

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique

Université Oran 1, Ahmed Ben Bella
Institut des Sciences et Techniques Appliquées

Projet de Fin d'Etudes

Présenté par :

BOUKHOBZA Ichrak

En vue de l'obtention du diplôme de

Master Professionnel

Spécialité : Optométrie

Thème :

« Dispositif et procédé de mesure excentré de la kératométrie
cornéenne pour la détermination de la sagittale sclérale »

Soutenu le 21 juin 2026 devant le jury composé de :

Dr GUERNAZI Daoud

Pr.DERDOUR Mohamed Amine

Dr.OUZZANI Mhamed

Dr.AZZOUZ Ilyas

Président

Examineur

Encadreur

Partenaire socio-économique

Année universitaire 2025-2026

Remerciement

Je tiens à exprimer ma gratitude à DIEU TOUT-PUISSANT, qui m'a comblé de sa volonté et m'a donné la motivation et la discipline nécessaires tout au long de cette période, pour la conception du mémoire.

Je tiens également à remercier vivement et exprimer ma profonde gratitude à mon encadrant de mémoire de fin d'étude **Dr. OUZZANI** Mhamed pour sa présence continuelle et son encouragement tout au long de ce travail.

Ses conseils et ses encouragements ont permis à ce travail d'aboutir, qui m'ont aidé aussi à enrichir mon parcours professionnel et finalement mon autonomie de travail.

J'adresse mon remerciement aux membres du jury en particulier **Dr.Guernazi** Daoud en tant que président, **Pr.DERDOUR** Mohamed Amine en tant qu'examineur, devant qui j'ai eu l'honneur de présenter mon travail, et qui ont pris la peine de lire et juger ce mémoire.

Je tiens aussi à exprimer ma gratitude envers mes amies pour leur soutien constant leur soutien a été notre l'aide à atteindre cette étape essentielle de notre parcours scolaire.

Finalement, je souhaite exprimer ma sincère gratitude envers le **Pr.ROUANE** Hacene Omar pour son dévouement inébranlable lors des formations à l'incubateur.

Mon développement personnel et professionnel a été profondément influencé par sa contribution, et je suis très reconnaissante.

Et je saisis également l'occasion pour exprimer ma profonde gratitude envers toutes les personnes qui ont apporté leur contribution, que ce soit de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire

Tables des matières

Remerciement.....	1
Tables des matières.....	2
Listes des figures.....	6
Listes des Tableaux.....	8
Résumé.....	9
Summary	10
الملخص	11
Introduction générale.....	12
Partie théorique	13
Chapitre I : Anatomie de la surface oculaire	14
Introduction	15
1.Introduction à la surface oculaire	15
2.Anatomie du film lacrymal	16
3.Anatomie de la cornée.....	17
4.Anatomie du limbe	18
5.Anatomie de la sclère	18
6.Anatomie de la conjonctive.....	19
Conclusion.....	20
Chapitre II : Concepts fondamentaux des lentilles sclérales	21
Introduction	22
1.Histoire	22
2.Définition	22
3.Indications	23
4.Classification.....	23
6.Conception & design.....	24
6.1. Surface postérieure (structure générale).....	25
6.2. Surface antérieure (options optiques).....	25
6.3.La zone optique	25
6.4.La zone de transition	26

6.5. La zone haptique (ou zone d'appui)	26
6.6. L'inversée	27
6.7. Multifocaux	27
6.8. Modifications bord	27
7. Épaisseur:	27
8. Gestion avancée des cas complexes	28
9. Principes et méthode d'adaptation d'adaptations	28
9.1. Principe générale	28
9.2. Critères de réussite	30
10. Problèmes et complications liés au port des lentilles sclérales	30
11. Équipement utile pendant l'adaptation des lentilles sclérales	31
11.1. Kératométrie et topographie	31
11.2. OCT du segment antérieur	31
11.3. Microscopie spéculaire	32
Conclusion	33
Chapitre III : Approches théoriques et instrumentales de la hauteur sagittale	34
Introduction	35
1. Définition de la hauteur sagittale	35
2. Paramètres géométriques de la cornée influencent la hauteur sagittale	36
3. Calcul et estimation de la hauteur sagittale	36
3.1. Calcule géométrique	36
3.2. Estimation et mesure instrumentales	38
3.3. Méthodes cliniques	40
4. Profondeur de la chambre antérieure	41
4.1. Mesurage de la profondeur de la chambre antérieure	42
Conclusion	45
Partie Pratique	46
Introduction	47
1. Échantillonnage	47
1.1. Critères d'inclusion	47
1.2. Critères d'exclusion	47

2. Matériels et Méthodes	47
2.1. Conception 3D et Découpe au LASER CO2	47
2.2. Conception électronique.....	51
2.3. Prototype finale	52
2.4. Développement du logiciel pour calculer la hauteur sagittale	53
2.5. Méthodologie d'utilisation du prototype finalisé avec le programme	56
2.6. Acquisition des données expérimentales.....	57
2.7. Aspects éthiques et déontologique	58
2.8. Présentation des cas.....	59
3. Résultats	65
3.1. Les données expérimentales de l'échantillon.....	65
3.3. Caractéristiques cliniques.....	66
4. Discussion.....	70
4.1. Comparaison des sagittales cornéennes entre les trois appareils.....	70
4.2. Comparaison de sagittales sclérales entre les trois appareils.....	71
4.3. Récapitulatif	72
4.4. Conclusion finale.....	72
4.5. Confrontation des résultats par rapport aux études publiées.....	73
Partie Startup	78
Étude technico-économique	79
1. Présentation du projet.....	80
Introduction	80
1.1. L'idée du projet.....	80
1.2. Les valeurs suggérées.....	81
1.3. Équipe de travail.....	82
1.4. Objectifs du projet.....	82
1.5. Le planning de réalisation du projet.....	82
2. Aspects innovants	83
2.1. Nature des innovations	83
2.2. Domaines d'innovation	84
Étude de marché	85

3. Analyse stratégique du marché.....	86
3.1. Segment du marché	88
3.2. Mesure de l'intensité de la concurrence	89
3.3. Plan marketing.....	89
4. Plan de production et organisation	91
4.1. Processus de production	91
4.2. Approvisionnement	91
4.3. Main-d'œuvre.....	91
4.4. Principaux partenaires	92
Etude technique	93
5. Plan financier.....	94
5.1. Emplacement de l'activité économique	94
5.2. Les coûts et les charges	94
5.3. Chiffre d'affaires	97
6. Prototype expérimental	98
Business Model Canva (BMC)	98
Conclusion générale	100
Références bibliographiques	102
Annexes	106

Listes des figures

Figure 1 : Anatomie d'une lentille sclérale.	23
Figure 2 : vue en coupe des différentes zones de la lentille sclérale.	25
Figure 3 : géométrie d'encoche d'une lentille sclérale.	27
Figure 4 : Géométrie des canaux d'écoulement des larmes d'une lentille sclérale.	28
Figure 5 : Sagittale cornéen vs Sagittale globale de la surface oculaire incluant la zone sclérale.	35
Figure 6 : Analyse géométrique de la cornée	36
Figure 7 : Mesure de la sagittale cornéenne vs la sagittale sclérale en OCT.	38
Figure 8 : Affichage des hauteurs sagittales recueillis dans des topographies d'élévation.	39
Figure 9 : Rapport CSP affichant la hauteur Sagittale.	40
Figure 10 : Affichage de la hauteur sagittale obtenues avec la profilométrie.	40
Figure 12 : Formule de calcul de la hauteur sagittale sclérale.	41
Figure 13 : Mesure de la profondeur de la chambre antérieure recueilli avec un biomètre.	42
Figure 14 : Profondeur de la chambre antérieure mesuré avec topographe Orbscan.	43
Figure 15 : Profondeur de la chambre antérieure mesuré avec le Pentacam.	43
Figure 16 : Profondeur de la chambre antérieure mesuré avec OCT.	43
Figure 17 : Profondeur de la chambre antérieure mesuré avec le SPAC.	44
Figure 18 : Profondeur de la chambre antérieure mesuré avec technologies combinées.	44
Figure 19 : Vue dimensionnée des prototypes.	48
Figure 20 : Vue des prototypes en 3D.	48
Figure 21 : Prototypes imprimée des cibles de fixationss.	49
Figure 22 : Prototypes imprimées des boîtiers	49
Figure 23: Vue dimensionnée des filtres en PMMA.	50
Figure 24 : Vue en 3D des filtres en PMMA.	50
Figure 25: Filtres en PMMA.	50
Figure 26: Configuration finale du filtre et du boîtier.	51
Figure 27 : Composants & Matériels électroniques utilisées dans la réalisation du prototype.	51
Figure 28 : Première version du circuit électronique du prototype.	52
Figure 29 : Deuxième version du circuit électronique du prototype.	52
Figure 30 : Prototype finale.	52
Figure 31: Système de commande des sources lumineuses du prototype	53
Figure 32 : Première Interface.	54
Figure 33 : Deuxième Interface.	55
Figure 34 : Troisième Interface	55
Figure 35 : Etapes d'utilisation du programme.	56
Figure 36 : Topographe d'élévation PENTACAM OCULUS.	57
Figure 37 OCT YALKaid	58
Figure 38 : Auto-kérato-réfractomètre avec le prototype.	58
Figure 39 : Mesure de la SAG CC en utilisant le PENTACAM de l'OD et l'OG.	59

Figure 40 : Mesure de la SAG CC avec le YALkaid de l'OD et l'OG.....	59
Figure 41 : Outils d'essai d'une lentille sclérale de diamètre 15 mm et de sagittale de 4625 μm ..	61
Figure 42 : Evaluation de la clairance d'une lentille sclérale.	61
Figure 43 : Mesure de la SAG CC en utilisant le PENTACAM de l'OD et l'OG.	62
Figure 44 : Mesure de la SAG CC en utilisant le YALkaid de l'OD et l'OG.	63
Figure 45 : Répartition des sujets selon le sexe.	65
Figure 46 : Répartiton des SAG CC selon trois appareils.....	66
Figure 47 : Répartition des SAG SCL à 15 mm selon trois appreils.....	67
Figure 48 : Prototype finale.....	98

Listes des Tableaux

Tableau 1 : Terminologie et classification des lentilles sclérales.	24
Tableau 2 : Parmètres géométriques de la cornée.	36
Tableau 3 : Facteurs des sagittales des lentilles sclérales.	41
Tableau 4 : Valeurs métrologiques des moyennes des sagittales cornéennes centrales.	66
Tableau 5 : Valeurs métrologiques des moyennes des sagittales sclérales.	68
Tableau 6 : Etude de marché	87
Tableau 7 : Budget marketing	91
Tableau 8 : Les charges variables.	95
Tableau 9: Les charges fixes.	95
Tableau 10 : Main d'oeuvre	96
Tableau 11: Equipement	96
Tableau 12 : Agencement et installations	97
Tableau 13 : Chiffres d'affaires.	97
Tableau 14 : Bilan final du projet.	98

Résumé

La hauteur sagittale constitue aujourd'hui l'un des paramètres les plus importants dans l'adaptation des lentilles sclérales. Cependant, sa mesure dépend généralement sur des appareils coûteux, limitant son accessibilité dans de nombreuses pratiques cliniques. Dans ce contexte, ce mémoire présente le SAGISIM, un dispositif innovant accompagné d'un logiciel de calcul permettant l'estimation rapide et automatisée de la hauteur sagittale cornéenne et sclérale à un diamètre donné.

Méthodes

Il s'agit d'une étude prospective comparative visant à évaluer la fiabilité du SAGISIM en comparant ses mesures à celles obtenues par des instruments de référence utilisés en pratique clinique, notamment YALKAID OCT-SA. Les mesures de sagittale cornéenne et sclérale ont été analysées à travers les moyennes obtenues et les incertitudes de mesure associées à chaque méthode.

Résultats

Pour la sagittale cornéenne, la moyenne obtenue avec YALKaid était de $2333,9 \pm 24,4 \mu\text{m}$, tandis que celle de l'I-Optik en utilisant le SAGISIM était de $2599,35 \pm 25,2 \mu\text{m}$, avec une différence moyenne de $295,45 \mu\text{m}$. Concernant la sagittale sclérale, la moyenne mesurée par YALKaid était de $4539 \pm 21,66 \mu\text{m}$, contre $4818,1 \pm 27,45 \mu\text{m}$ pour l'I-Optik avec le SAGISIM, avec une différence moyenne de $280,1 \mu\text{m}$.

Conclusion

Les résultats montrent des incertitudes relativement faibles pour les deux appareils étudiés, tout en mettant en évidence des écarts de mesure qui soulignent l'importance de la standardisation des méthodes d'évaluation de la hauteur sagittale. Grâce à sa simplicité d'utilisation, son faible coût potentiel et son automatisation, le SAGISIM représente une solution prometteuse pour faciliter l'accès à la mesure de la hauteur sagittale et accompagner l'évolution des pratiques d'adaptation des lentilles sclérales, avec des perspectives futures d'application aux lentilles souples.

Mots-clés : Hauteur sagittale, sagittale cornéenne, sagittale sclérale, lentilles sclérales.

Summary

The sagittal height constitutes today one of the most important parameters in the adaptation of scleral lenses. However, its measurement usually depends on expensive devices, limiting its accessibility in many clinical practices. In this context, this thesis presents the SAGISIM, an innovative device accompanied by a calculation software allowing the rapid and automated estimation of the corneal and scleral sagittal height at a given diameter.

Methods

This is a comparative prospective study aimed at evaluating the reliability of the SAGISIM by comparing its measurements with those obtained by reference instruments used in clinical practice, in particular YALKAID OCT-SA. The corneal and scleral sagittal measurements were analyzed through the averages obtained and the measurement uncertainties associated with each method.

Results

For the corneal sagittal, the average obtained with yalkaid was $2333.9 \pm 24.4 \mu\text{m}$, while that of the I-Optik using the SAGISIM was $2599.35 \pm 25.2 \mu\text{m}$, with an average difference of $295.45 \mu\text{m}$. Concerning the scleral sagittal, the average measured by YALKAID was $4539 \pm 21.66 \mu\text{m}$, against $4818.1 \pm 27.45 \mu\text{m}$ for the I-Optik with the SAGISIM, with an average difference of $280.1 \mu\text{m}$.

Conclusion

The results show relatively low uncertainties for the two devices studied, while highlighting measurement differences that underline the importance of standardizing the methods for evaluating the sagittal height. Thanks to its simplicity of use, its low potential cost and its automation, SAGISIM represents a promising solution to facilitate access to sagittal height measurement and to support the evolution of scleral lens adaptation practices, with future prospects for application to soft lenses.

Keywords: Sagittal height, corneal sagittal height , scleral sagittal height, scleral lenses.

الملخص

يُعد الارتفاع السهمي اليوم أحد أهم المعايير في تكييف العدسات الصلبة. ومع ذلك، فإن قياسه يعتمد عادةً على أجهزة باهظة الثمن، مما يحد من إمكانية الوصول إليه في العديد من الممارسات السريرية. وفي هذا السياق، تقدم هذه الأطروحة جهاز SAGISIM، وهو جهاز مبتكر مزود ببرنامج حسابي يتيح التقدير السريع والآلي للارتفاع السهمي للقرنية والصلبة عند قطر معين.

الطرق

تُعد هذه دراسة مستقبلية مقارنة تهدف إلى تقييم موثوقية جهاز SAGISIM من خلال مقارنة قياساته بتلك التي تم الحصول عليها باستخدام أجهزة مرجعية مستخدمة في الممارسة السريرية، ولا سيما جهاز YALKAID OCT-SA. تم تحليل قياسات الارتفاع السهمي للقرنية والصلبة من خلال المتوسطات التي تم الحصول عليها ودرجات عدم اليقين في القياس المرتبطة بكل طريقة.

النتائج

بالنسبة للساجيتال القرنية، بلغ المتوسط الذي تم الحصول عليه باستخدام $YALKAID 2333,9 \pm 24,4$ ميكرومتر، في حين بلغ المتوسط الذي تم الحصول عليه باستخدام I-Optik مع جهاز $SAGISIM 2599,35 \pm 25,2$ ميكرومتر، بفارق متوسط قدره 295,45 ميكرومتر. أما بالنسبة للساجيتال الصلبي، فقد بلغ المتوسط المقاس بواسطة $YALKAID 4539 \pm 21,66$ ميكرومتر، مقابل $27,45 \pm 4818,1$ ميكرومتر لجهاز I-Optik باستخدام SAGISIM، مع فرق متوسط قدره 280,1 ميكرومتر.

الخلاصة

تُظهر النتائج وجود درجات من عدم اليقين منخفضة نسبيًا بالنسبة للجهازين قيد الدراسة، مع إبراز اختلافات في القياس تؤكد على أهمية توحيد أساليب تقييم الارتفاع السهمي. وبفضل سهولة استخدامه وتكلفته المنخفضة المحتملة وطبيعته الآلية، يمثل جهاز SAGISIM حلاً واعدًا لتسهيل الوصول إلى قياس الارتفاع الساجيتي ومواكبة تطور ممارسات تكييف العدسات الصلبة، مع آفاق مستقبلية لتطبيقه على العدسات المرنة.

الكلمات المفتاحية: الارتفاع الساجيتي، الساجيتي القرنية، الساجيتي الصلبة، العدسات الصلبة.

Introduction générale

En contactologie, l'adaptation des lentilles de contact a considérablement évolué grâce aux progrès de la recherche, de l'instrumentation et des pratiques cliniques. Parmi les paramètres devenus essentiels au succès des adaptations modernes, la hauteur sagittale occupe aujourd'hui une place centrale, en particulier dans le domaine des lentilles sclérales.

La hauteur sagittale constitue un élément déterminant pour le choix de la géométrie de la lentille et pour l'obtention d'un ajustement optimal. Une évaluation précise de ce paramètre permet d'améliorer la qualité de l'adaptation, de réduire le nombre d'essais nécessaires et d'optimiser le confort du patient.

Cependant, les technologies actuellement disponibles pour mesurer la hauteur sagittale reposent principalement sur des équipements spécialisés tels que l'OCT (tomographie par cohérence optique) ou les systèmes de profilométrie cornéo-sclérale. Bien que performants, ces instruments demeurent coûteux et restent peu accessibles dans de nombreuses structures cliniques.

Face à cette problématique, le développement d'une solution alternative, plus simple, plus accessible et suffisamment fiable pour une utilisation clinique quotidienne, apparaît comme une nécessité. C'est dans cette optique qu'a été conçu le SAGISIM, un dispositif innovant destiné à estimer et calculer la hauteur sagittale cornéenne et sclérale pour un diamètre donné.

La conception de ce dispositif a nécessité plusieurs étapes de développement, incluant la modélisation, la fabrication et l'optimisation de nombreux prototypes. Chaque version a été testée et améliorée afin d'identifier la configuration la plus performante pour la détermination de la hauteur sagittale.

Parallèlement, un logiciel dédié a été développé pour traiter les données recueillies à partir d'un auto-kérato-réfractomètre associé au dispositif SAGISIM. Ce logiciel permet de convertir automatiquement les mesures obtenues en valeurs de hauteur sagittale exploitables en pratique clinique.

Après la phase de validation technique du dispositif et du logiciel, une étude comparative prospective a été mise en place afin d'évaluer leurs performances. Cette étude vise à comparer les mesures obtenues avec le SAGISIM à celles fournies par des instruments de référence, afin d'en déterminer la fiabilité, la précision et la pertinence clinique.

Ce mémoire est structuré en trois parties principales. La première présente les bases théoriques nécessaires à la compréhension de la hauteur sagittale et de son importance en contactologie. La deuxième est consacrée à la conception, à la fabrication et au développement du dispositif SAGISIM ainsi qu'à son logiciel associé. Enfin, la troisième partie décrit la méthodologie de l'étude comparative, les procédures expérimentales mises en œuvre, les résultats obtenus ainsi que leur discussion. Cette organisation permet de suivre l'ensemble du processus, depuis l'identification du besoin clinique jusqu'à l'évaluation scientifique de la solution proposée.

Partie théorique

Chapitre I : Anatomie de la surface oculaire

Introduction

Chaque milieu optique évoque une géométrie intrinsèque propre à la surface oculaire commençant par la répartition du film lacrymal sur les variations de courbure de la cornée du centre vers la périphérie. Puis se poursuit au niveau du limbe, consécutivement, vers la sclère.

Dans ce contexte, l'étude de toute la surface oculaire devient indispensable pour mieux caractériser la géométrie ainsi qu'interpréter la fiabilité des mesures prises par des procédés de mesure innovante.

Ce chapitre abordera exclusivement les milieux optiques intervenant dans ce procédé de mesure.

1.Introduction à la surface oculaire

La surface oculaire est une unité intégrée englobant la cornée, la conjonctive, les glandes lacrymales et les paupières.

Elle comprend l'épithélium cornéen et conjonctival, les glandes lacrymales principales et accessoires, les cils avec leurs glandes, ainsi que les structures palpébrales impliquées dans le clignement et le canal naso-lacrymal.

L'ensemble de ces structures sont reliées via l'épithélium continu qui assure l'intégration structurale des composants oculaires et leur connexion aux systèmes nerveux, vasculaire, immunitaire et endocrinien. [1]

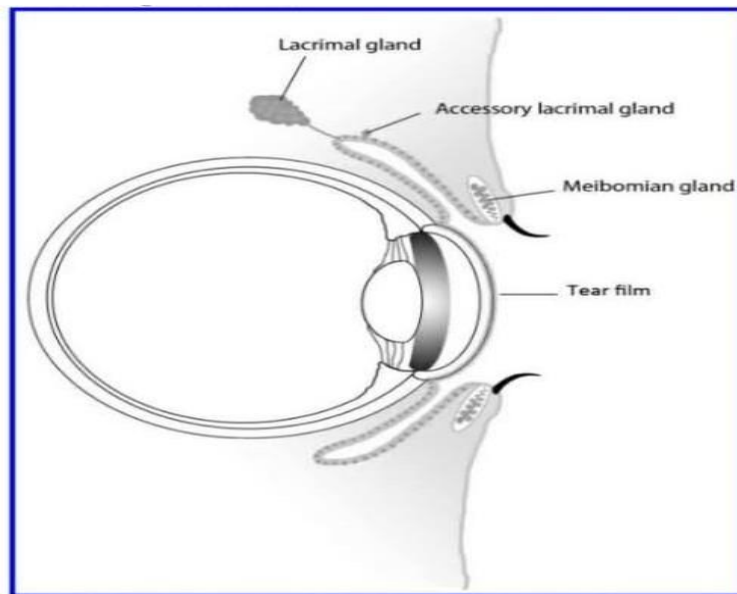


Figure 1 : Vue en coupe du système de la surface oculaire.

