



<http://portaildoc.univ-lyon1.fr>

Creative commons : Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale
- Pas de Modification 4.0 France (CC BY-NC-ND 4.0)



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.fr>



INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNIQUES DE LA READAPTATION

Directeur Professeur Jacques LUAUTE

ETUDE DE L'IMPACT DU PRESBYLASIK SUR LA VISION BINOCULAIRE :
COMPARAISON ENTRE MONOVISION ET MULTIFOCALITÉ CORNÉENNE

MEMOIRE présenté pour l'obtention du

CERTIFICAT DE CAPACITE D'ORTHOPTISTE

par

DINGEON Ilona – DUHAMEL Matteo

Autorisation de reproduction

LYON, le

17 juin 2025

Professeur Ph. DENIS
Responsable de l'Enseignement
Mme E. LAGEDAMONT
Directrice des Etudes

2025-14

Président
Pr Bruno LINA

Vice-président CA
Mme Sandrine CHARLES

Vice-président CFVU
Mme Julie-Anne CHEMELLE

Vice-président Commission de
Recherche
M. Arnaud BRIOUDE

Directeur Général des Services par intérim
M. Gaël ASTIER

Secteur Santé

U.F.R. de Médecine Lyon Est
Directeur
Pr. RODE Gilles

U.F.R de Médecine Lyon-Sud
Charles Mérieux
Directeur
Pr PAPAREL Philippe

Comité de Coordination des
Etudes Médicales (CCEM)
Pr PAPAREL Philippe

U.F.R. Des Sciences et
Techniques des Activités
Physiques et Sportives
(S.T.A.P.S.)
Directeur
M. BODET Guillaume

U.F.R d'Odontologie
Directeur
Pr. MAURIN Jean-Christophe

Institut des Sciences Pharmaceutiques
et Biologiques
Directeur
Pr DUSSART Claude

Institut des Sciences et Techniques de
Réadaptation
Directeur
Pr LUAUTE Jacques

Secteur Sciences et Technologies

Institut des Sciences Financières et d'Assurance (I.S.F.A.)
M. ROBERT Christian

Institut National Supérieur du Professorat et de l'éducation (INSPé)
Directeur
M. CHAREYRON Pierre

UFR de Sciences
Directeur
M. DEZLUS Olivier

POLYTECH LYON
Directeur
Pr PERRIN Emmanuel

IUT LYON 1
Directeur
M. MASSENZIO Michel

Observatoire astronomique de Lyon
Directeur
M. GUIDERDONI Bruno

UFR Biosciences
Directrice
Mme GIESELER Kathrin

Département Génie Electrique et des procédés (GEP)
Directrice
Mme CAVASSILA Sophie

Département informatique
Directrice
Mme BOUAKAZ BRONDEL Saida

Département Mécanique
Directeur
M. BUFFAT Marc

Remerciements

Nous tenons à exprimer notre gratitude à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de notre mémoire.

Tout d'abord, un grand merci au Dr Esminezhad, notre maître de mémoire, pour nous avoir accompagnés avec ses connaissances ainsi que ses précieux conseils. Nous tenons également à le remercier, ainsi que le Dr. Boujnah du centre Kléber, pour avoir gentiment accepté d'intégrer leurs patients dans notre étude.

Nos sincères remerciements au Professeur Denis, directeur de l'école d'Orthoptie de Lyon ; à Mme Lagedamont, directrice de la formation, ainsi qu'à tous les enseignants et encadrants qui nous ont soutenus tout au long de notre formation d'orthoptie.

Petit clin d'œil à Mme Karen Ponton et Mme Justine Thomas pour avoir supervisé les plannings des patients du docteur Esminezhad ainsi que ceux du docteur Boujnah afin que l'on mène à bien nos bilans orthoptiques.

Un grand merci à tous les patients qui ont accepté de faire partie de notre étude puisque, sans eux, ce mémoire n'aurait tout simplement pas pu voir le jour.

Sans oublier Madame Véronique Villalon pour sa disponibilité et l'organisation dans nos études.

Merci à nos camarades de promotion, pour leur entraide et leur relecture tout au long de cette aventure.

Enfin, nous tenons à remercier nos familles et nos proches pour leur bienveillance et soutien durant ces 3 années d'étude.

A tous, merci infiniment.

Table des matières

REMERCIEMENTS.....	4
INTRODUCTION	8
I. ANATOMIE DE LA CORNEE	9
A. EMBRYOLOGIE	9
B. INNERVATION ET VASCULARISATION	9
C. METABOLISME	9
D. GENERALITE SUR LA CORNEE.....	9
E. LES COUCHES DE LA CORNEE	11
1. <i>Les cellules constitutives des couches cornéennes</i>	11
2. <i>Les cellules résidentes.....</i>	11
a) Le film lacrymal	11
b) L'épithélium cornéen.....	12
c) La couche de Bowman	13
d) Le stroma	13
e) La membrane de Descemet	13
f) L'endothélium	14
II. LA PRESBYTIE.....	15
A. ANATOMIE DU SYSTEME ACCOMMODATIF	15
1. <i>Anatomie du cristallin</i>	15
2. <i>Anatomie des muscles ciliaires.....</i>	16
3. <i>Anatomie de la zonule.....</i>	16
B. PRINCIPE DE L'ACCOMMODATION.....	17
1. <i>Principales théories de l'accommodation.....</i>	17
2. <i>Physiologie de l'accommodation.....</i>	18
C. APPLICATIONS CLINIQUES.....	18
1. <i>Parcours d'accommodation.....</i>	18
2. <i>Mesure de l'accommodation.....</i>	19
D. VIEILLISSEMENT DU SYSTEME ACCOMMODATIF : LA PRESBYTIE	20
1. <i>Modification anatomique du système accommodatif avec l'âge.....</i>	20
2. <i>Impact fonctionnel de la presbytie et évolution avec l'âge</i>	21
3. <i>Épidémiologie de la presbytie.....</i>	21
E. LA PRISE EN CHARGE DE LA PRESBYTIE	21
1. <i>Le diagnostic de la presbytie</i>	21
2. <i>La prise en charge optique</i>	21
a) Lunettes	21
b) Lentilles	22
3. <i>La prise en charge chirurgicale.....</i>	22
III. LES DIFFERENTS LASERS	23
A. PKR (PHOTOKERATECTOMIE A VISEE REFRACTIVE)	23
1. <i>La technique PKR.....</i>	23
a) Histoire et développement	23
b) Description de la procédure.....	23
2. <i>Sureté et efficacité du PKR</i>	23
a) Indications actuelles.....	23
b) Résultats et qualités visuelles	23
c) Complications.....	23
3. <i>Évaluation et perspectives de la procédure PKR.....</i>	24
a) Avantages.....	24
b) Inconvénients.....	24
B. LASIK (LASER IN SITU KERATOMILEUSIS).....	24
1. <i>La technique LASIK</i>	24

a)	Histoire et développement	24
b)	Description de la procédure.....	24
2.	<i>Sureté et efficacité du LASIK</i>	24
a)	Indications actuelles.....	24
b)	Résultats et qualités visuelles	24
c)	Complications.....	25
3.	<i>Évaluation et perspectives de la procédure LASIK</i>	25
a)	Avantages.....	25
b)	Inconvénients.....	25
C.	SMILE	25
1.	<i>La technique SMILE</i>	25
a)	Histoire et développement	25
b)	Description de la procédure.....	25
2.	<i>Sureté et efficacité du SMILE</i>	26
a)	Indications actuelles.....	26
b)	Résultats et qualités visuelles	26
c)	Complications.....	26
3.	<i>Évaluation et perspectives de la procédure SMILE</i>	26
a)	Avantages.....	26
b)	Inconvénients.....	26
c)	Perspectives de développement.....	27
IV.	LA CHIRURGIE REFRACTIVE	28
A.	MONOVISION	28
1.	<i>Principe</i>	28
2.	<i>Méthodes</i>	28
3.	<i>Population</i>	28
4.	<i>Avantages</i>	28
5.	<i>Limites</i>	29
B.	MULTIFOCALITE CORNEENNE	29
1.	<i>Définition et principe</i>	29
2.	<i>Plateforme presbyMAX de Schwind</i>	29
3.	<i>Population</i>	30
4.	<i>Limites</i>	30
V.	LA PLACE DE L'ORTHOPTIE DANS LA CHIRURGIE REFRACTIVE	31
A.	IMPACT DE LA CHIRURGIE REFRACTIVE SUR LA VISION BINOCULAIRE	31
1.	<i>Chirurgie réfractive classique</i>	31
2.	<i>Chirurgie de la presbytie</i>	31
B.	CONTRE-INDICATION A LA CHIRURGIE DE LA PRESBYTIE SUR LE PLAN ORTHOPTIQUE	32
C.	LE BILAN ORTHOPTIQUE	32
1.	<i>Interrogatoire</i>	33
2.	<i>Bilan sensoriel</i>	33
3.	<i>Bilan moteur</i>	33
4.	<i>Résultats</i>	33
VI.	PARTIE PRATIQUE	35
A.	INTRODUCTION	35
B.	MATERIEL ET METHODE	35
1.	<i>Type d'étude</i>	35
2.	<i>Population étudiée</i>	36
3.	<i>Procédure chirurgicale</i>	36
4.	<i>Evaluation préopératoire et postopératoire</i>	36
5.	<i>Bilan orthoptique</i>	37
6.	<i>Analyse statistique</i>	37
C.	RESULTATS	38
1.	<i>Comparaison intra-groupe</i>	38
2.	<i>Comparaison inter-groupe</i>	41

D.	DISCUSSION	43
E.	CONCLUSION.....	44
VII.	BIBLIOGRAPHIE	45
ANNEXES		48
A.	BILANS ORTHOPTIQUES PRE ET POSTOPERATOIRE	49
B.	STATISTIQUES : FIGURES	61
1.	<i>Comparaison intra-groupe</i>	61
2.	<i>Comparaison inter-groupe (monovision vs multifocalité cornéenne)</i>	70

Introduction

La presbytie est une condition physiologique, due au vieillissement de l'œil, qui affecte tous les individus à partir d'environ 40 ans. Elle se définit comme une diminution progressive de la capacité accommodative du cristallin et se traduit fonctionnellement par une baisse de vue en vision de près. On observe, de nos jours, une forte demande dans l'autonomie visuelle que ce soit d'un point de vue fonctionnel ou esthétique. La chirurgie réfractive, réservée à l'origine pour la myopie, l'hypermétropie et l'astigmatisme n'a cessé de se développer et permet à présent de prendre en charge la presbytie avec, notamment, la technique du PresbyLASIK.

Deux méthodes chirurgicales différentes nous ont intéressés : la monovision, qui vise à corriger un œil en vision de loin et l'autre en vision de près, et la multifocalité cornéenne, qui vise à créer plusieurs zones focales sur le même œil. Ces techniques permettent ainsi d'obtenir une bonne acuité visuelle de près comme de loin sans le port d'un système optique progressif. Cependant, leurs impacts sur la vision binoculaire, nécessaire au confort visuel, restent encore incertains.

C'est pour cela que nous avons choisi comme objectif d'étudier l'impact du PresbyLASIK sur l'équilibre binoculaire, en comparant les effets de la monovision et de la multifocalité cornéenne.

Le choix de ce sujet nous a paru évident face au développement actuel des techniques de chirurgie réfractive, ainsi que de la demande toujours croissante des patients pour ce type d'intervention. En tant qu'orthoptistes, la vision binoculaire constitue le cœur de notre métier. Il nous a donc paru essentiel de pouvoir évaluer, d'un point de vue expérimental, l'impact de la chirurgie sur celle-ci. De plus, si de nombreuses études se penchent sur les capacités de récupération visuelle en monovision ou multifocalité, peu d'entre elles s'intéressent à leurs conséquences sur la vision binoculaire.

Par conséquent, nous nous sommes demandé si le PresbyLASIK a un impact différentiel sur la vision binoculaire selon qu'il soit réalisé en monovision ou en multifocalité cornéenne.

Notre hypothèse est que la multifocalité cornéenne, en préservant une symétrie relative entre les deux yeux, provoque moins de perturbations binoculaires que la monovision, qui induit une dissociation totale.

I. Anatomie de la cornée

A. Embryologie

Chez l'homme, la première manifestation de l'organogenèse de l'œil se manifeste à la quatrième semaine avec la formation de la vésicule optique, qui provient de l'ectoderme. La vésicule cristallinienne s'échappe de l'ectoderme et devient à cet endroit l'épithélium cornéen primitif. Ce premier ectoderme est constitué de deux couches cellulaires qui s'appuient sur un stroma acellulaire étroit. C'est sans doute lui qui a donné naissance à la couche de Bowman. L'épithélium se distingue à la fin de la sixième semaine et les microvillosités typiques se manifestent. Une première vague mésenchymateuse entre la vésicule cristallinienne et l'épithélium, toujours en arrière du stroma primitif, se déplace à la même période. Elle se répartit en une seule couche et constituera l'endothélium. Ce flux de cellules est issu de la crête neurale principale. Une deuxième vague de cellules d'origine mésodermique pénètre progressivement dans l'espace entre l'épithélium et l'endothélium pour constituer le stroma cornéen à la huitième semaine¹. Ces cellules ne semblent pas coloniser le stroma primitif, mais le repoussent en avant. Dès la dixième semaine, l'anatomie de la cornée est définitive ; la membrane de Descemet, la membrane basale de l'endothélium, commence à se développer. Le développement de l'œil va se poursuivre en arrière de l'ectoderme qui constituera les paupières².

B. Innervation et vascularisation

L'une des parties les plus innervées et les plus sensibles de l'organisme est la cornée, en raison du nombre très élevé des terminaisons nerveuses qu'on y trouve. Les nerfs ciliaires, qui sont issus de la branche ophtalmique du nerf trijumeau, sont responsables de l'innervation sensitive cornéenne³. De manière radiaire, les fibres nerveuses pénètrent la cornée dans sa périphérie, puis se déplacent en avant pour constituer un plexus sous-épithérial, et se terminent au niveau de l'assise cellulaire intermédiaire de l'épithélium. Après leur entrée dans la cornée claire, les fibres nerveuses perdent rapidement leur myéline. Il existe également des fibres nerveuses sympathiques dans la cornée. Très peu de nutriments et d'énergie sont apportés par le sang au tissu cornéen, car la cornée est l'un des rares tissus avasculaires de l'organisme. Au limbe, une arcade vasculaire est formée par les artères ciliaires antérieures, qui dérivent de l'artère ophtalmique. Des branches de l'artère faciale dérivée de la carotide externe s'anastomosent avec cette arcade².

C. Métabolisme

Les cellules épithéliales et endothéliales de la cornée sont extrêmement actives sur le plan métabolique. L'acide adénosine triphosphorique (ATP) est nécessaire pour maintenir cette activité. La glycolyse produit de l'ATP dans des conditions aérobies (dans l'air ambiant). La cornée, y compris les cellules épithéliales, reçoit du glucose par diffusion de l'humeur aqueuse. L'oxygène cornéen est principalement fourni par le film lacrymal par contact avec l'air. Il y a cependant une faible quantité d'oxygène cornéen qui provient de la diffusion de l'oxygène de l'humeur aqueuse et de la circulation limbique. Une hypoxie grave et prolongée peut provoquer la néovascularisation superficielle à partir du limbe afin de garantir un apport supplémentaire d'oxygène².

D. Généralité sur la cornée

Le globe oculaire est constitué de la cornée, un tissu transparent et avasculaire, qui entre en contact direct avec le monde extérieur. Le film lacrymal recouvre sa face antérieure, tandis que sa face postérieure est immergée dans l'humeur aqueuse de la chambre antérieure de l'œil.

La cornée d'un enfant à la naissance mesure 9 mm de diamètre horizontal et 10 mm de diamètre vertical⁴.

Elle est presque ronde chez l'adulte, avec une taille moyenne de 11,8 mm à l'horizontale et 11,3 à la verticale. La moyenne de son épaisseur centrale est de 550 um et elle reste presque constante avec l'âge. Elle a une épaisseur d'environ 710 um en périphérie. Elle se développe de manière régulière du centre vers la périphérie⁵.

Son rayon de courbure à la face externe (7,7mm) est supérieur au rayon de courbure à la face interne (6,5mm). Au centre, la courbure cornéenne est plus prononcée qu'en périphérie. Il s'agit donc d'une cornée asphérique que l'on appelle "prolate". Le vertex est la partie la plus courbée de la cornée située au centre. En général, il est parallèle à l'axe optique de l'œil. La courbure et l'épaisseur des cornées varient en fonction de l'ethnie. En moyenne, sa taille est de 49 dioptries à la naissance. Elle se transforme vite pour atteindre 45 dioptries à 4 mois puis atteint 43 dioptries à 20 ans⁴.

La cornée est alimentée par diffusion. Les larmes apportent les éléments nécessaires par l'intermédiaire de la surface cornéenne. Elle est appelée voie transépithéliale.

La présence d'une humeur aqueuse favorise l'apport nutritionnel par voie transendothéliale. De plus, aucune cellule pigmentée n'est présente dans la cornée⁶.

La cornée a pour principales fonctions de préserver les tissus intraoculaires (paroi), de transmettre la lumière (transparence) et de focaliser les images (pouvoir dioptrique).

L'organisation des fibres de collagène dans le stroma garantit la transparence de la cornée. Le diamètre moyen de chaque fibre est toujours le même, tout comme la distance entre chaque fibre. Cela autorise la traversée d'un rayon lumineux par la cornée sans être complètement réfléchi. En cas de non-respect de ces deux constantes, la transparence est mise en péril.

Le film lacrymal, l'épithélium, la couche de Bowman, le stroma, la membrane de Descemet et l'endothélium forment la cornée, d'avant en arrière. Deux entités supplémentaires sont ajoutées : la lame basale de l'épithélium et la couche prédescemétique de Dua, qui n'est pas une couche anatomique en soi mais une couche fonctionnelle de la cornée postérieure qui peut être individualisée lors des dissections cornéennes².

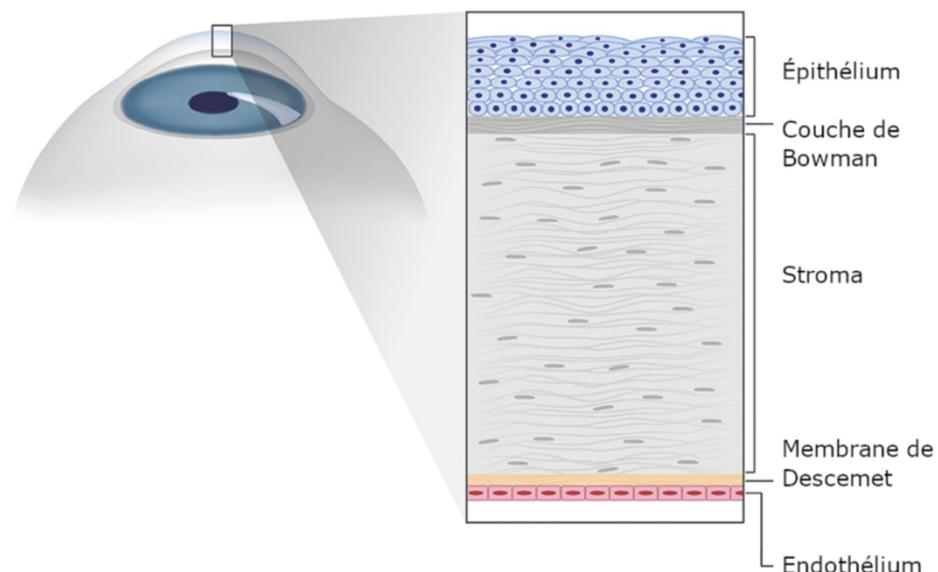


Figure 1 : Schéma des 5 couches de la cornée (d'après researchgate.net)

E. Les couches de la cornée

1. Les cellules constitutives des couches cornéennes

Elles sont propres à la cornée. Cela comprend les cellules épithéliales de la cornée, les kératocytes et les cellules endothéliales de la cornée. A savoir que l'âge entraîne une diminution des densités cellulaires kératocytaires et endothéliale.

2. Les cellules résidentes

Elles se trouvent à l'état homéostasique ou par migration temporaire. Elles se retrouvent également dans d'autres tissus. Les cellules dendritiques non activées, telles que les cellules de Langerhans, les macrophages et les mélanocytes, sont représentées.

Le film lacrymal, l'épithélium, la membrane basale de l'épithélium, la couche de Bowman, le stroma, la membrane de Descemet et l'endothélium sont les couches cornéennes, de l'extérieur vers l'intérieur⁴.

a) *Le film lacrymal*

Il recouvre l'extérieur de la cornée, la préserve de la déshydratation et favorise la régularité épithéliale. Il est constitué de trois couches :

- une couche profonde mucinique
- une couche intermédiaire aqueuse
- une couche externe lipidique

Les cellules caliciformes de l'épithélium conjonctival et les glandes de Henlé produisent la couche de mucus. Les glandes lacrymales principales et accessoires de Krause et Wolfring produisent la couche aqueuse. Les mucines libres, les électrolytes, les facteurs de croissance, les hormones, les cytokines, les immunoglobulines et les débris cellulaires sont présents dans cette substance. Les glandes sébacées palpébrales de Meibomius, de Zeiss et de Moll produisent la double couche lipidique superficielle.

Plus de 98% du volume du film lacrymal est représenté par de l'eau.

Phase lacrymale	Lieu de production	Rôle physiologique
Lipidique : externe (0,1Um)	Glandes de Meibomius palpébrales	- prévention de l'évaporation - également sur l'air cornéo-conjonctivale
Aqueuse : moyenne (7Um)	Glandes lacrymales	- hydratation cornéenne - protection cornéenne - nettoyage de surface
Mucinique : interne (0,05Um)	Cellules caliciformes conjonctivales	- relation avec les cellules épithéliales - hydrophilie des glycosaminoglycanes

Tableau 1 : Les 3 phases du film lacrymal avec leurs fonctions spécifiques (D'après le livre de Bourges)

Ce film, en plus de son effet lubrifiant et réfractif, a pour fonction d'apporter à la cornée de l'oxygène, sous forme d'oxygène dissous dans la phase aqueuse, ainsi que des protéines antimicrobiennes essentielles pour préserver son intégrité face aux nombreuses agressions extérieures.

