aussi en orthokeratologie.

Le Pentacam affiche des mesures supérieures au Lenstar (Pentacam $541,61 \pm 31,35$ > Lenstar $539,84 \pm 34,14$), sans différence statistiquement significative ($p = 0,51$). La différence moyenne est 3,69 avec une limite de concordance à 95% allant de -10,43 à 17,8.

Nos résultats montrent que le Pentacam et le Lenstar donnent des valeurs comparables, l'intervalle des limites de concordance est acceptable, permettant ainsi une interchangeabilité entre les appareils. Par contre, une corrélation de ces mesures avec leur impact sur la pression intraoculaire corrigée est justifiable, permettant ainsi de vérifier que même des modifications minimales n'auraient pas des répercussions sur la pression.

Zhang et al, a aussi corroboré nos résultats ; l'interchangeabilité des valeurs entre les 2 appareils avec des valeurs plus basses pour le Lenstar(56) , Clare O'Donnell a aussi montré qu'il y avait une bonne concordance entre les 2 appareils(57) , plusieurs autres études ont permis de confirmer nos résultats(55,58)

Tableau 4 : ECC : comparaison de notre étude avec les autres études de la littérature

Paramètre	Pentacam	Lenstar LS 900	Différence	25% LoA	P. value
Notre étude	541,61±31,35	539,84±34,14	3,69 ± 7,2	-10,43 à 17,81	p = 0,51
Zhang J et al	541,46	536,54	4,92	-27,19 à 17,36	P<0,001
Huang et al	538	534,28	3,72	-8,2 à 15,7	
O'Donnell C	550,67	542,63	19,97	-24,4 à 15,5	P<0,001
Barkana Y	538,7	511,38 (obs1) 512,21(obs2)	1,7	-18,5 à 17,2	p = 0,88

3 Profondeur de la chambre antérieure :

L'intérêt de cette comparaison réside dans la différence de la méthodologie de mesure entre les 2 appareils. Le pentacam permet une mesure automatique ne dépendant pas de la mise en place de curseur par l'observateur, par ailleurs une accommodation modificatrice de la chambre antérieure peut être évitée lors de cette mesure. Le lenstar utilise une interférométrie nécessitant une bonne fixation par le malade néanmoins l'accommodation s'avère réduite en utilisant les infra-rouges.

Malgré cette différence, Le Pentacam affiche des mesures supérieures au lenstar (Pentacam $3,16 \pm 0,41$ mm > Lenstar $3,05 \pm 0,43$) sans différence statistiquement significative (p = 0,12), La différence moyenne est 0,19 avec une limite de concordance à 95% allant de -1,04 à 1,44.

Nous concluons que les 2 appareils donne des valeurs rapproché, mais l'interchangeabilité entre les appareils ne serait pas possible vu le large intervalle de la limite de concordance.

Clare O'Donnell et al, a montré une bonne corrélation et une possibilité d'interchangeabilité entre le pentacam et le lenstar LS 900(57), Huang et al a montré aussi une bonne concordance entre les 2 appareils avec différence moyenne de 0,02 une limite de concordance à 95% allant de -0,11 à 0,15(55). Uçakhan, et al. a aussi démontré que le pentacam donnée des valeurs plus profonde mais avec des différence statistiquement significative(54). En conclusion tous les auteurs s'accordent sur la non interchangeabilité des mesures entre les 2 appareils.

Tableau 5 : PCA : comparaison de notre étude avec les autres études de la littérature

Paramètre	Pentacam	Lenstar LS 900	Différence	25% LoA	P. value
Notre étude	3,16±0,41mm	3,05±0,43	0,19± 0,63	-1,04 à 1,44	p = 0,12
Huang et al	3,24 3,78	3,23 3,76	0,02 0,02	-0,11 à 0,15 -0,11 à 0,15	P<0,001 P<0,001
O'Donnell C	2,96	2,93	-0,08	-0,04 à 0,12	p = 0,001
Uçakhan OÖ	3,08	2,99	0,09	-0,23 à 0,05	P<0,001

4 Axe de l'Astigmatisme :

Le Pentacam affiche des valeurs différentes au lenstar (Pentacam $102,3 \pm 75,56$ > Lenstar $88,36 \pm 31,02$), par contre l'étude n'a montré de différence statistiquement significative ($p = 0,17$). Les limites de notre études est le nombre limité de notre échantillon ne permettant pas ainsi aux études statistiques d'avoir la précision requise.