2. Anatomie du film lacrymal

La surface oculaire est protégée par le clignement, en coordonnant les larmes à ce dernier, le nettoyage et l'hydratation est assurée. [2]

Ces larmes s'introduisent comme un film lacrymal provenant d'un système de sécrétion qui englobent les glandes lacrymales principales et accessoires, ainsi que par les glandes de Meibomius, tandis que la mucine est produite par les cellules caliciformes conjonctivales. [1]

Le film lacrymal se compose de trois couches distinctes :

2.1. Couche lipidique : film monomoléculaire qui régule l'évaporation des larmes et assure un scellement étanche lors de la fermeture palpébrale. [1]

2.2. Couche aqueuse : produite par les glandes lacrymales principales et accessoires, elle contient des sels solubles et des protéines [1]

2.3. Couche mucineuse : située au-dessus des cellules épithéliales cornéennes et conjonctivales, elle est constituée de mucine glycoprotéique, partiellement adsorbée sur les membranes des cellules épithéliales cornéennes et stabilisée par les microvillosités des cellules superficielles. Cette organisation crée une surface hydrophile favorisant la répartition des larmes aqueuses et améliorant l'humidification via la diminution de la tension superficielle. [1]

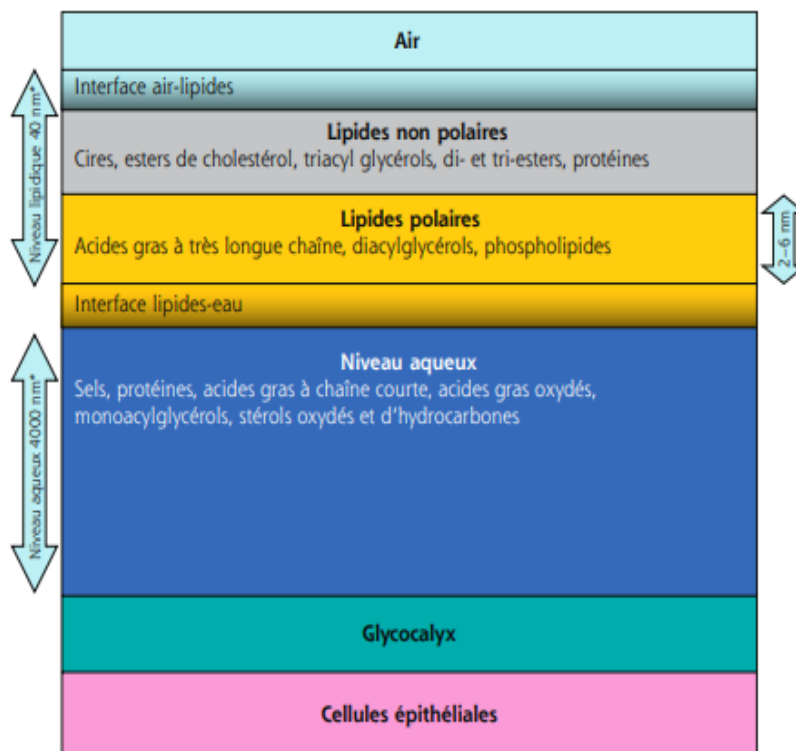


Figure 2 : Organisation du film lacrymal en différents niveaux.

3. Anatomie de la cornée

La cornée est un tissu qui constitue un milieu transparent permettant la vision, grâce à ses cinq couches, soutenues par le film lacrymal. Elle constitue l'élément réfractif le plus puissant du système visuel, contribuant aux deux tiers de la puissance réfractive totale de l'œil.

La cornée est constituée de cinq couches, chacune présentant une fonction spécifique, ces couches sont :

3.1. L'épithélium

L'épithélium constitue la couche la plus externe de la cornée. Il est continuellement baigné par le film lacrymal à chaque clignement et assure une surface réfractive lisse, tout en protégeant le stroma contre les agressions externes. C'est une continuité non pigmentée de la conjonctive bulbaire. [3]

3.2. La membrane de Bowman

La membrane de Bowman se situe directement sous l'épithélium. Elle est acellulaire et constituée de fibres de collagène incorporées dans diverses substances extracellulaires. Ces fibres sont uniformes en épaisseur. [3]

3.3. Le stroma

Le stroma est la couche la plus volumineuse de la cornée, représentant environ 90 % du tissu cornéen. Il est constitué de lamelles transparentes de fibrilles de collagène dans une matrice extracellulaire. [3]

3.4. La couche de DUA

C'est une entité anatomique distincte située entre le stroma cornéen profond et la membrane de Descemet. Sa structure acellulaire et sa résistance mécanique contribuent à la cohésion et à l'organisation lamellaire de la cornée postérieure. [4]

3.5. La membrane de Descemet

Cette membrane se situe à la face postérieure du stroma et constitue la membrane basale de l'endothélium. Elle est formée de fibres de collagène fines disposées et incorporées dans une matrice. Elle sert à protéger les structures plus profondes de l'œil. [3]

3.6. L'endothélium

L'endothélium cornéen est composé d'une seule couche de cellules aplaties polygonales, dont les membranes plasmiques s'emboîtent. Il joue un rôle majeur dans le maintien de l'état déshydraté de la cornée, en agissant comme une pompe à l'eau, empêchant l'entrée de liquide dans le stroma cornéen. Ces pompes sont situées dans la membrane latérale de chaque cellule. [3]

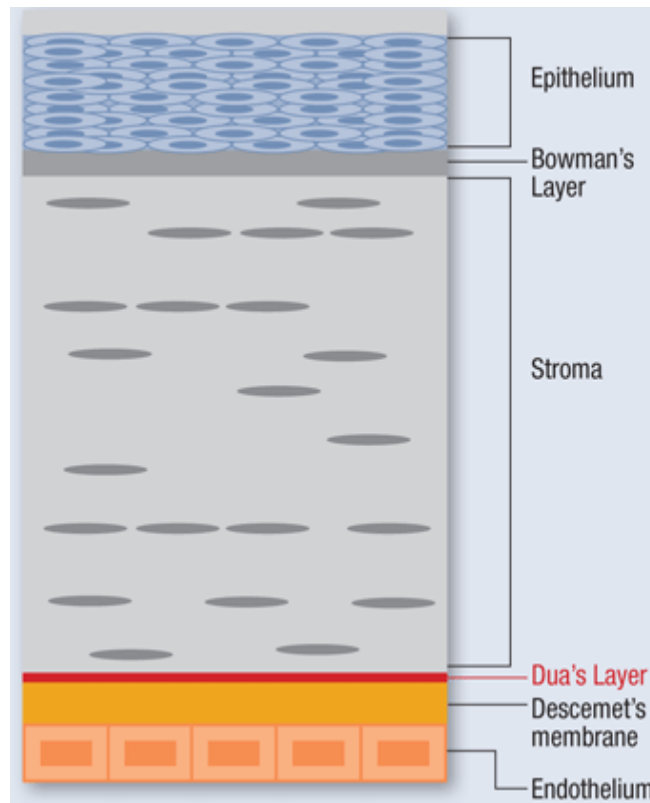


Figure 3 : Les différentes six couches de la cornée.

4. Anatomie du limbe

Le limbe est la frontière anatomique entre la cornée et la sclère blanche. C'est à son niveau que se fait la transition entre l'épithélium de la cornée et celui de la conjonctive bulbaire. [5]

Il correspond à une zone de transitions entre des lamelles cornéennes organisées et des fibres de collagène sclérales aléatoires. [6]

5. Anatomie de la sclère

La sclère constitue la plus grande partie de la tunique fibreuse externe du globe oculaire. Toute sa surface externe est recouverte par la capsule de Tenon, ainsi que par la conjonctive bulbaire dans sa partie antérieure. Sa surface interne est en contact avec la choroïde, séparée éventuellement par un espace supra-choroïdien potentiel. Sur le plan microscopique, la sclère se compose de trois couches : tissu épiscléral, sclère propre et lamina fusca. [7]

Concernant les zones spécifiques de la sclère, on distingue trois zones principales :

Sillon-scléral : une indentation située sur la surface interne de l'extrémité antérieure de la sclère.

Éperon-scléral : une bande circulaire localisée à l'extrémité antérieure de la sclère.

Lamina-cribrosa : région percée de la sclère, permettant le passage des fibres du nerf optique.

6. Anatomie de la conjonctive

La conjonctive est une membrane muqueuse fine transparente vascularisée qui s'étend du limbe à la sclère antérieure, forme un cul-de-sac à la fornix supérieure et inférieure, et se replie antérieurement pour tapisser les paupières et permettre un mouvement fluide des paupières sur le globe. La conjonctive peut être divisée en trois sections qui sont continuées les unes avec les autres : la conjonctive palpébrale ou tarsale, la conjonctive bulbaire qui recouvre la sclère, et le fornix conjonctival, qui est le cul-de-sac reliant la section palpébrale et la section bulbaire. [6]

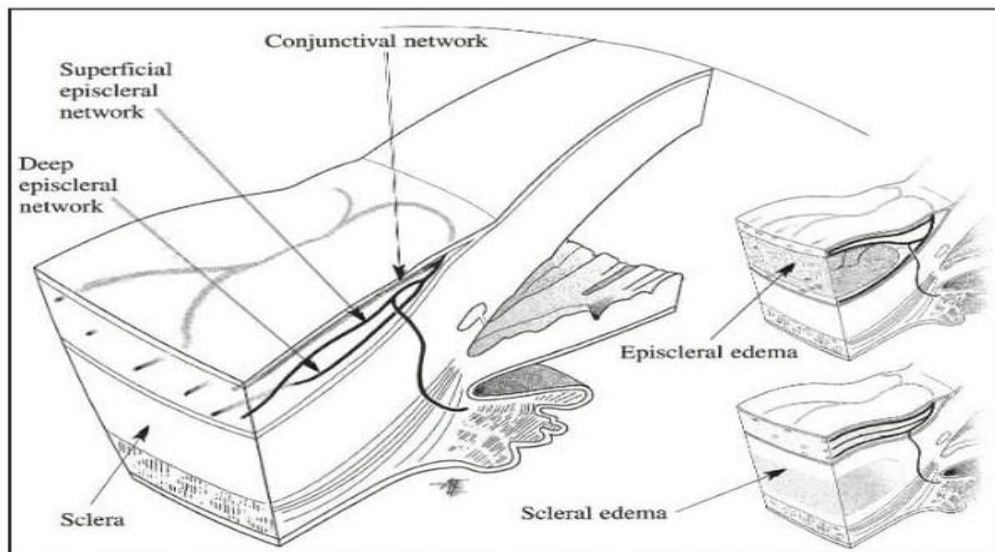


Figure 4 : Section de la conjonctive, l'épisclère et la sclère.

Conclusion

Ce chapitre a eu pour objectif d'identifier l'aspect anatomique des différentes structures de la surface oculaire afin de mieux caractériser et définir la sagittale sclérale tout en mettant en évidence ses propres dimensions et caractéristiques théoriques, géométriques et cliniques qui seront prochainement abordées dans le chapitre suivant.

Chapitre II : Concepts fondamentaux des lentilles sclérales

Introduction

Les lentilles sclérales jouent actuellement un rôle prépondérant dans le traitement des cas complexes des maladies de la surface oculaire en raison de leurs propriétés de stabilité, de confort et de protection par la présence d'un réservoir lacrymal. Le développement de leurs matériaux et de leur adaptation a grandement amélioré leurs performances cliniques.

Ce chapitre présente les principes généraux des lentilles sclérales, leur historique, leurs indications, leurs caractéristiques de conception ainsi que les principales étapes de leur adaptation. La compréhension de ces éléments reste étroitement liée à l'analyse de la géométrie de la surface oculaire, notamment à l'évaluation de la hauteur sagittale, paramètre essentiel dans le choix et l'ajustement des lentilles sclérales.

1.Histoire

L'évolution des lentilles de contact, depuis les premières lentilles sclérales en matière rigide décrites par Adolph Fick en 1888 jusqu'aux modèles modernes, a suivi une progression marquée par l'amélioration des matériaux et du diamètre des lentilles. Après les premières tentatives de Eugene Kalt et August Müller, limitées par l'imperméabilité du verre à l'oxygène, le XXe siècle a vu apparaître les lentilles en PMMA puis les lentilles souples et semi-rigides permettant une meilleure tolérance oculaire. À la fin du XXe siècle, les matériaux perméables aux gaz (GP) et les progrès technologiques ont favorisé le retour des lentilles sclérales de grand diamètre, notamment grâce aux travaux de Perry Rosenthal et Don Ezekiel. Aujourd'hui, la fabrication numérique assistée par ordinateur permet une précision microscopique et une adaptation quasi parfaite des lentilles sclérales à la surface oculaire. [8]

2.Définition

Les lentilles sclérales sont de grandes lentilles rigides perméables aux gaz ayant des diamètres allant de 14 mm à plus de 22 mm. Ces lentilles couvrent la cornée et le limbe et sont soutenues uniquement par le repos sur la sclère. Les lentilles sclérales présentent certains avantages distincts par rapport aux lentilles cornéennes.

Elles sont révolutionnaires en raison de la combinaison unique du grand diamètre et du matériau rigide. Le grand diamètre offre un confort exceptionnel grâce son trajet direct sans qu'elle touche la cornée et repose sur la conjonctive, qui est moins sensible.

La lentille est très stable sur l'œil, elle ne bouge pas lorsque le patient cligne des yeux, ce qui permet une vision stable sans fluctuations, ce qui en fait une excellente option pour les yeux secs et les maladies de la surface oculaire.

Le matériau rigide ne se conforme pas à la cornée et permet de créer un grand réservoir de fluide, qui agit comme la lentille corrigeant 99% des astigmatismes cornéens réguliers et irréguliers. Ce réservoir protège, lubrifie et humidifie la surface oculaire tout au long du port. [9]

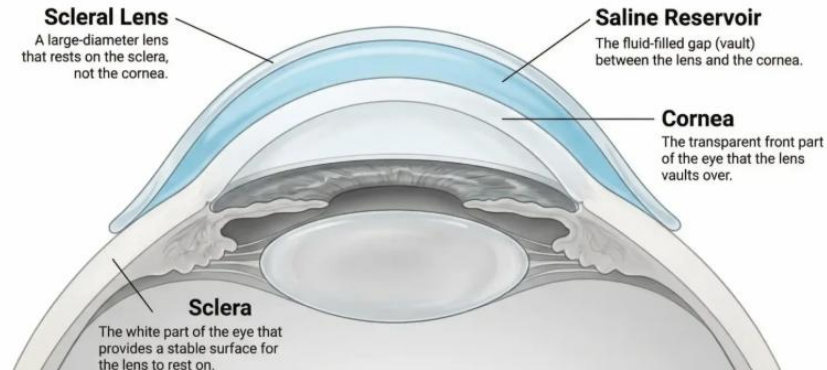


Figure 1 : Anatomie d'une lentille sclérale.

3. Indications

Les indications des lentilles sclérales comprennent principalement les ectasies cornéennes, telles que le kératocône et le kératoglobus, les maladies de la surface oculaire, notamment les kératoconjunctivites et les kératopathies d'exposition, ainsi que les maladies inflammatoires et auto-immunes comme le syndrome de Sjögren et la polyarthrite rhumatoïde. Elles incluent également les causes postchirurgicales et traumatiques, telles que les chirurgies du ptérygion et les traumatismes cornéens, les pathologies cornéennes dégénératives et dystrophiques comme les nodules de Salzmann et la dystrophie de la membrane basale épithéliale, les cicatrices cornéennes altérant l'acuité visuelle, ainsi que d'autres indications telles que l'aphakie, la conjonctivite et la kératite superficielle chronique (CSK). [8] [10]

4. Classification

La renaissance des lentilles sclérales a offert de nouvelles opportunités aux professionnels de l'adaptation des lentilles de contact, elle a également introduit de nombreux designs, ce qui a entraîné une certaine confusion et controverse quant à la manière de les décrire et de les classer.

La classification initiale des lentilles sclérales reposait sur : le diamètre de la lentille comme facteur déterminant. Les plus petites des lentilles de grand diamètre étaient classées comme cornéo-sclérales ou semi-sclérales, tandis que les plus grandes étaient appelées mini-sclérales ou sclérales complètes.

En 2010, la Scleral Lens Education Society, a proposé une terminologie basée sur la manière dont les lentilles s'adaptent à l'œil. Les lentilles adaptées à la cornée sont décrites comme des lentilles cornéennes. Les lentilles reposant à la fois sur la cornée et la sclère sont appelées lentilles cornéo-

sclérales, et celles reposant exclusivement sur la sclère sont désignées comme lentilles sclérales. [8]

Type	Des noms alternatives	Diamètre	Appuie	Réservoir lacrymale
Cornéenne	/	8 à 12.5mm	Toutes les lentilles s'appuient sur la cornée	Aucun réservoir lacrymale
Corneo-sclérale	Corneo Limbale Semi-sclérale Limbale	12.5 à 15mm	Les lentilles Partage un appui entre la cornée et la sclère	Capacité de réservoir lacrymal limité
Sclérale	Haptic	15 à 25mm Mini Sclérale 15 à 18mm Sclérale large 18 à 25mm	Toutes les lentilles s'appuient sur l'sclère	/ Capacité du réservoir lacrymale limitée Capacité du réservoir lacrymale illimité

Tableau 1 : Terminologie et classification des lentilles sclérales.

Contrairement à la croyance populaire, leur grande taille et leur surface non portante offrent de nombreux avantages :

Elles sont étonnamment confortables, les corps étrangers situés derrière la lentille ne posent généralement pas de problème. L'insertion peut être plus facile pour les patients moins habiles. L'entretien est simple, et le stockage à sec est généralement satisfaisant, même avec des matériaux perméables aux gaz. Le polissage ou le resurfaçage de la lentille est également possible.

Cependant, pour avoir une vision équilibrée, il est essentiel d'en considérer aussi les inconvénients :

La fabrication est plus laborieuse que pour la plupart des autres types de lentilles. L'oxygénation cornéenne est réduite, et les performances visuelles ne sont pas toujours aussi bonnes qu'avec des lentilles cornéennes plus petites dans certains cas de kératocône. Une décentration dans le méridien vertical peut entraîner des effets prismatiques significatifs, en particulier si une seule lentille est portée. [10]

6.Conception & design

La grande majorité des lentilles actuellement produites sont préformées, en utilisant des lentilles diagnostiques. Pour plus de clarté, il est important de noter que certaines lentilles sont constituées entièrement de courbes de différents rayons et largeurs, tandis que d'autres utilisent des splines, qui sont des zones de rayons de courbure (théoriquement) infinis avec des angles d'incidence variables sur l'œil.

Les lentilles sclérales peuvent varier de 15 à 24 mm de diamètre et en raison de leur taille, elles comportent de nombreuses courbes ou splines qui dépendent de la conception et des besoins individuels du patient. En général, les différentes régions d'une lentille sclérale peuvent être divisées en trois zones et deux surfaces : la zone optique, la zone de transition et la zone d'appui (ou haptique). [9]

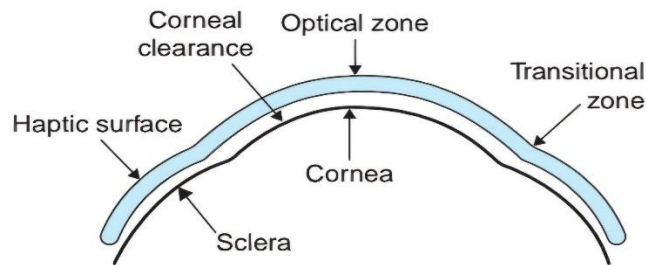


Figure 2 : vue en coupe des différentes zones de la lentille sclérale.

6.1. Surface postérieure (structure générale)

La surface postérieure d'une lentille sclérale est organisée en trois zones principales : la zone cornéenne (optique et périphérique), la zone limbique et la zone sclérale. La zone optique peut être prolata ou oblate selon la forme cornéenne, tandis que la périphérie peut être sphérique ou torique. La zone limbique ajuste le diamètre et l'élévation (rond, ovale, sphérique, torique ou par quadrant) pour assurer une transition harmonieuse. Enfin, la zone sclérale peut être sphérique, torique ou totalement personnalisée par quadrant afin de s'adapter aux irrégularités de la sclère et garantir la stabilité de la lentille. [9]

6.2. Surface antérieure (options optiques)

La surface antérieure sert principalement à optimiser la vision. Elle peut être torique pour corriger l'astigmatisme et multifocale pour la presbytie (centre de loin ou de près). Elle peut aussi être asphérique pour réduire les aberrations optiques, tandis que des corrections avancées guidées par le front d'onde permettent de traiter les aberrations de haut ordre et d'améliorer la qualité visuelle. [9]

6.3. La zone optique

La zone optique d'une lentille sclérale correspond à sa partie centrale, Elle peut être conçue avec une ou plusieurs courbes, généralement jusqu'à trois, et ses surfaces postérieures peuvent être sphériques ou asphériques. Les designs modernes associent souvent une courbe de base centrale sphérique à des courbes périphériques asphériques afin d'améliorer l'adaptation et la transition vers les zones plus externes. Les modifications de ces courbes influencent parfois la profondeur sagittale selon la conception globale de la lentille. Sur la face antérieure, les surfaces peuvent également être sphériques ou asphériques, ces dernières contribuant à réduire les aberrations optiques et à améliorer la qualité visuelle si la lentille est bien centrée. Une toricité antérieure peut être ajoutée pour corriger un astigmatisme résiduel, nécessitant alors une stabilisation de la lentille, tandis que la toricité postérieure est rarement nécessaire dans les lentilles sclérales à dégagement complet. [9]

6.4.La zone de transition

La zone de transition d'une lentille sclérale (aussi appelée zone médio-périphérique ou limbique) correspond à la partie intermédiaire entre la zone optique et la zone haptique. Elle est constituée de plusieurs courbes ou splines (souvent 2 à 4), dont la forme peut être sphérique, asphérique ou progressive, selon le design du fabricant. Son rôle principal est d'assurer une transition harmonieuse permettant un bon dégagement cornéen et limbique sans contact, en travaillant en coordination avec la zone optique. Un bon équilibre entre ces deux zones est essentiel, car toute modification de l'une doit être compensée par l'autre afin de maintenir un dégagement uniforme et une adaptation optimale. Elle peut aussi inclure des fenestrations (petits orifices d'environ 1 mm) utilisées autrefois pour améliorer l'oxygénation ou faciliter le retrait des lentilles trop serrées, mais celles-ci peuvent provoquer des bulles dans le réservoir lacrymal, limitant leur usage actuel.