L'hypertonie du film lacrymal joue également un rôle osmotique dans l'hydratation du stroma antérieur. Les variations nyctémérales de l'épaisseur cornéenne (plus élevée le matin que le soir) sont expliquées par cette osmolarité qui augmente avec l'évaporation des larmes au cours de la journée. Chaque clignement entraîne la dégradation de la couche lipidoaqueuse du film lacrymal, puis sa reconstruction sur la couche de mucus qui reste attachée aux microvillosités des cellules épithéliales cornéennes et conjonctivales².

Son osmolarité est de 310 mEq et son pH compris entre 7,10 et 7,50 selon les situations environnementales⁴.

Le temps de rupture du film lacrymal (BUT : break-up time) est un moyen clinique simple d'analyser sa qualité.

b) *L'épithélium cornéen*

L'épithélium cornéen est un épithélium structuré et régulier présentant une épaisseur d'environ 50 um. La couche basale de l'épithélium cornéen est une couche cellulaire unique et parallèle aux autres couches. Il existe ainsi peu de variations de l'épaisseur cornéenne et aucune irrégularité de la couche basale. Cela permet de minimiser les phénomènes de dispersion lumineuse. Il est un épithélium pavimenteux stratifié et comprend cinq à six assises de cellules. Il est formé de trois couches : couche superficielle, couche intermédiaire et couche basale. (De la plus externe à la plus profonde)

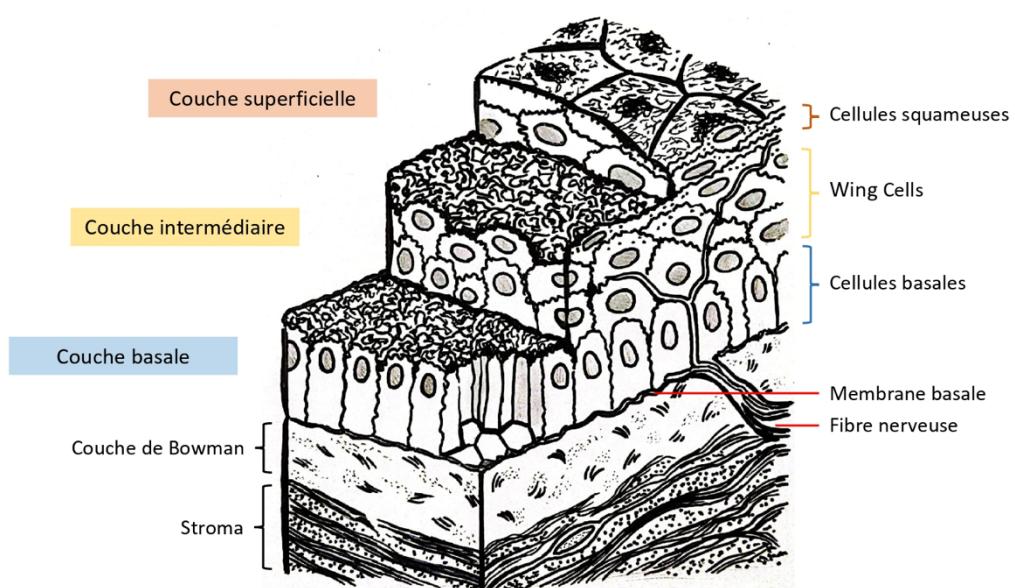


Figure 2 : Schéma des couches de l'épithélium cornéen

Les cellules de la couche basale présentent une forme cylindrique (colonne). Les hémidesmosomes les fixent à la membrane basale. Néanmoins, dans certaines affections telles que le diabète, ces hémidesmosomes sont limités voire complètement absents. Il en découle alors une fragilité épithéliale réelle.

La membrane basale est la couche qui sépare l'épithélium de la membrane de Bowman. Elle est constituée de collagène IV.

La couche intermédiaire est composée de deux ou trois assises de cellules. Il s'agit de cellules de transition, parfois connues sous le nom de « wing cells ». Elles sont, en effet, polygonales, avec une face antérieure convexe et une face postérieure concave (forme d'aile d'oiseau).

Les couches les plus superficielles sont formées de cellules allongées et aplatis, et sont divisées en deux ou trois couches. Des microvillosités superficielles au niveau apical augmentent la surface des échanges métaboliques et renforcent l'adhérence du film lacrymal.

Lors de la desquamation, la plupart des surfaces épithéliales perdent leur couche de cellules superficielles. Les cellules superficielles sont en contact avec le film lacrymal lors de cette

desquamation. La couche de cellules basales de l'épithélium fournit les nouvelles cellules, d'où son nom de « couche germinative »⁶. Ce renouvellement se fait en 7 à 14 jours².

c) *La couche de Bowman*

En microscopie optique, la membrane de Bowman semble lisse et homogène. Elle mesure 8 à 14 um d'épaisseur et s'affine légèrement avec l'âge, représentant environ 2% de l'épaisseur cornéenne totale⁴.

La fonction et l'origine de la membrane de Bowman reste peu connues. C'est une couche acellulaire située entre la membrane basale épithéliale et le stroma.

Au niveau de la membrane de Bowman, les seules cellules présentes sont les axones des cellules nerveuses qui émergent du stroma superficiel et la traversent pour rejoindre l'épithélium. Il est également possible de trouver des fibroblastes en périphérie.

Elle est constituée de fibres de collagène de type V qui sont orientées dans toutes les directions, créant ainsi un réseau. Le diamètre de ces fibres de collagène est inférieur (24 à 27 nm) à celui du stroma (32 à 36 nm). La substance fondamentale est constituée de glycosaminoglycans qui occupent l'espace entre les fibres de collagène.

Cette couche se termine brusquement au niveau du limbe. La présence d'une rupture ou d'une autre lésion dans la membrane de Bowman provoque la formation d'une cicatrice. Il n'existe aucune régénération à ce stade⁶.

d) *Le stroma*

Il représente 90% du tissu cornéen et est composé d'une matrice extracellulaire, de kératocytes et de fibres nerveuses. Cette structure est pratiquement acellulaire car les cellules ne représentent que 2 à 3% du volume du stroma, tandis que le reste de ce volume est occupé par la matrice extra-cellulaire (principalement composée de collagène et de protéoglycans). Les collagènes du stroma sont essentiellement le collagène I, dans une moindre mesure, les collagènes III, V et VI.

Les molécules de collagène se combinent pour former des fibrilles, qui se regroupent pour former des fibres de collagène. Il y a 250 à 300 lamelles superposées de ces fibres, avec une épaisseur moyenne de 2 um. Chaque lamelle traverse la cornée du limbe au limbe parallèlement à la surface. À l'intérieur des fibres de collagène, la transparence cornéenne est due à la grande régularité du diamètre (22,5 à 35 nm) et à l'espacement des fibrilles de collagène entre elles (41,5 nm). La transparence cornéenne nécessite une organisation régulière des fibrilles de collagène.

Les cornées adultes sont principalement constituées de protéoglycans contenant du kératane sulfate et du dermatane sulfate. Ils jouent un rôle essentiel dans la régulation de l'espacement interfibrillaire et de l'hydratation stromale, en raison de la pression de gonflement qu'ils exercent au niveau de ces espacements et de leur fonction d'absorption et de rétention des molécules d'eau.

Les kératocytes constituent un réseau en trois dimensions où chaque cellule est connectée à ses voisines par des gap junctions. Grâce à cette structure, ils peuvent interagir activement et former une entité fonctionnelle unique. Lors d'une agression les kératocytes proches du site de l'altération perdent leurs liens, se transforment en fibroblastes et se focalisent sur la restauration du stroma altéré. Les kératocytes jouent un rôle crucial dans la protection de la matrice extracellulaire. Ils produisent ainsi des molécules de procollagène et des glycosaminoglycans. Parallèlement, ils produisent des enzymes qui dégradent le collagène².

e) *La membrane de Descemet*

La composition de cette lame basale de l'endothélium est principalement constituée de collagène IV et de laminine. Elle devient plus épaisse avec l'âge. Son épaisseur est de 3 um à la

naissance et de 8 à 10 um à l'âge adulte. Sa résistance à la dégradation enzymatique des métalloprotéases est remarquable. En cas de rupture, cette membrane ne peut pas se régénérer. Cependant, il est possible que les cellules endothéliales migrent sur le stroma dénudé à l'endroit d'une déchirure descemétique et recouvrent la zone lésée, ce qui évite l'œdème cornéen. Il est possible qu'elle se sépare accidentellement du stroma cornéen ou qu'elle soit dissociée par chirurgie².

f) *L'endothélium*

Son apparence est celle d'une couche monocellulaire placée sur la face postérieure de la membrane de Descemet. Les cellules endothéliales ont une épaisseur de 5 um et une largeur de 20 um. Elles sont principalement de forme hexagonale. Ces cellules présentent une apparence homogène dans un endothélium normal. Chez un adulte jeune, la densité cellulaire est de 3500 cellules/mm². Ce nombre diminue de manière constante avec l'âge.

Le polymégathisme se manifeste par une augmentation de taille de ces cellules, tandis que le pléomorphisme se manifeste par une perte de la structure hexagonale.

Chez l'homme, les cellules endothéliales ne peuvent pas se diviser *in vivo*. Si un traumatisme endothérial localisé se produit, les cellules de voisinage s'étendent, s'élargissent et remplissent l'espace. Leur densité est réduite.

Des jonctions étroites (tight junctions) et des jonctions lâches (gap junctions) relient les cellules endothéliales entre elles. Il n'y a pas de desmosome à ce niveau.

La perméabilité de l'endothélium aux électrolytes et aux petites molécules, ainsi qu'à l'eau, est due à ce type de jonctions intercellulaires.

L'endothélium joue un rôle crucial dans la régulation de l'hydratation cornéenne, afin de maintenir les 78 % d'eau dans le stroma constants. Les flux de lactate et les pompes Na/K/ATPase sont étroitement liés à ce mécanisme².

II. La presbytie

La presbytie, dérivant du grec ancien πρέσβυς (presbus) signifiant « vieux » et ὄψ (ops) signifiant « vue », est une diminution physiologique liée au vieillissement de la capacité accommodative de l’œil⁷. Cette diminution est la cause d’une incapacité de l’individu à accomplir des tâches visuelles de près, se manifestant approximativement vers 45 ans⁸.

A. Anatomie du système accommodatif

L’accommodation résulte de l’interaction continue entre trois éléments de l’œil : le muscle ciliaire, la zonule de Zinn et le cristallin.

1. Anatomie du cristallin

Le cristallin est une lentille biconvexe transparente, ayant la particularité d’être élastique. Il est constitué d’une face antérieure (cristalloïde antérieure) et d’une face postérieure (cristalloïde postérieure), cette dernière étant plus convexe que la première. Ces deux faces se réunissent au niveau de l’équateur en périphérie et contiennent chacune un pôle. La ligne joignant ces deux pôles constitue l’axe du cristallin, qui se confond avec l’axe optique. Au repos, il présente un diamètre d’environ 10 mm, une épaisseur de 4 mm et une puissance réfractive d’environ 21 dioptres⁹ (un tiers du pouvoir réfractif de l’œil).

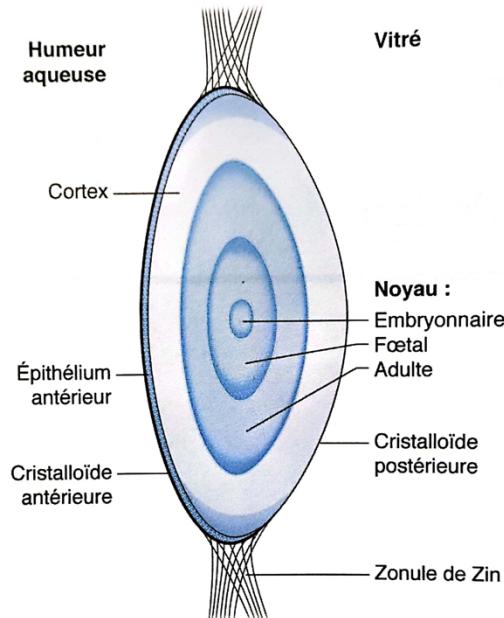


Figure 3 : Anatomie du cristallin (d’après Chirurgie de l’hypermétropie, de l’astigmatisme et de la presbytie, B. Cochener)

Du plus superficiel au plus profond, on retrouve trois principaux éléments : la capsule cristallinienne, l’épithélium cristallinien et la substance⁹ (constituée du noyau et du cortex). La capsule est un tissu souple, lâche et transparent. Il s’agit d’un ensemble de membranes basales d’épaisseur variable ayant plusieurs fonctions, et qui participe notamment au modelage du cristallin lors de l’accommodation¹⁰. L’épithélium cristallinien est un épithélium simple, qui tapisse toute la face antérieure du cristallin, dont la forme cellulaire varie selon la région concernée. En effet, il constitue une source continue de nouvelles fibres cristalliniennes, ces dernières n’étant que le produit de modifications morphologiques et fonctionnelles des cellules de l’épithélium¹¹. Ces fibres constituent

la substance du cristallin, elle-même structurée en deux parties : le noyau et le cortex. Elles adoptent une forme allongée en s'étendant du pôle antérieur au pôle postérieur et représentent la majorité du cristallin. Les fibres les plus anciennes sont les plus internes, elles composent le noyau ; tandis que les plus récentes (celles formées à partir de 10 ans) sont situées en périphérie et forment le cortex.

2. Anatomie des muscles ciliaires

Le muscle ciliaire est un muscle lisse situé au niveau des corps ciliaires, on le retrouve à la fois dans la pars plana et la pars plicata. Il s'insère, en postérieur, au niveau de la choroïde et en antérieur, à proximité du pont scléral et du trabéculum. On y retrouve trois groupes de fibres musculaires, distingués selon leur orientation et leur localisation. Les plus externes sont les fibres longitudinales qui se situent à proximité immédiate de la sclérotique. On retrouve, plus profondément, les fibres radiales à disposition oblique. Enfin, au niveau le plus interne, nous trouvons les fibres circulaires¹².

Le muscle ciliaire est prolongé par deux tendons : le tendon postérieur, inséré sur des structures mobiles au niveau de la choroïde et le tendon antérieur, qui est le seul à s'insérer sur un point fixe, l'éperon scléral. De ce fait, c'est principalement le tendon antérieur qui joue un rôle mécanique actif dans l'accommodation lors de la contraction du muscle ciliaire¹³.

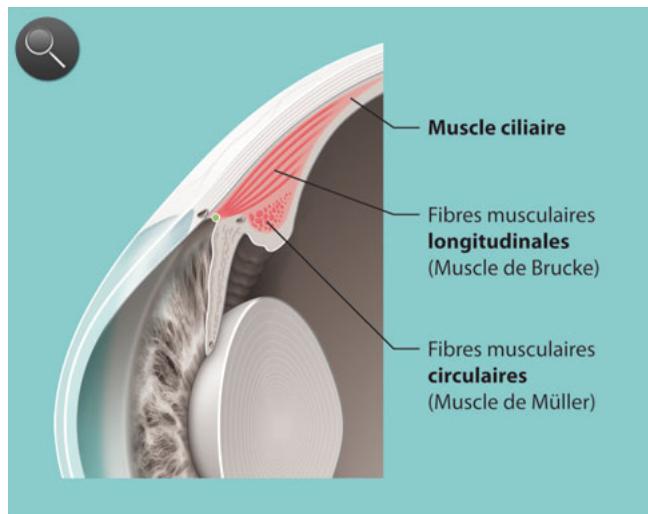


Figure 4 : Muscle ciliaire (d'après Presbytie : Rapport SFO 2012, B. Cochener)

Le muscle ciliaire reçoit une innervation parasympathique qu'il partage avec le muscle sphincter de la pupille. Les fibres pré-ganglionnaires prennent naissance au niveau du noyau d'Edinger-Westphal, puis, empruntent la branche inférieure du nerf oculomoteur (III). Elles font synapse au niveau du ganglion ciliaire et ce sont finalement les nerfs ciliaires courts qui viennent innérer le muscle ciliaire¹⁴.

3. Anatomie de la zonule

La zonule du Zinn est un réseau de microfibres extracellulaires riche en fibrilline qui maintient le cristallin centré dans l'œil et qui joue un rôle majeur dans l'accommodation¹⁵. Deux ensembles de fibres zonulaires, connectés entre eux, ont été mis en évidence : le système des « fibres principales » et celui des « fibres de tension ». Les fibres principales forment l'essentiel de la structure de la zonule et se divisent en deux branches, l'une allant vers la face antérieure du cristallin au niveau de l'équateur (fibres cilio-équatoriales), et l'autre allant vers la face postérieure (fibres cilio-capsulaire postérieures). Les fibres de tension quittent le système principal et vont jusqu'à l'épithélium ciliaire au sein des

vallées ciliaires (fibres orbiculo-ciliaires). Ces dernières agissent alors comme un point d'appui pour le système des fibres principales et jouent donc un rôle décisif lors de l'accommodation.

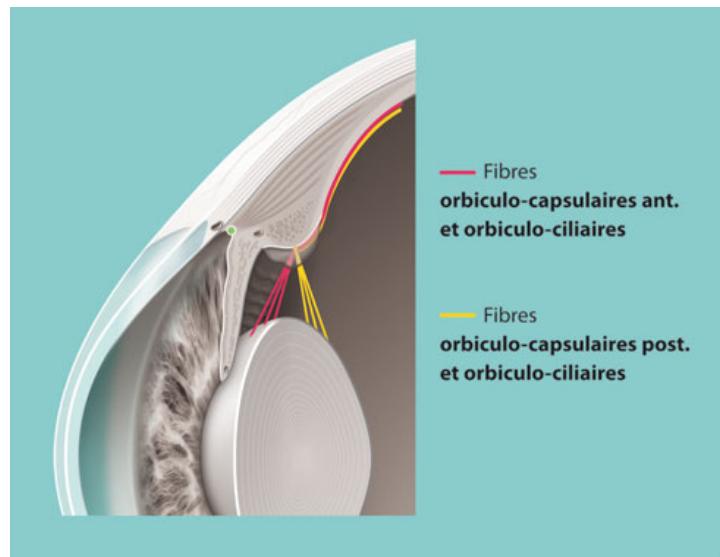


Figure 5 : Insertion ciliaire et cristallinienne des fibres zonulaires (d'après Presbytie : Rapport SFO 2012, B. Cochener)

Lorsque le muscle ciliaire se contracte et se projette vers l'avant, les fibres de tension se tendent, absorbant ainsi la traction des fibres zonulaires principales ancrées au niveau du cristallin. Cela permet aux fibres zonulaires principales antérieures de se relâcher, permettant au cristallin de devenir plus sphérique et d'augmenter sa puissance réfractive¹⁶. Lors du relâchement accommodatif, ce processus se déroule en sens inverse.

B. Principe de l'accommodation

1. Principales théories de l'accommodation

Différentes théories ont été proposées pour expliquer le mécanisme de l'accommodation. La principale d'entre elles est celle d'Helmotz (1867). Elle stipule que l'accommodation est essentiellement le fait d'une modification de la face antérieure du cristallin grâce à l'action du système muscle ciliaire - zonule. Il propose que lorsque système accommodatif est au repos, le cristallin est maintenu dans sa forme initiale par la tension des fibres zonulaires. C'est le relâchement de celle-ci par l'action du muscle ciliaire qui lui permet de diminuer son rayon de courbure et donc d'augmenter sa puissance optique¹⁷.

Tscherning rejette l'idée que c'est la relaxation de la zonule qui permettrait l'accommodation. Il propose une théorie où le muscle ciliaire agit de manière plus directe sur le cristallin en modifiant activement sa forme, en particulier à sa périphérie¹⁸. Cette théorie est aujourd'hui considérée comme obsolète.

On peut encore mentionner la théorie de Schachar qui distingue entre les forces des fibres zonulaires antérieures et postérieures d'une part et celle des fibres équatoriales d'autre part. Lors de l'accommodation, la tension zonulaire équatoriale augmenterait, tandis que la tension antérieure et postérieure serait diminuée (à la différence d'Helmotz chez qui toutes les fibres se relâchent). Cela résulterait en un bombement des surfaces centrales du cristallin et en un aplatissement des surfaces périphériques¹⁹. Ce n'est donc pas le relâchement de des fibres zonulaires qui permettrait l'accommodation mais plutôt une redistribution des leurs forces respectives. Cette théorie est controversée aujourd'hui et n'a pas été aussi largement validée par la communauté scientifique que celle d'Helmotz.

2. Physiologie de l'accommodation

L'accommodation est le résultat d'un phénomène complexe impliquant les trois structures détaillées plus haut. A l'état de repos, seules les fibres orbiculo-ciliaires sont relâchées. Tandis que toutes les fibres quittant le muscle ciliaire pour rejoindre le cristallin (fibres cilio-équatoriales et cilio-capsulaires) sont sous tension. Au niveau du cristallin, c'est la capsule équatoriale qui est tendue et celle aux pôles qui est relâchée. Sous l'influx parasympathique, le muscle ciliaire se contracte (fermeture du sphincter) et se projette vers l'avant, ce qui a pour effet d'inverser la distribution de la tension au niveau zonulaire. On observe donc une mise sous tension des fibres orbiculo-ciliaires. Puis, le relâchement des fibres cilio-équatoriales et cilio-capsulaires permet à la capsule cristallinienne équatoriale de se relâcher à son tour (et aux pôles de se mettre sous tension). Cela résulte en un bombement du cristallin qui permet l'augmentation de son pouvoir réfractif.