La différence moyenne est $14,14 \pm 86,1$ avec une limite de concordance à 95% allant de $-154,63$ à $182,9$, ces résultats démontre le large intervalle des limite de concordance ainsi, confirmant aussi les valeurs disparates entre les 2 appareils sans possibilité d'interchangeabilité entre les 2 appareils. Les limites de cette comparaison est l'absence de réfraction subjective qui nous permettrait de savoir qu'elle est le la réfraction la plus précise comparativement à l'axe de l'astigmatisme qui donnerait la meilleure acuité visuelle.

5 L'astigmatisme :

Le Pentacam affiche des mesures supérieures au lenstar (Pentacam $1,14 \pm 0,77$ > Lenstar $1,22 \pm 0,77$)

L'étude n'a montré de différence statistiquement significative ($p = 0,32$)

D'autres études ont comparés les résultats obtenues par le pentacam et un autre biomètre non contact (IOL MASTER), Jing dong et al a montré que l'IOLmaster affichait des valeurs supérieurs au pentacam avec une différence statistiquement significative(59), ceci a été aussi confirmé par Mao et al(60).

6 Diamètre pupillaire :

Depuis l'avènement de la chirurgie réfractive, et la hausse des attentes post opératoire par la plupart des malades qui en bénéficient (contraste entre acuité visuelle satisfaisante et confort visuel), on a pu développer la science de l'aberrométrie.

Cette aberrométrie se base sur l'étude de l'aberration optique dont la pupille et son diamètre pourrait jouer un rôle prépondérant essentiellement par le phénomène de diffraction. La variation de la taille de la pupille entre les ambiances photopique et mésopiques pourrait conditionner la zone optique à traiter qui influencerait sur la profondeur d'ablation.

Plusieurs appareils permettent de calculer ce diamètre, on cite parmi ces appareils (Pentacam, orbscan, lenstar, Zywave).

Le lenstar affiche des mesures supérieures au pentacam (Lenstar $5,07 \pm 0,99$ > Pentacam $2,84 \pm 0,44$).

L'étude a montré une différence statistiquement significative ($p = 0$), La différence moyenne est $-2,14 \pm 0,72$ avec une limite de concordance à 95% allant de $-3,56$ à $-0,73$.

Vu nos résultats on pourrait conclure que les valeurs sont très disparates, avec un large intervalle de concordance. Mais nous signalons que cette comparaison ne pourrait être faite vu la différence des conditions de prise entre le pentacam et le Lenstar.

Lors de notre prise par le pentacam on utilisait souvent une ambiance scotopique qui nous permettait d'avoir des acquisitions satisfaisantes, par contre lors des prises de mesure par le Lenstar on utilisait une ambiance normale (photopique) avec lors des acquisitions l'appareil utilise un flash vert qui pourrait induire cette constriction pupillaire.

Conclusion :

Les résultats de notre étude ne montrent pas de différence significative pour les mesures de la kératométrie, la profondeur de la chambre antérieure, et l'épaisseur coréenne centrale, néanmoins les intervalles de concordance ne sont acceptables que pour l'épaisseur cornéenne centrale, donc ça reste le seul paramètre interchangeable entre les 2 appareils reste l'épaisseur cornéenne centrale.

En revanche notre étude retrouve une différence significative pour la mesure du diamètre pupillaire, résultat prévisible vu les différentes conditions d'acquisition de mesures.

Les limites de notre étude restent l'échantillonnage qui est restreint, et l'interférence de la non reproductibilité des résultats pour chaque appareil sur nos résultats.

ANNEXES

A Liste des Figures :