Un limbe ovale nécessite une conception torique lorsque les hauteurs horizontale et verticale diffèrent. Cela permet d'assurer une clairance uniforme dans tous les méridiens et d'éviter les zones de contact ou de pression inégale. [9]

6.5.La zone haptique (ou zone d'appui)

La zone haptique d'une lentille sclérale correspond à sa partie périphérique en contact direct avec la sclère, Elle est généralement composée de plusieurs courbes ou de splines, parfois remplacées par une conception tangentielle, et doit s'adapter le plus précisément possible à la forme sclérale afin de répartir les pressions de manière homogène et d'assurer un confort optimal. Une mauvaise adaptation peut entraîner une compression inégale, une déformation de la lentille et un astigmatisme résiduel, nécessitant parfois l'utilisation de designs toriques en surface postérieure. Dans les cas plus complexes, des conceptions à quadrants permettent d'ajuster indépendamment chaque zone de la lentille pour mieux épouser les irrégularités sclérales, souvent guidées par des examens comme l'OCT. [9]

Les zones d'appui toriques améliorent l'adaptation sur les sclères irrégulières en réduisant la décentration, les bulles, l'inconfort et les complications mécaniques. Elles améliorent aussi la

stabilité, le confort et la qualité visuelle. L'analyse clinique (OCT, lampe à fente) permet d'identifier les signes d'une mauvaise adaptation sclérale. [9]

6.6.L'inversée

Les lentilles sclérales à géométrie inversée sont conçues pour s'adapter aux cornées oblate, souvent observées après chirurgie réfractive myopique ou greffe. Contrairement aux designs standards adaptés aux cornées prolates, elles possèdent une ou plusieurs courbes secondaires plus cambrées que la courbe de base, puis s'aplatissent progressivement vers le bord. Ce design permet une meilleure adaptation aux profils cornéens atypiques et est souvent privilégié dès le début de l'adaptation dans ces cas spécifiques [8]

6.7. Multifocaux

Les lentilles sclérales multifocales exploitent leur stabilité, leur optique rigide et leur réservoir lacrymal pour corriger la presbytie. La centration est essentielle pour leur efficacité, et les paramètres comme l'addition et la taille de la zone optique sont personnalisés selon chaque patient. Un essai diagnostique est indispensable avant fabrication définitive. [8]

6.8. Modifications bord

Certaines anomalies anatomiques comme les pinguécules ou bulles de filtration peuvent gêner le port des lentilles sclérales. Pour y remédier, des encoches ou modifications du bord peuvent être réalisées afin d'éviter ces zones. Ces ajustements nécessitent des mesures précises et une bonne communication avec le laboratoire, parfois à partir de lentilles d'essai personnalisées.

[8] [11]

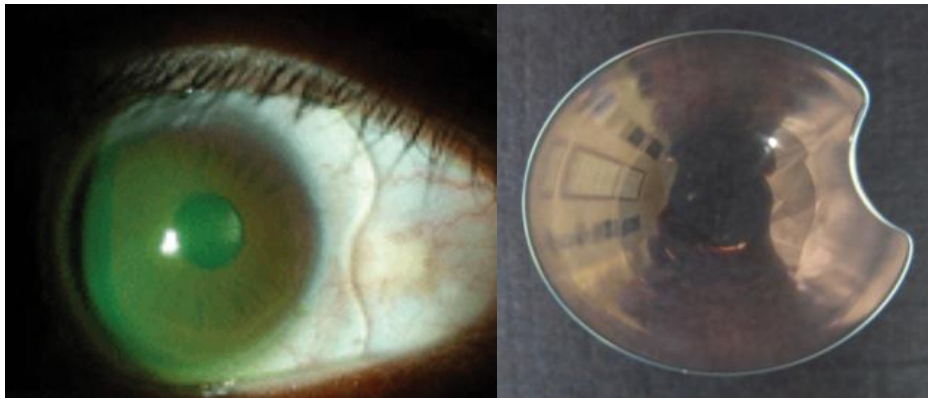


Figure 3 : géométrie d'encoche d'une lentille sclérale.

7.Épaisseur:

L'épaisseur des lentilles sclérales a peu d'impact sur le confort, mais elle est importante pour limiter la flexion et éviter un ajustement trop serré. Elles sont donc généralement plus épaisses que les lentilles cornéennes (environ 0,3 à 0,5 mm). Malgré cette épaisseur, l'utilisation de matériaux très

perméables à l'oxygène (hyper-Dk) permet d'éviter l'œdème cornéen, même lors de port prolongé. [8]

8. Gestion avancée des cas complexes

Autres gestions avancées dans les cas les plus complexes, les canaux peuvent être utilisés aussi pour améliorer l'échange lacrymal et limiter l'accumulation de débris sous la lentille. Ils sont réalisés par fraisage sur la surface postérieure de la lentille, formant des tunnels visibles. Parfois, leurs bords sont pointus et nécessitent un polissage supplémentaire. [11]

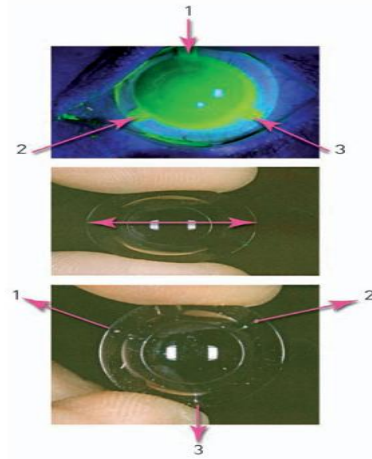


Figure 4 : Géométrie des canaux d'écoulement des larmes d'une lentille sclérale.

9. Principes et méthode d'adaptation d'adaptations

Une bonne adaptation en lentilles sclérales nécessite d'abord un examen optométrique général complet avant de passer à la phase spécialisée de contactologie et d'adaptation lenticulaire.

Cette prise en charge débute par une anamnèse approfondie, basée sur un questionnaire permettant de recueillir les antécédents oculaires et généraux, les antécédents familiaux, les besoins visuels du patient ainsi que la symptomatologie, afin d'orienter le diagnostic et le suivi clinique. Elle comprend également des examens préliminaires neuro-visuels, une réfraction et une kératométrie objectives, un examen biomicroscopique à la lampe à fente des annexes, des cils et de la surface oculaire, ainsi qu'une réfraction subjective.

Chez les patients nécessitant une prise en charge en lentilles sclérales, un protocole spécifique d'évaluation et d'adaptation doit ensuite être suivi comme suit :

9.1. Principe générale

L'adaptation est empirique, elle est basée sur des lentilles d'essai. Le but est une voûte cornéenne complète avec appui stable sur la sclère.

Une bonne adaptation des lentilles sclérales nécessite une évaluation clinique rigoureuse afin de garantir une relation optimale entre la lentille et la surface oculaire.

Les lentilles d'essai permettent notamment : d'évaluer la voûte et l'alignement, de détecter une compression vasculaire, d'améliorer la précision de la puissance par sur-réfraction, de tester le confort du patient ainsi que d'éduquer le patient concernant la manipulation de la lentille

La première étape consiste à recueillir les informations nécessaires au paramétrage de la lentille sclérale, notamment le diamètre total et la hauteur sagittale, tout en respectant le profil de la surface oculaire du patient.

Le diamètre total initial (Φ) : est généralement déterminé à partir du DHIV, auquel est ajouté environ 4 à 10 mm, en commençant par l'ajout le plus faible.

La hauteur sagittale constitue le paramètre le plus important puisqu'elle conditionne la réussite de l'adaptation sclérale. Elle doit être évaluée à l'aide de méthodes de projection et de calcul adaptées, telles que la topographie cornéenne d'élévation, la profilométrie, ou l'OCT-SA.

Après détermination du diamètre total et de la hauteur sagittale appropriés, l'évaluation de la lentille peut débuter. La lentille doit obligatoirement être rincée puis remplie d'une solution saline stérile sans bulles d'air, associée à de la fluorescéine avant l'insertion. La fluorescéine permet de vérifier l'échange lacrymal, les zones d'indentation, la stabilité de la lentille ainsi que la qualité du réservoir lacrymal ; un échange modéré étant généralement suffisant.

Une fois la lentille insérée, le praticien doit rechercher la présence éventuelle de bulles d'air dans le réservoir, vérifier l'existence de compressions conjonctivales ou de zones de contact, à l'aide d'un stylo LED bleu ou directement avec le filtre cobalt de la lampe à fente.

L'évaluation biomicroscopique à la lampe à fente doit être réalisée du centre vers la périphérie de la lentille. L'épaisseur du réservoir ou clairance cornéenne est évaluée à l'aide d'une section optique inclinée à 45° avec un faisceau fin et un fort grossissement. La zone d'appui sclérale doit être observée avec une illumination faible et un faisceau large en examinant chaque quadrant. Les zones d'atterrissage (haptique/sclérale) doivent présenter un alignement homogène avec la conjonctive, tout en évaluant le profil des bords et la nécessité éventuelle d'une personnalisation. [8]

La compression se manifeste par un blanchiment conjonctival localisé au niveau de la zone d'atterrissage. Celui-ci peut être circonférentiel ou sectoriel, interne ou externe. Dans ce cas, un aplatissement des courbures périphériques ainsi qu'une augmentation du diamètre total et de la largeur de la zone d'atterrissage sont recommandés afin de réduire la pression. La présence de bulles d'air ou de mousse sous le bord de la lentille indique généralement une zone d'atterrissage

trop plate nécessitant un cambrage supplémentaire. À l'inverse, un blanchiment externe associé à un dégagement excessif interne traduit une zone périphérique trop serrée devant être aplatie

[11] [12]

L'empiètement conjonctival peut être sectoriel ou circonférentiel et survient lorsqu'une lentille est trop serrée, provoquant un pincement conjonctival et un staining après retrait de la lentille [9] [12]

Le soulèvement du bord (edge lift/standoff) se manifeste par une ombre périphérique, une accumulation de fluorescéine, une mousse lacrymale ou un ménisque d'air au bord de la lentille. L'augmentation de la hauteur sagittale ainsi que le resserrement de la zone de transition, de la courbe de base ou de la zone d'atterrissage peuvent corriger ce phénomène.

Le centrage et le mouvement doivent également être évalués. Les lentilles sclérales présentent normalement très peu de mouvement ; tout déplacement excessif peut traduire un problème d'alignement, de zone d'appui, un contact cornéen ou une mauvaise mouillabilité [11]

Le décentrement est souvent inférieur et dépend du design de la lentille, de la géométrie sclérale, de la clairance et du temps de port [13]

Une période de stabilisation de 20 à 30 minutes est nécessaire avant la réévaluation finale. Après stabilisation, la clairance doit idéalement être $\geq 100\text{--}200\text{ }\mu\text{m}$, sans contact cornéen et avec un appui scléral équilibré. L'haptique doit être uniforme et toute compression ou blanchiment doit conduire à des ajustements supplémentaires. Une nouvelle vérification des paramètres est ensuite réalisée afin d'effectuer les modifications nécessaires [8]

Après validation de l'adaptation, une sur-réfraction est effectuée afin de déterminer la puissance définitive de la lentille sclérale. Celle-ci doit être compatible avec le profil oculaire du patient afin de permettre la fabrication d'une lentille personnalisée et adaptée.

Dans certaines situations nécessitant une personnalisation avancée (encoches, voûte localisée, irrégularités sclérales importantes), le moulage par empreinte peut être envisagé. Cette technique permet l'adaptation la plus précise possible, mais nécessite une expertise importante. Les matériaux RGP ne sont pas moulés directement ; une coque en PMMA ou un modèle intermédiaire est utilisé pour la reproduction [10]

9.2.Critères de réussite

Après validation de l'adaptation sclérale, une éducation du patient doit être réalisée de manière progressive afin d'assurer une manipulation correcte et sécurisée des lentilles [8]:

Vision correcte, stable et confort idéale.

Éducation du patient ; explication des règles d'hygiène et d'entretien.

10.Problèmes et complications liés au port des lentilles sclérales

Inconfort : lié à une mauvaise adaptation (zones de contacts) ou hypoxie

Bulles : dues à une mauvaise adaptation ou une mauvaise manipulation elle peut être acceptable si elles flottent contrairement si elle est statique et au centre.

Mucus et débris : accumulation fréquente dans le réservoir peut causer le mid-day fogging diminution du contraste et vision floue et fluctuante Ortenberg et al , ont montré que la durée de port quotidienne des lentilles sclérales peut être considérablement améliorée en faisant de courtes pauses de port de lentilles toutes les 4 à 5 heures [10] [8].

Hyperémie : signe de compression de la lentille sur la surface oculaire.

Déplacement conjonctival : correspond à la migration du tissu conjonctival près du limbe sous la lentille sclérale à cause de la pression négative créée sous la lentille il est généralement bénin sauf s'il reste un risque de néovascularisation.

Infection : ce n'est pas fréquent et c'est très rare si le nettoyage est fréquent et le patient est rigoureux avec son hygiène.

GPC : peu symptomatique comparé aux lentilles souples et aux lentilles rigides cornéennes.

Hypoxie : fortement réduite avec les matériaux modernes.

Néovascularisation : due à un stress mécanique sur la zone limbique mais souvent contrôlable

KPS : il est généralement induit mécaniquement due à un dégagement inadéquat ou à cause d'une hypoxie et sécheresse oculaire ou conséquence d'une bulle d'air statique et un retrait maladroit.

Œdème cornéen : il est principalement stromal, mais un œdème épithélial micro kystique et une néovascularisation peuvent apparaître en cas de mauvais dégagement limbique ou mi-périphérique, l'augmentation du DK au-delà de 100 a peu d'effet supplémentaire sur l'œdème en port diurne. En revanche, réduire l'épaisseur de la lentille et du réservoir de fluide peut aider à diminuer l'œdème, mais moins que prévu théoriquement. [10]

11.Équipement utile pendant l'adaptation des lentilles sclérales

11.1. Kératométrie et topographie

La kératométrie a peu d'utilité en lentilles sclérales car elle analyse juste la cornée centrale. La topographie est plus utile car elle analyse une zone plus large, mais elle reste peu prédictive pour l'adaptation finale. Elle sert surtout au suivi. Elle peut être difficile à obtenir sur des cornées très irrégulières.

11.2.OCT du segment antérieur

L'OCT permet de visualiser la relation lentille–œil, mesurer la clairance du réservoir et guider les modifications. Il est utile pour le suivi et sert à documenter l'état initial et les changements de la cornée et conjonctive.

11.3. Microscopie spéculaire

Le microscope spéculaire est une technique non invasive d'imagerie qui permet au médecin d'observer, d'analyser et de documenter les cellules endothéliales de la cornée.

La structure de la cellule endothéliale de la cornée est affectée par le port des lentilles de contact, à court et long terme, de même que par d'autres facteurs tels que l'âge et le diabète qui peuvent réduire la densité de ces cellules [13]

Dans un cas où une perte de la densité des cellules endothéliales pourrait entraver le port des lentilles, il est recommandé de mesurer la densité des cellules endothéliales avant le port des lentilles [8]

Conclusion

Ce chapitre a eu pour objectif de présenter les lentilles sclérales en mettant l'accent sur leur géométrie, leur conception, leurs méthodes d'adaptation, ainsi que leurs avantages thérapeutiques et optiques, tout en abordant les principales complications pouvant être associées à leur utilisation.

Parmi ces paramètres, la hauteur sagittale occupe une place centrale puisqu'elle conditionne la voûte cornéenne, l'alignement scléral et le choix de la lentille initiale. L'étude détaillée de la hauteur sagittale, de ses méthodes de calcul et de mesure constitue ainsi une étape indispensable pour optimiser l'adaptation des lentilles sclérales, ce qui fera l'objet du chapitre suivant.

Chapitre III : Approches théoriques et instrumentales de la hauteur sagittale

Introduction

La hauteur sagittale est un facteur important en ce qui concerne l'adaptation des lentilles sclérales. D'une manière générale, l'on distingue deux types de sagittal selon le diamètre de corde : il y a le sagittal cornéen et le sagittal scléral. La mesure de ces paramètres se fait par l'utilisation d'instruments de mesures tomographiques, topographiques et biométriques ; bientôt, l'on pourrait utiliser l'instrument kératométrique pour cette mesure. À côté de cela, certains instruments de mesures prennent aussi en compte la profondeur de la chambre antérieure ; mais la profondeur de la chambre antérieure n'est pas une mesure sagittale en elle-même.

Ce chapitre traitera des principes de la hauteur sagittale oculaire, des instruments de mesure utilisés pour sa détermination et de sa fonction dans l'adaptation des lentilles sclérales.

1. Définition de la hauteur sagittale

La profondeur sagittale représente la hauteur ou la profondeur de la surface oculaire sur un diamètre donné. Son association avec les angles scléraux peut améliorer la précision et l'efficacité de l'adaptation des lentilles sclérales, en particulier pour les cornées irrégulières. [14] [15]

Il est possible d'obtenir des mesures de profondeur sagittale (SD) et de corde à n'importe quel point du segment antérieur. [14]

L'ajustement repose sur le principe de la sagittale (SAG), c'est-à-dire la distance maximale (en micromètres) entre une corde, perpendiculaire à l'axe de rotation d'une surface, et cette surface courbe. [16]

Sagittale cornéenne : le praticien prend souvent en compte la hauteur sagittale de la cornée (SHC), définie comme la distance entre une corde située au niveau de la jonction cornéo-sclérale et le sommet de la cornée. La SHC est décrite par la distance en hauteur (μm) suivie de la valeur de la corde (ex. : 2800 μm à 12 mm).

Sagittale sclérale : la hauteur sagittale globale de la surface oculaire (OSHO), qu'il est plus important de prendre en compte lors de l'adaptation de lentilles sclérales, correspond à la distance maximale entre une corde définie perpendiculaire à l'axe de rotation de la surface oculaire. Elle est également exprimée en microns (μm) suivis de la valeur de la corde sclérale. [16] [17] [18]

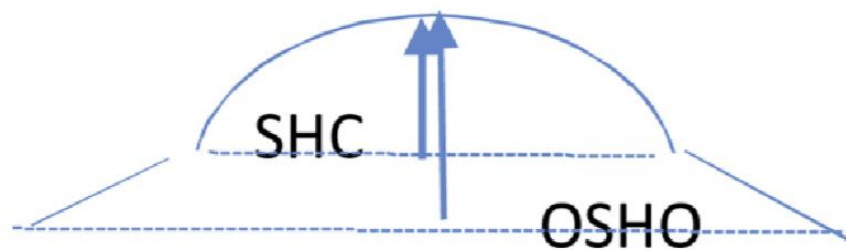


Figure 5 : Sagittale cornéen vs Sagittale globale de la surface oculaire incluant la zone sclérale.

2.Paramètres géométriques de la cornée influencent la hauteur sagittale

Dans les adaptations en fonction de la profondeur sagittale, la profondeur sagittale en générale d'un patient dépend des aspects de la forme cornéenne : la courbure cornéenne centrale/kératométrie (K),l'asphéricité (Q), l'excentricité cornéenne (e) , le diamètre cornéen (Φ) , facteur de forme de la cornée (SF) et section conique (P).**Invalid source specified.**

Table 1. Corneal shape factor (e^2 and SF), asphericity (Q) and conic sections (p) ¹⁵				
	e^2	SF	Q	p
$e^2 =$	*	SF	$-Q$	$1 - p$
$SF =$	e^2	*	$-Q$	$1 - p$
$Q =$	$-e^2$	$-SF$	*	$p - 1$
$p =$	$1 - e^2$	$1 - SF$	$1 + Q$	*

Tableau 2 : Parmètres géométriques de la cornée.

Le facteur supplémentaire (P) correspond à une section conique (ellipse allongé, ellipse aplatie) et peut également être dérivé de chacun de ces facteurs. [19]

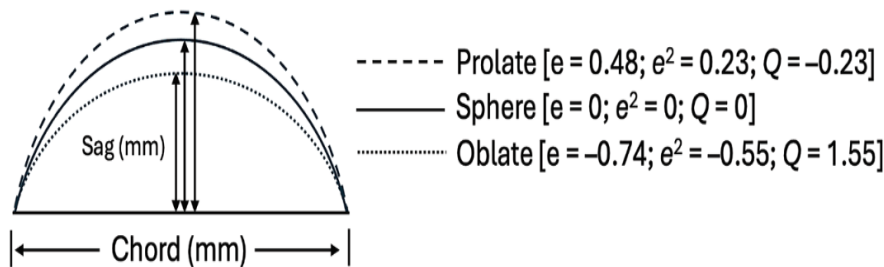


Figure 6 : Analyse géométrique de la cornée .

3.Calcul et estimation de la hauteur sagittale

3.1. Calcule géométrique

Equations mathématique [20]

Calculer la sagittale d'un arc circulaire déterminé pour une corde spécifique est relativement simple d'un point de vue mathématique ou géométrique. Une simple trigonométrie donne la formule :

$$S = r - \sqrt{r^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2}$$

où :

S = sag ,r = rayon de courbure, d = diamètre de la corde.

Le modèle elliptique est souvent utilisé car il représente correctement la géométrie de la cornée, bien que peu d'études l'aient analysé de manière quantitative. Dans ce modèle mathématique, le sommet de l'ellipse (apex) est placé à l'origine (0,0). La profondeur sagittale « z » représente la hauteur de la surface pour une demi-corde donnée « y » et peut être déterminée à l'aide d'une équation mathématique spécifique.

$$z = a - \sqrt{a^2 - \frac{y^2}{Q}}$$

où :

a = dimension du demi-grand axe de l'ellipse, b = dimension du demi-petit axe , Q = facteur de forme lié directement au SF.

Equations adaptée à l'asphéricité de la cornée (forme réelle) [21] [22] [23] :

Dans le domaine des lentilles de contact, la profondeur sagittale de la lentille (SAG) est un paramètre qui définit la hauteur d'une lentille et dépend principalement de la courbure de base (BC), des courbes intermédiaires et du diamètre total de la lentille (Φ).

Pour calculer la SAG cornéenne l'équation précédente devient plus complexe car la cornée n'est pas complètement sphérique et s'aplatit vers la périphérie. L'équation des surfaces conicoïdes est donc plus adaptée et inclut l'excentricité (e) comme variable afin d'estimer l'aplatissement périphérique de la cornée, est donnée par Bennett et peut s'exprimer ainsi :

$$S = \frac{r - \sqrt{r^2 - p \left(\frac{d}{2}\right)^2}}{p}$$

où :

S = sag

r = rayon de courbure à l'apex

d = diamètre de corde

p (facteur de forme) = $1 - e^2$

3.2. Estimation et mesure instrumentales

3.2.1. Tomographie par cohérence optique OCT

Principe générale de fonctionnement de l'OCT : L'OCT est une technique d'imagerie similaire à l'échographie, mais utilisant des ondes lumineuses au lieu des ultrasons. Elle repose sur le principe de l'interférométrie : la lumière rétrodiffusée par les tissus est comparée à un faisceau de référence afin de reconstruire une image des structures observées. [24] [25]

Elle est non invasive et sa grande vitesse permet la collecte de données bidimensionnelles ou tridimensionnelles en quelques centaines de millisecondes avec une haute résolution latérale et axiale. [26]

Application de l'AS-OCT en tomographie cornéenne : La tomographie consiste à reconstruire une structure à partir de coupes. L'AS-OCT et la tomographie de Scheimpflug permettent de cartographier l'élévation des surfaces cornéo-sclérales et de la cornée postérieure, afin d'obtenir notamment des cartes d'épaisseur cornéenne. [27]

3.2.1.1 Classification des technologies OCT

OCT en domaine temporel (Time-Domain OCT, TD-OCT) : technologie plus ancienne avec une résolution limitée, moins coûteuse, mais moins précise.