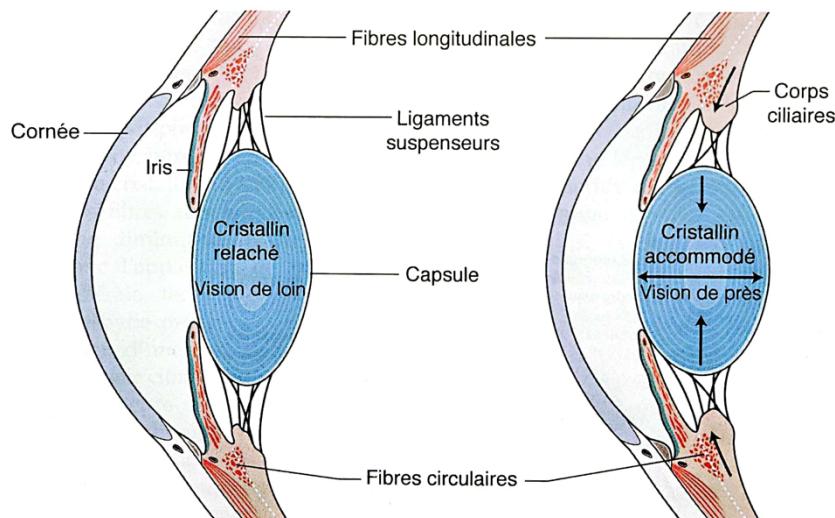


Figure 6 : Modification du cristallin lors de l'accommodation (d'après Chirurgie de l'hypermétropie, de l'astigmatisme et de la presbytie, B. Cochener)

La désaccommodation résulte du processus inverse. Le muscle ciliaire se relâche de manière passive à l'arrêt de la stimulation parasympathique. Les fibres zonulaires principales se mettent à nouveau sous tension, de même que la capsule cristallinienne dans sa majorité. En simplifiant, on peut dire qu'à l'état de repos du système accommodatif, le cristallin est sous tension. Tandis que lors d'un effort d'accommodation, le cristallin se relâche¹⁷.

C. Applications cliniques

1. Parcours d'accommodation

Pour définir la notion de parcours accommodatif, il est nécessaire d'introduire deux notions importantes : le punctum remotum (PR) et le punctum proximum d'accommodation (PPA). Le punctum remotum correspond au point le plus éloigné qu'un œil sain peut voir net sans accomoder. Le punctum proximum d'accommodation est le point le plus proche qu'un œil sain peut voir net en accommodant (accommodation maximale)²⁰. Ainsi, le parcours accommodatif (ou amplitude accommodative) correspond à la distance entre le punctum remotum et le punctum proximum, c'est-à-dire à la distance totale sur laquelle un individu est capable de voir net en augmentant progressivement son accommodation. On comprend donc que celui-ci varie tout au long de la vie et qu'il est nécessaire de tenir compte de l'âge du patient lorsqu'on le mesure en clinique. On peut déterminer le parcours accommodatif théorique selon l'âge à l'aide de la formule suivante²¹ :

$$\text{Amplitude accommodative (maximale)} = 25 - (0,4 \times \text{âge}).$$

L'évolution de l'amplitude accommodative au cours de la vie n'est pas uniforme. Elle diminue rapidement de 25 à 45 ans, puis on observe un ralentissement de cette baisse à partir de 45 – 50 ans jusqu'aux alentours de 70 ans où le PA devient quasi nul²².

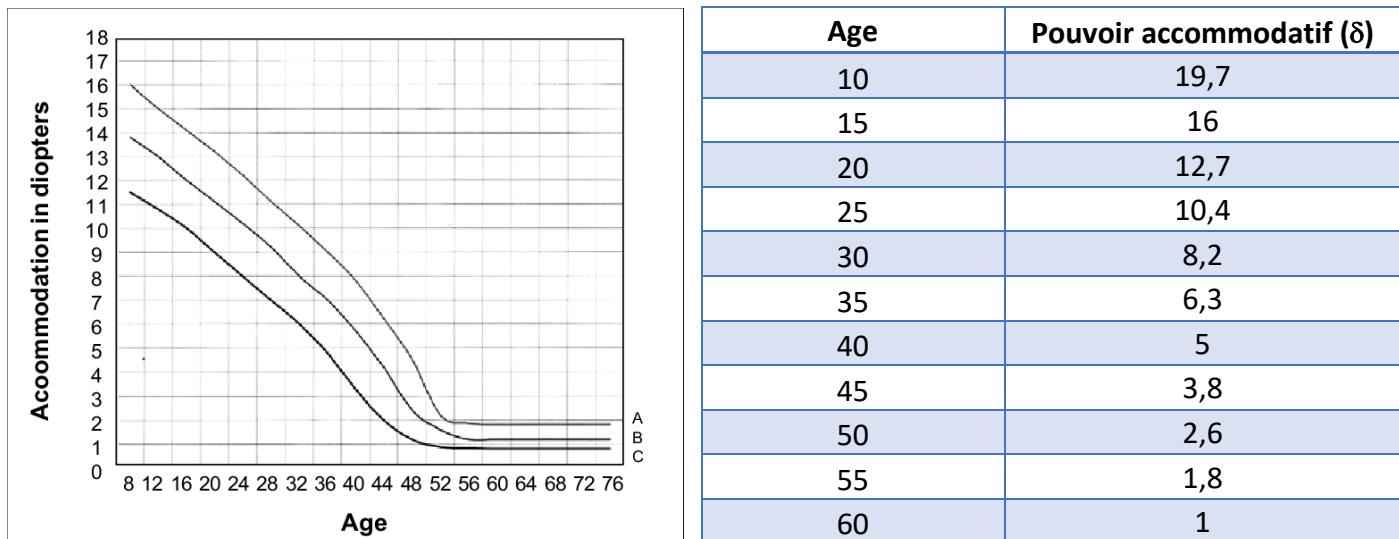


Figure 7 : Evolution de la réserve accommodative avec l'âge selon Duane

L'amplitude accommodative est classiquement exprimée en dioptries. En pratique, on le calcule de la manière suivante :

$$\text{Amplitude accommodative} = 1/\text{PPA} \text{ où le PPA est exprimé en m.}$$

Par exemple : Pour un patient de 20 ans sans aucun trouble organique ou réfractif, le PPA se trouvera approximativement à 10 cm. On aura alors un PA = $1/0,10 = 10$ dioptries.

Le parcours accommodatif est un outil clinique important dans le diagnostic des troubles accommodatifs dû à un problème d'amplitude, il est donc un examen fondamental dans le diagnostic de la presbytie. En revanche, un bon PPA n'exclut pas pour autant d'autres types de troubles accommodatifs. Il est possible retrouver un trouble de la flexibilité accommodative ou bien de la réponse accommodative, tout en ayant une amplitude dans la norme²³. Il est donc important, lors de l'examen de la fonction accommodative dans d'en évaluer les différents aspects.

Il est important de souligner que le parcours accommodatif est directement dépendant de l'état réfractif du patient. Un patient emmétrope aura un PR situé à l'infini et un PPA situé à distance finie (par exemple, environ 30 cm à 45 ans). En revanche, un myope aura un PR à distance finie et un PPA situé d'autant plus proche de lui que son amétropie sera importante. L'hypermétrope, à l'inverse, aura un PR virtuel (à l'arrière de la rétine) et un PPA plus éloigné que l'emmétrope du même âge. La dynamique accommodative chez un sujet est donc immédiatement reliée à son état réfractif et à la qualité de sa correction optique. Il est donc crucial d'examiner ce point de manière approfondie lors de la prise en charge du patient presbyte.

2. Mesure de l'accommodation

Il existe différentes manières d'évaluer l'accommodation, dépendantes de la fonction que l'on cherche apprécier. Il est important de préciser que tous les tests mentionnés ici doivent être réalisés avec la correction optique (totale) du patient.

Afin d'évaluer l'amplitude d'accommodation on peut calculer le parcours accommodatif. Il existe 2 méthodes d'examen : soit par push-up, soit par push-away. Le principe est le même, on cherche à déterminer le PPA de notre patient. Lors du push-up, on rapproche un point de fixation avec lettres (palette de Bernel, Gulden stick, etc.) de notre patient et on mesure la distance au nez à partir duquel ce texte devient flou. On obtient le parcours accommodatif en appliquant la formule : $PA = 1/d$ où d est la distance au nez (en m) et PA est exprimé en dioptries. La méthode du push-away consiste à faire l'inverse. On démarre avec le point de fixation proche du patient et on mesure la distance à partir de laquelle il voit le texte de manière nette, puis on applique la même formule. Cette méthode peut se réaliser en binoculaire ou monoculaire.

Un autre moyen d'évaluer l'amplitude accommodative est d'ajouter progressivement des verres concaves. Le patient porte sa correction optique et fixe une mire accommodative à 40 ou 33 cm en monoculaire. L'examineur ajoute alors des verres négatifs par pas de -0,25 dioptries jusqu'au premier flou constant indiqué par le patient. L'amplitude d'accommodation est égale à l'accommodation demandée par la proximité du test, additionnée à la valeur de notre dernier verre concave (en valeur absolue) avant flou total. A 40 cm, la formule sera donc : $PA = 2,50 + |\text{add concave maximum}|$. On retrouve, généralement, un parcours accommodatif inférieur de 2 dioptries au la mesure du PPA.

Afin de réaliser un bilan accommodatif aussi complet que possible, il est nécessaire d'explorer d'autres fonctions accommodatives telles que flexibilités accommodatives, l'accommodation relative et d'évaluer le rapport AC/A. Ces examens ayant un intérêt limité par rapport à la presbytie, nous les abordons succinctement.

Les flexibilité accommodatives (ou rock accommodatif) permettent d'évaluer l'endurance et la dynamique de la réponse accommodative, en binoculaire ou monoculaire. On alterne pour cela des faces à main de +/- 2 dioptries pendant une minute en vision de près et comptons le nombre de cycle effectués. L'accommodation relative mesure la capacité à relâcher (accommodation relative négative) ou augmenter (accommodation relative positive) binoculairement l'accommodation en maintenant une convergence fixe de près. L'examen s'effectue par ajout de verres (positifs ou négatifs selon ce que l'on étudie) de 0,25 dioptries jusqu'au flou. C'est un test très intéressant dans l'évaluation des excès et insuffisances accommodatives²⁴. Enfin, le rapport AC/A correspond à la convergence accommodative induite pour une accommodation donnée, il permet d'évaluer le lien accommodation-convergence. Différentes méthodes existent pour le mesurer (méthode du gradient, méthode calculée, etc.). Il permet de classifier les différents troubles de la vision binoculaire (classification d'après Wick²⁵) et d'évaluer l'intérêt et l'impact de l'ajout d'une addition sur les vergences²³.

D. Vieillissement du système accommodatif : la presbytie

1. Modification anatomique du système accommodatif avec l'âge

Avec l'âge, on observe des modifications anatomiques et biochimiques des trois acteurs de l'accommodation : le cristallin, le muscle ciliaire et les fibres zonulaires.

Au niveau cristallinien, on note une diminution de l'élasticité de la capsule²⁶. Celle-ci est associée à une augmentation de taille du cristallin par augmentation du nombre de fibres cristalliniennes²⁷. Le muscle ciliaire voit sa partie circulaire augmenter de taille. On trouve également une accumulation de tissu conjonctif dans sa portion antérieure. Tout cela contribue à lui donner la forme d'un muscle contracté. Au niveau de la zonule, on observe une perte des fibres équatoriales antérieures.

La presbytie serait principalement due aux modifications du cristallin et de sa capsule (perte d'élasticité), l'empêchant d'augmenter sa puissance réfractive en dépit des stimulations. Les connaissances actuelles restent cependant insuffisantes pour déterminer avec précision les mécanismes responsables de la presbytie¹³.

2. Impact fonctionnel de la presbytie et évolution avec l'âge

Au niveau subjectif, la presbytie se traduit par une vision floue de près. Celle-ci se manifeste principalement à la lecture à partir de 45 ans. En pratique cependant, cela dépend de l'amétropie de chaque patient. Ce que nous venons de dire s'applique au patient emmétrope ou emmétropisé, pour qui le PP s'éloigne avec l'âge. En revanche, chez le myope, le PR se situera d'autant plus proche que la myopie sera forte (cf. II.3.1). Ainsi, les effets de la presbytie ne se feront ressentir que tardivement puisqu'il aura tendance à enlever sa correction optique pour lire de près. A l'inverse, l'hypermétrope, chez qui le PP se situe d'autant plus loin que son hypermétropie est élevée, pourra percevoir une baisse d'acuité visuelle de près avant 45 ans s'il n'est pas correctement corrigé. C'est pourquoi, il est fréquent de rencontrer des patients légèrement hypermétropes (+0,25 / +0,5) se plaindre d'une baisse d'acuité visuelle de près dès 40 ans. Compensant à toute distance grâce à leur réserve accommodative, ils ignorent souvent leur hypermétropie. Il s'agit là d'un des diagnostics différentiels de la presbytie, dont la distinction repose essentiellement sur l'âge.

3. Épidémiologie de la presbytie

En 2015, la prévalence mondiale de la presbytie était estimée à 24,5 %, soit environ 1,8 milliard de personnes²⁸.

L'un des grands défis contemporains réside dans l'augmentation de l'espérance de vie, provoquant d'importantes transformations des sociétés et des modes de vie. Dans ce contexte, la presbytie est perçue comme un handicap majeur, touchant une partie population encore largement active, tant sur le plan professionnel que privé. Plusieurs études ont révélé l'impact significatif de la presbytie sur la qualité de vie^{29 30}. Sa bonne prise en charge constitue donc un enjeu de santé publique majeur.

E. La prise en charge de la presbytie

1. Le diagnostic de la presbytie

Pour établir un diagnostic de presbytie, deux critères essentiels doivent être réunis. Une diminution significative du parcours accommodatif (déterminée grâce à la mesure du PPA). Cette baisse sera évaluée en comparaison avec les normes établies selon l'âge du patient (cf. figure 7). Un âge suffisamment avancé : la presbytie étant une condition liée au vieillissement, l'âge du patient doit être pris en compte. Généralement, on envisage la possibilité de presbytie entre 40 et 45 ans (cela varie selon les auteurs). Ce diagnostic ne pose généralement pas de problème, hormis dans un cas : le patient légèrement hypermétrope (+0,50/ +0,75) qui approche des 40 ans. Il consulte généralement pour une baisse d'acuité visuelle brute de près faisant initialement penser à de la presbytie. C'est en fait l'incapacité à compenser l'hypermétropie dû à la diminution du parcours accommodatif qui en est l'origine. Il faudra alors réaliser une réfraction sous cycloplégique et mettre en place la correction optique totale. L'addition ne sera ajoutée qu'aux alentours de 45 ans, comme pour tout autre patient.

2. La prise en charge optique

a) Lunettes

La correction optique des patients presbytes consiste à ajouter une addition à la correction de base, qui ne sera utilisée qu'en vision de près. Celle-ci sera évolutive avec le temps selon les réserves accommodatives du patient. Ainsi, le sujet presbyte sera amené à changer régulièrement sa correction, et ce jusqu'à environ 70 ans. En lunettes, il existe deux grandes catégories de verres : les multifocaux (bifocaux et trifocaux) et les verres progressifs³¹. Les verres bifocaux contiennent deux zones distinctes, une pour la vision de loin et un pour la vision de près, séparées par une ligne visible ou discrète. Les trifocaux, plus rares, ajoutent une zone intermédiaire. Les multifocaux ne sont que peu prescrits aujourd'hui. Les verres progressifs, prescrits majoritairement, présentent une surface optique

continue sans rupture entre la vision de loin, intermédiaire et de près, grâce à une progression graduelle de puissance. Ils offrent un champ visuel fluide et confortable à toutes les distances, évitant donc les inconvénients des sauts d'image caractéristiques des bifocaux. Certains patients ne supportant pas bien les verres progressifs, optent pour le port d'une première monture en vision de loin et d'une seconde en vision de près.

b) *Lentilles*

La correction de la presbytie en lentilles se décline en deux grandes options : les lentilles multifocales et la monovision. Les multifocales (les plus utilisées) sont conçues pour corriger la presbytie en offrant plusieurs zones de correction sur une même lentille. Les différentes zones de puissance optique à la surface de la lentille permettent une vision nette à différentes distances. Elles visent à imiter le fonctionnement de l'œil non presbyte en offrant une transition plus fluide entre la vision de près, intermédiaire et de loin³¹.

La monovision a pour principe de corriger un œil en vision de loin et un œil en vision de près. Elle a l'avantage d'être simple à mettre en œuvre, pour un moindre coût. En revanche, elle rompt la vision binoculaire et peut donc être à l'origine de céphalées, diplopie, inconfort visuel, réduction de la profondeur de champ, etc³². Nous abordons plus longuement ce sujet en parties IV et V.

3. La prise en charge chirurgicale

Plusieurs techniques chirurgicales existent pour corriger la presbytie. Parmi celles-ci, on retrouve les techniques de photoablation qui consistent à remodeler la cornée par traitement laser. Elles se divisent en deux grandes catégories : la monovision (chirurgie à bascule) et la multifocalité cornéenne. Ces deux méthodes sont parfois combinées dans des proportions variables. Nous les abordons plus en détail dans la partie IV.

Il est également possible d'utiliser un implant intra-cornéen (inlay), également appelé lenticule. Trois principaux modèles de ce type d'implant sont disponibles sur le marché. Enfin, la presbytie peut également être corrigée par la mise en place d'un implant lors d'une chirurgie du cristallin. Ces implants, qui remplacent le cristallin naturel, peuvent être monofocaux ou multifocaux.

Le choix de la technique la plus adaptée dépendra du profil clinique du patient et de ses attentes.

III. Les différents lasers

A. PKR (Photokératectomie à visée réfractive)

1. La technique PKR

a) *Histoire et développement*

Le laser excimère (photoablation) est une technique de chirurgie réfractive qui vise à améliorer la vision en modifiant la forme de la cornée afin de corriger la myopie et/ou l'astigmatisme. On effectue cette technique directement sur la surface de l'œil. Il s'agit de la méthode laser réfractive la plus ancienne, mise en œuvre pour la première fois en 1983, puis diffusée au début des années 90.

b) *Description de la procédure*

La PKR est une méthode facile, sans douleur et très rapide à mettre en œuvre.

Dans un premier temps, l'œil est anesthésié en utilisant un collyre (anesthésie topique). Par la suite, il est nécessaire de retirer l'épithélium de la cornée. On peut procéder au débridement de ces cellules en utilisant de l'alcool et un anneau ainsi que de petites fléchettes. Le laser peut aussi réaliser le retrait de l'épithélium avant la photoablation du stroma (technique transPKR). Ensuite, le laser sera activé pendant quelques instants directement sur la cornée, plus précisément dans le stroma cornéen. Il sera utilisé pour sculpter la cornée afin de traiter le problème de vision. Enfin, une lentille de pansement pourra être installée.

2. Sureté et efficacité du PKR

a) *Indications actuelles*

Le traitement de la PKR est spécialement conçue pour les myopies et les astigmatismes légers. Elle est une option privilégiée par rapport à la méthode du Lasik, qui peut entraîner une fragilisation de la cornée. Par conséquent, il est préférable d'orienter les patients qui pratiquent des activités présentant un risque élevé de chocs oculaires vers une PKR. La détection d'une fragilité cornéenne lors du bilan préopératoire (d'une épaisseur inférieure à 500 microns) constitue également une indication pour l'utilisation de la PKR.

b) *Résultats et qualités visuelles*

Il est important que le patient prenne quelques jours de congé après l'intervention. Pendant la première semaine, il est crucial d'assurer une protection mécanique de l'œil opéré. Afin d'accomplir cela, il est nécessaire que le patient porte une coque protectrice pendant la nuit et une lentille de pansement pendant la journée. Bien qu'elles soient très supportables et bien traitées par le traitement antalgique prescrit, les premières heures sont souvent marquées par des douleurs post-opératoires, souvent associées à une sensation de brûlure. De plus, il est courant que la vue reste floue pendant quelques jours, puis commence à s'améliorer progressivement.

c) *Complications*

Après une opération par PKR, il est possible que des phénomènes de sécheresse et des halos lumineux perturbent temporairement la vision³³. De manière exceptionnelle, des complications peuvent survenir. Il peut inclure des infections ou une inflammation de la surface de la cornée connue sous le nom de « haze », qui se traduit par une légère brume.

3. Évaluation et perspectives de la procédure PKR

a) Avantages

Nous avons plus de 30 ans de recul sur cette technique. En outre, la PKR présente des bénéfices tels que l'absence de découpe du capot cornéen, une meilleure résistance biomécanique de la cornée et une diminution de la sécheresse oculaire. Par conséquent, elle est généralement privilégiée, en particulier pour les "cornes à risque", telles que les cornées fines, irrégulières, la sécheresse oculaire préalable à la chirurgie ou les activités (professionnelles ou loisirs) qui présentent un risque de contact ou de chocs oculaires (sports de combat, métiers à risque de traumatisme). Enfin elle permet de réaliser des retouches en cas de correction résiduelle³⁴.

b) Inconvénients

Les patients éprouvent des douleurs lors de la repousse de l'épithélium cornéen³⁵

Tous les patients présentent également un haze pendant les deux premiers mois après l'intervention, qui peut durer jusqu'à 6 mois. Enfin, la PKR ne convient qu'à la correction des petites amétropies et est conseillée pour les cornées fines.

B. LASIK (Laser In Situ Keratomileusis)

1. La technique LASIK

a) Histoire et développement

De nos jours, le LASIK est la méthode la plus couramment utilisée, et cela depuis plus de 10 ans.

Cette méthode comprend trois phases :

- La découpe d'un volet cornéen connu sous le nom de « capot »
- Le traitement par laser Excimer du défaut de vision
- La mise en place du volet³⁶

Depuis plus de 15 ans, deux techniques sont utilisées pour découper le capot. L'utilisation d'un instrument connu sous le nom de micro-kératome ou la découpe par laser femtoseconde. Il revient au chirurgien de décider de la méthode qu'il désire utiliser.

b) Description de la procédure

Après avoir anesthésier l'œil, le chirurgien effectue un volet cornéen de 8 à 11 mm de diamètre sur une épaisseur de 90 à 200 microns afin de mettre en évidence les couches profondes du tissu cornéen. Le volet cornéen est réalisé à l'aide du laser Femtoseconde. Par la suite, nous retirons ce capot pour mettre en évidence le stroma cornéen sur lequel le faisceau du laser Excimer sera dirigé, ce qui permettra de modifier la forme de la cornée et de corriger le défaut de vision. Enfin, le volet cornéen superficiel est redéployé sur la zone traitée, qu'elle protège immédiatement. Le volet est protégé par une lentille pansement pendant les premières heures après la chirurgie.