Figure 1 : coupe sagittale donnant une appreciation macroscopique de l'oeil	10
Figure 2 : illustration des courbures antérieurs de l'œil (cornée)	10
Figure 3 : coupe histologique de la cornée	13
Figure 4 : disposition des fibre de collagène dans le stroma cornéen	14
Figure 5 : vue d'ensemble de l'iris. De haut en bas : couche cellulaire antérieure, stroma, épithélium antérieur avec muscle dilatateur et épithelium pigmanté postérieur	17
Figure 6 : Vue d'ensemble des corps ciliaires montrant de bas en haut la sclère, le muscle ciliaire et les procès ciliaires.....	22
Figure 7 : Représentation de la classification de Shaffer.....	30
Figure 8 : image gonioscopique montrant des synéchies antérieures périphériques	32
Figure 9 : Aspect d'iris plateau avec bascule antérieure de la racine de l'iris et des procès ciliaires en avant de l'éperon scléral (flèche) avec fermeture de l'angle.....	37
Figure 10 : Aspect d'inversion de la courbure de l'iris en cas de glaucome pigmentaire avec majoration du contact entre la face postérieure de l'iris et la cristalloide postérieure. 1.cornée ; 2.iris	38
Figure 11 : Important épaissement iridociliaire par mélanome. La biomicroscopie ultrasonore permet de mesurer cette lésion assez précisément.	39
Figure 12 : OPD SCAN III : Disque placido	41
Figure 13 : Fente lumineuse (coue cornéenne , Orbscan).....	42
Figure 14 :Acquisition de mesure avec l'appareil Lenstar	50
Figure 15 : Image OCT du segment antérieur montrant un angle irido-cornéen ouvert	53

Figure 16 : image OCT montrant une aposition irido-trabéculaire.....	53
Figure 17 : évaluation de la fiabilité de mesures entre différents observateurs en utilisant le Lenstar LS 900 (27).....	75
Figure 18 : image montrant une colonne pentacam (oculus)	77

B [Liste des tableaux :](#)

Tableau 1 : Tableau récapitulatif de notre étude comparative entre le Pentcam et le Lenstar LS 900.....	71
Tableau 2 : K1 : comparaison de notre étude avec les autres études de la littérature	80
Tableau 3 : K2 : comparaison de notre étude avec les autres études de la littérature	81
Tableau 4 : ECC : comparaison de notre étude avec les autres études de la littérature	83
Tableau 5 : PCA : comparaison de notre étude avec les autres études de la littérature	84

C [Listes des graphiques :](#)

Graphique 1 : Répartition du sexe	59
Graphique 2 : Repartition en fonction du profil réfractif.....	60
Graphique 3 : Répartition en fonction de la longueur axiale	61
Graphique 4 : Bland–Altman plot montrant une concordance entre le K1 du pentacam et le lenstar LS900	64
Graphique 5 : Bland–Altman plot montrant une concordance entre le K2 du pentacam et le lenstar LS900	65
Graphique 6 : Bland–Altman plot montrant une concordance entre l’axe du pentacam et le lenstar LS900	67
Graphique 7 : Bland–Altman plot montrant une concordance entre l’épaisseur cornéenne centrale mesurée par le pentacam et le lenstar LS900.....	68
Graphique 8 : Bland–Altman plot montrant une concordance entre la profondeur de la chambre antérieure mesurée par le pentacam et le lenstar LS900	69
Graphique 9 Bland–Altman plot montrant une concordance entre le diamètre pupillaire mesurée par le pentacam et le lenstar LS900.....	70

Références :

1. Masson E. Anatomie de la cornée [Internet]. EM-Consulte. [cité 7 mars 2020]. Disponible sur: <https://www.em-consulte.com/article/292150/anatomie-de-la-cornee>
2. CASSETTE NB Studio. La cornée [Internet]. Docteur Damien Gatinel. [cité 16 mars 2020]. Disponible sur: <https://www.gatinel.com/recherche-formation/la-cornee/>
3. Masson E. Physiologie de la cornée [Internet]. EM-Consulte. [cité 16 mars 2020]. Disponible sur: <https://www.em-consulte.com/article/30698/figures/physiologie-de-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. Masson E. Anatomie et physiologie de l'iris [Internet]. EM-Consulte. [cité 7 mars 2020]. Disponible sur: <https://www.em-consulte.com/article/1302533>
6. Ivan DJ, Tredici TJ, Perez-Becerra J, Dennis R, Burroughs JR, Taboada J. Photorefractive keratectomy (PRK) in the military aviator: an aeromedical perspective. *Aviat Space Environ Med*. août 1996;67(8):770-6.
7. chirurgie_refractive.pdf [Internet]. [cité 7 mars 2020]. Disponible sur: https://www.sfo.asso.fr/files/files//FPHUNG/Congres_2015/chirurgie_refractive.pdf
8. Masson E. Anatomie de l'angle iridocornéen [Internet]. EM-Consulte. [cité 7 mars 2020]. Disponible sur: <https://www.em-consulte.com/article/7576/anatomie-de-l-angle-iridocorneen>