OCT en domaine spectral (Spectral-Domain OCT, SD-OCT) : plus rapide avec une résolution améliorée, utilisé pour une visualisation plus détaillée.

OCT en domaine swept-source (Swept-Source OCT, SS-OCT) : possède une pénétration plus profonde, permet une visualisation plus complète de la sclère et des structures profondes [28] [29] [30] [31]

3.2.1.2 Détermination de la hauteur sagittale dans L'OCT

Les instruments AS-OCT fourniront des données de hauteur sagittale en calculant la distance entre un plan de référence appelé une corde et la surface antérieure de la cornée spécifiquement son apex, et celles-ci peuvent être utilisées comme point de départ dans la sélection d'une lentille d'essai initiale [23]

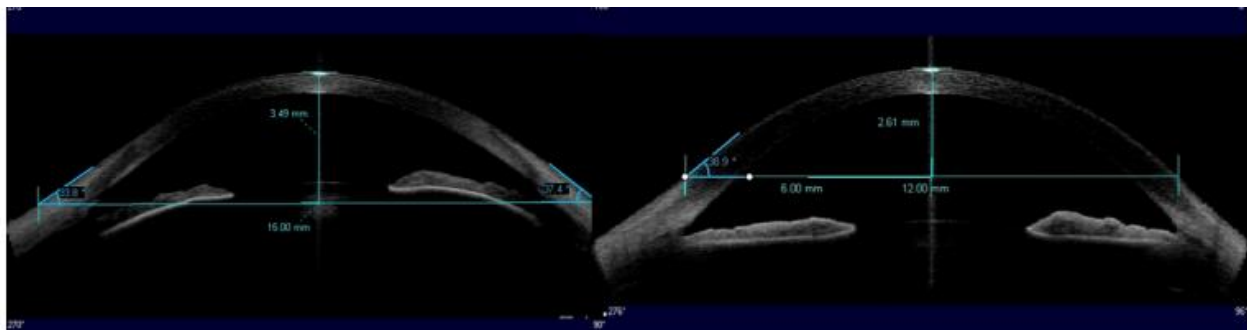


Figure 7 : Mesure de la hauteur sagittale cornéenne vs la hauteur sclérale en OCT.

Exemple des OCT qui mesure la sagittale : Le CASIA 2 , Visante , Yalkaid [14] [26]

3.2.2. Topographie d'élévation

Principe générale de fonctionnement : Les irrégularités cornéennes étant faibles par rapport à la courbure globale de la cornée, celle-ci est supprimée à l'aide d'une surface de référence, le plus souvent une meilleure sphère ajustée (Best Fit Sphere, BFS). La comparaison entre la cornée réelle et cette sphère permet de mettre en évidence les élévations et irrégularités cornéennes.

3.2.2.1. Technologie

Imagerie par photographie de Scheimpflug (Pentacam) : Cette technique utilise une caméra rotative CCD pour réaliser plusieurs coupes de la cornée passant par son centre. Les images obtenues sont analysées et reconstruites afin d'obtenir une représentation détaillée de la forme et des structures cornéennes : c'est la tomographie cornéenne [32] [26]

La plupart des topographes d'élévation avec imagerie tomographiques fourniront des données de hauteur sagittale, et celles-ci peuvent être utilisées comme point de départ dans la sélection d'une lentille d'essai initiale [23]



Figure 8 : Affichage des hauteurs sagittales recueillis dans des topographies d'élévation.

Exemple de topographe qui mesure la sagittale : Pentacam (Oculus), Medmont E300 [33] [34] [28]

Rapport CSP : permet d'analyser la forme de la cornée et de la sclère. Cette mesure fournit des données de hauteur sagittale, essentielles pour l'adaptation des lentilles sclérales, car elles permettent d'évaluer la profondeur et la forme de la surface oculaire.

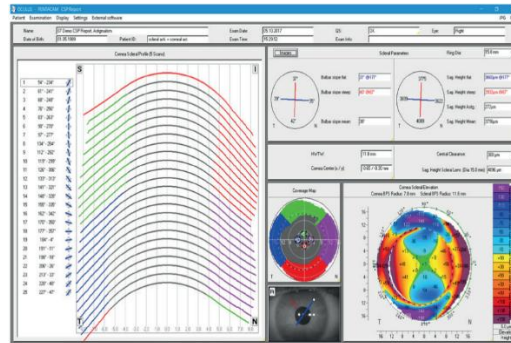


Figure 9 : Rapport CSP affichant la hauteur Sagittale.

3.2.3 Profilométrie

3.2.3.1. Principe générale de fonctionnement

C'est une représentation meilleure de la modélisation 3D de l'œil, la profilométrie cornéo-sclérale est nécessaire pour l'adaptation des lentilles sclérales. [27]

Les données de sortie 3D de l'ESP sont utilisées pour estimer des paramètres importants, telles que la hauteur sagittale, pour étendre la zone de mesure au-delà de la surface cornéenne, il est nécessaire d'instiller de la fluorescéine dans l'œil. les projecteurs de motifs de franges utilisés dans l'ESP sont équipés d'une lumière bleue et un filtre jaune est ajouté devant le dispositif d'imagerie. Les paramètres du filtre sont optimisés pour obtenir le meilleur contraste d'image. Il mesure la cornée, de limbe à limbe, et la sclère jusqu'à un diamètre de 20 mm. [35]

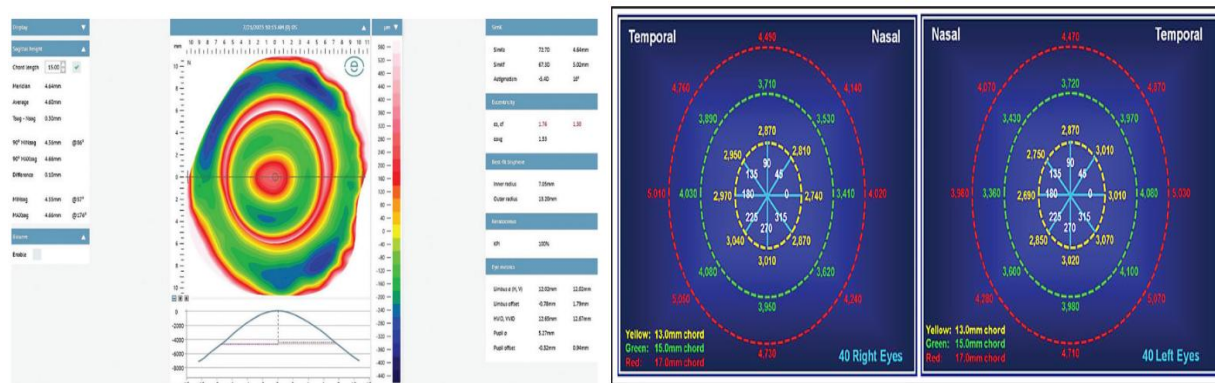


Figure 10 : Affichage de la hauteur sagittale obtenues avec la profilométrie.

Exemple de topographe qui mesure la sagittale : ESP by Eaglet [36],SD 3MAP Euclid.

3.3. Méthodes cliniques

La hauteur sagittale varie en fonction du méridien examiné, et les différences méridionales d'élévation sclérale (toricité sclérale) augmentent avec la distance par rapport au limbe (environ 100 μm pour une corde de 15 mm à 400 μm pour une corde de 20 mm) [15]

Diameter (mm)	Micron (μm)
14.00	1700
14.50	1800
15.00	2000
15.50	2200
16.00	2400
16.50	2600
17.00	2800
17.50	3000
18.00	3200

Tableau 3 : Facteurs des sagittales des lentilles sclérales.

Dans la pratique clinique, différentes méthodes sont utilisées pour estimer la hauteur sagittale sclérale. La première consiste à additionner la hauteur sagittale cornéenne, la clairance ou le réservoir lacrymal, ainsi qu'un facteur sagittal supplémentaire lié à l'adaptation de la lentille. [9]

$$\text{Lens sagittal height} = \text{Corneal sagittal height at 10mm} + \text{Scleral sag factor} + \text{Fluid reservoir height}$$

Figure 11 : Formule de calcul de la hauteur sagittale sclérale.

La seconde méthode repose sur l'addition de la profondeur de la chambre antérieure (interne ou externe selon que l'épaisseur cornéenne est incluse ou non), de la pachymétrie cornéenne et du réservoir lacrymal. Ces deux approches figurent parmi les méthodes les plus utilisées pour évaluer la sagittale sclérale.

4.Profondeur de la chambre antérieure

La profondeur de la chambre antérieure (ACD) correspond à la distance qui peut être mesurée de différentes façons selon l'appareil utilisé. Certains instruments mesurent l'ACD de l'épithélium cornéen jusqu'à la capsule antérieure du cristallin, tandis que d'autres la mesurent à partir de l'endothélium en excluant l'épaisseur cornéenne. [37]

4.1. Mesurage de la profondeur de la chambre antérieure

L'ACD peut être mesurée par diverses techniques :

4.1.1. Biométrie

- Ultrasons A-Scan : biométrie ultrasonore utilise des ondes sonores haute fréquence pour mesurer la profondeur de la chambre antérieure (ACD). Le son traverse les différentes structures oculaires jusqu'à la rétine, chaque structure produisant un signal analysé par l'appareil. Elle peut être réalisée en mode contact, où la sonde touche la cornée, ou en immersion, plus précise car sans contact direct avec l'œil. [38]
- Ultrasound biomicroscopy (UBM) : Cette technique utilise des ondes sonores à très haute fréquence pour obtenir de véritables images en coupe transversale du segment antérieur de l'œil, fonctionnant ainsi comme un « microscope acoustique ». [39]
- Biométrie optique : La biométrie optique utilise la lumière et des techniques d'interférométrie pour mesurer l'œil de manière non-contact. Elle permet notamment de mesurer la longueur axiale et la profondeur de la chambre antérieure avec une grande précision. Plus rapide, confortable et précise que l'échographie dans la plupart des cas, elle reste toutefois moins performante lorsque les milieux oculaires sont très opaques, comme dans les cataractes denses. [40]

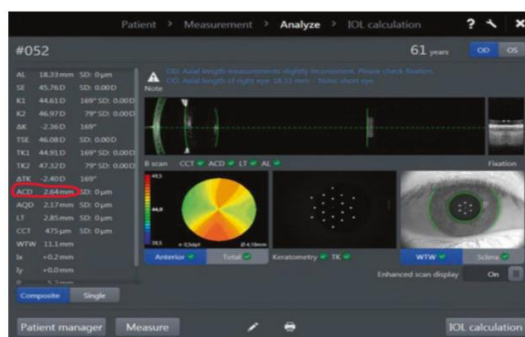


Figure 12 : Mesure de la profondeur de la chambre antérieure recueilli avec un biomètre.

4.1.2. Photographie par faisceau lumineux en fente

C'est un système de tomographie cornéenne utilisant un balayage par faisceau à fente pour analyser en 3D la cornée et le segment antérieur. Il balaie la cornée de limbe à limbe et reconstruit des cartes topographiques 3D codées en couleurs [41] [26]

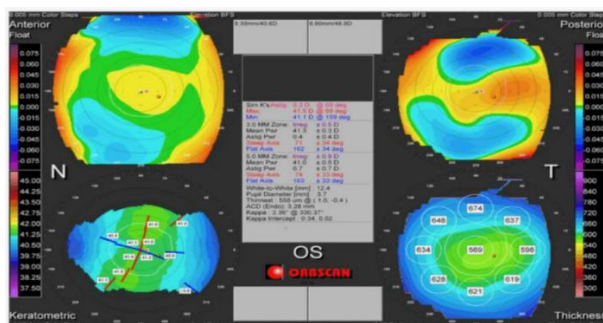


Figure 13 : Profondeur de la chambre antérieure mesuré avec topographe Orbscan.

Autres techniques déjà mentionné précédemment :

4.1.3. Imagerie Scheimpflug [42]

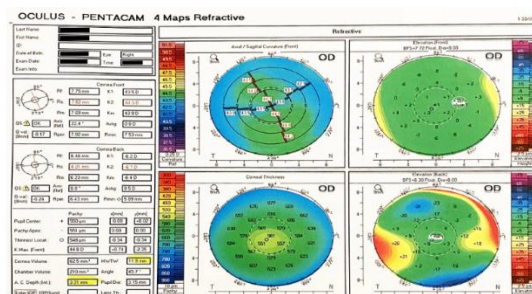


Figure 14 : Profondeur de la chambre antérieure mesuré avec le Pentacam.

4.1.4. Tomographie par cohérence optique du segment antérieur (AS-OCT) [43] [26]

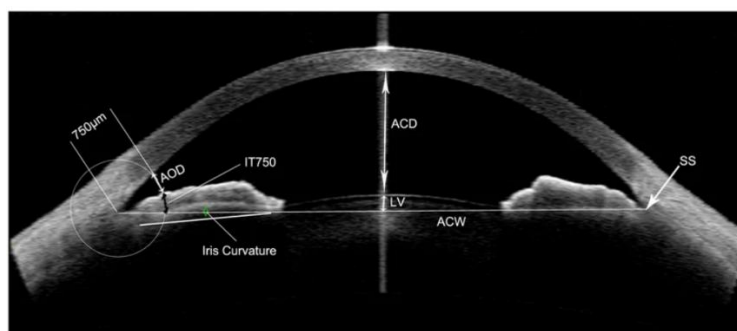


Figure 15 : Profondeur de la chambre antérieure mesuré avec OCT.

4.1.5.SPAC Scanning Peripheral Anterior Chamber Depth Analyzer

C'est un appareil non-contact utilisé pour mesurer la profondeur de la chambre antérieure en prenant rapidement plusieurs images en lumière de fente. Le SPAC fournit des mesures telles que, la profondeur de la chambre antérieure. Pour calculer la profondeur totale de la chambre antérieure depuis la surface cornéenne jusqu'au cristallin, la machine ajoute l'épaisseur cornéenne à la véritable profondeur de la chambre antérieure. [43]



Conclusion

Ce chapitre a eu pour objectif d'identifier les différents paramètres géométriques cornéens et scléaux, ainsi que sur différentes méthodes de calcul, d'estimation et de mesure instrumentale. Les techniques modernes, telles que la topographie d'élévation, la profilométrie ou encore l'OCT antérieur, permettent une analyse plus précise de la géométrie de la surface oculaire, tandis que certaines approches cliniques utilisent également des données biométriques complémentaires, notamment la profondeur de la chambre antérieure, dans l'estimation de la sagittale totale initiale.

Cependant, au-delà des technologies spécialisées, la kératométrie demeure un examen fondamental et accessible en pratique clinique. L'association des données issues de l'auto-kératométrie aux formules géométriques de la hauteur sagittale permet ainsi d'estimer la hauteur sagittale initiale et d'orienter le choix des lentilles scléales, constituant la base de la partie pratique développée dans le chapitre suivant.

Partie Pratique

Introduction

Il s'agit d'une étude prospective comparative, réalisée au niveau de trois établissements publics et privés :

- Etablissement hospitalier spécialisé EHS d'ophtalmologie Hamou Boutlelis.
- Centre d'ophtalmologie d'Oran Dr.Kheddam Chahinez.
- Université Oran 1 au niveau du laboratoire de physique et couches minces et matériaux pour l'électronique. (LPCMME).

Sur une durée de 3 mois du 01/02/2026 et au 01/05/2026.

1.Echantillonnage

Cette étude a été faite sur 10 malades (20 yeux) dans les deux cliniques et au niveau du laboratoire mentionné précédemment pour mesurer la hauteur sagittale.

1.1. Critères d'inclusion

- ✓ Yeux cliniquement sains.
- ✓ Acuité visuelle normale ou corrigée.
- ✓ Sujets adultes.

1.2. Critères d'exclusion

- ✗ Toutes pathologies oculaires.
- ✗ Traumatismes oculaires.
- ✗ Patient avec des antécédents de chirurgie réfractive.
- ✗ Cycloplégie .
- ✗ Enfants.
- ✗ Porteur de lentilles régulières.
- ✗ Mesures non reproductibles.

2.Matériels et Méthodes

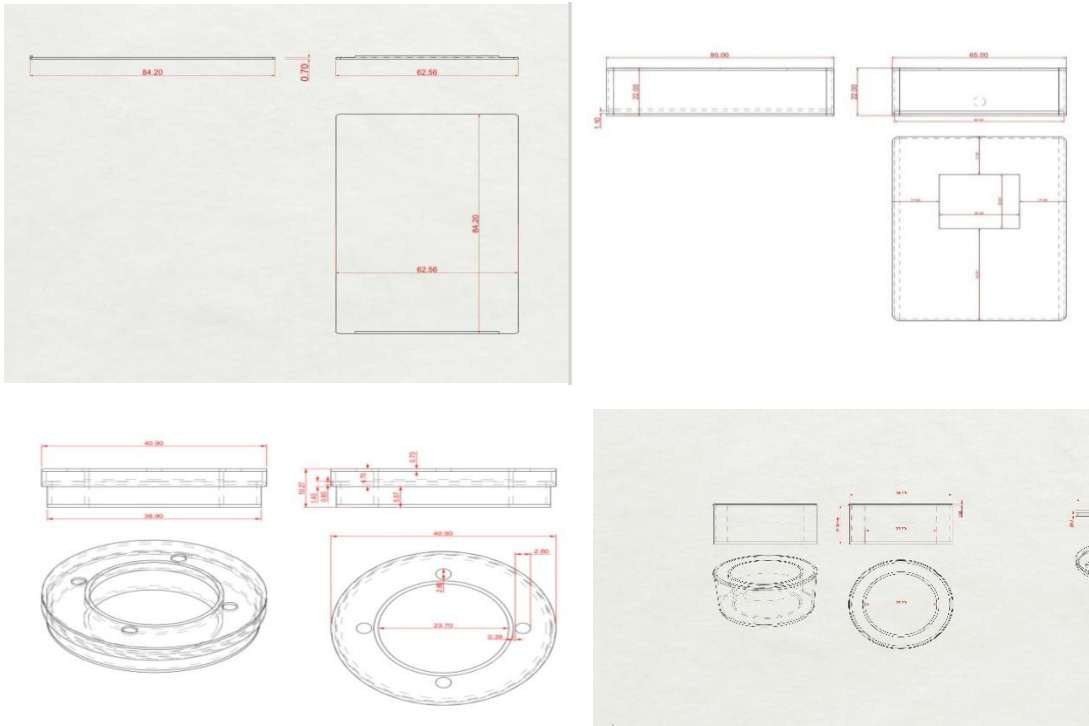
2.1. Conception 3D et Découpe au LASER CO2

2.1.1. Modélisation du design sur le logiciel SOLIDWORKS

L'esquisse de la forme de base de la cible de fixation avec son boîtier, l'extrusion pour créer un modèle 3D et l'ajout de détails complexes tels que le clipse et le slide doivent être effectués à l'aide de fonctions comme les courbes dans SolidWorks.

En outre, les capacités de rendu offrent la possibilité de visualiser et de présenter de manière réaliste la conception finale, combinant ainsi la créativité et la précision technique.

2.1.2 Mise en plan du boîtier et de la cible de fixation



Les dessins sont sauvegardés dans un fichier STL pour l'imprimer dans une machine d'impression 3D, après une moyenne de 1h à 3h pour chaque prototype , les résultat était une forme approximative à partir du dessin lui-même avec un poids de 25-30 grammes pour chacune.



Figure 20 : Prototypes imprimée des cibles de fixations.

Ces versions des cibles de fixation n'ont pas donné des résultats satisfaisants, ces derniers ont permis d'identifier des contraintes au niveau des performances recherchés, après chaque essai de chaque prototype, ces expérimentations on conduit à une nouvelle phase de conception contrairement au boitier qui ont était très satisfaisante.

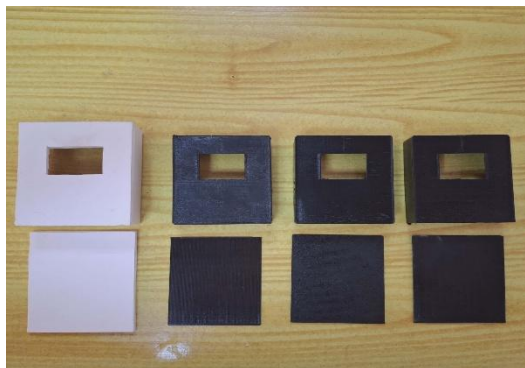


Figure 21 : Prototypes imprimées des boîtiers.

Pour les cibles de fixation, un développement d'un nouveau prototype a été réalisé en PMMA, le PlexiGlass découpé au laser mieux adapté aux objectifs du projet

Modélisation du design sur le logiciel SOLIDWORKS

2.1.5. Mise en Plan des disques en PMMA

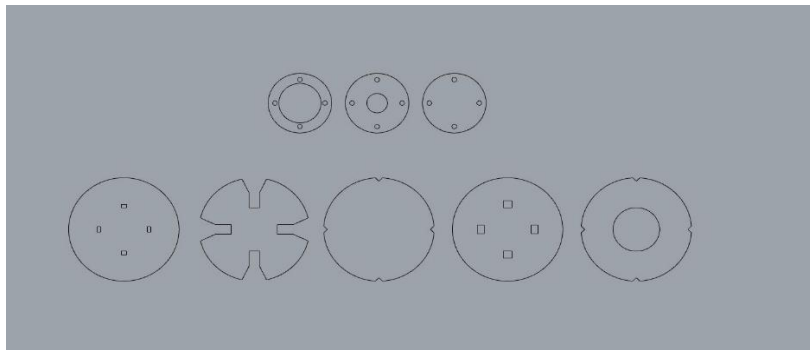


Figure 22: Vue dimensionnée des disques en PMMA.