2. Sureté et efficacité du LASIK

a) Indications actuelles

Le traitement du LASIK est capable d'opérer tous les types de défaut oculaire : la myopie jusqu'à -10 dioptries, l'hypermétropie jusqu'à +7,50 dioptries, l'astigmatisme jusqu'à -5,75 et la presbytie.

b) Résultats et qualités visuelles

La sensation d'inconfort au niveau des yeux après une opération de LASIK est fréquente pendant environ 3 à 4 heures. Il est possible que la vision soit voilée. On peut également ressentir

des picotements, des larmoiements et des brûlures. Dès le jour suivant l'intervention, ces symptômes auront partiellement disparu et un confort plus agréable sera retrouvé. Néanmoins, il est possible que certaines sensations de sécheresse oculaire demeurent.

La finesse de la vision peut prendre plus ou moins de temps à se stabiliser en fonction de l'amétropie traitée, mais elle est assez bonne pour reprendre la plupart des activités quotidiennes.

c) *Complications*

Une découpe incomplète du capot cornéen peut survenir lors de la chirurgie LASIK. Des plis ou un déplacement du capot peuvent entraîner une gêne et une vision altérée. De plus, la survenue d'une ectasie est une complication rare, provoquant une déformation de la cornée. Enfin une invasion épithéliale peut se produire³⁷.

3. Évaluation et perspectives de la procédure LASIK

a) *Avantages*

L'avantage majeur réside dans le maintien de l'épithélium cornéen qui permet une cicatrisation beaucoup plus rapide et sans douleur. De plus, elle permet de corriger tout type d'amétropie même si le défaut visuel est important. Si une correction est imparfaite ou si un défaut visuel revient, la retouche réfractive est extrêmement facile avec le LASIK.

b) *Inconvénients*

Il est déconseillé d'utiliser le LASIK chez des patients présentant des cornées déformées ou asymétriques, tels qu'un kératocône frustre. De la même manière, le LASIK ne peut pas être utilisé pour les patients dont l'épaisseur cornéenne est inférieure à 500 microns. Il est également recommandé d'éviter cette intervention pour les personnes qui pratiquent des activités physiques violentes, comme les sports de combat, ou qui exercent des métiers à risque de chocs violents. La sécheresse oculaire sévère constitue une autre contre-indication majeure. Enfin, il existe un risque d'apparition de halo lumineux après l'opération.

C. SMILE

1. La technique SMILE

a) *Histoire et développement*

Au cours des vingt dernières années, la chirurgie réfractive cornéenne a connu de grands progrès, notamment avec les techniques de PKR et LASIK, utilisant un laser excimer pour remodeler la cornée et corriger les amétropies. Une alternative plus récente, le SMILE (Small Incision Lenticule Extraction), repose uniquement sur un laser femtoseconde pour extraire un lenticule intrastromal. Cette méthode, moins invasive, vise à préserver l'innervation et la biomécanique de la cornée. L'étude des données actuelles permet d'évaluer son rôle dans la chirurgie réfractive et ses perspectives d'évolution.

b) *Description de la procédure*

La méthode SMILE est simple, indolore et très rapide à mettre en œuvre.

Après avoir anesthésié l'œil du patient à l'aide de gouttes de collyre.

L'œil du patient est placé en contact avec le cône du laser VisuMAX par le chirurgien pour aligner parfaitement le traitement laser à venir avec la pupille. À ce moment-là, une succion est utilisée pour obstruer l'œil et il est donc nécessaire de rester complètement immobile.

La prochaine étape est le traitement laser SMILE. Le lenticule de myopie sera sculpté dans la cornée par le laser femtoseconde pendant une vingtaine de secondes. Ensuite le chirurgien le retire en grâce à une micro-incision de 3 à 4 mm réalisée par le laser, en prenant en compte les adhérences déjà

présentes entre la cornée et le lenticule développé. Après l'intervention, des gouttes d'antibiotiques sont administrées et il est recommandé de prendre du repos.

2. Sureté et efficacité du SMILE

a) *Indications actuelles*

Les critères de choix d'une intervention SMILE sont basés sur une évaluation préopératoire extrêmement minutieuse. Il est nécessaire d'avoir une vision stable (aucune variation de la myopie depuis 2 ans), d'éliminer un kératocône évident ou surtout frustre, d'obtenir une topographie cornéenne normale, d'avoir une épaisseur de cornée adéquate (en fonction du niveau de myopie à traiter), et d'avoir un examen ophtalmologique parfaitement normal. Les patients qui se qualifient le mieux pour cette opération sont ceux qui souffrent d'une sécheresse oculaire importante et ceux qui ont subi un traumatisme oculaire.

b) *Résultats et qualités visuelles*

Les conséquences opératoires après un SMILE sont simples. On retrouve des picotements et des larmoiements pendant une à deux heures mais une récupération visuelle assez rapide.

Les patients décrivent souvent un flou variable qui s'atténue progressivement en 2, 3 semaines, mais qui ne limite pas la reprise rapide des activités professionnelles ou personnelles dès le lendemain de l'opération des yeux au laser. Après l'opération SMILE, les sports violents et le maquillage pour les femmes sont rapidement autorisés.

c) *Complications*

Il est peu fréquent d'observer des complications mais il est possible d'avoir des infections oculaires, une érosion épithéliale, des variations de la vision, une sous ou sur-correction du trouble de la réfraction, une sensibilité à la lumière, des halos ou éblouissement, une diminution du résultat avec le temps

3. Évaluation et perspectives de la procédure SMILE

a) *Avantages*

La méthode SMILE diminue la sensation de sécheresse oculaire temporaire parfois observée après un Lasik, elle élimine le risque de déplacement traumatique du capot, elle diminue le risque d'invasion épithéliale et elle diminuerait le risque d'ectasie cornéenne.

b) *Inconvénients*

Le principal désavantage de la méthode SMILE réside dans l'impossibilité de retraiter en cas de sous-correction ou de sur-correction, du moins avec la même méthode.

Le SMILE est une méthode extrêmement attrayante et offre des résultats exceptionnels, tout comme en LASIK, mais la récupération du patient après l'opération n'est pas aussi rapide. Le patient émet fréquemment des symptômes de voile résiduel (faible mais présent) pendant au moins une semaine et parfois plus d'un mois.

Il n'est actuellement possible que pour les personnes atteintes de myopie et/ou d'astigmatisme.

c) *Perspectives de développement*

Des recherches sont en cours pour développer des solutions permettant également de corriger l'hypermétropie et la presbytie, pour lesquels aujourd'hui l'opération des yeux au LASIK est la seule méthode efficace.



Figure 8 : Les différents lasers en chirurgie réfractive (d'après <https://insighteye.com.au/zeiss-visumax-femtosecond-technology-results/>)

IV. La chirurgie réfractive

Les différentes méthodes de chirurgie réfractive de la presbytie visent toutes à compenser la perte accommodative en créant une pseudo-accommodation. Plusieurs techniques existent : monovision, multifocalité cornéenne et l'association de ces deux techniques.

A. Monovision

1. Principe

La monovision consiste à corriger un œil pour la vision de loin et un œil pour la vision de près. Cette anisométropie induite permet au sujet presbyte de voir net, de près comme de loin, en fixant sélectivement avec un œil selon la distance. L'œil dominant sera corrigé pour la vision de loin avec comme cible visée l'emmétropie. L'œil dominé sera corrigé pour la vision de près ou intermédiaire avec une cible pouvant aller jusqu'à -2,50 dioptries, il y aura donc une myopisation de celui-ci³⁸. En pratique, il semble plus intéressant de rechercher l'œil préféré, qui est généralement l'œil dominant mais pas nécessairement. On utilisera le test du flou réfractif afin de le déterminer : on fait fixer le patient en vision de loin avec sa correction en ajoutant un +0,75 alternativement sur chaque œil. L'œil préféré est celui ressentant le plus d'inconfort au flou³⁹.

La monovision repose sur la plasticité cérébrale, le cerveau doit être capable de trier les informations visuelles en provenance des deux yeux afin de privilégier l'image la plus nette. Elle est donc dissociante pour les deux yeux et perturbe la vision binoculaire. Il conviendra donc de réaliser une évaluation minutieuse de l'état binoculaire du patient, ainsi que de réaliser des essais en lentilles avant de décider d'opter pour cette technique.

2. Méthodes

La monovision peut être réalisée en lentilles (comme vu en III.5.b.2.) ou induite chirurgicalement, soit par implantation monofocale (notamment lors de chirurgie de la cataracte), soit par photoablation par laser à excimères. Dans ce dernier cas, on distingue la monovision « pure » (utilisée seule) et celle associée à la multifocalité cornéenne (presbyLASIK).

3. Population

Elle s'adresse essentiellement aux patients myopes et jeune presbyte afin que l'anisométropie créée ne dépasse pas les 2 dioptries. Au-delà de 55 ans, on privilégiera la méthode par implantation. Une bonne dominance oculaire est également un facteur de réussite de l'intervention.

Elle est contre-indiquée en cas de trouble de la vision binoculaire : strabisme, exophorie-tropie, hétérophorie mal compensée, insuffisance de convergence, trouble accommodatif, etc.

4. Avantages

La monovision a pour avantage de reposer sur un principe simple à mettre en œuvre. La technique chirurgicale employée est peu invasive et est réversible. On observe un faible taux de retouche, un résultat stable, une bonne préservation de la sensibilité aux contrastes et la possibilité de restituer une vision binoculaire par ajout d'une correction optique si besoin. Elle bénéficie d'excellents résultats selon de nombreuses études, en termes d'efficacité et de tolérance.

5. Limites

Le principal inconvénient de cette technique est la rupture de la vision binoculaire induite. Celle-ci nécessitera une neuro-adaptation pouvant prendre plusieurs semaines, voire plusieurs mois. Lorsqu'elle ne se met pas en place correctement, on retrouvera des céphalées, une fatigue oculaire, une décompensation des hétérophories, une diminution de la vision stéréoscopique, etc. Il peut également être retrouvé des halos, notamment en vision de près.

Contrairement aux techniques de multifocalité, il n'y a pas de continuité dans la vision : une très bonne vision de près sera associé à une moins bonne vision intermédiaire et inversement.

B. Multifocalité cornéenne

1. Définition et principe

Comme pour les lentilles, la multifocalité cornéenne en chirurgie offre au sujet une pseudo-accommodation en modifiant la cornée de façon à percevoir plusieurs distances focales en même temps. Le cerveau opère ensuite une sélection parmi les différentes images projetées sur la rétine afin de conserver la plus nette (celle correspondant à la distance de vision souhaitée). L'intervention consiste à moduler l'aberration sphérique de la cornée par laser. En effet, la cornée est une surface asphérique (sa courbure n'épouse pas la forme d'une sphère). Dans la majorité des cas, son rayon de courbure diminue du centre vers la périphérie (elle s'aplatis du centre vers la périphérie), on dit d'elle qu'elle est prolate. Le presbyLASIK (multifocalité cornéenne) consiste à induire des aberrations sphériques au niveau de la cornée afin d'augmenter sa profondeur de champ et permettre ainsi une vision nette de loin comme de près. L'enjeu sera toujours le même : augmenter la profondeur de champ sans que cela soit au détriment de la qualité optique⁴⁰ (l'un augmentant lorsque l'autre diminue).

On distingue plusieurs techniques de presbyLASIK selon l'aberration induite : le presbyLASIK décentré, périphérique et central⁴¹. C'est le central qui est majoritairement pratiqué aujourd'hui. Cette méthode consiste à augmenter la profondeur de champ en agissant sur deux facteurs : l'utilisation du myosis accommodatif préservé (pour la vision de près) et l'induction d'aberration sphérique négative. Le profil prolate de la cornée est inversé vers un profil hyperprolate, c'est-à-dire qu'on augmente son rayon de courbure. Il en résulte que la vision de près est assurée par la cornée centrale, tandis que la vision de loin par la périphérie, d'où son nom de presbyLASIK central.

2. Plateforme presbyMAX de Schwind

Différentes plateformes et algorithmes de presbyLASIK existent, induisant différents types d'aberration sphériques. Nous nous limitons ici à la plateforme presbyMAX de Schwind puisque c'est elle que nous utiliserons dans notre étude clinique. Ce profil de presbyLASIK permet la vision de près par la cornée centrale avec une zone hyper-bombée et la vision de loin par la cornée périphérique. La technique est appliquée sur les deux yeux avec une légère asymétrie. L'association de la monovision à des modifications de l'asphérité cornéenne permet ainsi de réduire le degré de bascule. L'œil dominé est toujours favorisé pour la vision de près avec une cible réfractive de -0,89 (myopisation) et un degré moyen de multifocalité (« add med »). L'œil dominant est favorisé pour la vision de loin avec l'emmétropisation comme cible réfractive. On distingue 3 méthodes selon le degré d'aberration induite dans l'œil dominant⁴² :

- la μ -monovision : différenciation multifocale moyenne de l'œil dominant, la différence entre vision de près et de loin est assez marqué (« add med »). De très bons résultats sont obtenus en vision de près, une bonne stéréoscopie et une altération de la vision de loin au départ. Celle-ci revient au bout de 6 à 12 mois.

- l'hybride : faible différenciation multifocale de l'œil dominant, le remodalge cornéen est moins marqué (« add low »). On obtient un bon résultat en vision de près, la stéréoscopie est conservée et la vision de loin revient en 3 à 6 mois (moindre altération par rapport à la μ -monovision).

- la monocular : pas de multifocalité de l'œil dominant, il est entièrement dédié à la vision de loin. La vision de près est satisfaisante avec une stéréoscopie acceptable car la bascule induite reste inférieure à 1 dioptrie. La vision de loin est parfaite immédiatement.

L'utilisation d'une technique au profit d'une autre dépendra donc de chaque patient et de ses attentes en termes de vision.

3. Population

Le presbyLASIK est principalement destiné aux jeunes presbytes¹³, car la multifocalité induite est souvent insuffisante pour garantir une vision parfaite de près. Le myosis joue donc un rôle important dans cette limitation car il permet d'augmenter la profondeur de champ. Cela nécessite que le patient conserve une certaine réserve accommodative afin de provoquer un myosis de près par la syncinésie accommodation - convergence. Par ailleurs, les patients hypermétropes constituent de bons candidats pour cette procédure car la chirurgie de l'hypermétropie augmente naturellement la prolatérité de la cornée, favorisant ainsi la pseudo-accommodation.

4. Limites

Bien que la multifocalité cornéenne offre une vision nette à différentes distances, elle implique un compromis entre l'étendue des distances couverte et la qualité de l'image. La vision de loin est en général moins bonne qu'avant l'opération, bien que cela dépende de la méthode utilisée. Le patient peut également décrire la présence de halos dans certaines conditions d'éclairage, en raison des aberrations sphériques induites. La qualité visuelle étant influencée par la contraction pupillaire, elle peut se détériorer dans certaines conditions d'éclairage comme pour la vision de loin dans un environnement très éclairé (entraînant un myosis). Enfin, une période de neuroadaptation sera nécessaire pour que le patient retrouve un niveau de vision satisfaisant, ce qui demande une certaine motivation de sa part.

v. La place de l'orthoptie dans la chirurgie réfractive

A. Impact de la chirurgie réfractive sur la vision binoculaire

1. Chirurgie réfractive classique

Les chirurgies réfractives cornéennes peuvent entraîner divers troubles de la vision binoculaire dont la nature, la gravité et la durée varient en fonction de la technique chirurgicale utilisée et du profil clinique du patient. Une revue de la littérature menée par García-Montero et al.⁴³ met en évidence les troubles induits selon les différentes techniques opératoires. Après une intervention au LASIK, des modifications transitoires des vergences fusionnelles sont souvent rapportées avec une diminution de l'amplitude de fusion en vision de près au cours des premiers mois. Le rapport AC/A tend également à augmenter temporairement, mais revient généralement dans la norme dans un délai de trois à neuf mois. Par ailleurs, l'accommodation peut subir des fluctuations, incluant des changements dans son amplitude, une difficulté à maintenir un effort accommodatif, ou encore un excès transitoire.

Dans le cadre de la PKR, les patients peuvent connaître une récupération visuelle plus lente que pour le LASIK, en raison de retards dans la ré-épithérialisation cornéenne et de l'instabilité du film lacrymal. Des troubles accommodatifs sont également rapportés, avec une réduction temporaire de l'amplitude accommodative.

On retrouve des modifications de l'amplitude de vergence avec le SMILE, mais généralement moins marquées que celles observées avec le LASIK ou la PRK.

Certaines perturbations sont communes à toutes les techniques. On retrouve notamment une augmentation du PPC, des risques de diplopie, en particulier chez les patients présentant des facteurs de risque préexistants comme un strabisme ou une anisométrie significative. Des décompensations de phorie peuvent également survenir, notamment chez les patients ayant des déséquilibres binoculaires préopératoires.

Ces troubles sont associés à un impact sur la qualité de vie. De nombreux patients rapportent des symptômes asthénopiques, notamment une fatigue visuelle et des difficultés lors des tâches impliquant la vision de près, comme la lecture ou le travail sur écran. Lorsqu'une diplopie apparaît, elle affecte significativement les activités quotidiennes. La période d'adaptation nécessaire pour surmonter ces perturbations visuelles peut également représenter un défi pour les patients, même si elle reste limitée dans le temps.

2. Chirurgie de la presbytie

Une revue de la littérature réalisée par Finlay, A. L.⁴⁴ révèle que la monovision présente souvent de bons résultats. Cependant, chez certains patients, l'anisométrie induite peut perturber l'équilibre binoculaire, en particulier si certaines anomalies existent à l'origine. Les patients présentant des hétérophories mal compensées, bien qu'asymptomatiques avant la chirurgie, peuvent voir leur état se détériorer et développer des troubles asthénopiques en postopératoire.

Une étude de Muthu et al.⁴⁵ confirme également les bons résultats obtenus en monovision et presbyLASIK, mais recommande leur utilisation uniquement chez les patients isométropes, sans antécédent de trouble de la vision binoculaire.

D'après García-Montero et al., la tolérance à l'anisométrie varie largement d'un individu à l'autre, mais un consensus émerge selon lequel une anisométrie supérieure à 1,50 dioptre compromet la fonction binoculaire et la stéréoscopie. En monovision, une tendance vers l'ésophorie a été observée, avec un risque accru de gêne postopératoire si celle-ci dépasse 2 dioptres. Un cas de décompensation de phorie verticale chez un patient présentant une paralysie du IV jusque-là asymptomatique a également été rapporté (Schuler et al. 1999). Chez les patients pseudophakes présentant une exophorie préopératoire marquée, des cas d'exotropies intermittentes ont été observés jusqu'à deux ans après la chirurgie.

Enfin, Ito et al. (2012)⁴⁶ ont mis en évidence une corrélation positive entre l'exophorie de près préopératoire et l'acuité stéréoscopique postopératoire (en vision de près).

Ces études indiquent que la chirurgie réfractive ne provoque généralement pas de nouveaux troubles binoculaires, mais qu'elles tendent à aggraver des anomalies préexistantes qui étaient jusque-là compensées. Il est donc essentiel de réaliser un bilan orthoptique préopératoire, et particulièrement avant une chirurgie de la presbytie, afin d'identifier d'éventuels troubles binoculaires. Cela permettrait de réorienter les patients vers une rééducation orthoptique si besoin ou vers des solutions alternatives à la chirurgie si celle-ci n'est pas réalisable⁴⁷.

B. Contre-indication à la chirurgie de la presbytie sur le plan orthoptique

De nombreux éléments doivent être pris en compte pour évaluer la possibilité d'une chirurgie réfractive de la presbytie. Parmi ceux-ci, figurent par exemple l'âge, l'aspect du cristallin, l'état de la cornée et de nombreux autres facteurs³⁹.

Au niveau purement orthoptique, on retrouve un certain nombre de contre-indications :

- une hétérophorie mal compensée (phorie-tropie). Le patient peut décompenser en tropie en postopératoire. Une phorie de 8 dioptries ou plus devra amener à reconsidérer la possibilité de chirurgie.
- des capacités fusionnelles limitées et une insuffisance de convergence.
- un déséquilibre accommodatif.
- en cas d'anisométropie, il convient de prendre en compte l'aniséiconie induite qui s'ajoute à celle déjà présente et qui peut engendrer un inconfort visuel. Une anisométrope de 2,5 dioptries ou plus peut constituer une contre-indication¹³.
- la présence d'un strabisme, notamment les exotropies, avec un risque accru de diplopie en postopératoire. Certaines études ont cependant mis en évidence la possibilité d'une amélioration de la déviation dans les strabismes accommodatifs pur et partielle par soulagement de l'effort accommodatif^{48 44}. Les données restent encore insuffisantes pour conclure sur une réelle efficacité.
- une amblyopie rendra impossible toute chirurgie à bascule car l'œil amblyope ne serait pas en mesure d'assurer efficacement la fonction visuelle pour laquelle il serait corrigé.
- une paralysie oculomotrice, et notamment la paralysie congénitale du IV qui peut passer inaperçue jusque-là et être décompensée en postopératoire.
- tout autre trouble non strabique de la vision binoculaire fera également l'objet d'un examen minutieux : exophorie et ésophorie basique, excès de convergence, insuffisance de divergence, excès de divergences, etc. (classification d'après Wick²⁵).

Tous ces troubles peuvent être responsables d'inconfort visuel en post-opératoire et doivent donc être dépistés afin de réorienter le patient de la meilleure manière possible.

C. Le bilan orthoptique

Plusieurs protocoles ressortent des études précitées. Nous proposons le bilan suivant.