9. Masson E. Cristallin et zonule : anatomie et embryologie [Internet]. EM-Consulte. [cité 7 mars 2020]. Disponible sur: <https://www.em-consulte.com/article/10105/figures/cristallin-et-zonule-anatomie-et-embryologie>
10. Dialogues L. Anatomie et histologie de l'œil – Henry Saraux – Masson [Internet]. [cité 27 juill 2019]. Disponible sur: <https://www.librairiedialogues.fr/livre/460419-anatomie-et-histologie-de-l-il-henry-saraux-masson>
11. Rapport SFO 2014 – Glaucome primitif à angle ouvert [Internet]. [cité 7 mars 2020]. Disponible sur: https://www.em-consulte.com/em/SFO/2014/html/file_100018.html
12. L'épithélium cornéen par Danièle Rigal: Editions Masson 9782225841101 – RECYCLIVRE [Internet]. [cité 28 juill 2019]. Disponible sur: <https://www.abebooks.fr/9782225841101/L%C3%A9pith%C3%A9lium-corn%C3%A9en-Dani%C3%A8le-Rigal-2225841101/plp>
13. Masson E. Biomicroscopie ultrasonore du segment antérieur [Internet]. EM-Consulte. [cité 28 juill 2019]. Disponible sur: <https://www.em-consulte.com/article/180184/biomicroscopie-ultrasonore-du-segment-anterieur>
14. Hamard P. La gonioscopie. Datarevues0181551200305-C243 [Internet]. 8 mars 2008 [cité 28 juill 2019]; Disponible sur: <https://www.em-consulte.com/en/article/113482>
15. Pavlin CJ, Foster FS. Ultrasound biomicroscopy. High-frequency ultrasound imaging of the eye at microscopic resolution. Radiol Clin North Am. nov 1998;36(6):1047-58.

16. Pavlin CJ, Harasiewicz K, Sherar MD, Foster FS. Clinical use of ultrasound biomicroscopy. *Ophthalmology*. mars 1991;98(3):287-95.
17. Patel S, Reinstein DZ, Silverman RH, Coleman DJ. The shape of Bowman's layer in the human cornea. *J Refract Surg Thorofare NJ* 1995. déc 1998;14(6):636-40.
18. Reinstein DZ, Silverman RH, Raevsky T, Simoni GJ, Lloyd HO, Najafi DJ, et al. Arc-scanning very high-frequency digital ultrasound for 3D pachymetric mapping of the corneal epithelium and stroma in laser in situ keratomileusis. *J Refract Surg Thorofare NJ* 1995. août 2000;16(4):414-30.
19. Reinstein DZ, Srivannaboon S, Holland SP. Epithelial and stromal changes induced by intacs examined by three-dimensional very high-frequency digital ultrasound. *J Refract Surg*. 2001;17(3):310-8.
20. Sihota R, Dada T, Gupta R, Lakshminarayan P, Pandey RM. Ultrasound biomicroscopy in the subtypes of primary angle closure glaucoma. *J Glaucoma*. oct 2005;14(5):387-91.
21. Radhakrishnan S, Goldsmith J, Huang D, Westphal V, Dueker DK, Rollins AM, et al. Comparison of optical coherence tomography and ultrasound biomicroscopy for detection of narrow anterior chamber angles. *Arch Ophthalmol Chic Ill* 1960. août 2005;123(8):1053-9.
22. Fénolland J-R, Puech M, Baudouin C, Labbé A. Imagerie de l'angle iridocornéen dans le glaucome. [/data/revues/01815512/v36i4/S0181551213000594/](https://www.em-consulte.com/en/article/801531) [Internet]. 12 avr 2013 [cité 16 mars 2020]; Disponible sur: <https://www.em-consulte.com/en/article/801531>
23. Doyle A, Hamard P, Puech M, Lachkar Y. Asymmetric pigmentary glaucoma in a patient with Marfan's syndrome. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol Albrecht Von Graefes Arch Klin Exp Ophthalmol*. sept 2005;243(9):955-7.