2.1.6. Modélisation 3D des filtres PMMA

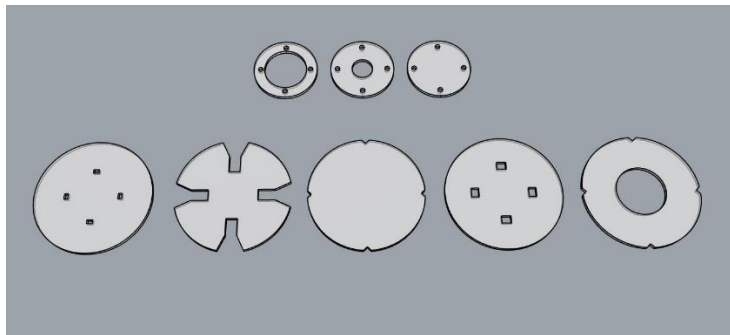


Figure 23 : Vue en 3D des disques en PMMA.

2.1.7. Obtention des versions prototypes

Les dessins sont sauvegardés dans un fichier pour les imprimer dans une machine CO2 laser cutting, le résultat était une forme approximative à partir du dessin lui-même avec un poids de 10 grammes.



Figure 24: Filtres en PMMA.

2.1.8. Choix de prototypage final

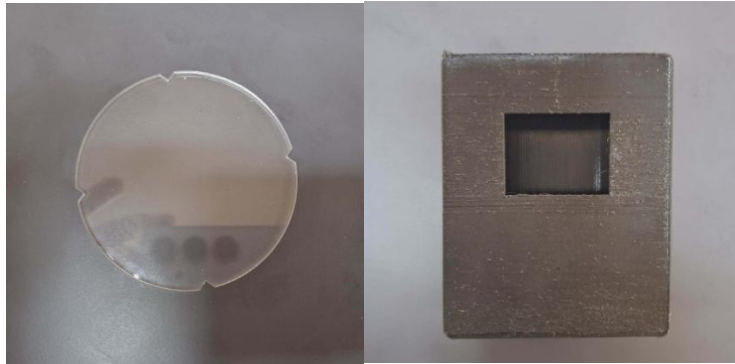


Figure 25: Configuration finale du disque et du boîtier

2.2. Conception électronique

2.2.1. Matériels et composants

La fabrication du prototype à nécessiter plusieurs mécaniques et outils d'assemblage tels que :

Une plaque perforée, la batterie rechargeable, un module de charge, diode électroluminescente, des strip-leds, des conducteurs électriques, colle de fixation en silicone et des boutons de commandes.



Figure 26 : Composants & matériels électroniques utilisées dans la réalisation du prototype.

Deux versions ont été développées et évaluées

A-Le premier circuit électrique et électronique :

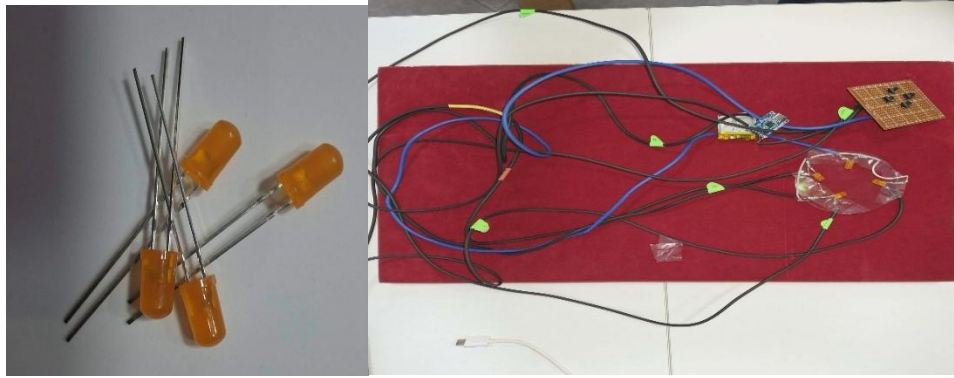


Figure 27 : Première version du circuit électronique du prototype.

Cette première configuration ne répond pas de manière satisfaisante aux critères définies pour le projet et présenter des limitations observées lors de l'expérimentation.

B-Le deuxième circuit électrique et électroniques :

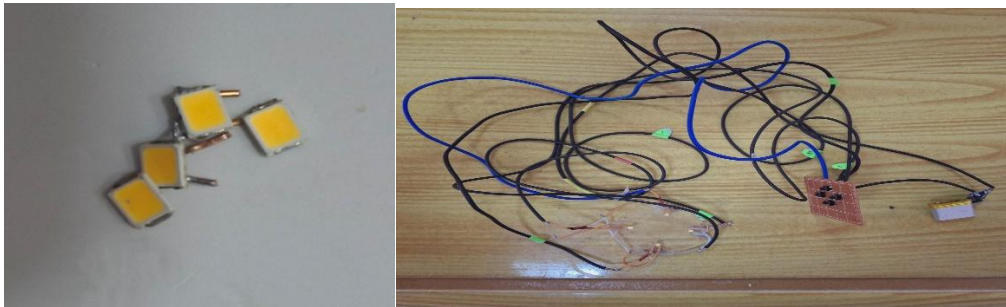


Figure 28 : Deuxième version du circuit électronique du prototype.

Cette dernière s'est révélée adaptée aux exigences fonctionnelles et techniques du projet

2.3. Prototype finale



Figure 29 : Prototype finale.

2.3.1. Méthodologie de fonctionnement du prototype finale

Le prototype est équipé de quatre lumières réparties selon une configuration définie, chacune d'elle est commandé par un bouton ce qui conduit à contrôler séparément chaque source, le système est alimenté avec une batterie rechargeable.



Figure 30: Système de commande des sources lumineuses du prototype.

2.4. Développement du logiciel pour calculer la hauteur sagittale

2.4.1. Outils informatiques utilisés

A- Logiciel Visual Studio Code (VS Code)

Un éditeur de code simplifié développé par Microsoft, gratuit et open source.

Son environnement de développement intégré offre aux développeurs à la fois des outils pour faire progresser les projets techniques, de l'édition à la construction jusqu'au débogage.

Il existe de nombreuses fonctionnalités offertes par Visual Studio Code :

- La prise en charge de plusieurs centaines de langage de programmation, telles que Python
- Un débogueur intégré pour accélérer votre boucle d'édition, de compilation et de suppression des bugs.
- Peek, une fonction qui permet de parcourir rapidement le code source et de naviguer entre les fichiers.
- Une interface d'édition comprenant des raccourcis clavier, des options multiples, un enregistrement automatique de votre travail, une fonction de recherche/remplacer, le formatage du code source...

B-Le langage python

Python est un langage de programmation de haut niveau interprété, orienté objet et doté d'une sémantique dynamique

Il est particulièrement intéressant pour le développement rapide en raison de ses structures de données de haut niveau, ainsi que de son typage dynamique et de sa liaison dynamique, ainsi que pour l'utilisation en tant que langage de script ou de collage pour relier des composants déjà existants.

Python prend en charge les modules et les paquets, ce qui favorise la modularité des programmes et la réutilisation du code [44]

- Bibliothèque/Modules utilisée

La bibliothèque contient des classes, des valeurs, des modèles de messages, des données de configuration et une documentation.

Une bibliothèque python est donc une collection de modules associés qui contient des paquets de codes réutilisables plusieurs fois dans divers programmes.

- Les différents modules utilisés
 1. Tkinter et messagebox pour la gestion des erreurs et des informations.
 2. Math pour calculer à travers des formules et fonctions intégrées la hauteur sagittale cornéenne et sclérale.

2.4.2. Caractéristiques du logiciel de calcul

2.4.2.1. Principe de fonctionnement

Le logiciel a été spécialement conçu pour calculer automatiquement la hauteur sagittale à partir des données kératométriques obtenues par l'auto-kérato-réfractomètre, après introduction du dispositif avec ces 5 points de fixation, le programme effectué fournit directement la hauteur sagittale cornéenne et la hauteur sagittale sclérale fixé à 15 mm .

2.4.2.2. Etape de développement

La première interface

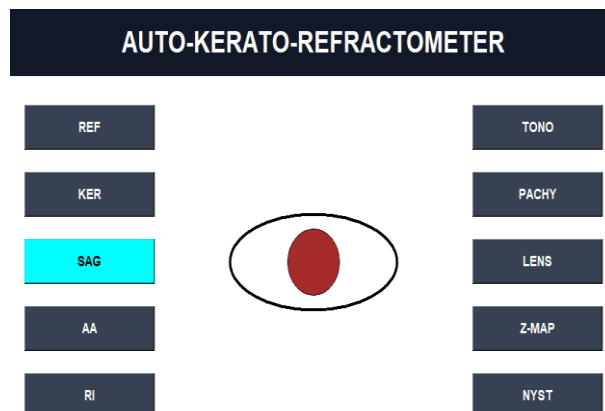


Figure 31 : Première Interface.

1. Insertion du label principale « AUTO-KERATO-REFRACTOMETER ».
2. L'incorporation de la couleur du fond en blanc.
3. Insertion une forme d'un œil à l'aide des outils de dessin et canevas.mathématique , en utilisant un ovale et un cercle.
4. Insertion des boutons verticalement dans les limites de l'interfaces et configurer le bouton SAG avec une couleur spécifique.

La deuxième interface

Figure 32 : Deuxième Interface.

1. Insertion du label principale « CENTRAL & PERIPHERAL MEAN »
2. L'ajout de deux cadres avec leurs zones de saisie pour calculer la moyenne centrale et la moyenne périphériques (labels).
3. Création de deux boutons en rouge et en vert « CALCULATE MEANS » et « NEXT ».

La troisième interface

Figure 33 : Troisième Interface

1. Insertion du label principale « SCLERAL SAGITTAL CALCULATION ».
2. L'ajout des deux labels d'affichage de résultats précédents avec une zone de saisie pour remplir le DHIV et calculer la hauteur sagittale prochainement.
3. Création d'un seul bouton « CALCULATE SAG ».
4. Insertions des labels affichant des résultats automatisés des hauteurs sagittales cornéennes et sclérales.

2.4.2.3. Les étapes d'utilisation

Les contactologues peuvent accéder et utiliser le programme en suivant ces étapes ;

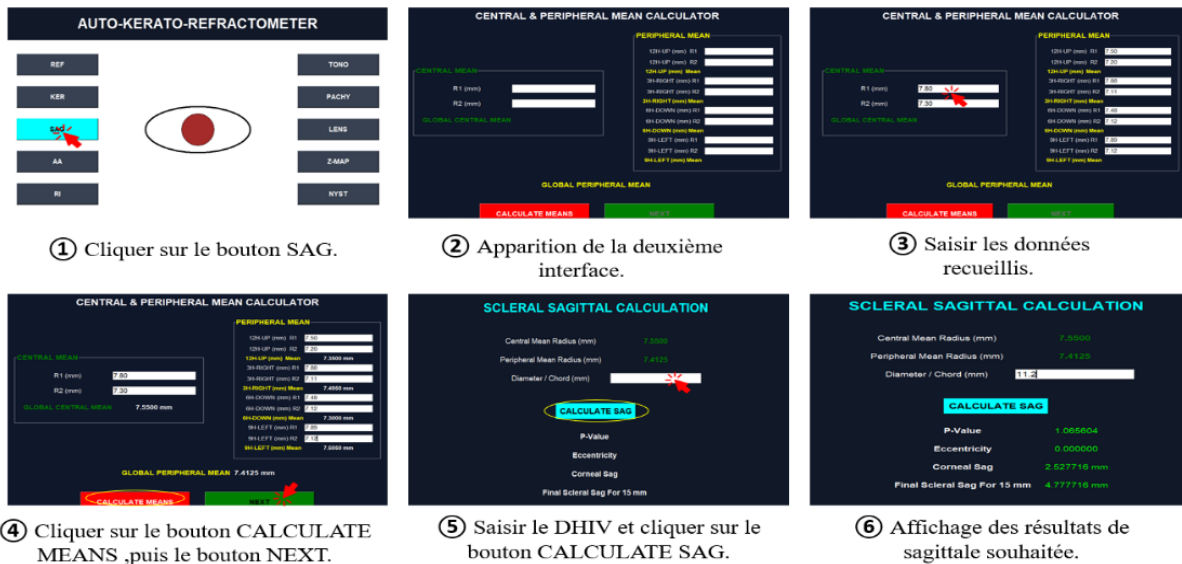


Figure 34 : Etapes d'utilisation du programme.

2.5. Méthodologie d'utilisation du prototype finalisé avec le programme



2.6. Acquisition des données expérimentales

La phase d'analyses des donnés, la rédaction de résultats et leur représentation graphique a été réalisés par l'utilisation Excel et Programmation Python.

2.6.1. La phase de conception de la fiche de recueils de données de la hauteur sagittale cornéo-sclérales

Une fiche a été élaborée afin de standardiser la collecte des données à travers une étude prospectives des différentes hauteurs de sagittale obtenues en fonctions de trois machines ainsi que l'ensemble des paramètres fournis par chacun, donc disposer une base de données structure qui va permettre une comparaison afin d'analyser la fiabilité des résultats obtenues.

2.6.2. Les machines utilisées

Dans notre étude, toutes les mesures de la hauteur sagittale ont été pris par 3 machines : le topographe d'élévation oculus PENTACAM, OCT-SA YALKAID, et l'auto-kérato-réfractometre I-optik.

2.6.3. La population mesurée

Les patients recrutés étaient entre 22 ans et 30 ans.

2.6.4. Examen des patients

Tous les malades inclus dans l'étude ont été sous examen complet afin de déterminer la hauteur sagittale à l'aide de 3 appareils distincts conformément au protocole de mesures propres à chaque instrument. Les mesures ont été réalisées dans des bonnes conditions standardisées afin de garantir la reproductibilité des résultats.

2.6.5. Déroulement de l'expérimentation

2.6.5.1 Topographie cornéenne d'élévation

Tous les yeux ont été soumis d'une mesure de la hauteur sagittale indirect au niveau du segment 180° par l'oculus PENTACAM, nous avons obtenues des images topographiques après mettre en place les sujets et fixer leur front et menton dans une salle obscure. Le sujet ne doit pas cligner et doit garder son regard bien fixer sur le cercle noir.

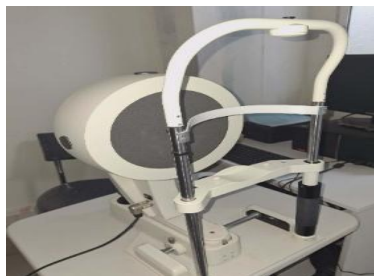


Figure 35 : Topographe d'élévation PENTACAM OCULUS.

2.6.5.2.OCT-SA YALKaid

Tous les yeux ont été soumis d'une mesure de la hauteur sagittale direct au niveau d'une coupe horizontale par OCT-SA yalkaid, nous avons obtenues les images après la mise en place des sujets et fixation de leur front et menton dans une salle obscure, le sujet ne doit pas cligner et doit garder son regard bien fixer sur le cercle vert.



Figure 36 OCT YALKaid

2.6.5.3. Auto-kérato-réfractomètre

Tous les yeux ont soumis une mesure de la hauteur sagittale indirect en fixant la cible centrale et ces quatre point lumineux périphériques, nous avons obtenues les mesures kératométriques après la mise en place des sujets et fixation de leur front et menton dans une salle ambiante.



Figure 37 : Auto-kérato-réfractomètre avec le prototype.

2.6.5.4. Évaluation finale avec LAF (essai d'une seule lentille sclérale)

Un seul œil a été soumis sous LAF afin de démontrer une seule application clinique de la hauteur sagittale sclérale mesurée avec le I-Optik , cette étape avait pour objectif de mettre en évidence la pertinence clinique de la mesure obtenue à l'aide du dispositif.

2.7. Aspects éthiques et déontologique

Le consentement éclairé et la confidentialité ont été respectés avec les cliniques et au niveau du laboratoires.

2.8. Présentation des cas

Cas n°1

Une patiente âgée de 23 ans a été recrutée dans le cadre de cette étude afin de recueillir les données de la hauteur sagittale à l'aide de trois machines , les mesures ont été réalisées séparément commençant par la topographie d'élévation du PENTACAM Oculus , suivant YALKAID AS-OCT et finalement L'I-Optik auto-kérato-réfractomètre.

Anamnèse

Une anamnèse complète est réalisée pour recueillir : Les antécédents oculaires , maladies oculaires , chirurgie réfractive précédentes, pathologie du segment antérieur et port des lentilles de contacts.

Mesure par topographie d'élévation PENTACAM OCULUS OD et OG

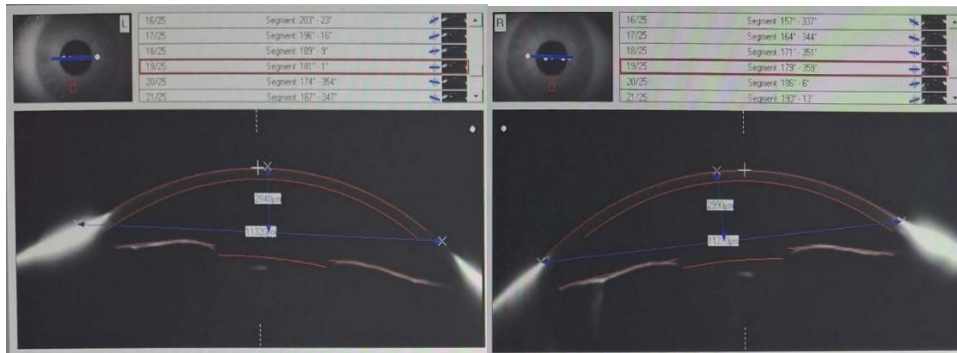


Figure 38 : Mesure de la SAG CC en utilisant le PENTACAM de l'OD et l'OG.

Oeil	OD	OG
SAG CC(μm)	2990	2840

Mesure par AS-OCT Yalkaid OD et OG

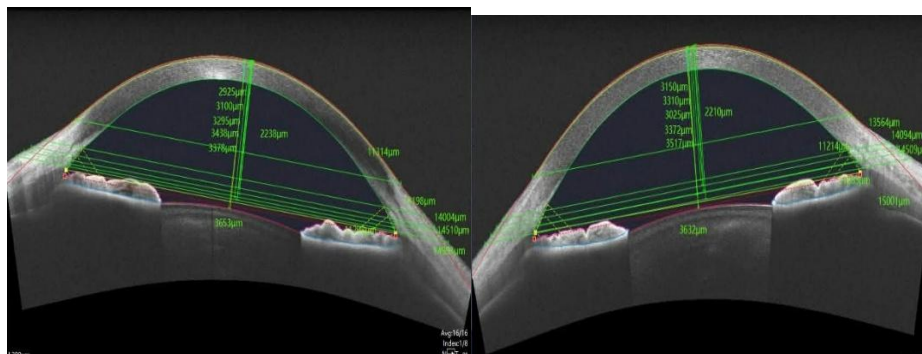


Figure 39 : Mesure de la SAG CC avec le YALKAID de l'OD et l'OG.

Oeil	OD	OG
SAG CC(μm)	2210	2238

Oeil	OD	OG
SAG CC(μm)	2210	2238
Réservoir(μm)	250	250
SAG Facteur(μm)	2000	2000
SAG SCL à 15 mm(μm)	4460	4488

Mesure par auto-kérato- réfractomètre OD et OG

Kératometrie	K1(mm)	K2(mm)	Moyenne(mm)
Centrale	7.81	7.70	7.755
90°-12H	7.82	7.72	7.77
0°-3H	7.99	7.80	7.895
270°-6H	7.98	7.81	7.895
180°-9H	7.88	7.84	7.86

Kératometrie	K1(mm)	K2(mm)	Moyenne(mm)
Centrale	7.99	7.82	7.905
90°-12H	7.98	7.81	7.895
0°-3H	7.70	7.58	7.64
270°-6H	7.91	7.59	7.75
180°-9H	7.69	7.40	7.545

Calcul avec Programme/Excel

Oeil	OD	OG
SAG CC	2362	2428
SAG SCL à 15 mm	4612	4678

Comparaison finale

OD

Appareils	SAG CC(μm)	SAG SCL à 15mm(μm)
PENTACAM	2990	/
YALKAID	2210	4460
I-OPTIK-SAGISIM	2362	4612

OG

Appareils	SAG CC(μm)	SAG SCL à 15 mm(μm)
PENTACAM	2840	/
YALKAID	2238	4488
I-OPTIK-SAGISIM	2428	4678

Conclusion

Les deux yeux présentent des résultats similaires. Pour les mesures SAG CC, sauf pour le Pentacam qui a montré des valeurs plus élevées contrairement pour le Yalkaid et l'I-optik avec des écarts de 152 μm pour l'OD et 190 μm pour l'OG . En revanche, les mesures de sagittale sclérale à 15 mm obtenues par le Yalkaid et l'I-Optik sont relativement proches, avec les mêmes écarts pour les deux yeux. Cette cohérence suggère qu'ils pourraient être plus concordants dans le cadre de l'adaptation des lentilles sclérales.

Essai d'une lentille sclérale au niveau de la lampe à fente de l' OG

Outils & matériels

Pour l'évaluation clinique à la LAF une lentille sclérale d'essai a été sélectionné en fonction de la hauteur sagittale préalablement mesuré avec le I-Optik et le dispositif SAGISIM , le réservoir de la lentille a été rempli de sérum physiologique et instillé avec la fluorescéine afin de permettre l'observation et l'évaluation du dégagement cornéen (réservoir).



Figure 40 : Outils d'essai d'une lentille sclérale de diamètre 15 mm et de sagittale de 4625 μm .

Résultats image

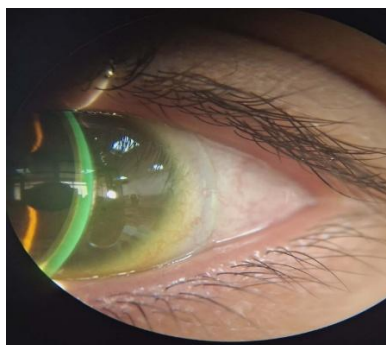


Figure 41 : Evaluation de la clairance d'une lentille sclérale.

La figure montre une coupe optique de 45 ° de la lentille sclérale au niveau de LAF.

Une clairance importante est observée ce qui signifie une profondeur sagittale excessive de la lentille choisie.

Pour cet œil (OG), la sagittale sclérale mesurée à 15 mm était de 4488 μm avec le Yalkaid et de 4678 μm avec l'I-Optik et le dispositif, soit une différence de 190 μm .

Afin de vérifier les paramètres proposés par l'I-Optik, une lentille d'essai de 4625 μm a été sélectionnée.

L'examen en LAF a révélé une clairance excessive, confirmant que la profondeur sagittale recommandée était probablement surestimée.

Cette observation clinique concorde avec les mesures obtenues, puisque l'I-Optik a fourni une valeur de sagittale sclérale supérieure de près de 190 μm à celle du Yalkaid.. Ainsi, une valeur plus proche de celle mesurée par le Yalkaid (4488 μm) aurait probablement permis d'obtenir une clairance plus adaptée.