1. Interrogatoire

L'interrogatoire débute par des questions générales permettant de situer le contexte visuel du patient. Il est nécessaire de demander son âge, sa profession, ainsi que le temps quotidien passé sur les écrans et de rechercher le type de vision le plus sollicitée : vision de près, intermédiaire ou de loin. On explore ensuite les antécédents généraux et les traitements pris car certains médicaments peuvent altérer les capacités fusionnelles. Les antécédents ophtalmologiques sont également abordés afin de mettre en évidence d'éventuelles pathologies (glaucome, cataracte, etc.) et des chirurgies anciennes. Il est important d'interroger le patient sur d'éventuels antécédents de strabisme, ou s'il a déjà éprouvé une diplopie qui serait signe d'un éventuel trouble binoculaire sous-jacent. Au niveau des antécédents orthoptiques, il faut s'intéresser à toute rééducation antérieure, ainsi qu'aux antécédents de trouble non strabique tel que l'insuffisance de convergence.

On s'intéresse également à la correction optique, notamment de quand elle date, si elle a été réalisée sous cycloplégie et si elle est bien supportée. Il est important de vérifier si elle intègre des prismes (signe d'un trouble ocluo-moteur). Enfin, on cherche les signes fonctionnels actuels de manière détaillée : présence de céphalées, de diplopie intermittente, de flou visuel en vision de près et/ou de loin, de fatigue oculaire, d'inconfort visuel, de rougeurs ou picotements oculaires, de photophobie, etc. Il faut faire préciser si ses signes se présente à n'importe quel moment de la journée ou s'ils sont associés à des horaires précis (fin de journée, après un effort visuel).

2. Bilan sensoriel

Pour l'évaluation de la sensorialité, la première mesure est celle de la réfraction à l'autorétractomètre. On réalise ensuite une mesure de l'acuité visuelle sans correction en vision de loin avec une échelle de Monoyer et de près avec une échelle de Parinaud, en monoculaire ainsi qu'en binoculaire. Il est important de bien vérifier si le patient présente une position compensatrice et/ou un nystagmus lors de la prise d'acuité. La réfraction subjective est réalisée par la méthode du brouillard. Un examen sous cyclopégique sera effectuée avant la chirurgie pour corriger le patient de la manière la plus optimale.

Il est important de déterminer l'œil directeur, surtout avant une monovision afin de ne pas perturber la dominance oculaire.

Les capacités fusionnelles sont évaluées à la barre de prismes en vision de loin et de près (œil droit et œil gauche idéalement). Puis, une mesure l'acuité stéréoscopique avec le TNO permet une appréciation qualitative et quantitative de celle-ci. Ces deux derniers éléments représentent une étape clé dans le bilan pour estimer la tolérance à la chirurgie réfractive.

Enfin il est intéressant de mesurer également le PPA qui nous permet d'évaluer le parcours accommodatif, ainsi que d'examiner les flexibilités accommodatives avec le test du rock accommodatif.

3. Bilan moteur

L'examen sous écran nous permet d'évaluer la déviation que l'on mesure ensuite à la baguette de Maddox ou par la méthode de l'angle objectif dans l'espace.

On procède ensuite à l'examen de la motilité oculaire dans les 9 positions du regard, en veillant attentivement à détecter des signes de paralysies oculomotrices. Enfin, la mesure du ponctum proximum de convergence (PPC) constitue élément essentiel dans le diagnostic des insuffisances de convergence.

4. Résultats

À l'issue de ce bilan, on doit être en mesure de déterminer si l'une des contre-indications majeures mentionnées précédemment est présente ou non. Dans certains cas, tel que l'insuffisance de convergence, une rééducation orthoptique sera recommandée afin de normaliser et équilibrer les capacités fusionnelles et accommodative du patient en vue de la chirurgie.

Dans d'autres cas (l'amblyopie ou l'anisométrie notamment), la possibilité d'une intervention dépendra de la balance bénéfice/ risque et il conviendra au patient d'en discuter avec le chirurgien. Enfin, la neuroadaptation étant un aspect essentiel de la chirurgie réfractive du presbyte, il sera crucial d'évaluer si le patient est psychologiquement prêt à en accepter les conséquences. En effet, un patient très attentif aux moindres détails, qui éprouverait des difficultés à « ignorer » l'une des deux images ou serait perturbé par la présence éventuelle de halos, a de fortes chances de ressentir un inconfort visuel après l'intervention¹³.

Au vu des données évoquées ci-dessus, nous nous sommes posés la question de l'impact du bilan orthoptique pré opératoire et de sa potentielle évolution dans la récupération visuelle des patients opérés de PresbyLASIK par les techniques de monovision et de multifocalité cornéenne.

VI. Partie pratique

A. Introduction

La presbytie est une condition physiologique liée au vieillissement, caractérisée par une perte progressive de la capacité accommodative, entraînant une difficulté croissante à effectuer des tâches en vision de près⁷. Sa prise en charge constitue un véritable défi, dans la mesure où elle implique de restaurer une vision fonctionnelle à plusieurs distances à l'aide d'un seul système optique.

Plusieurs stratégies correctives existent, qu'elles soient optiques (lunettes, lentilles de contact) ou chirurgicales, certaines reposant sur des principes communs³⁸. En chirurgie réfractive, deux techniques principales sont utilisées : la monovision et la multifocalité cornéenne. La monovision consiste à corriger différemment les deux yeux : l'œil dominant est optimisé pour la vision de loin, tandis que l'œil dominé est ciblé pour la vision de près.

La multifocalité cornéenne repose sur un mécanisme plus complexe : elle consiste en une modification par laser de la prolatérité cornéenne afin de générer plusieurs distances focales simultanées³¹. Cette approche vise à augmenter la profondeur de champ, tout en contrôlant les aberrations optiques afin de préserver la qualité visuelle. Elle peut être appliquée de manière indifférenciée sur les deux yeux ou en modulant légèrement le degré de correction pour privilégier un œil en vision de près (ou de loin), et l'autre en vision intermédiaire.

Bien que ces deux techniques permettent une amélioration globale de la fonction visuelle, leur influence sur la vision binoculaire reste une question centrale. La monovision, en rompant l'équilibre fonctionnel entre les deux yeux, peut engendrer une altération de la fusion binoculaire et être à l'origine de symptômes tels que céphalées, fatigue visuelle ou décompensation de troubles binoculaires préexistants⁴⁴. La multifocalité cornéenne semble quant à elle mieux préserver la vision binoculaire, mais au prix d'une fréquence plus élevée d'aberrations optiques.

La présente étude vise à évaluer l'impact de ces deux techniques chirurgicales sur la vision binoculaire, à travers une analyse à la fois objective et subjective, et à comparer leurs effets respectifs afin de déterminer si l'une d'entre elles préserve ou favorise significativement la vision binoculaire par rapport à l'autre.

B. Matériel et méthode

1. Type d'étude

Nous avons réalisé une étude prospective comparative réalisée dans un cadre clinique, visant à évaluer l'impact de deux techniques chirurgicales de correction de la presbytie sur la vision binoculaire. Les patients inclus étaient candidats à une chirurgie réfractive par laser excimer, et ont été répartis en deux groupes en fonction de la technique utilisée : un groupe traité par monovision, et un autre par multifocalité cornéenne.

L'analyse a reposé sur des évaluations orthoptiques complètes, réalisées en préopératoire et en post-opératoire, permettant une comparaison de l'impact de chaque technique sur la fonction binoculaire.

2. Population étudiée

Cette étude a inclus 6 patients ayant bénéficié d'une chirurgie réfractive par laser excimer, réalisée au CHU Edouard Herriot et à l'Institut Laser LYLO. La période d'inclusion s'est étendue de décembre 2024 à mai 2025, soit une durée totale de six mois.

Parmi les patients inclus, 4 ont été opérés selon la technique de multifocalité cornéenne et 2 selon la technique de monovision.

L'âge moyen des patients était de 53 ans. La population était composée de 4 femmes et 2 hommes.

Critères d'inclusion :

- Présence d'une presbytie diagnostiquée ;
- Âge compris entre 43 et 66 ans.

Critères d'exclusion :

- Présence de toute pathologie oculaire susceptible d'altérer la vision (cataracte, glaucome, kératite, kératocône, pathologies rétiniennes telles que rétinopathie ou décollement de rétine) ;
- Présence d'une pathologie systémique ayant des répercussions ophtalmologiques ;
- Acuité visuelle corrigée préopératoire inférieure à 10/10 ;
- Antécédent d'amblyopie ;
- Présence d'un strabisme ;
- Antécédent de chirurgie réfractive ;
- Antécédent de chirurgie de strabisme.

Tous les patients avaient, en pré et post-opératoire, une acuité visuelle de 10/10 en vision de loin (sur échelle de Monoyer), et Parinaud 2 en vision de près, après correction.

Cette étude a été menée dans le respect des principes éthiques énoncés dans la Déclaration d'Helsinki. Tous les patients ont été informés des objectifs de l'étude, des modalités de participation et des examens réalisés, et ont donné leur consentement éclairé.

3. Procédure chirurgicale

Les interventions chirurgicales ont été réalisées à l'aide du laser excimer Schwind Amaris⁴², selon la technique du LASIK, que ce soit pour la correction par monovision ou par multifocalité cornéenne.

Elles ont été pratiquées par deux chirurgiens expérimentés, chacun respectant les protocoles opératoires standardisés associés à chaque technique.

La procédure impliquait également une mesure d'acuité visuelle de loin et de près, avant et après la chirurgie, ainsi qu'un examen de la topographie cornéenne.

4. Evaluation préopératoire et postopératoire

L'évaluation a eu lieu en deux étapes :

- Préopératoire : Juste avant l'intervention, à 20 minutes de l'opération. Cette première évaluation a permis de collecter les données de base sur l'état de la vision et de la fonction binoculaire.
- Postopératoire : Un second bilan a été effectué à 1 mois après l'intervention.

Aucune période de repos n'a été imposée après les bilans orthoptiques.

5. Bilan orthoptique

Le bilan orthoptique a été réalisé selon un protocole standardisé et a inclus les étapes suivantes :

1. *Interrogatoire clinique :*

- Profession et utilisation des écrans : type d'utilisation, durée et intensité. Y a-t-il une sur-sollicitation de la vision de près au quotidien ?
- Présence de signes fonctionnels tel que : céphalées, diplopie, flou à la lecture, fatigue visuelle, larmoiements, photophobie. Identification des moments où ces symptômes apparaissent : fin de journée, après travail, lors d'un effort visuel, etc.
- Historique des corrections optiques : dernière correction, confort, cycloplégie.
- Antécédents médicaux et ophtalmologiques, ainsi que les antécédents orthoptiques, incluant les traitements de rééducation.

2. *Examen orthoptiques standardisés :*

- Détermination de l'œil directeur et recherche d'une position compensatrice.
- Examen sous écran (évaluation des hétérophories) : en vision de loin et de près.
- Motilité oculaire.
- Baguette de Maddox : mesure de l'angle de l'hétérophorie en vision de loin et de près.
- Vision stéréoscopique : testée au TNO.
- Mesure du ponctum proximum de convergence (PPC)
- Mesure du ponctum proximum d'accommodation (PPA).
- Vergences aux prismes : évaluation de la convergence et divergence, en vision de loin et de près.

6. Analyse statistique

Les données recueillies ont été analysées à l'aide du logiciel Matlab. Les comparaisons préopératoires versus postopératoires ont été réalisées, au sein de chaque groupe de chirurgie, à l'aide du test des rangs signés de Wilcoxon.

Ce test non paramétrique est adapté aux petits échantillons et ne suppose pas la normalité des données.

La comparaison des variations pré-post entre les deux groupes de chirurgie (monovision vs multifocale) a été réalisée à l'aide du test U de Mann-Whitney.

Pour chaque comparaison, une taille d'effet a également été calculée :

- Pour les comparaisons intragroupes (pré vs post), la taille d'effet a été estimée en divisant la valeur z du test de Wilcoxon par la racine carrée de la taille d'échantillon (z / \sqrt{N}), correspondant approximativement à une corrélation bisérielle de rang.

- Pour la comparaison intergroupe, la corrélation bisérielle de rang a été calculée directement à partir du rangsumme du test de Mann-Whitney.

Les tailles d'effet ont été interprétées selon les recommandations usuelles :

- $r < 0,3$: effet faible ou modéré
- $r \geq 0,5$: effet fort

C. Résultats

1. Comparaison intra-groupe

Aucune différence statistiquement significative n'a été mise en évidence entre les périodes pré- et postopératoire, que ce soit dans le groupe monovision ou dans le groupe multifocal.

Néanmoins, la présence de tailles d'effet importantes (*Tableau 1*) suggère des variations cliniquement pertinentes, bien que la puissance statistique insuffisante — probablement liée à la taille réduite des échantillons — ne permette pas d'en conclure avec certitude.

Mesures	p_monovision *	Taille d'effet monovision ***	p_multifocale *	Taille d'effet multifocale***
SF	1	2	0,125	1,825741858
AOE VL	1	-2	1	-2
AOE VP	1	2	0,5	1,897366596
VS (TNO)	0,5	-1,897366596	1	-2
PPC	1	2	1	-0,632455532
Convergence VL	1	0,632455532	0,625	-0,730296743
Convergence VP	0,5	-1,897366596	0,5	1,897366596
Divergence VL	1	0	0,25	1,8516402
Divergence VP	1	0,632455532	0,375	-1,278019301

Tableau 1 : Comparaison préopératoire vs postopératoire au sein des groupes monovision et multifocale

Tests non-paramétrique (I.e. basés sur le rang):

* valeur p du Test des rangs signés de Wilcoxon

** valeur p du Test U de Mann-Whitney

*** valeur r de la Corrélation bisérielle de rang

Les **signes fonctionnels** retrouvés étaient : céphalées, flou à la lecture, fatigue visuelle, photophobie, sécheresse oculaire et larmoiements. Les concernant, des tailles d'effet positives ont été observées dans les deux groupes ($r = 2$ en monovision ; $r = 1,83$ en multifocal), traduisant une augmentation des plaintes postopératoires (*Figure 9*). Cette évolution est observée chez l'un des deux patients en monovision, et de manière systématique dans le groupe multifocal :

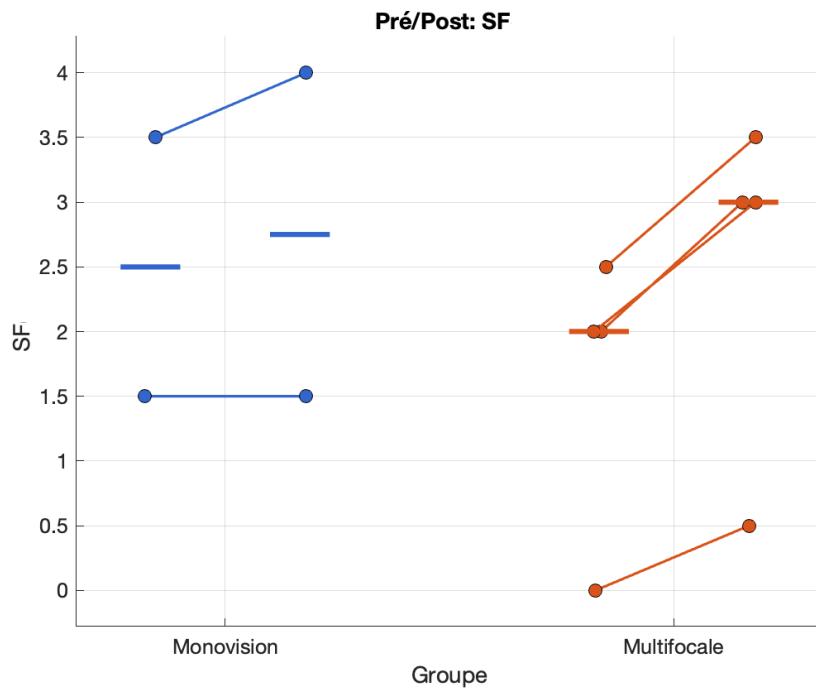


Figure 9 : Evolution des signes fonctionnels au sein des deux groupes

Une évolution similaire est constatée pour **l'hétérophorie de près**, avec des tailles d'effet positifs dans les deux groupes ($r = 2$ en monovision ; $r = 1,9$ en multifocal), indiquant une augmentation de l'angle d'exophorie après chirurgie (Figure 10) :

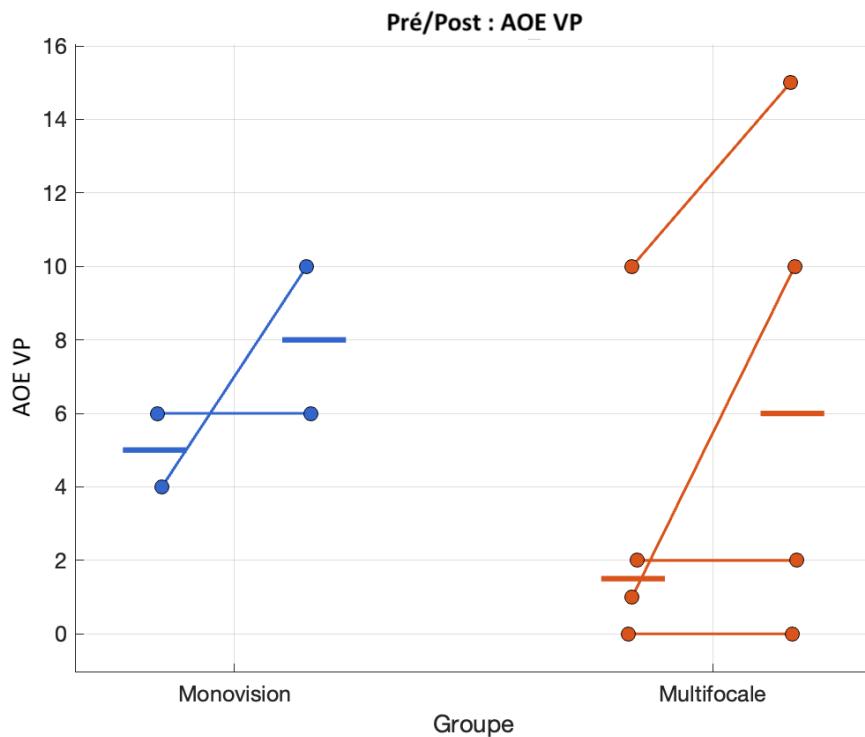


Figure 10 : Evolution de l'angle de la phorie de près dans les deux groupes

En ce qui concerne le **ponctum proximum de convergence (PPC)**, des effets de sens opposés ont été observés : une augmentation de la distance de rupture au nez dans le groupe monovision (taille d'effet positive ; $r = 2$), et une diminution de cette distance dans le groupe multifocal (effet négatif ; $r = -0,63$) (Figure 11) :

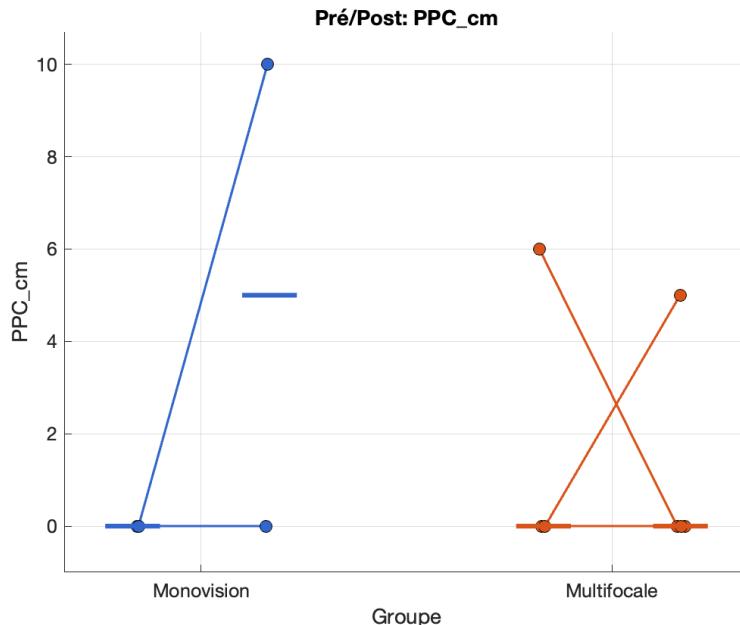


Figure 11: Evolution du PPC dans les deux groupes

Des variations opposées ont été également relevées pour la **convergence de loin** ($r = 0,63$ en monovision ; $r = -0,73$ en multifocal) et la **divergence de près** ($r = 0,63$ en monovision ; $r = -1,28$ en multifocal).