24. Pavlin CJ, McWhae JA, McGowan HD, Foster FS. Ultrasound biomicroscopy of anterior segment tumors. *Ophthalmology*. août 1992;99(8):1220-8.
25. Weisbrod DJ, Pavlin CJ, Emara K, Mandell MA, McWhae J, Simpson ER. Small ciliary body tumors: ultrasound biomicroscopic assessment and follow-up of 42 patients. *Am J Ophthalmol*. avr 2006;141(4):622-8.
26. Kawana K, Okamoto F, Nose H, Oshika T. Ultrasound biomicroscopic findings of ciliary body malignant melanoma. *Jpn J Ophthalmol*. août 2004;48(4):412-4.
27. Haigis W. Optical coherence biometry. *Dev Ophthalmol*. 2002;34:119-30.
28. Bullimore MA, Slade S, Yoo P, Otani T. An Evaluation of the IOLMaster 700. *Eye Contact Lens*. mars 2019;45(2):117-23.
29. Puliafito CA, Hee MR, Lin CP, Reichel E, Schuman JS, Duker JS, et al. Imaging of macular diseases with optical coherence tomography. *Ophthalmology*. févr 1995;102(2):217-29.
30. Huang D, Swanson EA, Lin CP, Schuman JS, Stinson WG, Chang W, et al. Optical coherence tomography. *Science*. 22 nov 1991;254(5035):1178-81.
31. Izatt JA, Hee MR, Swanson EA, Lin CP, Huang D, Schuman JS, et al. Micrometer-scale resolution imaging of the anterior eye in vivo with optical coherence tomography. *Arch Ophthalmol Chic Ill 1960*. déc 1994;112(12):1584-9.
32. Hoerauf H, Wirbelauer C, Scholz C, Engelhardt R, Koch P, Laqua H, et al. Slit-lamp-adapted optical coherence tomography of the anterior segment. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol*. 1 janv 2000;238(1):8-18.
33. Baikoff G, Jitsuo Jodai H, Bourgeon G. Measurement of the internal diameter and depth of the anterior chamber: IOLMaster versus anterior chamber optical coherence tomographer. *J Cataract Refract Surg*. sept 2005;31(9):1722-8.
34. Savini G, Schiano-Lomoriello D, Hoffer KJ. Repeatability of automatic measurements by a new anterior segment optical coherence tomographer combined with Placido topography and agreement with 2 Scheimpflug cameras. *J Cataract Refract Surg*. avr 2018;44(4):471-8.

35. Li H, Leung CKS, Cheung CYL, Wong L, Pang CP, Weinreb RN, et al. Repeatability and reproducibility of anterior chamber angle measurement with anterior segment optical coherence tomography. *Br J Ophthalmol.* nov 2007;91(11):1490-2.
36. Baudouin C, Labbé A, Maftouhi AE, Hamard P. Application de l'OCT de segment antérieur dans l'étude des glaucomes. *Datarevues0181551200316-C25* [Internet]. 28 oct 2008 [cité 16 mars 2020]; Disponible sur: <https://www.em-consulte.com/en/article/187205>
37. Concordance de deux variables : l'approche graphique – EM|consulte [Internet]. [cité 16 mars 2020]. Disponible sur: <https://www.em-consulte.com/rmr/article/144170>
38. La biométrie optique dans le calcul d'implant de la chirurgie de la cataracte. */data/revues/01815512/00240009/922/* [Internet]. 8 mars 2008 [cité 29 sept 2019]; Disponible sur: <https://www.em-consulte.com/en/article/111669>
39. Buckhurst PJ, Wolffsohn JS, Shah S, Naroo SA, Davies LN, Berrow EJ. A new optical low coherence reflectometry device for ocular biometry in cataract patients. *Br J Ophthalmol.* juill 2009;93(7):949-53.
40. Lam S. Comparison of age-derived lens thickness to optically measured lens thickness in IOL power calculation: a clinical study. *J Refract Surg Thorofare NJ* 1995. févr 2012;28(2):154-5.
41. Cruysberg LPJ, Doors M, Verbakel F, Berendschot TTJM, De Brabander J, Nuijts RMMA. Evaluation of the Lenstar LS 900 non-contact biometer. *Br J Ophthalmol.* janv 2010;94(1):106-10.
42. Comparative study of central corneal thickness measurement with slit-lamp optical coherence tomography and visante optical coherence tomography. – PubMed – NCBI [Internet]. [cité 5 oct 2019]. Disponible sur: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17916376>