Ces résultats indiquent que, pour un diamètre de corde de 15 mm, l'I-Optik pourrait surestimer la sagittale sclérale d'environ 150 à 300 μm , ce qui peut conduire au choix d'une lentille présentant une profondeur sagittale excessive et par conséquent, une clairance plus importante.

Cas n°2

Une patiente âgée de 26 ans a été recrutée dans le cadre de cette étude afin de recueillir les données de la hauteur sagittale à l'aide de trois machines, les mesures ont été réalisées séparément commençant par la topographie d'élévation du PENTACAM Oculus , suivant YALKAID AS-OCT et finalement L'I-Optik auto-kérato-réfractomètre.

Anamnèse

Une anamnèse complète est réalisée pour recueillir : Les antécédants oculaires , Maladies Oculaires , chirurgie réfractive précédentes, pathologie du segment antérieur et port des lentilles.

Mesure par topographie d'élévation PENTACAM OCULUS OD et OG

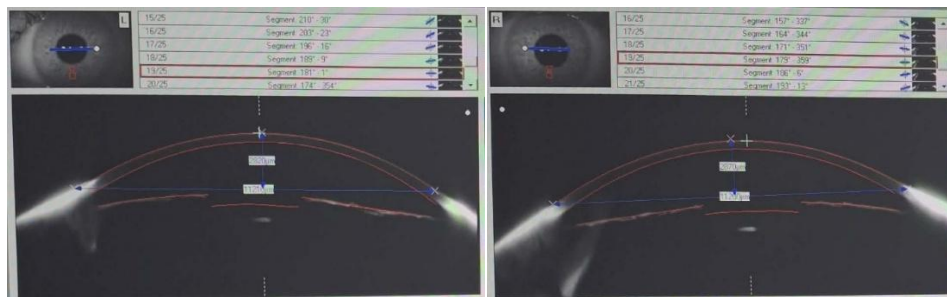


Figure 42 : Mesure de la SAG CC en utilisant le PENTACAM de l'OD et l'OG.

Oeil	OD	OG
SAG CC(μm)	2870	2820

Mesure par AS-OCT Yalkaid OD et OG

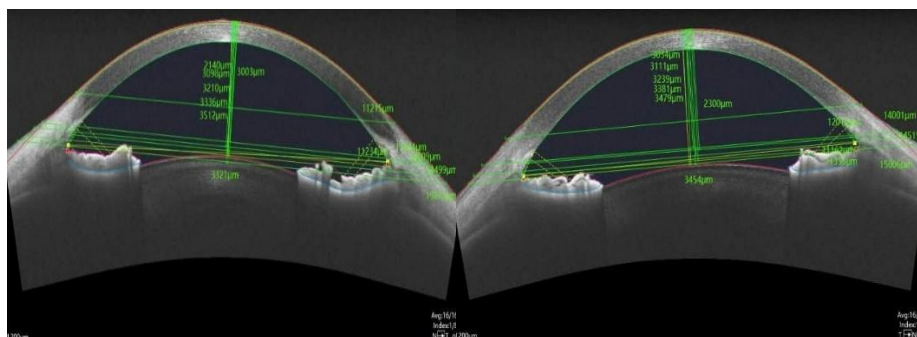


Figure 43 : Mesure de la SAG CC en utilisant le YALKaid de l'OD et l'OG.

Oeil	OD	OG
SAG CC(μm)	2300	2140

Oeil	OD	OG
SAG CC(μm)	2300	2140
Réservoir(μm)	250	250
SAG Facteur(μm)	2000	2000
SAG SCL à 15 mm(μm)	4550	4380

Mesure par autoréfractomètre OD et OG

Kératometrie	K1(mm)	K2(mm)	Moyenne(mm)
Centrale	8.08	8.05	8.065
90°-12H	7.74	7.61	7.675
0°-3H	7.84	7.79	7.815
270°-6H	7.81	7.69	7.75
180°-9H	8.01	7.97	7.99

Kératometrie	K1(mm)	K2(mm)	Moyenne(mm)
Centrale	7.98	7.80	7.89
90°-12H	8.05	7.76	7.905
0°-3H	8.01	7.84	7.925
270°-6H	7.88	7.84	7.86
180°-9H	8.03	7.86	7.945

Calcul avec Programme/Excel:

Oeil	OD	OG
SAG CC	2322	2327
SAG SCL à 15 mm	4572	4577

Comparaison finale

OD

Appareils	SAG CC(μm)	SAG SCL à 15mm(μm)
PENTACAM	2870	/
YALKAID	2300	4550
I-OPTIK-SAGISIM	2322	4572

OG

Appareils	SAG CC(μm)	SAG SCL à 15 mm(μm)
PENTACAM	2820	/
YALKAID	2140	4390
I-OPTIK-SAGISIM	2327	4577

Conclusion

Les résultats montrent que le Yalkaid et l'i-Optik avec le dispositif présentent une bonne concordance pour l'évaluation de la hauteur sagittale sclérale, soit une différence de seulement 22 μm particulièrement pour l'œil droit. Le Pentacam a montré des valeurs de sagittale cornéenne plus élevées que les deux autres appareils et ne permet pas l'évaluation directe de la sagittale sclérale à 15 mm. Ainsi, pour l'adaptation des lentilles sclérales, les paramètres scléraux obtenus par OCT et I-Optik avec le dispositif semblent plus pertinents.

3. Résultats

3.1. Les données expérimentales de l'échantillon

L'élaboration de ce travail a été basée sur une étude : prospective et comparative.

Portant sur 10 sujets avec des yeux sains, leurs données ont été recueillies dans 2 cliniques et un laboratoire universitaire sur une période 3 mois du 01/02/2026 au 01/05/2026.

3.2 Caractéristiques épidémiologiques

L'âge

Nos patients de sexe féminin avaient entre 22 et 30ans avec un âge moyen de de 24.1 ans.

Répartition de l'échantillon selon l'âge

Age	22	23	24	26	30	Moyenne	24.1
Sexe :Femme	1	5	2	1	1	Totale	10

Répartition de l'échantillon selon le sexe.

Notre étude à couvert 10 sujets dont toutes l'étude à recouvert uniquement des femmes.

Sexe âge	22	23	24	26	30
Pourcentage	10%	50%	20%	10%	10%



Figure 44 : Répartition des sujets selon le sexe.

3.3. Caractéristiques cliniques

Comparaison des sagittales cornéennes entre trois appareils

Les mesures des sagittales cornéennes obtenues avec les trois appareils montrent que les valeurs enregistrées par Pentacam sont les plus élevées pour l'ensemble des cas étudiés (SAG-CC1 à SAG-CC20), avec des valeurs variantes approximativement entre 2800 μm et 3500 μm .

Les mesures fournies par Yalkaid sont les plus faibles, se situant globalement entre 2200 μm et 2800 μm . Quant à I-Optik avec le dispositif, les résultats sont comprises approximativement entre 2400 μm et 2900 μm .

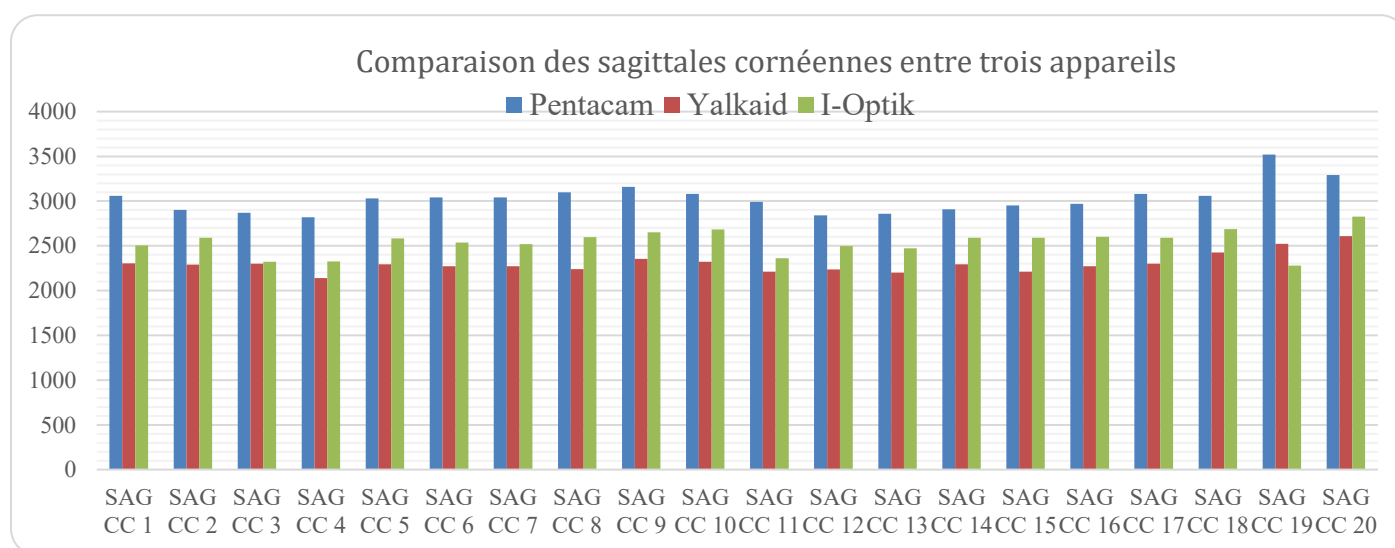


Figure 45 : Répartition des SAG CC selon trois appareils.

Valeurs métrologiques calculés

Appareils	Pentacam	Yalkaid	I-optik-SAGISIM
Moyenne SAG CC (μm)	3028.5	2303.9	2599.35
Ecart type (μm)	163.8	109.1	112.8
Incertitude type (μm)	36.6	24.4	25.2
Incertitude élargie ($k=2$) (μm)	73.2	48.8	50.4

Tableau 4 : Valeurs métrologiques des moyennes des sagittales cornéennes centrales.

Différence de Moyenne en termes de précision de chaque machines

$$\Delta (\text{Pentacam-Yalkaid}) = 3028.5 - 2303.9 = 724.6 \mu\text{m}$$

$$\Delta (\text{Pentacam-IOptik}) = 3028.5 - 2599.35 = 429.15 \mu\text{m}$$

$$\Delta (\text{IOptik-Yalkaid}) = 2599.35 - 2303.9 = 295.45 \mu\text{m}$$

Comparaison des sagittales sclérales entre trois appareils

Les mesures des sagittales sclérales ont été comparées entre les appareils Yalkaid et I-Optik avec le dispositif pour les 20 yeux étudiés (SAG-SCL1 à SAG-SCL20). Les valeurs obtenues avec les deux appareils présentent des résultats similaires sur l'ensemble des cas, avec des mesures légèrement plus élevées pour I-Optik.

Les valeurs sont comprises approximativement entre 4500 μm et 5050 μm pour I-Optik et le dispositif et entre 4450 μm et 4900 μm pour Yalkaid. Malgré cette légère différence, les résultats des deux appareils demeurent globalement proches.

Le Pentacam n'a pas été inclus dans cette comparaison, car ses capacités de mesure ne permettent pas l'évaluation des sagittales sclérales sur une corde de 15 mm, contrairement à Yalkaid et I-Optik.

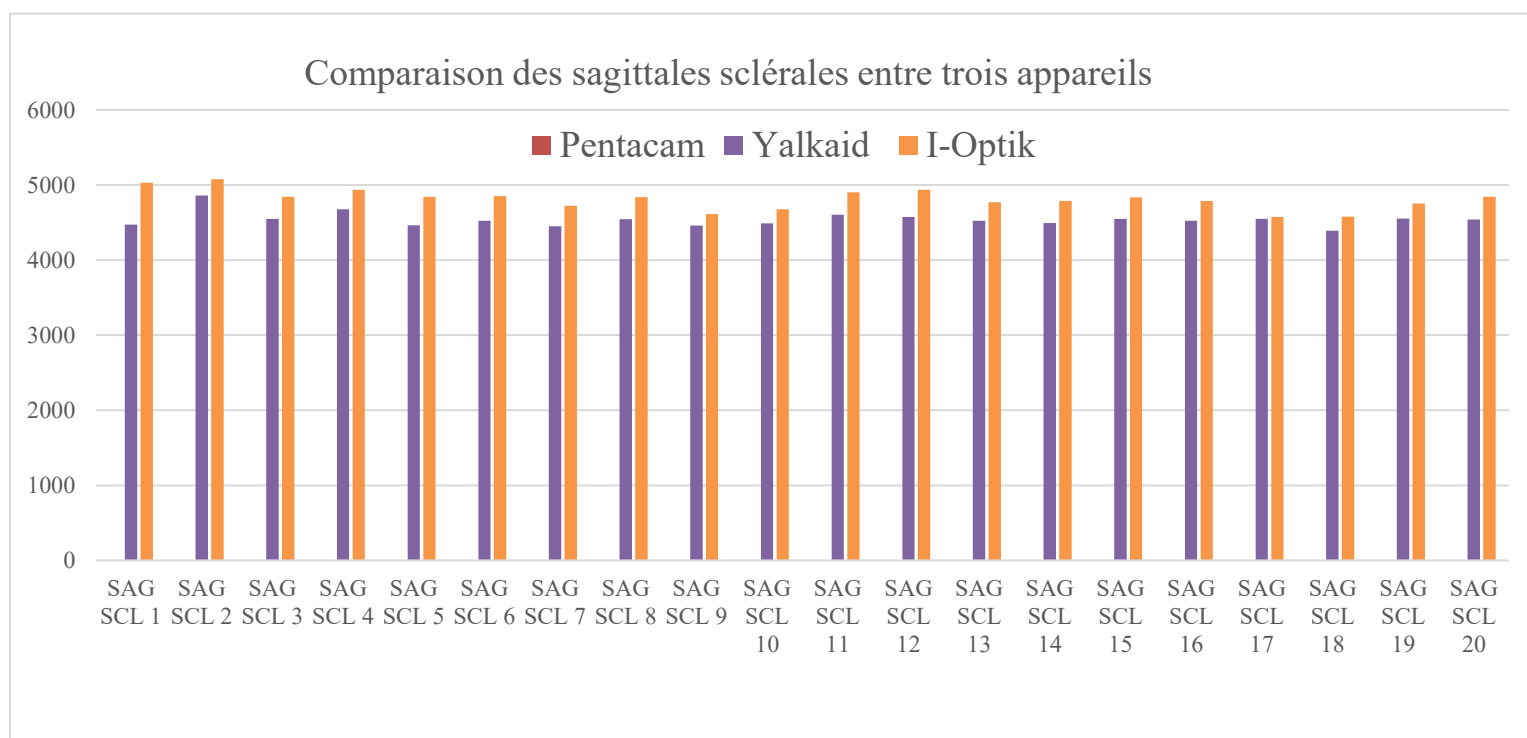


Figure 46 : Répartition des SAG SCL à 15 mm selon trois appareils

Valeurs métrologiques calculés

Appareils	Pentacam	Yalkaid	I-optik-SAGISIM
Moyenne SAG SCL (μm)	/	4539.0	4819.1
Ecart type (μm)	/	96.88	122.78
Incertitude type (μm)	/	21.66	27.45
Incertitude élargis (k=2) (μm)	/	43.33	54.91

Tableau 5 : Valeurs métrologiques des moyennes des sagittales sclérales.

Différence de Moyenne en termes de précisions entre les deux machines

$$\Delta(\text{Yalkaid} - \text{Ioptik}) = 4819.1 - 4539.0 = 280.1 \mu\text{m}$$

Formules utilisées pour calculer

➤ La moyenne : $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$

Où :

x_i = chaque mesure = individuelle = μm.

n = nombre de mesures = 20

$\bar{x}$ = Moyenne = μm.

➤ L'écart type : $s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$

Où :

S = écart-type

x_i = chaque mesure = valeur individuelle = μm.

$\bar{x}$ = moyenne = μm.

$n - 1$ = correction de Bessel = 20-1 = 19.

➤ Incertitude-type sur la moyenne : $\Delta = \frac{s}{\sqrt{n}}$

Où :

Δ =incertitude-type de la moyenne

s=écart-type

n= nombre de mesures = 20

➤ Incertitude élargie $\triangleq 2\Delta$

Où :

$\triangleq$ = incertitude élargie

k = facteur de couverture (souvent $k = 2$)

Δ = Incertitude type.

4. Discussion

L'adaptation des lentilles sclérales se base sur des paramètres très importants qui garantissent une adaptation optimale, parmi les paramètres les plus importants, la hauteur sagittale sclérale.

Une détermination précise de cette dernière permet d'optimiser l'adaptation initiale de la lentille et de réduire le nombre d'essais cliniques. Plusieurs appareils coûteux sont utilisés pour obtenir cette mesure telles que l'OCT-SA et la topographie d'élévation PENTACAM.

Le nouveau dispositif évalué dans l'étude a été développé dans l'objectif de proposer une méthode économique, rapide et fiable pour l'estimation de cette mesure.

Cette étude a porté sur 20 yeux de 10 patients avec des yeux sains. Les mesures obtenues avec ce nouveau dispositif ont été comparées avec des équipements déjà utilisés en pratique clinique afin d'évaluer sa précision.

L'analyse principale s'est concentrée sur deux paramètres principaux : la hauteur sagittale cornéenne et la hauteur sagittale sclérale.

4.1. Comparaison des sagittales cornéennes entre les trois appareils

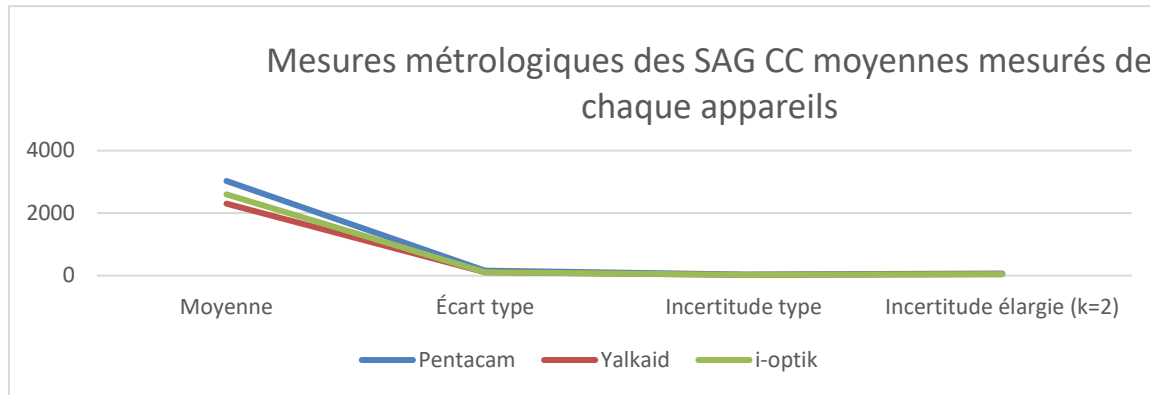
Les valeurs moyennes obtenues montrent une différence importante entre les trois appareils.

Le Pentacam présente la moyenne la plus élevée de 3028,5 μm , suivi de l'I-Optik avec le dispositif de 2599,35 μm , tandis que le Yalkaid fournit la moyenne la plus faible de 2303,9 μm .

L'écart-type est plus élevé pour le Pentacam de 163,8 μm que pour l'I-Optik avec le dispositif 112,8 μm et le Yalkaid 109,1 μm , indiquant une dispersion plus importante des mesures obtenues avec cet appareil. À l'inverse, le Yalkaid présente la plus faible dispersion, ce qui traduit une meilleure fiabilité de mesure.

Concernant l'incertitude, l'incertitude type pour le Pentacam est de $\pm 36.6 \mu\text{m}$, $\pm 24.4 \mu\text{m}$ pour Yalkaid et $\pm 25.2 \mu\text{m}$ pour l'I-Optik et le dispositif, de la même façon, l'incertitude élargie est plus élevée pour le Pentacam en comparant avec Yalkaid et l'I-Optik et le dispositif qui montrent une similarité notable.

Ces résultats indiquent que les mesures du Pentacam sont associées à une plus grande incertitude, tandis que celles du Yalkaid et de l'i-Optik apparaissent plus précises.



Conclusion

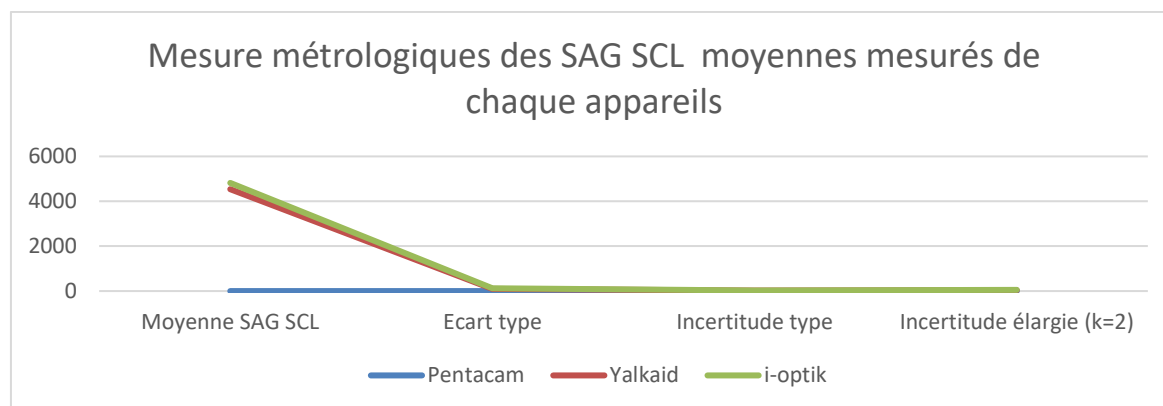
D'après ces résultats, le Yalkaid et l'i-Optik présentent une meilleure répétabilité et concordance et une incertitude plus faible que le Pentacam qui était aussi vérifié avec une différence de moyenne de chaque machines. Toutefois, la différence importante entre les moyennes suggère que les appareils ne fournissent pas exactement les mêmes estimations de sagittale. D'autres analyse statistique est recommandée pour développer le dispositif et diminuer l'incertitude pour garantir une utilisation interchangeable des deux machines dans la pratique clinique.

4.2. Comparaison de sagittales sclérales entres les trois appareils

Les résultats obtenus montrent que la moyenne de la sagittale sclérale mesurée par le Yalkaid est de 4539,0 μm , tandis que celle mesurée par l'i-Optik est de 4819,1 μm . L'I-Optik et le dispositif montre des valeurs moyennes supérieures d'environ 280 μm par rapport au Yalkaid. Cette différence probablement liée aux différences de technologie de mesure, méthode de prise de mesure, changement et variation de l'amplitude accommodatifs.