En revanche, la **convergence de près** a montré une taille d'effet négative en monovision ($r = -1,9$) et positive en multifocal ($r = 1,9$), suggérant une diminution de la capacité de convergence dans le premier groupe, et une stabilité, voire une augmentation dans le second (Figure 12) :

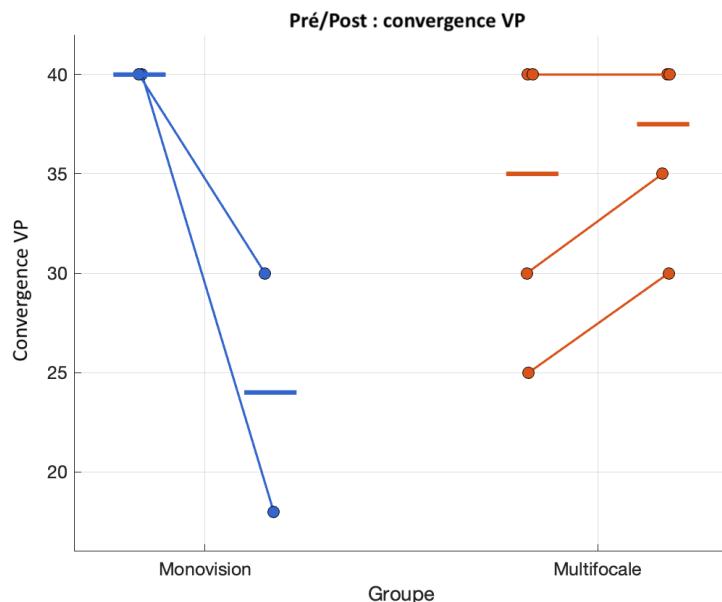


Figure 12 : Evolution de la convergence de près dans les deux groupes

Enfin, la **vision stéréoscopique** s'est trouvée modifiée de manière similaire dans les deux groupes : des tailles d'effet négatives importantes sont observées ($r = -1,9$ en monovision ; $r = -2$ en multifocal), traduisant une augmentation de l'acuité stéréoscopique exprimée en secondes d'arc (Figure 13) :

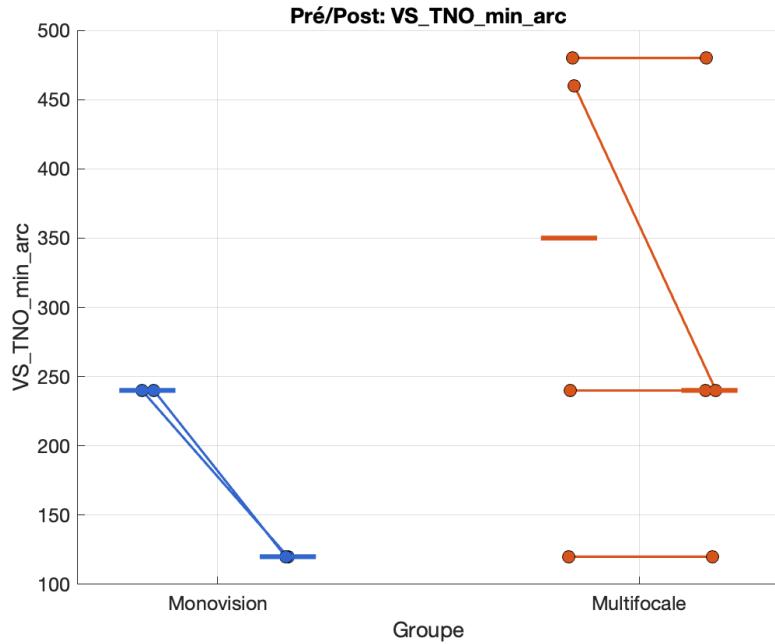


Figure 13 : Evolution de l'acuité stéréoscopique dans les deux groupes

2. Comparaison inter-groupe

Aucune différence statistiquement significative n'a été retrouvée entre les deux techniques chirurgicales concernant l'ampleur de l'effet postopératoire sur les différentes variables. Toutefois, des tailles d'effet substantielles mettent en évidence certaines tendances différencielles (voir Tableau 2) :

Mesures	p_inter-groupe**	Taille d'effet_inter-groupe ***
SF	0,266666667	-0,125
AOE VL	0,666666667	0,375
AOE VP	1	0,75
VS (TNO)	0,4	0,25
PPC	0,533333333	1,25
Convergence VL	0,533333333	1,25
Convergence VP	0,133333333	-0,25
Divergence VL	0,8	0,5
Divergence VP	0,8	1

Tableau 2 : Comparaison monovision vs multifocale

Une taille d'effet positive a été relevée pour l'**hétérophorie de près** ($r = 0,75$), indiquant une augmentation plus marquée de l'exophorie dans le groupe monovision par rapport au groupe multifocal (Figure 14) :

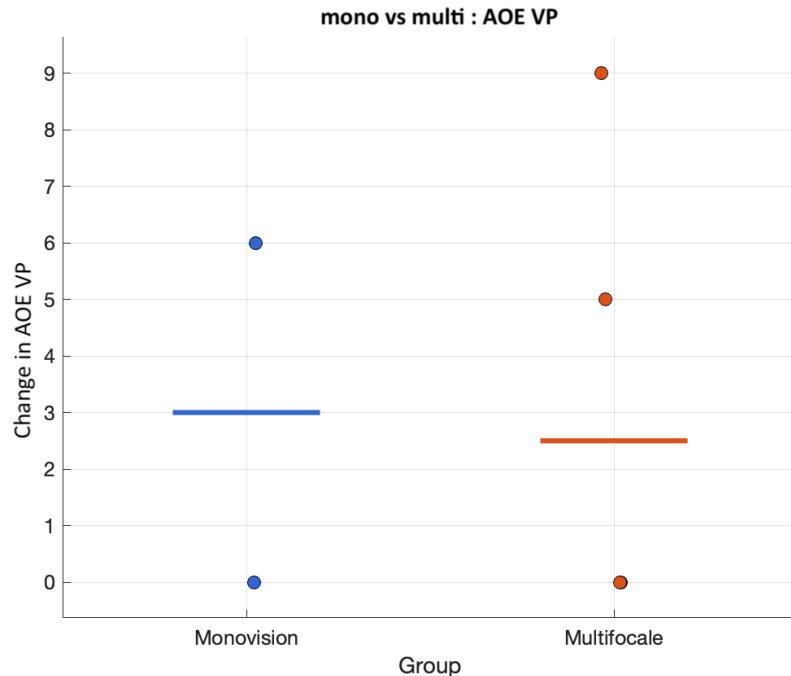


Figure 14 : Comparaison inter-groupe de l'effet sur l'hétérophorie

Concernant le **ponctum proximum de convergence**, une taille d'effet positive ($r = 1,25$) suggère une réduction plus importante de la distance de rupture du PPC au dans le groupe multifocal, tandis qu'une augmentation de cette distance est observée en monovision.

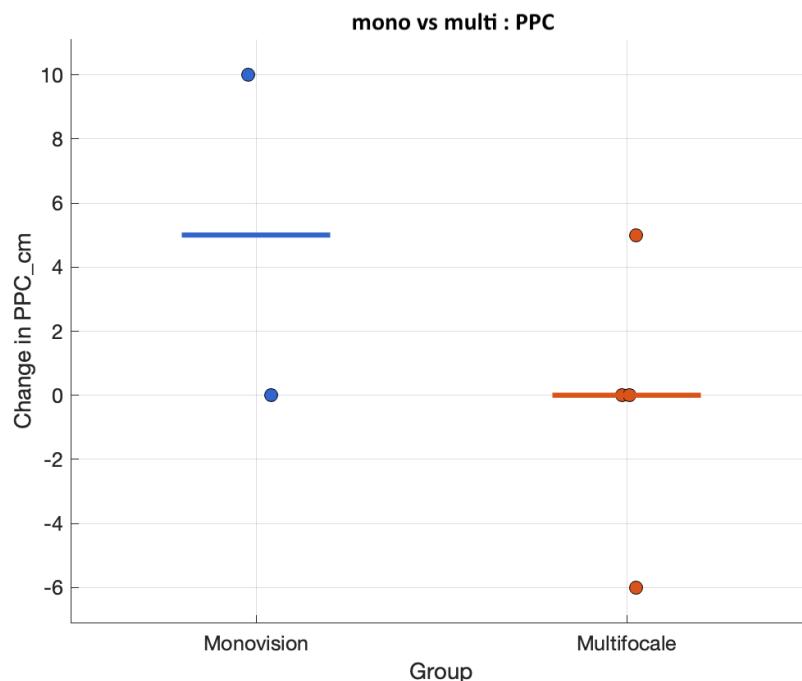


Figure 15 : Comparaison inter-groupe de l'effet sur le PPC

Des différences entre les deux techniques chirurgicales sont également observées pour la **convergence de loin** ainsi que pour les **divergences de près et de loin**, mais ne permettant pas d'identifier un profil d'évolution cohérent entre les groupes.

Enfin, aucune différence notable n'a été observée entre les deux groupes pour la **convergence de près**, les **signes fonctionnels** et la **vision stéréoscopique**, les tailles d'effet étant inférieures à 0,5 pour ces paramètres. En revanche, pour la **convergence de près**, si l'on compare *individuellement* l'impact de la chirurgie sur cette variable, on constate qu'elle évolue très nettement en sens inverse dans chacun des groupes.

D. Discussion

L'analyse des données recueillies dans cette étude ne permet pas de mettre en évidence de différences statistiquement significatives, ni entre les situations pré- et postopératoires au sein de chaque groupe, ni entre les deux techniques chirurgicales. L'absence de différences significatives est essentiellement imputable à la taille réduite des groupes de patients, le taux de recrutement ayant été beaucoup plus faible qu'espéré. Toutefois, la mise en évidence de tailles d'effet importantes suggère la présence d'effets potentiellement significatifs. On constate des effets distincts des deux techniques chirurgicales sur les fonctions binoculaires et les symptômes fonctionnels rapportés par les patients.

Dans le groupe **monovision**, les résultats laissent envisager une détérioration de la convergence, mise en évidence par une augmentation de l'exophorie de près, une augmentation de la distance de rupture du ponctum proximum de convergence au nez et une diminution de la convergence de près. Cette altération globale de la convergence est cohérente avec le principe même de la monovision, qui introduit une dissociation entre les deux yeux, et renforce notre hypothèse. L'effet délétère sur la fusion semble se répercuter directement sur les symptômes fonctionnels, qui s'intensifient en postopératoire. On note, en revanche, une amélioration paradoxale de l'acuité stéréoscopique au TNO difficilement interprétable. Ces résultats sont cohérents avec ceux retrouvés dans la littérature et notamment les études de Muthu et al.⁴⁵ et Finlay, A. L.⁴⁴.

Dans le groupe **multifocalité cornéenne**, les effets apparaissent plus hétérogènes. Une augmentation des signes fonctionnels et de l'exophorie de près est également observée. On retrouve cependant une amélioration paradoxale de la convergence de près, ce qui pourrait traduire un mécanisme de compensation visant à pallier à l'augmentation de l'exophorie et du PPC (diminution de la distance de rupture par rapport au nez). Les résultats montrent également une détérioration de la convergence de loin et de la divergence de près, ce qui rend plus difficile d'établir un schéma clair. L'amélioration de la stéréoscopie est également retrouvée dans ce groupe, mais elle apparaît moins paradoxale qu'en monovision dans la mesure où l'on retrouve une amélioration de la convergence. Elle est, en revanche, contradictoire avec l'augmentation de l'exophorie, selon les résultats de l'étude d'Ito et al.⁴⁶. Il est également notable que l'intensification des signes fonctionnels chez trois des quatre patients du groupe multifocal soient associé à la présence d'une photophobie en postopératoire, orientant vers une composante optique majeure dans la genèse des plaintes, indépendamment des paramètres binoculaires.

En comparant les deux techniques, la **monovision** semble plus délétère pour la vision binoculaire, avec des tailles d'effet marquées sur la convergence aux prismes et sur le PPC. Ces résultats suggèrent une altération plus systématique et significative des fonctions binoculaires dans ce groupe, en lien direct avec la dissociation induite par la chirurgie et rejoiit les résultats retrouvés dans l'étude de García-Montero et al.⁴³. À l'inverse, les modifications binoculaires observées après

chirurgie **multifocale** apparaissent moins cohérentes et il semble vraisemblable de les attribuer à des phénomènes optiques (halos, photophobie) plutôt qu'à une réelle décompensation de la vision binoculaire.

E. Conclusion

La presbytie est un trouble visuel qui affecte l'ensemble de la population, pour lequel de nombreuses techniques de correction sont aujourd'hui disponibles. Comme mentionné précédemment, les évolutions des modes de vie contemporains, avec une population toujours plus active au-delà de 45 ans, rendent une prise en charge optimale de ce trouble visuel d'autant plus essentielle²⁹. Cette prise en charge doit non seulement viser une correction **juste** de l'amétropie, mais aussi garantir un confort visuel maximal. C'est précisément ce dernier aspect qui a retenu notre attention dans cette étude. D'un point de vue orthoptique, il nous a donc semblé pertinent d'examiner l'efficacité et le confort binoculaire associés aux techniques de correction qui induisent une dissociation de la vision binoculaire.

L'objectif de notre étude était double : d'une part, évaluer l'impact de la chirurgie réfractive sur les fonctions binoculaires, et d'autre part, comparer les effets des deux techniques — monovision et multifocalité cornéenne — sur le confort visuel, en posant l'hypothèse que la multifocalité cornéenne offrirait un confort supérieur en raison d'une dissociation binoculaire moindre.

Les résultats obtenus ne permettent pas de démontrer de manière statistiquement significative une détérioration de la vision binoculaire suite à la chirurgie réfractive. Néanmoins, deux observations importantes peuvent être formulées. Premièrement, les résultats suggèrent une altération de l'équilibre binoculaire, tant sur le plan sensoriel que moteur, en lien avec la chirurgie de presbyLASIK, indépendamment de la technique utilisée. En effet, bien qu'aucune altération systématique de la convergence n'ait été observée dans le groupe multifocalité cornéenne, des tailles d'effet marquées indiquent une possible modification de l'hétérophorie, ainsi que des autres paramètres binoculaires. Deuxièmement, ces résultats permettent de supposer — comme énoncé dans notre hypothèse initiale — que la technique de monovision induirait une altération plus marquée des fonctions binoculaires, en particulier en ce qui concerne la convergence, par rapport à la technique de multifocalité.

Ces données soulignent l'importance d'un bilan orthoptique préopératoire complet et d'une sélection rigoureuse des candidats à la monovision, en écartant ceux présentant un risque élevé de trouble binoculaire. Elles soulignent également la nécessité d'une attention particulière face aux symptômes visuels postopératoires, en particulier en cas de signes de décompensation binoculaire, afin d'assurer un suivi adapté et d'intervenir précocement si nécessaire.

Ces résultats ouvrent des pistes intéressantes pour optimiser la prise en charge des patients presbytes, mais restent limités du fait de la faible taille de nos échantillons. Il est donc nécessaire de mener des études complémentaires plus puissantes, avec davantage de participants et une analyse statistique plus poussée, afin de confirmer ces tendances.

VII. Bibliographie

1. Kamien, B. *et al.* Bi-allelic MYH3 loss-of-function variants cause a lethal form of contractures, pterygia, and spondylocarpotarsal fusion syndrome 1B. *Neuromuscular Disorders* **32**, 445–449 (2022).
2. Bourges, J.-L. *La cornée*. (Elsevier Masson, Issy-les-Moulineaux, 2020).
3. Yang, A. Y., Chow, J. & Liu, J. Corneal Innervation and Sensation: The Eye and Beyond. *Yale J Biol Med* **91**, 13–21 (2018).
4. Bourges, J.-L. *La cornée en pratique clinique*. (Sauramps médical, Montpellier, 2021).
5. Thuret, G., Muraine, M. & Gain, P. *L'endothélium cornéen: rapport 2020*. (Elsevier Masson, Issy-les-Moulineaux, 2020).
6. Smith, M. E., Kincaid, M. C. & West, C. E. *Anatomie et réfraction*. (Elsevier, Paris, 2004).
7. Wolffsohn, J. S. *et al.* BCLA CLEAR Presbyopia: Definitions. *Cont Lens Anterior Eye* **47**, 102155 (2024).
8. *Ophthalmologie*. (Elsevier Masson, Issy-les-Moulineaux, 2021).
9. Kamina, P. *Anatomie clinique*. (Maloine, Paris, 2015).
10. Danysh, B. P. & Duncan, M. K. The lens capsule. *Exp Eye Res* **88**, 151–164 (2009).
11. Kuszak, J. R. The ultrastructure of epithelial and fiber cells in the crystalline lens. *Int Rev Cytol* **163**, 305–350 (1995).
12. Davies, L. N. *et al.* BCLA CLEAR presbyopia: Mechanism and optics. *Contact Lens and Anterior Eye* **47**, 102185 (2024).
13. Cochener, B., Albou-Ganem, C., Renard, G. & d'Ophthalmologie (SFO), S. F. *Presbytie: Rapport SFO 2012*. (Elsevier Masson, 2012).
14. Jeanrot, N., Ducret, V. & Jeanrot, F. *Manuel de strabologie: aspects cliniques et thérapeutiques*. (Elsevier Masson, Issy-les-Moulineaux, 2018).
15. Bassnett, S. Zinn's zonule. *Prog Retin Eye Res* **82**, 100902 (2021).

16. Rohen, J. W. Scanning electron microscopic studies of the zonular apparatus in human and monkey eyes. **18**,
17. Cochener-Lamard, B., Albou-Ganem, C. & Renard, G. *Presbytie: rapport 2012 [présenté à la Société française d'ophtalmologie]*. (Elsevier-Masson, Issy-les-Moulineaux, 2012).
18. *Adler's Physiology of the Eye*. (Elsevier, Philadelphia, PA, 2024).
19. Schachar, R. A. *et al.* Model of zonular forces on the lens capsule during accommodation. *Sci Rep* **14**, 5896 (2024).
20. Universalis, E. PUNCTUM REMOTUM & PUNCTUM PROXIMUM - Index. *Encyclopædia Universalis* <https://www.universalis.fr/index/punctum-remotum-et-punctum-proximum/>.
21. Beaubert, É., Pariguet, F. & Taboulot, S. *Manuel de l'opticien: anatomie, physiologie, pathologie*. (Maloine, Paris, 2012).
22. Duane, A. NORMAL VALUES OF THE ACCOMMODATION AT ALL AGES. *JAMA* **LIX**, 1010 (1912).
23. Scheiman, M., Wick, B. & Steinman, B. *Clinical Management of Binocular Vision: Heterophoric, Accommodative, and Eye Movement Disorders*. (Wolters Kluwer Health, Philadelphia, 2020).
24. Allary, J.-C. *Réfraction oculaire et vision binoculaire*. (Lavoisier-Tec & doc, Paris, 2018).
25. Wick, B. Diagnosis and Management in Vision Care. 473 (1987).
26. Ziebarth, N. M. *et al.* Primate lens capsule elasticity assessed using Atomic Force Microscopy. *Exp Eye Res* **92**, 490–494 (2011).
27. Davson, H. *Physiology of the Eye*. (MacMillan, Hounds Mills, 1991).
28. Markoulli, M. *et al.* BCLA CLEAR Presbyopia: Epidemiology and impact. *Contact Lens and Anterior Eye* **47**, 102157 (2024).
29. Luo, B. P., Brown, G. C., Luo, S. C. & Brown, M. M. The quality of life associated with presbyopia. *Am J Ophthalmol* **145**, 618–622 (2008).
30. McDonnell, P. J., Lee, P., Spritzer, K., Lindblad, A. S. & Hays, R. D. Associations of presbyopia with vision-targeted health-related quality of life. *Arch Ophthalmol* **121**, 1577–1581 (2003).

31. Morgan, P. B. *et al.* BCLA CLEAR Presbyopia: Management with contact lenses and spectacles. *Contact Lens and Anterior Eye* **47**, 102158 (2024).
32. Wolffsohn, J. S. & Davies, L. N. Presbyopia: Effectiveness of correction strategies. *Prog Retin Eye Res* **68**, 124–143 (2019).
33. Gatinel, D. & Hoang-Xuan, T. Modélisation tridimensionnelle et géométrie descriptive des profils de photoablations sphériques et cylindriques pures au laser Excimer. **25**, (2002).
34. Ng-Darjuan, M. F., Evangelista, R. P. & Agahan, A. L. D. Photorefractive Keratectomy with Adjunctive Mitomycin C for Residual Error after Laser-Assisted In Situ Keratomileusis Using the Pulzar 213 nm Solid-State Laser: Early Results. *ISRN Ophthalmol* **2013**, 815840 (2013).
35. Revue-Praticien-Article1.
36. Shah, R. History and Results; Indications and Contraindications of SMILE, Compared With LASIK. *Asia-Pacific Journal of Ophthalmology* **8**, 371–376 (2019).
37. Mohamed, T. A., Hoffman, R. S., Fine, I. H. & Packer, M. Post-laser assisted in situ keratomileusis epithelial ingrowth and its relation to pretreatment refractive error. *Cornea* **30**, 550–552 (2011).
38. Craig, J. P. *et al.* BCLA CLEAR Presbyopia: Management with corneal techniques. *Contact Lens and Anterior Eye* **47**, 102190 (2024).
39. Albou-Ganem, C. & Cochener-Lamard, B. *Chirurgie de l'hypermétrie, de l'astigmatisme et de la Presbytie*. vol. 2 (Lavoisier-Tec & doc, 2016).
40. Malecaze, F. & Letsch, J. Chirurgie de la presbytie : approche cornéenne. *Les Cahiers d'ophtalmologie* **2010**, 44–47 (2017).
41. Ho Wang Yin, G. & Hoffart, L. Les différentes techniques de presbylasik. *Les Cahiers d'ophtalmologie* **198**, 24–28 (2016).
42. SCHWIND PresbyMAX®: Presbyopia treatment planning module. <https://www.eye-tech-solutions.com/en/products/treatment-tools/module-presbymax>.
43. García-Montero, M. *et al.* Binocular vision alterations after refractive and cataract surgery: a review. *Acta Ophthalmologica* **97**, (2019).

44. Finlay, A. L. Binocular vision and refractive surgery. *Contact Lens and Anterior Eye* **30**, 76–83 (2007).
45. Muthu, S. *et al.* Integrating binocular vision assessment in refractive surgery work-up: Proposition and protocol. *Indian J Ophthalmol* **68**, 2835 (2020).
46. Ito, M., Shimizu, K., Iida, Y. & Amano, R. Five-year clinical study of patients with pseudophakic monovision. *J Cataract Refract Surg* **38**, 1440–1445 (2012).
47. Péchereau, A., Denis, D. & Speeg-Schatz, C. *Strabisme: rapport 2013 [présenté à la] Société française d'ophtalmologie*. (Elsevier-Masson, Issy-les-Moulineaux, 2013).
48. Minnal, V. R. & Rosenberg, J. B. Refractive surgery: a treatment for and a cause of strabismus. *Current Opinion in Ophthalmology* **22**, 222–225 (2011).