43. Rohrer K, Frueh BE, Wälti R, Clemetson IA, Tappeiner C, Goldblum D. Comparison and evaluation of ocular biometry using a new noncontact optical low-coherence reflectometer. *Ophthalmology*. nov 2009;116(11):2087-92.
44. Editor CK Senior. The Anterior Chamber, From Every Angle [Internet]. [cité 6 oct 2019]. Disponible sur: <https://www.reviewofophthalmology.com/article/the-anterior-chamber-from-every-angle>
45. Corneal changes after laser refractive surgery for myopia: comparison of Orbscan II and Pentacam findings. – PubMed – NCBI [Internet]. [cité 6 oct 2019]. Disponible sur: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17466859>
46. Salouti R, Nowroozzadeh MH, Zamani M, Fard AH, Niknam S. Comparison of anterior and posterior elevation map measurements between 2 Scheimpflug imaging systems. *J Cataract Refract Surg*. mai 2009;35(5):856-62.
47. Chen D, Lam AKC. Intrasession and intersession repeatability of the Pentacam system on posterior corneal assessment in the normal human eye. *J Cataract Refract Surg*. mars 2007;33(3):448-54.
48. 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.
49. Chen D, Lam AKC. Reliability and repeatability of the Pentacam on corneal curvatures. *Clin Exp Optom*. mars 2009;92(2):110-8.
50. Lackner B, Schmidinger G, Pieh S, Funovics MA, Skorpik C. Repeatability and reproducibility of central corneal thickness measurement with Pentacam, Orbscan, and ultrasound. *Optom Vis Sci Off Publ Am Acad Optom*. oct 2005;82(10):892-9.

51. Kim SW, Byun YJ, Kim EK, Kim T. Central corneal thickness measurements in unoperated eyes and eyes after PRK for myopia using Pentacam, Orbscan II, and ultrasonic pachymetry. *J Refract Surg Thorofare NJ* 1995. nov 2007;23(9):888-94.
52. Uçakhan OO, Ozkan M, Kanpolat A. Corneal thickness measurements in normal and keratoconic eyes: Pentacam comprehensive eye scanner versus noncontact specular microscopy and ultrasound pachymetry. *J Cataract Refract Surg.* juin 2006;32(6):970-7.
53. Pereira JMM, Neves A, Alfaiate P, Santos M, Aragão H, Sousa JC. Lenstar® LS 900 vs Pentacam®-AXL: Comparative study of ocular biometric measurements and intraocular lens power calculation. *Eur J Ophthalmol.* nov 2018;28(6):645-51.
54. Uçakhan OÖ, Akbel V, Biyıklı Z, Kanpolat A. Comparison of corneal curvature and anterior chamber depth measurements using the manual keratometer, Lenstar LS 900 and the Pentacam. *Middle East Afr J Ophthalmol.* sept 2013;20(3):201-6.
55. Huang J, Pesudovs K, Wen D, Chen S, Wright T, Wang X, et al. Comparison of anterior segment measurements with rotating Scheimpflug photography and partial coherence reflectometry. *J Cataract Refract Surg.* févr 2011;37(2):341-8.
56. Zhang J, Lian J-C, Zhang S-S, Yu Q, Zhou J-B. Comparison of the biometric measurements obtained using the Lenstar, Pentacam and ultrasound pachymetry methods in cataract patients. *Guoji Yanke Zazhi.* 8 avr 2016;16:594-9.
57. O'Donnell C, Hartwig A, Radhakrishnan H. Comparison of central corneal thickness and anterior chamber depth measured using LenStar LS900, Pentacam, and Visante AS-OCT. *Cornea.* sept 2012;31(9):983-8.
58. Barkana Y, Gerber Y, Elbaz U, Schwartz S, Ken-Dror G, Avni I, et al. Central corneal thickness measurement with the Pentacam Scheimpflug system, optical low-coherence reflectometry pachymeter, and ultrasound pachymetry. *J Cataract Refract Surg.* sept 2005;31(9):1729-35.

59. Dong J, Tang M, Zhang Y, Jia Y, Zhang H, Jia Z, et al. Comparison of Anterior Segment Biometric Measurements between Pentacam HR and IOLMaster in Normal and High Myopic Eyes. PloS One. 2015;10(11):e0143110.
60. Mao X, Savini G, Zhuo Z, Feng Y, Zhang J, Wang Q, et al. Repeatability, reproducibility, and agreement of corneal power measurements obtained with a new corneal topographer. J Cataract Refract Surg. oct 2013;39(10):1561-9.