Concernant l'écart-type observé est de 96,88 μm pour le Yalkaid et de 122,78 μm pour l'i-Optik. Les mesures réalisées avec le Yalkaid apparaissent donc moins dispersées autour de la moyenne, ce qui signifie une meilleure précision des données au sein de l'échantillon étudié. À l'inverse, l'i-Optik présente une variabilité légèrement plus importante.

L'incertitude type est de $\pm 21,66 \mu\text{m}$ pour le Yalkaid contre $\pm 27,45 \mu\text{m}$ pour l'I-Optik et le dispositif. De même, l'incertitude élargie est de $\pm 43,33 \mu\text{m}$ pour le Yalkaid et de $\pm 54,91 \mu\text{m}$ pour l'I-Optik et le dispositif. Ces résultats indiquent que les mesures du Yalkaid sont associées à une précision légèrement supérieure à celles de l'i-Optik et le dispositif.



Conclusion

Toutefois, malgré cette différence de précision, l'écart entre les moyennes des deux appareils est nettement significatif mais reste cliniquement acceptable. En effet, une certaine variabilité peut être attribué à plusieurs facteurs, notamment des caractéristiques propres à chaque appareil, les conditions de réalisation de l'examen ou encore l'expérience du praticien dans la prise de mesure.

4.3. Récapitulatif

Il est important de souligner que le dispositif évalué est encore au stade de développement malgré cela les résultats obtenus dès cette première phase d'évaluation apparaissent encourageants et démontrant sa capacité à fournir une estimation de la hauteur sagittale sclérale.

La proximité des mesures avec celle de l'OCT est approximative et comparable et cela pousse vers des améliorations lors des futures phases de développement afin de diminuer totalement l'incertitude.

4.4. Conclusion finale

Cette étude à objectif d'analyser la première mesure de la hauteur sagittale à travers la kératométrie obtenue de l'auto-kérato-refractomètre à l'aide d'un dispositif innovant.

Cette étude a permis de démontrer la faisabilité de l'utilisation d'un nouveau dispositif pour l'estimation de la hauteur sagittale cornéenne et sclérale. Les résultats obtenus montrent une bonne concordance avec ceux de l'OCT, considéré comme un point de référence fiable.

Ce travail réside dans le fait que le dispositif étudié est entièrement nouveau. Malgré cela, les performances observées sont satisfaisantes. Les écarts constatés par rapport aux mesures de référence restent acceptables dans un contexte clinique.

Ces résultats démontrent le potentiel du dispositif pour l'évaluation de la hauteur sagittale.

4.5. Confrontation des résultats par rapport aux études publiées

Notre étude a porté sur 20 yeux de 10 patients avec des yeux sains et un Age moyen de (24.1 ± 0.74) ans, l'objectif était d'évaluer la hauteur sagittale cornéenne à l'aide de différents équipements de mesure, notamment des systèmes d'imagerie avancées, un topographe d'élévation, l'OCT -SA par rapport un auto-kérato-réfractomètre et le dispositif développé.

L'utilisation de ces différents équipements a permis d'obtenir une estimation objective et reproductible de la hauteur sagittale cornéenne nécessaire à la détermination de la sagittale d'une lentille sclérale pour un diamètre choisis, dans notre cas c'était un diamètre de 15 mm correspondant aux paramètres de la lentille sclérale étudiée.

Afin de situer nos résultats par rapport aux données existantes, une comparaison avec plusieurs études a été réalisée

Le tableau suivant présente les principales caractéristiques de ces travaux notamment le nombre des yeux inclus, l'âge moyen des participants, indication et l'état de l'œil, les valeurs de la hauteur sagittales cornéenne rapportées par les différents auteurs.

- Javier Rojas Vinuela et al (2023) [21]: ont rapportés dans une étude comparative des hauteur sagittales de l'œil antérieur OC-SAG) calculée à l'aide des paramètres cornéens avec l'OC-SAG mesuré par profilométrie L'OC-SAG des yeux a été calculé à l'aide des valeurs k moyennes, de l'excentricité et du rayon interne (cornéen) obtenus avec l'ESP pour un diamètre de corde de 11 mm.
- Stefan Bandlitz et al (2022) [45] : ont mené une étude dans l'intérêt et d'évaluer la validité des paramètres topographiques cornéens basée sur Placido pour déterminer les hauteurs sagittales cornéo-sclérales mesurées par profilométrie de Fourier dans une longueur de corde de 12 mm.
- Markus Ritzmann et al (2017) [46]: ont montré dans une étude l'évaluation de la forme de la sclère antérieure en mesurant la hauteur sagittale, ces hauteurs ont été mesurés à une corde de 12.8 mm en utilisant la (Zeiss Visante AS-OCT).
- Luigina Sorbara (2013) [14]: ont décrit dans l'étude que l'objectif est de comparer l'utilisation de l'OCT dans la mesure de Hauteur Sagittale dans une populations kératoconiques et de sujets normaux dans un diamètre de corde particulier le DHIV.

Dans notre étude ont a démonter le résultat obtenu de la sagittale cornéenne moyenne obtenues de 3 appareils différents Le PENTACAM, YALKaid, et I-Optik :

➤ L'âge moyen est de (24.1 ± 0.74) ans, le nombre des yeux est de 20 yeux sains et le diamètre moyen est de (11.67 ± 0.09) mm

- Pour le PENTACAM $(3028 \pm 36.6) \mu\text{m}$

- Pour le YALKaid $(2303.9 \pm 24.4) \mu\text{m}$
- Pour le I-Optik et le dispositif $(2599.35 \pm 25.2) \mu\text{m}$

Auteur / année	Nombre de Yeux	Etat des yeux	Age moyen / Intervalle (ans)	Diamètre moyen / Diamètre précis (mm)	Instruments de mesures / Méthode de calculs	Hauteur Sagittale mesurées (μm)
Javier Rojas Vinuela et al (2018) [21]	70 OD	Sains	18-59	11	ESP	2103 $\pm$ 77
					Calculé sans excentricité (Cwe)	2224 $\pm$ 99
					Calculé avec excentricité (Ce)	2131 $\pm$ 102
					Calculé avec Best Fit sphère (BFS)	2068 $\pm$ 74
Markus Ritzman et al (2017) [46]	39 OD	Sains		12.8	Visante OCT	2906 $\pm$ 150
	39 OG					2917 $\pm$ 150

Stefan Bandlitz et al (2022) [45]	36	Sains	25.4 ± 3.2	12 mm	ESP	SAG max 2413 ± 108 SAG min 2293 ± 108
Luigina Sorbara et al (2013) [14]	14 14	Sains Kératoconiques	33 ± 7 40 ± 14	11.77 ± 0.41 11.75 ± 0.35	OCT	Méridien cambrée 2400 ± 140 Méridien Plat 2420 ± 220 Méridien cambrée 2790 ± 310 Méridien Plat 2470 ± 210

SAGISIM (2026)	20	Sains	24.1 ± 0.74	11.67 ± 0.09	Pentacam	3028.5 ± 36.6
					Yalkaid OCT	2303.9 ± 24.4
					I-Optik-SAGISIM	2599.35 ± 25.2

Tableau : Différents études portent sur la hauteur sagittale mesuré à partir d'un diamètre cornéen correspondant.

Partie Startup

Étude technico-économique

1. Présentation du projet

Introduction

Dans cette partie, nous présenterons en détail l'aspect technico-économique du projet en mettant en évidence le plan d'affaires ainsi que le Business Model Canvas (BMC). Cette étude permettra de définir les différentes structures techniques, organisationnelles et économiques de l'entreprise afin d'assurer la réussite du projet et l'atteinte des objectifs souhaités.

1.1. L'idée du projet

La mesure de la sagittale cornéenne représente aujourd'hui un paramètre essentiel dans l'adaptation moderne des lentilles de contact, notamment les lentilles sclérales et prochainement les lentilles souples de nouvelle génération. Cependant, cette mesure reste difficilement accessible dans la pratique quotidienne car elle nécessite généralement des équipements spécialisés tels que les topographes cornéens d'élévation, L'OCT (tomographie par cohérence optique), Profilomètre.

Notre projet consiste à développer un dispositif et un procédé innovant permettant de déterminer automatiquement la sagittale cornéenne à partir des paramètres kératométriques obtenus par un auto-kérato-réfractomètre.

L'idée principale du projet repose sur l'intégration d'une nouvelle fonction dans un équipement de base déjà présent dans pratiquement tous les cabinets d'optométrie et de contactologie l'auto-kérato-réfractomètre.

À l'aide d'un dispositif attaché à l'appareil, les paramètres kératométriques nécessaires seront automatiquement recueillis. Ensuite, grâce à une relation mathématique, une équation de calcul ainsi qu'un traitement automatisé des données, la sagittale cornéenne pourra être directement simulée et affichée au praticien.

Cette innovation représente une idée totalement nouvelle puisque aucun auto-kérato-réfractomètre actuel ne permet de déterminer directement la sagittale cornéenne.

Le choix de l'auto-kérato-réfractomètre est stratégique. Cet appareil constitue un instrument fondamental dans tous les cabinets d'optique et d'optométrie, au même titre que la lampe à fente. Ainsi, au lieu d'investir dans des équipements coûteux et spécialisés, il devient possible d'obtenir cette mesure directement à partir d'un appareil déjà disponible dans la pratique clinique quotidienne.

Le projet permettra ainsi :

Réduire des coûts : permet au contactologue de déterminer uniquement et directement la sagittale sans obligation d'investissement dans un équipement complet.

Optimisation de l'utilisation des ressources existantes : utilisation de l'auto-kérato-réfractomètre, cela maximise l'usage du matériel existant.

Diminution du temps clinique improductif : adaptation plus précise avec moins d'essais inadapté et meilleure rentabilité pour le praticien.

Compatibilité universelle : dispositif facilement utilisable et fonctionne avec tout auto-kérato-réfractomètre standard.

L'intérêt de cette innovation devient encore plus important avec l'évolution future des lentilles souples. Des études récentes ont montré que la tolérance des lentilles de contact ne dépend pas uniquement des paramètres classiques comme le rayon de courbure, le diamètre ou l'épaisseur, mais également de la correspondance entre la sagittale de la cornée et celle de la lentille.

Les recherches ont démontré que les patients tolérant bien leurs lentilles possèdent généralement une sagittale cornéenne proche de la sagittale de la lentille portée. À l'inverse, une différence importante entre ces deux valeurs peut provoquer une mauvaise tolérance, même en l'absence de pathologies, d'hypoxie ou de problèmes liés aux matériaux.

Pour cette raison, la sagittale est appelée à devenir un paramètre fondamental dans la conception et l'adaptation des futures lentilles souples.

Notre projet anticipe donc cette évolution technologique en proposant une solution pratique, rapide et accessible permettant d'intégrer cette mesure directement dans les examens de routine.

Cette innovation présente également un avantage important pour les patients. Actuellement, lorsqu'un praticien souhaite réaliser une adaptation spécialisée, il doit souvent orienter le patient vers une clinique ou un cabinet équipé d'un topographe cornéen afin d'obtenir des mesures complémentaires. Cette démarche entraîne des coûts supplémentaires, une perte de temps et parfois même une perte du patient pour le praticien.

Le projet représente donc une innovation technologique et industrielle capable de transformer les pratiques futures de l'adaptation des lentilles de contact.

1.2. Les valeurs suggérées

Innovation et pratique à utiliser

Notre projet propose une méthode moderne et innovante permettant de mesurer l'excentration de la kératométrie cornéenne avec une meilleure précision à travers un dispositif. Cette technologie contribuera à améliorer la qualité des examens visuels et des adaptations des lentilles sclérales.

Fiabilité des mesures

Le dispositif est conçu pour fournir des résultats fiables et reproductibles, permettant ainsi de réduire les erreurs liées aux méthodes classiques de mesure.

Facilité d'utilisation

Le système sera conçu de manière ergonomique afin de faciliter son utilisation dans des cabinets d'optométrie de spécialité.

Réduction du temps d'examen

Le procédé permettra d'obtenir rapidement des résultats précis, réduisant ainsi la durée des examens et améliorant l'efficacité du travail des praticiens.

1.3. Équipe de travail

Encadrant : **Dr.OUZZANI** Mhamed.

Étudiante : **BOUKHOBZA** Ichrak.

Spécialité : Optométrie.

Projet conçu : Dispositif et procédé de mesure de l'excentration de la kératométrie cornéenne pour déterminer la sagittale sclérale.

Secteur économique : Industrie biomédicale spécialisée dans l'équipement optométrique et ophtalmique et dispositifs médicaux.

Lieu d'implantation : Oran, Algérie.

1.4. Objectifs du projet

- Développer un dispositif innovant permettant de mesurer l'excentration de la kératométrie cornéenne.
- Faciliter le travail des professionnels de la santé visuelle grâce à un procédé automatisé et précis.
- Apporter et simuler une approche estimative et approximation de la sagittale sclérale pour orienter l'adaptateur vers l'intervalle sagittal optimal pour l'adaptation des lentilles sclérales.
- Contribuer au développement technologique dans le domaine de l'optique médicale et optométrie en Algérie.

1.5. Le planning de réalisation du projet

Analyses préliminaires du projet (3 à 6 mois)

- Effectuer des recherches scientifiques et techniques sur la kératométrie cornéenne et la sagittale sclérale.
- Étudier les dispositifs existants sur le marché international.
- Identifier les besoins des professionnels de la santé visuelle.
- Déterminer les spécificités du dispositif.
- Répondre à un besoin spécifique souhaitée par le marché.

Exécution de l'activité (3 mois)

- Acquisition des composants électroniques et des équipements nécessaires.
- Conception mécanique et électronique du dispositif.
- Développement du système de traitement des données recueillis.
- Réalisation des premiers tests techniques et cliniques.

Finalisation du produit (2 à 3 mois)

- Validation finale des performances du dispositif et la fiabilité des résultats.
- Finalisation du design et de l'ergonomie du prototype.
- Élaboration de la stratégie marketing.
- Préparation de l'étude technico-économique et de la fiche technique du produit.

2. Aspects innovants

2.1. Nature des innovations

Innovation de marché

En Algérie et au niveau internationale, il n'existe aucun dispositif spécialisé dans la mesure précise de l'excentration de la kératométrie cornéenne pour déterminer la sagittale sclérale notamment dans un auto-kérato-réfractomètre.

Ce projet représente donc une opportunité importante pour développer une technologie locale innovante dans le domaine de l'optique médicale et surtout en contactologie.

Grâce à des recherches approfondies et à une conception répondant aux exigences actuelles et futures du marché, ce dispositif pourrait s'imposer comme une solution intégrée aux équipements utilisés à l'échelle internationale.

Innovation technologique

Le projet repose sur l'intégration de plusieurs technologies modernes :

Innovation au niveau de la cible de fixation

L'innovation repose tout d'abord sur la conception d'une cible de fixation spécifique permettant de guider le regard du patient selon des positions précises et contrôlées. Cette approche facilite l'obtention de kératométries cornéennes centrales et excentriques fiables, indispensables au recueil des paramètres nécessaires au calcul de la hauteur sagittale sclérale. Ce système améliore ainsi la reproductibilité des mesures et optimise la précision des données acquises.

Innovation par l'intégration d'une nouvelle mesure au sein de l'appareil

La seconde innovation consiste à intégrer une mesure actuellement inexistante dans les équipements conventionnels et accessibles. À partir des kératométries déjà obtenues par l'appareil,

un procédé de calcul à travers un programme automatisé permettra d'exploiter ces données afin de déterminer la hauteur sagittale sclérale. Cette intégration transforme des mesures kératométriques classiques en un outil d'analyse avancé destiné à déterminer une mesure importante dans l'adaptation des lentilles sclérales.

Innovation orientée vers les besoins présents et futurs de la contactologie

Cette innovation répond aux besoins actuels liés à l'adaptation des lentilles sclérales, en proposant une méthode plus accessible, standardisée et potentiellement intégrable aux auto-kérato-réfractomètres existants.

À plus long terme, le dispositif pourrait également ouvrir des perspectives d'application dans le domaine des lentilles souples car la hauteur sagittale sera intégrée aussi dans les paramètres et critères d'adaptation de ces lentilles.

2.2. Domaines d'innovation

Ce projet peut être appliqué dans plusieurs domaines liés à la santé visuelle, recherche scientifique, et l'industrie :

Santé

Le dispositif pourra être utilisé dans les cabinets d'optométrie afin d'améliorer le diagnostic et l'adaptation des lentilles sclérales et prochainement les lentilles souples.

Recherche scientifique

Le système pourra contribuer au développement de nouvelles études dans le domaine des technologies de mesure cornéenne et la contactologie.

Éducation et formation

Le dispositif pourra servir comme outil pédagogique dans les universités et instituts spécialisés afin de former les étudiants aux techniques modernes de mesure oculaire.

Industrie biomédicale

Ce projet représente une avancée technologique pouvant encourager le développement de dispositifs médicaux-oculaires innovants.

Etude de marché

3. Analyse stratégique du marché

Afin d'analyser le marché et d'évaluer les opportunités de développement du projet, plusieurs éléments stratégiques doivent être étudiés : les problématiques rencontrées, les solutions proposées, les canaux de distribution ainsi que les moyens de promotion.

Problématique	Solutions
Qualité du Service	Performant, Innovant, Pratique et Facilite la prise de mesure
Emplacement de projet	Oran, Algérie.
Promotion	-L'établissement de santé oculaire (ophtalmologie , optométrie et contactologie) -les professionnels du domaine -Les salons d'expositions et les foires. -Les évènements, les congrès et les conférences scientifiques. -Les annonces publicitaires en ligne et sur le terrain. -Promotion et réduction de prix occasionnellement. -Plateformes de recherches scientifique, moteurs de recherche académiques -réseaux sociaux publicité télévisuelle.
Prix	200000 DA.
Moyens/Canaux de distribution	-Cabinets et cliniques. -Etablissement d'enseignement d'optique et d'optométrie. -Distributeurs & fournisseurs de matériel ophtalmique et optométrique. -Canaux numériques : réseaux sociaux et sites web.

Qualification Personnel	-Optométriste-Contactologue. -un ingénieur en conception mécanique. - un ingénieur électronique embarquée. -Un ingénieur biomédical. -Programmeur. - Commercial.
Efficience Prestation	Locale et vers le marché international.

Tableau 6 :Etude de marché

Emplacement du projet

Oran, Algérie.

Promotion

- Participation aux congrès scientifiques et aux événements médicaux.
- Collaboration avec les professionnels du domaine de l'optique et de la contactologie.
- Présentation du projet dans les salons d'exposition et foires technologiques.
- Marketing digital via les réseaux sociaux et le site internet.
- Publicités en ligne ciblant les professionnels de santé visuelle.
- Collaboration avec les fabricants d'équipements ophtalmiques.
- Publications scientifiques et démonstrations techniques.

Moyens et canaux de distribution

- Fabricants d'auto-kérato-réfractomètres.
- Distributeurs d'équipements ophtalmiques.
- Cabinets d'optométrie et de contactologie.
- Cliniques ophtalmologiques.
- Laboratoires spécialisés en lentilles de contact.
- Fournisseurs de dispositifs biomédicaux.

Qualification du personnel

- Optométriste spécialiste en contactologie.
- Ingénieur biomédical.
- Ingénieur en conception et développement.
- Ingénieur en électronique.
- Programmeur.
- Responsable commercial.

Efficiencia de la prestación

Le projet vise d'abord le marché algérien puis le marché africain avant une éventuelle ouverture vers l'international.

3.1. Segment du marché

Perspectives du projet

À court terme

Notre objectif principal est de développer une relation de confiance avec les professionnels de la santé visuelle et les industriels du domaine.

Le projet vise dans un premier temps :

- La validation scientifique et technique du dispositif.
- La sensibilisation des praticiens à l'importance mesurer la hauteur sagittale avec précision.
- Le développement de partenariats avec les fabricants d'auto-kérato-réfractomètres.
- L'objectif est également de positionner le projet comme une innovation de référence dans le domaine de la contactologie en Algérie et ailleurs.

À long terme

À long terme, l'entreprise cherchera à évoluer vers une structure industrielle plus importante à travers :

- Le développement de nouvelles versions plus avancées du dispositif.
- L'intégration d'algorithmes de calcul plus performants.
- Le développement de collaborations internationales.
- L'exportation de la technologie vers le marché africain puis international.

Clients cibles

Clients directs

- Optométristes.
- Contactologues.
- Cabinets d'optométrie et de contactologie.

Clients indirects

Industries et fabricants des équipements ophtalmiques et optométriques.

3.2. Mesure de l'intensité de la concurrence

À l'échelle nationale et internationale, il n'existe actuellement aucune technologie intégrée à l'auto-kérato-réfractomètre permettant de calculer directement la sagittale cornéenne.

Cependant, certains équipements internationaux tels que les topographes cornéens (Oculus-Pentacam , HR ,AXL) OCT : (CASIA2 , Visante , YALKaid), Profilomètre : (ESP) , permettent d'obtenir la hauteur sagittale.

Ces équipements restent néanmoins coûteux et ne sont pas disponibles dans tous les cabinets. Le coût de ces machines est élevé et la technologie utilisée est très avancée par rapport au prototype, avec des prix variant de 3 000 000 à 10 500 000 DA.

Pour ces équipements internationaux ils comprennent d'autres technologies l'OCT tomographie par cohérence optique, la topographie cornéenne et la profilométrie qui se base sur la reconstruction 3D par balayage de la surface cornéo-sclérale.

3.3. Plan marketing

1. Description du produit

C'est dispositif et un procédé permettant de déterminer la hauteur sagittale optimale pour l'adaptation des lentilles sclérales à partir des mesures de la kératométrie périphérique, grâce à une fixation excentrée et un algorithme dédié. Ces mesures sont précises, reproductible, simple, et rapide.

Il est conçu être compatible avec tout auto-kérato-réfractomètres, standard sans nécessiter d'équipements supplémentaires/machines complexes pour la prise des mesures périphériques précises.

2. Comparaison avec les produits concurrents

Contrairement aux équipements classiques nécessitant des topographes d'élévation, des OCT et des profilomètres, notre projet permet d'obtenir directement une mesure sagittale à partir d'un appareil de base déjà utilisé quotidiennement.

Cette innovation réduit les coûts, simplifie la pratique clinique et améliore l'accessibilité de cette mesure.

3. Emplacement

Oran, Algérie.

4. Zone du marché

Locale avec une expansion vers l'internationale.

5. Principaux clients

Contactologues et Optométristes.

Industries et fabricants des auto-kérato-réfractomètres.

Distributeurs d'équipements ophtalmiques et optométriques.

6. Prix de vente

7. Stratégie marketing

Notre stratégie marketing reposera sur plusieurs axes :

Établissements de santé oculaire (ophtalmologie, optométrie, contactologie)

Ce sont les principaux utilisateurs finaux du dispositif. Ils représentent le marché clinique direct où l'innovation peut être adoptée pour améliorer la précision des examens et la prise en charge des patients.