ANNEXES

A. Bilans orthoptiques pré et postopératoire

Patient 1 monovision, 56 ans (Dr Boujnah)

Bilan préopératoire (19/12/2024)

Interrogatoire	<ul style="list-style-type: none"> - Profession : Assistante comptabilité client - Travail sur écran : Ordinateur, tablette, téléphone - Sollicite la VP au quotidien : +++ - SF : céphalées, flou à la lecture, fatigue oculaire, photophobie. Les SF surviennent en fin de journée ou dans l'après-midi au travail - De quand date la dernière CO : 2021 - CO faites sous cycloplégique : non - Supporte bien la CO : Du mal, pas à l'aise - ATCD G: 0 - ATCD ophta (not. chir) : 0 - ATCD orthoptique (not. réeduc) : Réeduc IDC il y a 8 ans pour céphalées, mais les céphalées sont revenu 4 ans après
Réfraction	OD : -4.75 (-0,50) à 30° add +2.25 OG : -1.25 (-2.00) à 5° add +2.25
Réfraction cible	OD : -3.25 (-0.50) à 30° add +2.25 OG : -1.50 (-2.25) à 5° add +2.25
AV	OD : 10/10, P2 OG : 10/10, P2
Œil directeur	OG
Position compensatrice	Auncune
ESE	VL : Orthophorique VP : Exophorie
MO	RAS
AOE	VL : 0 dp VP : 10 dp
VS (TNO)	240
PPC	Bon (jusqu'au nez)
PPA	15 cm
Vergences	C : 12 dp D : 6 dp C' : 40 dp D' : 12 dp

Bilan postopératoire (28/01/2025)

Interrogatoire	<ul style="list-style-type: none"> - Comment se sent depuis la chirurgie du point de vue oculaire ? Bien - Vision satisfaisante ? Oui - SF : Idem que préop + fatigue oculaire en fin de journée et photophobie plus qu'avant
Réfraction finale	OD : -1.50 Add +2.25 OG : +0.00 Add +2.25
AV SC	OD : 2/10, P2 lent OG : 12.5/10, P8
AV AC	OD : 12.5/10, P1.5 OG : 12.5/10, P1.5
Position compensatrice	Tête penchée sur épaule gauche
ESE	VL : Orthophorique VP : Exophorie
MO	RAS
AOE	VL : 0 dp VP : 6 dp
VS (TNO)	120
PPC	Bon (jusqu'au nez)
PPA	15 cm
Vergences	C : 10 dp D : 8 dp C' : 18 dp D' : 14 dp

Patiente 2 monovision, 45 ans (Dr Boujnah)

Bilan préopératoire (19/12/24)

Interrogatoire	<ul style="list-style-type: none"> - Profession : Chef de projet - Travail sur écran : Ordinateur au travail, téléphone dans la vie courante (8h/J) - Sollicite la VP au quotidien : +++ - SF : fatigue oculaire en fin de journée, photophobie, migraine toute la journée - De quand date la dernière CO : 2023 - CO faites sous cycloplégique : non - Supporte bien la CO : Les supporte bien, porte plus ses lentilles - ATCD G: 0 - ATCD ophta (not. chir) :0 - ATCD orthoptique (not. rééduc) : Pense qu'elle avait un strabisme étant petite
Réfraction	OD : -2.50 (-1.50) à 5° OG : -4.00 (-0.75) à 175°
Réfraction cible	OD : -1.25 (-1.50) à 5° OG : -4.00 (-0.75) à 175°
AV	OD : 12.5/10, P1.5 OG : 12.5/10, P1.5
Œil directeur	OG
Position compensatrice	Auncune
ESE	VL : Exophorie avec restitution très lente VP : Exophorie
MO	RAS
AOE	VL : 25 dp VP : 4 dp
VS (TNO)	240
PPC	Bon (jusqu'à 5 cm)
PPA	15 cm
Vergences	C : 6 dp D : 14 dp C' : 40 dp D' : 16 dp

Bilan postopératoire (28/01/2025)

Interrogatoire	<ul style="list-style-type: none"> - Comment se sent depuis la chirurgie du point de vue oculaire ? Parfait - Vision satisfaisante ? Oui - SF : Idem qu'en préopératoire Aucune modification des SF avant et après la chirurgie
Réfraction finale	OD : -1.25 Add +0.50 OG : +0.00 Add +0.50
AV SC	OD : 3/10, P1.5 OG : 12.5/10, P1.5
AV AC	OD : 12.5/10, P1.5 OG : 12.5/10, P1.5
Position compensatrice	Aucune
ESE	VL : Exophorie au 1 ^{er} coup d'écran avec restitution très lente VP : Exophorie avec restituation lente et clignements ++
MO	RAS
AOE	VL : 10 dp VP : 10 dp
VS (TNO)	120
PPC	10 cm
PPA	20 cm
Vergences	C : 20 dp D : 12 dp C' : 30 dp D' : 8 dp

Patient 1 multifocalité cornéenne, 55 ans (Dr Boujnah)

Bilan préopératoire (17/12/2024)

Interrogatoire	<ul style="list-style-type: none"> - Profession : Directeur de bureau d'étude - Travail sur écran : tablette, téléphone - Sollicite la VP au quotidien : +++ - SF : fatigue oculaire, larmoiement. Les SF surviennent en fin de journée - De quand date la dernière CO : 2024 - CO faites sous cycloplégique : non - Supporte bien la CO : Du mal, pas à l'aise avec l'adaptation des verres progressifs - ATCD G: HTA - ATCD ophta (not. chir) :0 - ATCD orthoptique (not. rééduc) : 0
Réfraction	OD : +1.50 (-0,25) à 55° add +2.00 OG : +2.25 (-0.50) à 85° add +2.00
Réfraction cible	OD : +1.50 (-0.25) à 55° OG : +2.00 (-0.50) à 85°
AV	OD : 10/10, P2 OG : 10/10, P2
Œil directeur	OD
Position compensatrice	Aucune
ESE	VL : Exophorie VP : Exophorie avec clignements
MO	RAS
AOE	VL : 4 dp VP : < 2 dp
VS (TNO)	460
PPC	Bon (jusqu'au nez)
PPA	Environ 50 cm
Vergences	C : 18 dp D : 4 dp C' : 30 dp D' : 4 dp

Bilan postopératoire (28/01/2025)

Interrogatoire	<ul style="list-style-type: none"> - Comment se sent depuis la chirurgie du point de vue oculaire ? Très content - Vision satisfaisante ? Oui - SF : fatigue oculaire ++ les 2 premières semaines après l'opération et diminue petit à petit, photophobie ++ surtout en conduite de nuit, sous titrage à la télé pas parfaitement nets en binoculaire. Sinon idem qu'en préopératoire.
Réfraction finale	OD : -1.50 Add +1.50 OG : +0.00 Add +1.50
AV SC	OD : 4/10, P1.5 OG : 10/10, P5
Position compensatrice	Aucune
ESE	VL : Exophorie VP : Exophorie
MO	RAS
AOE	VL : < 2 dp VP : 10 dp
VS (TNO)	240
PPC	Bon (jusqu'au nez)
PPA	10 cm
Vergences	C : 20 dp D : 6 dp C' : 35 dp D' : 6 dp

Patient 2 multifocalité cornéenne, 66 ans (Dr Esminezhad)

Bilan préopératoire (13/12/2024)

Interrogatoire	<ul style="list-style-type: none"> - Profession : Retraitée - Travail sur écran : Ordinateur portable, téléphone - Sollicite la VP au quotidien : +++ mais la VL aussi car conduit beaucoup - SF : céphalées sus-orbitaires plutôt en fin de journée avec tendance générale à la migraine, sécheresse oculaire - De quand date la dernière CO : 03/2024 - CO faites sous cycloplégique : non - Supporte bien la CO : Oui - Porte une lunette en VP et une en VL (pas de progressif) - ATCD G: 0 - ATCD ophta (not. chir) : kératite (1979) - ATCD orthoptique (not. réeduc) : 0
Réfraction	OD : -1.25 add +3.00 OG : -1.25 add +3.00
AV	OD : 10/10, P2 OG : 10/10, P2
Œil directeur	OD
Position compensatrice	Tête légèrement inclinée sur épaule droite
ESE	VL : Exophorie VP : Exophorie avec restitution lente
MO	RAS, poursuite légèrement saccadée
AOE	VL : 0 dp VP : 10 dp
VS (TNO)	240
PPC	Romp à 6-7 cm du nez
PPA	30 cm
Vergences	C : 18 dp D : 6 dp C' : 25 dp D' : 18 dp

Bilan postopératoire (20/01/2025)

Interrogatoire	<p>- Comment se sent depuis la chirurgie du point de vue oculaire ? Très content mais nécessité de lunettes pour conduire</p> <p>- Vision satisfaisante ? Oui</p> <p>- SF : idem préopératoire + fatigue oculaire en fin de journée</p>
Réfraction finale	OD : plan (-0.50) à 40° OG : -1
AV SC	OD : 12.5/10f OG : 2.5/10
AV AC	OD : 12.5/10f OG : 10/10
Position compensatrice	Aucune
ESE	VL : Exophorie VP : Exophorie
MO	RAS
AOE	VL : 0 VP : 14 dp
VS (TNO)	240
PPC	Au nez
PPA	42 cm
Vergences	C : 10 dp D : 6 dp C' : 30 dp D' : 8 dp

Patient 3 multifocalité cornéenne, 43 ans (Dr Boujnah)

Bilan préopératoire (27/03/2025)

Interrogatoire	<ul style="list-style-type: none"> - Profession : Gestionnaire de patrimoine - Travail sur écran : Oui beaucoup - Sollicite la VP au quotidien : +++ - SF : céphalées, fatigue oculaire, photophobie. Les SF surviennent en fin de journée ou à l'effet visuel - De quand date la dernière CO : 2024 - CO faites sous cycloplégique : non - Supporte bien la CO : Oui - ATCD G : 0 - ATCD ophta (not. chir) : 0 - ATCD orthoptique (not. rééduc) : Dans l'enfance mais pas de notion de strabisme
Réfraction	OD : +1.00 (-1.50) à 90° OG : +0.50 (-3) à 90°
Réfraction cible	OD : +1.00 (-1.50) à 90° OG : +0 .50 (-3) à 90°
AV	OD : 10/10, P2 OG : 10/10, P2
Œil directeur	OD
Position compensatrice	Auncune
ESE	VL : Orthophorique même dissocié VP : Orthophorique même dissocié
MO	RAS
AOE	VL : 0 dp VP : 0 dp
VS (TNO)	120
PPC	Bon (jusqu'au nez)
PPA	15-20 cm
Vergences	C : 14 dp D : <2 dp C' : 40 dp D' : 10 dp

Bilan postopératoire (24/04/2025)

Interrogatoire	<ul style="list-style-type: none"> - Comment se sent depuis la chirurgie du point de vue oculaire ? cf. SF - Vision satisfaisante ? oui - SF : idem qu'en préop, mais photophobie lors de la conduite la nuit + halos lumineux
Réfraction finale	OD : Plan OG : -2.75 (-0.50) à 170°
AV SC	OD : 10/10, P3 OG : 2/10f, P1.5
Position compensatrice	Aucune
ESE	VL : Orthophorique VP : Orthophorique
MO	RAS
AOE	VL : 0 dp VP : 0 dp
VS (TNO)	120
PPC	Bon (jusqu'au nez)
PPA	25 cm
Vergences	C : 16 dp D : 2 dp C' : 40 dp D' : 8 dp

Patient 4 multifocalité cornéenne, 50 ans (Dr Boujnah)

Bilan préopératoire (03/04/2025)

Interrogatoire	<ul style="list-style-type: none"> - Profession : architecte interieur - Travail sur écran : Ordinateur + téléphone - Sollicite la VP au quotidien : ++ - SF : aucun - De quand date la dernière CO : Décembre 2024 - CO faites sous cycloplégique : non - Supporte bien la CO : Oui - ATCD G: 0 - ATCD ophta (not. chir) : Botox lipofilling du cerne il y a longtemps - ATCD orthoptique (not. réeduc) : 0
Réfraction	OD : +1.75 Add +2.25 OG : +1.75 Add +2.25
Réfraction cible	OD : +1.50 OG : +1.50 (-0.50) à 110
AV	OD : 10/10, P2 OG : 10/10, P2
Œil directeur	OG
Position compensatrice	Aucune
ESE	VL : Orthophorique même dissociée VP : Exophorie
MO	RAS
AOE	VL : 0 dp VP : 2 dp
VS (TNO)	480
PPC	Bon (jusqu'au nez)
PPA	30
Vergences	C : 25 dp D : 4 dp C' : 40 dp D' : 10 dp

Bilan postopératoire (28/04/2025)

Interrogatoire	<ul style="list-style-type: none"> - Comment se sent depuis la chirurgie du point de vue oculaire ? Bien, hormis halos. - Vision satisfaisante ? Leger flou en VP, bonne vision en VL. - SF : photophobie et halos lumineux. Fatigue oculaire après la chirurgie qui a disparue depuis.
Réfraction finale	OD : - 1,75 Add + 1,75 OG : + 0,75 Add + 1,75
AV SC	OD : 5/10, P2 OG : 10/10, P8
Position compensatrice	Aucune
ESE	VL : Orthophorique VP : Exophorie
MO	RAS
AOE	VL : 0 dp VP : 2 dp
VS (TNO)	480
PPC	Bon (jusqu'au nez)
PPA	30 cm
Vergences	C : 18 dp D : 6 dp C' : 40 dp D' : 6 dp

B. Statistiques : figures

1. Comparaison intra-groupe

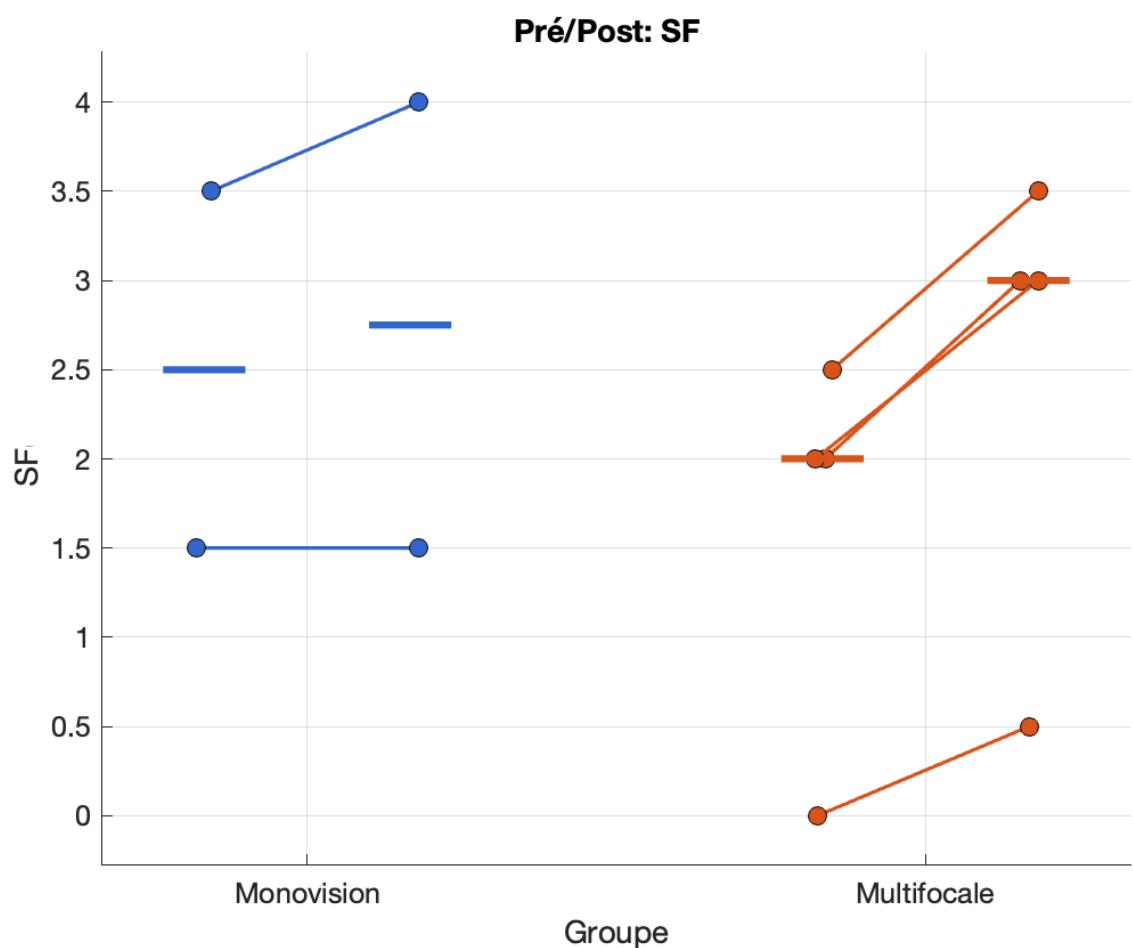


Figure 16 : Comparaison pré et postopératoire de l'intensité des signes fonctionnels dans les 2 groupes

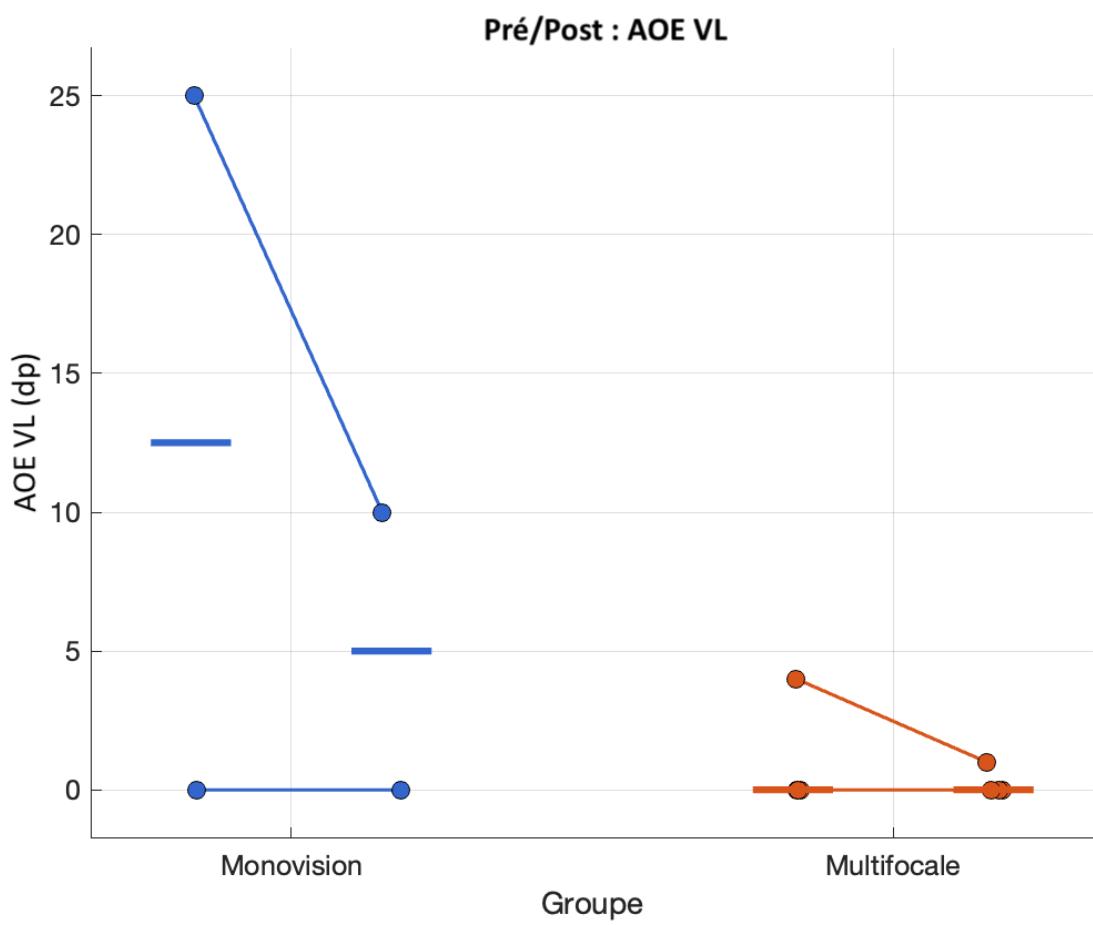


Figure 17 : Comparaison pré et postopératoire de l'AOE de loin dans les 2 groupes

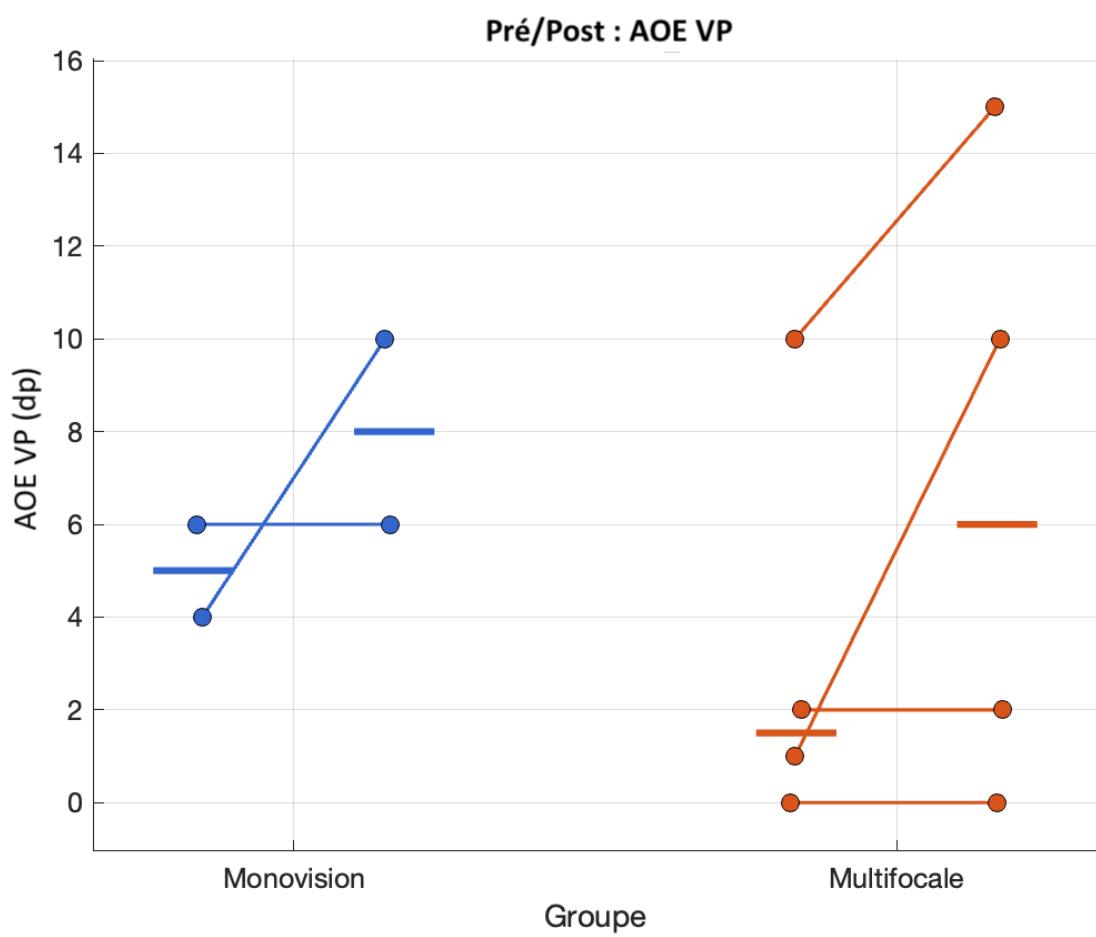


Figure 18 : Comparaison pré et postopératoire de l'AOE de près dans les 2 groupes