Professionnels du domaine

Les optométristes et contactologues sont les prescripteurs et utilisateurs clés. Ils jouent un rôle central dans l'acceptation et la diffusion de la technologie grâce à leur expertise et leur recommandation.

Salons d'exposition et foires

Ces événements permettent de présenter le dispositif à un large public professionnel, de démontrer son fonctionnement et de générer des contacts commerciaux et des partenariats.

Événements, congrès et conférences scientifiques

Ils offrent une visibilité scientifique et académique, renforçant la crédibilité du dispositif par des présentations, publications et échanges avec des experts du domaine.

Annonces publicitaires en ligne et sur le terrain

Elles assurent la visibilité du produit auprès des professionnels et des institutions via des supports digitaux et physiques, facilitant la reconnaissance et la notoriété de la technologie.

Promotions et réductions de prix occasionnelles

Elles permettent de stimuler l'adoption initiale du dispositif, notamment auprès des premiers utilisateurs ou des centres souhaitant tester la technologie.

Plateformes de recherche scientifique et moteurs de recherche académiques

Ces canaux permettent de diffuser les résultats d'études, articles et validations scientifiques, renforçant la légitimité et l'innovation perçue du dispositif.

Réseaux sociaux et publicité télévisuelle

Ils servent à toucher un public plus large et à renforcer la visibilité globale du projet, aussi bien auprès des professionnels que du grand public.

8. Budget marketing

650000DA/an.

	Mois												Total
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Budget mensuel (x1000 DA)	0	0	50	50	50	100	50	50	50	50	100	100	650

Tableau 7 : Budget marketing

4. Plan de production et organisation

4.1. Processus de production

Le processus de développement du projet se déroule selon plusieurs étapes principales :

Avoir une idée innovante et identification du besoin clinique lié à la mesure sagittale.

Conception du dispositif et assemblage électronique et définir le procédé mesure et l'algorithme derrière.

Acquisition du premier prototype.

Expérimenter sur le prototype.

Ajuster et apporter des modifications et optimisation du procédé de mesure

Validation technique.

Présentation et promotion du projet au grand public.

4.2. Approvisionnement

Afin d'acquérir nos matières premières, nous collaborons avec des fournisseurs locaux qui fournissent des matières premières provenant du marché international:

Les équipements de conception et de prototypage.

Les composants électroniques.

4.3. Main-d'œuvre

-Optométriste-Contactologue.

-Un ingénieur en conception mécanique.

-Un ingénieur électronique embarquée.

-Un ingénieur biomédical.

-Programmeur.

- Commercial.

4.4. Principaux partenaires

Fabricants d'auto-kérato-réfractomètres.

Industries biomédicales.

Cabinets et cliniques.

Ingénieurs en développement et conception biomédicale.

Universités et centres de recherche.

Fournisseurs de composants électroniques.

Etude technique

5. Plan financier

5.1. Emplacement de l'activité économique

Lieu : Oran, Algérie.

Mode d'acquisition : Location.

Surface : 150 mètres carrés.

5.2. Les coûts et les charges

Les charges variables

/	Produit brut	Quantité globale	Unité	Valeur du produit brut (DA)	Quantité unitaire (pour 1 unité)	Unité	Cout de reviens unitaire (DA)
Matières premières	Filament PLA	1	kg	5000	1.24	kg	6200
	PMMA PlexiGlass	0.25	kg	8000	0.005	kg	160
Matières consommables	Boutons Poussoirs	200	/	5000	1	/	25
	Diodes électroluminescentes (LED)	200	/	5000	1		25
	Conducteurs électriques	500	/	50000	1		100
	Circuit imprimées /PCB	50	/	7000	1		140
	Module de charge	50	/	15000	1		300

	Tubes colle silicone	750	/	18750	1		25
	Fils à souder	1	Kg	2100	1	/	2100
	Batterie HKX 3.7 Volt	50	/	30000	1	/	600
Total des charges variables				145850	///		9675

Tableau 8 : Les charges variables.

Les charges fixes

1. Frais et services divers

Frais & services divers	Frais & services divers	Nombre	Montant mensuel (DA/mois)	Montant annuel (DA/an)
	Abonnement internet	1	2500	30000
	Abonnement électricité	1	6000	72000
	Abonnement eau	1	3000	36000
	Nettoyage	1	4500	54000
	Frais de location	1	40000	480000
	Maintenance	1	12000	144000
	Total services	6	68000	816000

Tableau 9: Les charges fixes

2. Organisation et main-d'œuvre

Poste	Nombre	Salaire Mensuel (DA/An)	Salaire Brut (DA/An)
Un Optométriste Contactologue	1	40000	480000
Un ingénieur en conception mécanique	1	25000	300000
Un ingénieur en électronique embarquée	1	25000	300000
Commercial	1	40000	480000
Ingénieur bio-médical	1	20000	240000
Programmeur	1	35000	420000
Totale masses salariale	6	185000	2220000

Tableau 10 : Main d'œuvre

Equipements & investissement

1. Equipement

	Désignation	Valeur unitaire	Quantité	Valeur total DA
Equipement		0	0	0
		0	0	0
		0	0	0
	Imprimante EPSON L 31	35000	1	35000
	Bureau IS Sixième Génér	60000	1	60000
	Modem Wifi	5000	1	5000
		0	0	0
	Limatiseur 12000 bt	50000	2	100000
		0	0	0
			0	0
		0	0	0
		0	0	0
	multimètre	4000	1	4000
	Imprimante 3D	210000	1	210000
	Fer à souder	60000	1	60000
		0	0	0
		0	0	0
		0	0	0
		0	0	0
	Total		8	474000
	Dotation à l'amortissement l (Sur 5ans)			94800

Tableau 11: Equipement

2. Agencement et installations

Agencement et installations	Désignation		Valeur (DA)
	Peinture		15000
	Décoration		5000
	Travaux divers		10000
	Installations	Electricité	20000
		Eau	15000
		Téléphone	20000
	Ameublement		100000
	Total		185000
	Dotation aux investissements (Sur 10 ans)		18500

Tableau 12 : Agencement et installations

5.3. Chiffre d'affaires

Chiffre d'affaires /an

Biens / Services			Mois												Total
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Produit/service1	Unités vendues	Q1	0	2	2	4	4	5	5	6	6	6	5	5	50
	Prix de vente (x1000 DA)	P1	0.000	120.000	120.000	120.000	150.000	150.000	150.000	180.000	180.000	180.000	200.000	200.000	///
	Chiffre d'affaires (x1000 DA)	CA1	0.00	240.00	240.00	480.00	600.00	750.00	750.00	1080.00	1080.00	1080.00	1000.00	1000.00	8300.00

Tableau 13 : Chiffres d'affaires.

Bilan Final

	Formule	Montant (DA)
Cout unitaire initial (DA)		9675.00
Charges fixes unitaire (DA)		60720.00
Dotation à l'amortissement unitaire (Sur 5 ans)		1896.00
Dotation aux investissements unitaire (Sur 10 ans)		370.00
Cout Unitaire final (DA)	$A+B+C+D$	72661.00
Capacite de production (unités/an)		50
Budget Marketing (DA/an)		650000.00
Cout du projet annuel (DA)	$(E*F)+G$	4283050.08
Chiffre d'affaires annuel (DA)		8300000.00
Bénéfice annuel (DA)	$I-H$	4016949.92
Marge bénéficiaire (%)	$J*100/I$	48.40 %

Tableau 14 : Bilan final du projet.

6. Prototype expérimental



Figure 47 : Prototype finale.

Business Model Canva (BMC)

Business Model Canvas

Noms & Prénoms des étudiants : BOUKHOBZA Ichrak

Date:

20/05/2026

Versión:

1

Partenaires clés	Activités Clés	Propositions de valeur	Relation Client	Clients
-Optométristes et contactologues - Investisseurs et organismes de soutiens. -Fabricants des équipements ophtalmique et optométriques. -Fabricants & Fournisseurs des matieres premieres pour l'impression 3D et des équipements électroniques. -Ingénieurs , devloppeurs & programmeurs.	Exploiter un dispositif de kératométrie excentrée afin de déterminer avec précision la hauteur sagittale et de faciliter l'adaptation des lentilles sclérales en rendant accessible une mesure habituellement disponible uniquement sur des équipements coûteux. Ressources clés - Contactologue -Composants électronique & impression 3D. - Compétences et qualifications.	- Innovant. -Accessible. -Cliniquement performant. -Automatisé. -Pratique. -Economique.	B2B - Les événements les congrès et -Les conférences scientifiques. -Les salons d'exposition et les foires. -Laboratoires de lentilles de contacts Canaux -Distributeurs & fournisseurs de materiel ophtalmique et optométrique. -Les salons, les points d'expositions.	-Contactologues. -Industries biomédicales et fabricants des équipement ophtalmiques et optométriques notamment l'auto-kérato-réfractomètre.
Coûts		Revenus		
-Charge variable. -Charge fixe (Frais et services divers organisation et main d'œuvre). -Equipement et installation.		-La vente. -Le sponsoring -Maintenance et les mises à jour. -Partenariat et collaboration avec des laboratoires de lentilles de contacts. -Formations Certification et des ateliers.		

Conclusion générale

En conclusion, ce travail a permis de démontrer qu'il est possible de développer une méthode alternative de mesure de la hauteur sagittale reposant sur un dispositif innovant, conçu spécifiquement pour rendre cette mesure plus accessible, plus simple d'utilisation et économiquement plus abordable que les technologies actuellement disponibles. Cette démarche s'inscrit dans une volonté de démocratiser l'accès à un paramètre devenu essentiel en contactologie moderne, particulièrement dans le domaine des lentilles sclérales.

Le projet SAGISIM a mobilisé plusieurs disciplines complémentaires, allant de la conception mécanique et optique à la programmation informatique, en passant par la validation clinique. Le développement du dispositif a nécessité de nombreuses phases de réflexion, de prototypage, de tests et d'optimisation afin d'aboutir à une solution capable de répondre aux exigences de la pratique clinique. L'intégration d'un logiciel dédié a également permis d'automatiser le traitement des données recueillies et de transformer les mesures obtenues en valeurs de hauteur sagittale directement exploitables par le praticien.

Les résultats de l'étude comparative prospective ont montré que les mesures fournies par le SAGISIM présentent une concordance satisfaisante avec celles obtenues à l'aide d'équipements de référence déjà commercialisés. Bien que certaines différences puissent subsister, les performances observées démontrent que le dispositif est capable de fournir des estimations fiables et reproductibles de la hauteur sagittale, compatibles avec les besoins cliniques courants. Ces résultats valident ainsi le concept développé et confirment la pertinence de l'approche proposée.

Au-delà de ses performances actuelles, le SAGISIM ouvre des perspectives particulièrement prometteuses. À moyen et long terme, son évolution pourrait conduire à la création d'une plateforme complète d'analyse sagittale personnalisée, capable d'assister les contactologues dans le choix, l'adaptation et la personnalisation des lentilles de contact. L'intégration d'algorithmes avancés de calcul et d'aide à la décision pourrait permettre une réduction du temps d'adaptation, une amélioration du taux de réussite des premières lentilles prescrites et une optimisation du confort des patients.

Par ailleurs, les résultats obtenus pourraient susciter l'intérêt des fabricants de lentilles de contact et des industriels du secteur de l'optique médicale. Des collaborations futures pourraient permettre l'intégration de cette technologie dans les équipements de consultation existants ou dans les logiciels d'adaptation utilisés quotidiennement en pratique clinique. Une telle évolution contribuerait à rendre la mesure de la hauteur sagittale plus largement disponible, y compris dans les structures disposant de ressources limitées.

Cette étude présente néanmoins certaines limites. Le nombre de sujets inclus reste relativement restreint et les performances du dispositif devront être confirmées sur des échantillons plus importants et plus diversifiés, incluant notamment des yeux présentant des irrégularités cornéennes, des ectasies ou des indications spécifiques de lentilles sclérales. De futures études multicentriques permettront également d'évaluer la reproductibilité inter-opérateurs et la robustesse du système dans différentes conditions cliniques.

En définitive, le SAGISIM constitue une preuve de concept réussie démontrant qu'une innovation accessible peut fournir des résultats comparables à ceux obtenus avec des équipements technologiques beaucoup plus complexes et coûteux. Les résultats obtenus confirment la validité scientifique et clinique de cette approche et encouragent la poursuite de son développement. Ce travail représente ainsi une première étape vers une démocratisation de la mesure de la hauteur sagittale et pourrait contribuer, à terme, à améliorer la pratique de la contactologie moderne et l'accès aux adaptations spécialisées.

Références bibliographiques

- [1] R. Raul Martin Herranz, Ocular surface : Anatomy and physiology, USA: CRC Press , Science Publishers.
- [2] A. N. Mohamed Wakil Ansari, Atlas of Ocular Anatomy, Switzerland: Springer International Publisher, 2016.
- [3] S. ., J. Al Lens, Ocular Anatomy and Physiology Second Ed, USA: Slack Incorporated, 2008.
- [4] H. S. Dua, «Human Corneal Anatomy redefined : a novel pre-Descemet's layer (Dua's layer) , PubMed,» September 2013.
- [5] E. ., S. Buskirk, «The anatomy of the limbus,» *PubMed*.
- [6] L. Remington, Clinical Antomy and Physiology of the Visual System , Third Ed, USA: Elsevier Inc, 2012.
- [7] I. S. A K Khurana, Anatomy and Physiology of Eye , Second Ed, CBS Publishers.
- [8] S. V.A.H. Edward, Clinical Manual of Contact Lenses , Second Ed, Phildelphia USA: Lippicott Williams & Wilkins, 2014.
- [9] M. D. Fadel, Clinical Guide for Scleral Lens , Second Ed, Contamac , 2025.
- [10] N.Efron, Efron Contact Lens Practice ,Second Ed, Elsevier, 2012.
- [11] M. B. L.K., Contemporary Scleral Lenses Theory and A pplication, Bentham E Books.
- [12] D. Fadel, «Scleral Lens Issues and Complications Related to a Non-Optimal Fitting Relationship Between the Lens and Ocular Surface,» *Eye & Contact Lens*, pp. 152-163, May 2019.
- [13] M. e. Al, «CLEAR - Scleral lenses,» *Contact Lens and Anterior Eye* , *PubMed*, pp. 270-288, 2021.
- [14] L. e. Al, «Use of Visante OCT to measure the Sagittal depth and Scleral Shape of keratoconus compared to normal Cornea : Pilot Study,» *Journal of Optometry*, pp. 141-146, September 2013.

- [15] R. e. al, «Scleral Topography and its usefulness in scleral lens fitting,» *AVEH African Vision and Eye Health*, July 2021.
- [16] L. e. al, «Optical coherence tomography and scleral lens terminology,» *Contact Lens & Anterior Eye* , *PubMed*, pp. 529-534, December 2020.
- [17] S. e. al, «Prediction of anterior ocular surface sagittal heights using Placido-based corneal topography in healthy eyes,» *Ophthalmic and Physiological Optics* , pp. 1023-1031, Jun 2022.
- [18] S. e. al, «Optical coherence tomography and scleral contact lenses: clinical and research applications,» *Clinical and Experimental Optometry* , pp. 224-241, April 2021.
- [19] A. e. Al, «The Case for Sagittal Depth in Contact Lens Fitting,» *Review of Cornea & Contact Lens*, April 2026.
- [20] M. e. e. Al, «Sagittal depth considerations in the selection of the base curve radius of a soft contact lens,» *American Journal of Optometry & Physiological Optics*, pp. 407-413.
- [21] J. Vinuela, «Comparing sagittal heights calculated using corneal parameters and those measured with profilometry,» *Contact Lens & Anterior Eye* , *PubMed*, August 2023.
- [22] G.Young, «Ocular Sagittal Height and Soft Contact Lens Fit,» *Journal Of the British Contact Lens Association*, pp. 45-49, 1192.
- [23] L.Hall, «What You Need to Know About Sagittal Height and Scleral Lenses,» *Contact Lens Spectrum* , pp. 26-34, May 2015.
- [24] M. M. B. B.A., *Anterior Segment Optical Coherence Tomography*, Academic Press, November 2024..
- [25] C. M. Jancevski, «Anterior Segment Optical Coherence Tomography,» *Semon Ophthalmol* , *PubMed*, November 2010.
- [26] J. e. al, *Intra Ocular Lens Calculations*, Cleveland USA : Springer, 2025.
- [27] A.Wolf, «Corneal Topography: Get to New Heights,» *Review of Cornea and contact Lens* , April 2024.
- [28] J. H. e. al, «Optical coherence tomography angiography in glaucoma,» *Clinical and Experimental Optometry*, pp. 110-120, January 2024.
- [29] J. G. F. W. Drexler, *Optical Coherence Tomography*, SpringerReference, 2015.

- [30] X. L. e. al, «Comparison of a new anterior segment optical coherence tomography and Oculus Pentacam for measurement of anterior chamber depth and corneal thickness,» *Annals of Translational Medicine*, July 2020.
- [31] M. Wojtkowski, «High-speed optical coherence tomography: basics and applications,» *Applied Optics*, Jun 2010.
- [32] S. Nayak, «Corneal topography and tomography,» *journal of clinical Ophtalmology and Reasearch*, January 2015.
- [33] D. Gatinel, «Tomographie cornéenne,» January 2025. [En ligne]. Available: <https://www.gatinel.com/chirurgie-refractive/bilan-preoperatoire/tomographie-corneenne/>.
- [34] G. Y. e. al, «Corneal Topography and Soft Contact Lens Fit,» *Optometry and Vision Science : The american Academy of Optometry*, April 2010.
- [35] D. R. I. e. al, «Principles of operation, accuracy and precision of an Eye Surface Profiler,» *Ophthalmic and Physiological Optics*, May 2016.
- [36] «Eye Surface Profiler,» Eaglet, 2026. [En ligne]. Available: www.eaglet-eye.com/.
- [37] H. S. e. al, «Comparison of anterior chamber depth measured by three different anterior segment analysis systems,» *European Platform for Photodynamic Medicine*, February 2025.
- [38] K. T. S. Sen, UltraSound Biometry, January 2024.
- [39] R. N. A. H. M. Al-Farhan, «Anterior segment biometry using ultrasound biomicroscopy and the Artemis-2 very high frequency ultrasound scanner,» *Clinical Ophtalmology*, pp. 141-147, January 2013.
- [40] A. L. A. Rizzuti, Optical Biometry, April 2023.
- [41] G. U. A. e. al, «Measuring anterior chamber depth with Orbscan Topography System,» *The Journal of Cataract & Refractive Surgery*, November 1997.
- [42] L. Hillman, «Clearing up the confusion: get the right anterior chamber depth for ICL,» 2024. [En ligne]. Available: <https://www.eyeworld.org/2024/clearing-up-the-confusion-get-the-right-anterior-chamber-depth-for-icl/>.
- [43] R. L. e. al, «Comparison of anterior chamber depth measurements using the IOLMaster, scanning peripheral anterior chamber depth analyser, and anterior segment optical coherence tomography,» *British Journal of Ophtalmology*, February 2007.

- [44] Python, «What is Python ? Executive,» Python, September 2009. [En ligne]. Available: www.python.org/doc/essays/blurb/.
- [45] S. e. al, «Prediction of anterior ocular surface sagittal heights using Placido-based,» *Ophthalmic and Physiological Optics*, September 2022.
- [46] M. e. al, «An analysis of anterior scleral shape and its role in the design and fitting of scleral contact lenses,» *Contact Lens & Anterior Eye*, p. PubMed, 2017.

Annexes

FICHE DE RECEUIL DE DONNEES DE LA HAUTEUR SAGITTALE CORNEO-SCLERALE

Etat civile

Nom :

Prénom :

Age :

Sexe : F ☐, M ☐

Antécédents oculaires

Etat réfractif :

Kératocône : oui ☐ non ☐ suspicion ☐

Glaucome : oui ☐ non ☐ suspicion ☐

Chirurgie réfractive (Lasik,PKR) : oui ☐, non ☐

Greffe cornéenne oui ☐, non ☐

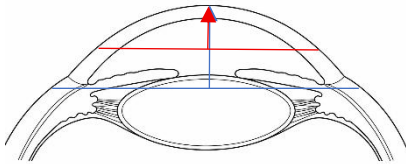
Pathologie cornéenne : oui ☐, non ☐

Pathologie de la Chambre antérieure : oui ☐, non ☐

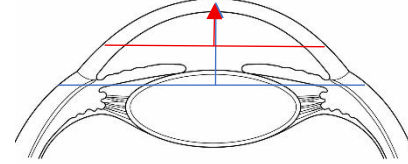
Pathologie du Cristallin : oui ☐, non ☐

Porteur de lentilles : oui ☐, non ☐ Détails :

OD



OG



Paramètres cornéens

P (facteur de forme) :

E (Excentricité cornéene) :

Q (Asphéricité cornéene):

Symétrie cornéene :

Kératométrie :

P (facteur de forme) :

E (Excentricité cornéene) :

Q (Asphéricité cornéene):

Symétrie cornéene :

Kératométrie :

Données topographiques (OCULUS-PENTACAM)

SAG CC ($\Phi=9\text{mm}$):

SAG CC ($\Phi=\text{DHIV}$):

Diamètre cornéen (Φ) :

PCA(Epi) :

SAG SCL ($\Phi=15\text{mm}$) :

SAG CC ($\Phi=9\text{mm}$):

SAG CC ($\Phi=\text{DHIV}$):

Diamètre cornéen (Φ) :

PCA(Epi) :

SAG SCL ($\Phi=15\text{mm}$) : :

Données OCT-SA (YALKaid)

SAG CC:.....

Diamètre cornéen (Φ) :.....

PCA (Endo) :.....

SAG SCL :

Corde Sclérale	SAG
15 mm	

SAG CC:.....

Diamètre cornéen (Φ) :.....

PCA (Endo) :.....

SAG SCL :

Corde Sclérale	SAG
15 mm	

Données Auto-kérato-réfractomètre (i-optik KR 9800)

Kératometrie	K1	K2	Moyenne
Centrale			
90°-12H			
0°-3H			
270°-6H			
180°-9H			

Kératometrie	K1	K2	Moyenne
Centrale			
90°-12H			
0°-3H			
270°-6H			
180°-9H			

Calcule SAG Excel en fonction de la kératometrie obtenue

Corde	SAG
DHIV =	
D-SCL= 15mm	

Corde	SAG
DHIV =	
D-SCL= 15mm	

Comparaison finale

Instruments	SAG -CC	SAG-SCL-15
PENTACAM		
YALKOID		
I-OPTIK-SAGISIM		

Instruments	SAG -CC	SAG-SCL-15
PENTACAM		
YALKOID		
I-OPTIK-SAGISIM		