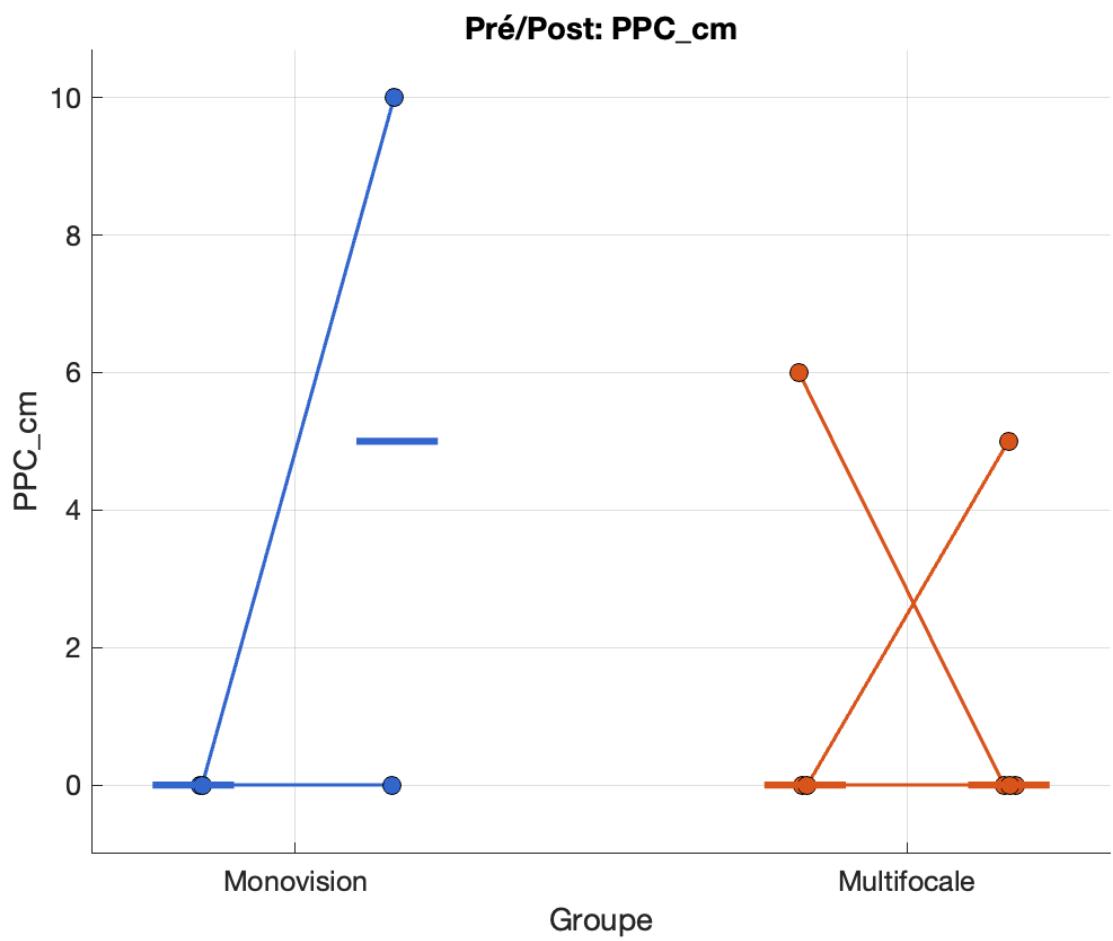


Figure 19 : Comparaison pré et postopératoire du ponctum proximum de convergence dans les 2 groupes

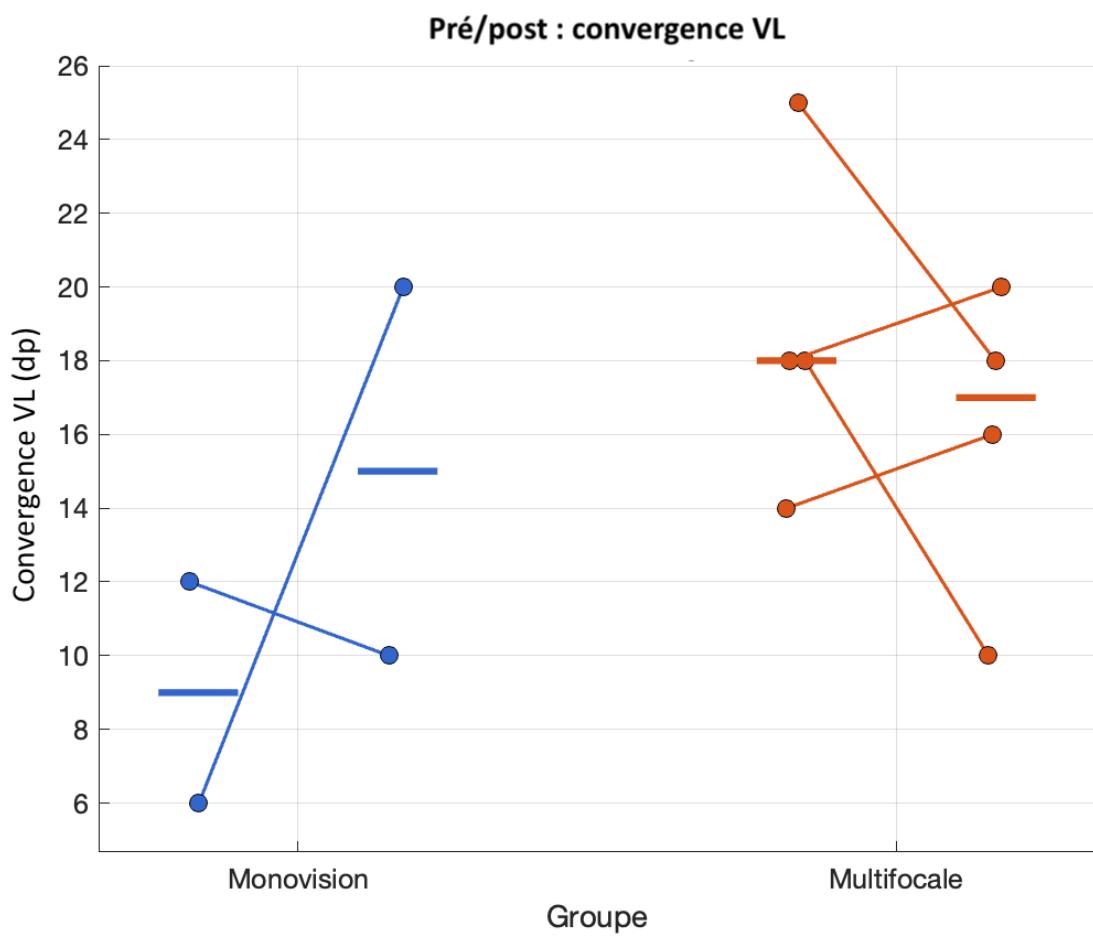


Figure 20 : Comparaison pré et postopératoire de la convergence de loin dans les 2 groupes

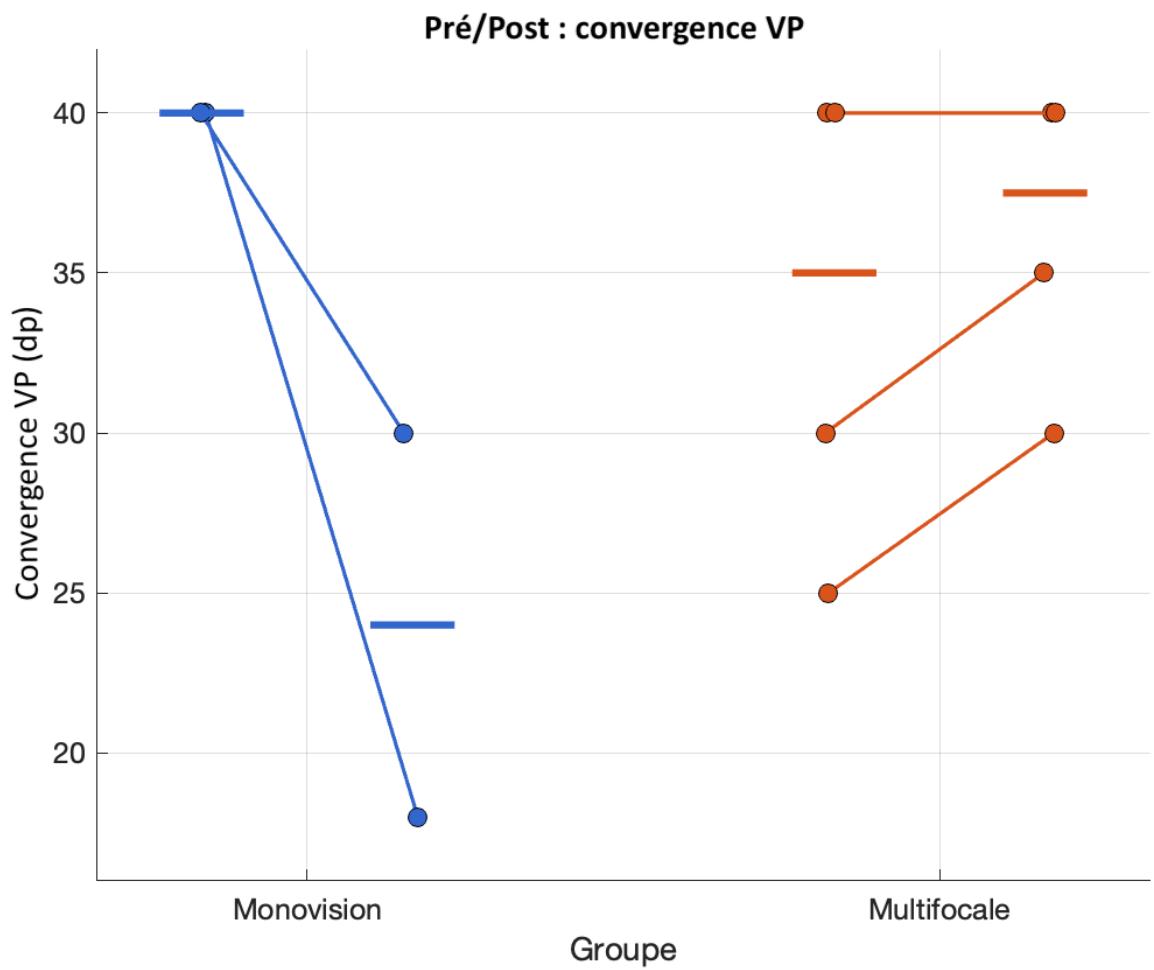


Figure 21 : Comparaison pré et postopératoire de la convergence de près dans les 2 groupes

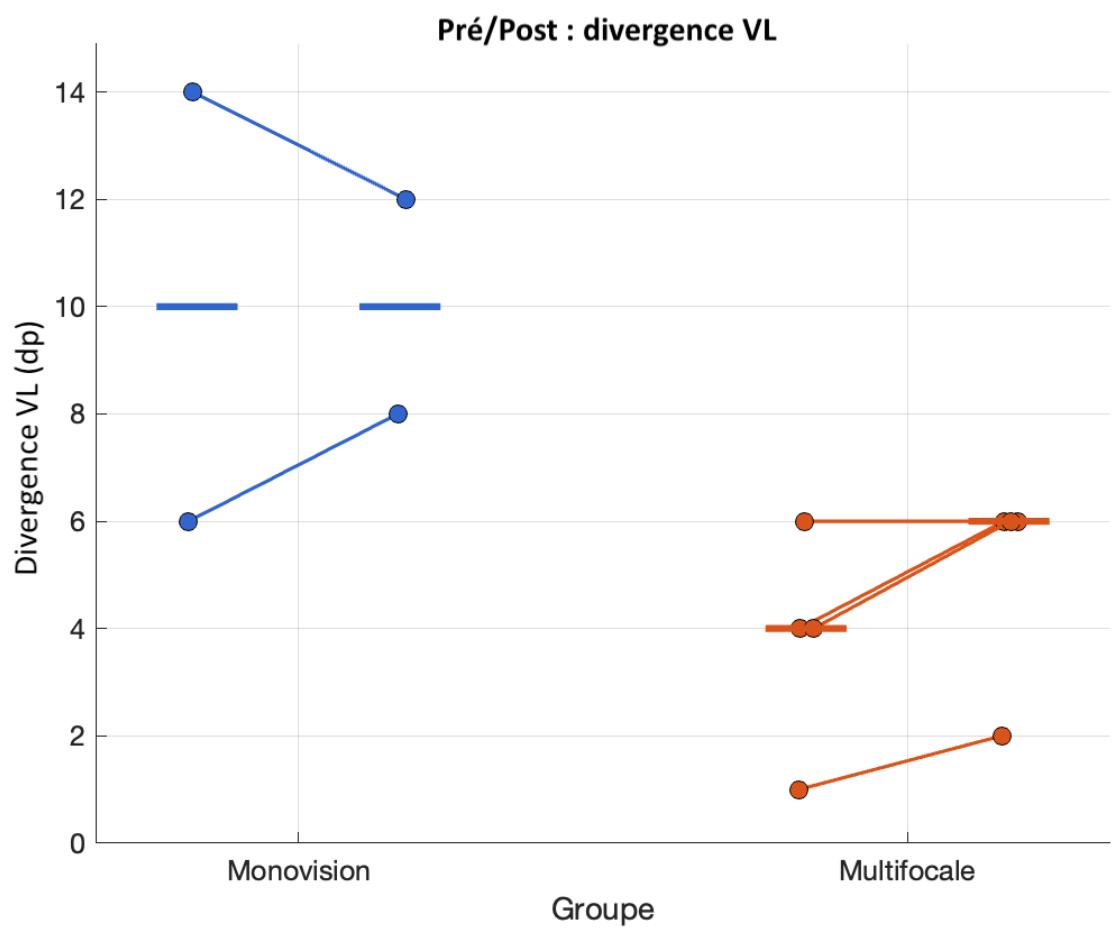


Figure 22 : Comparaison pré et postopératoire de la divergence de loin dans les 2 groupes

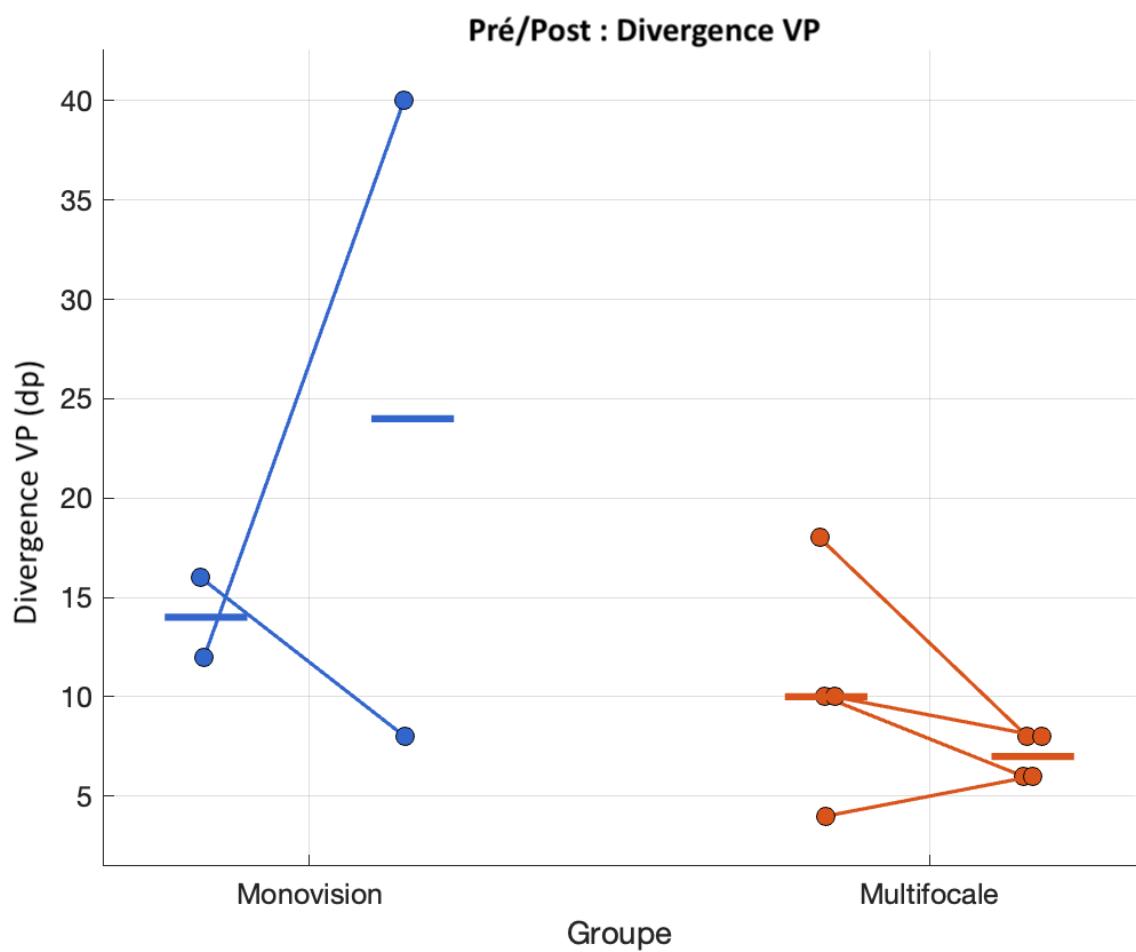


Figure 23: Comparaison pré et postopératoire de la divergence de près dans les 2 groupes

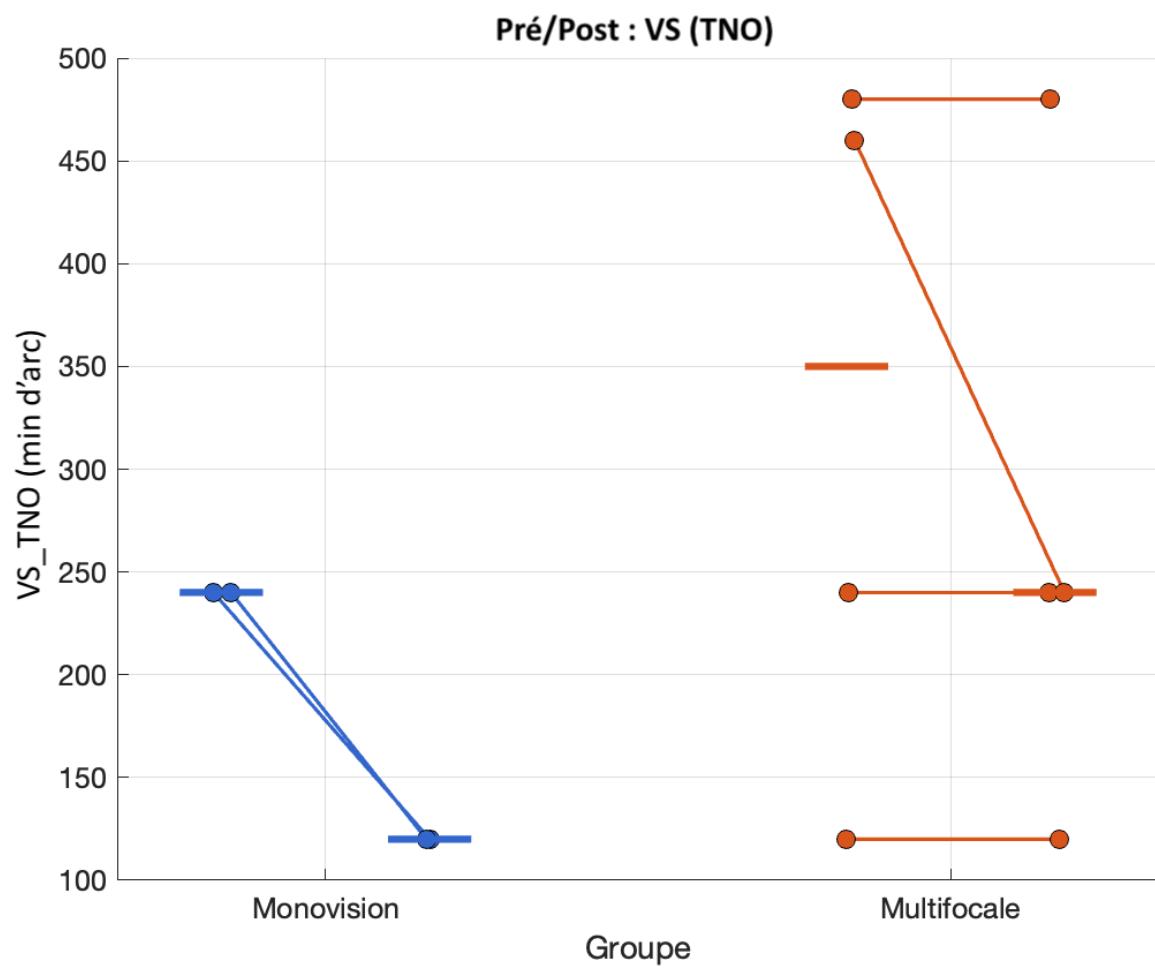


Figure 24: Comparaison pré et postopératoire de la vision stéréoscopique au TNO dans les 2 groupes

2. Comparaison inter-groupe (monovision vs mutlifocalité cornéenne)

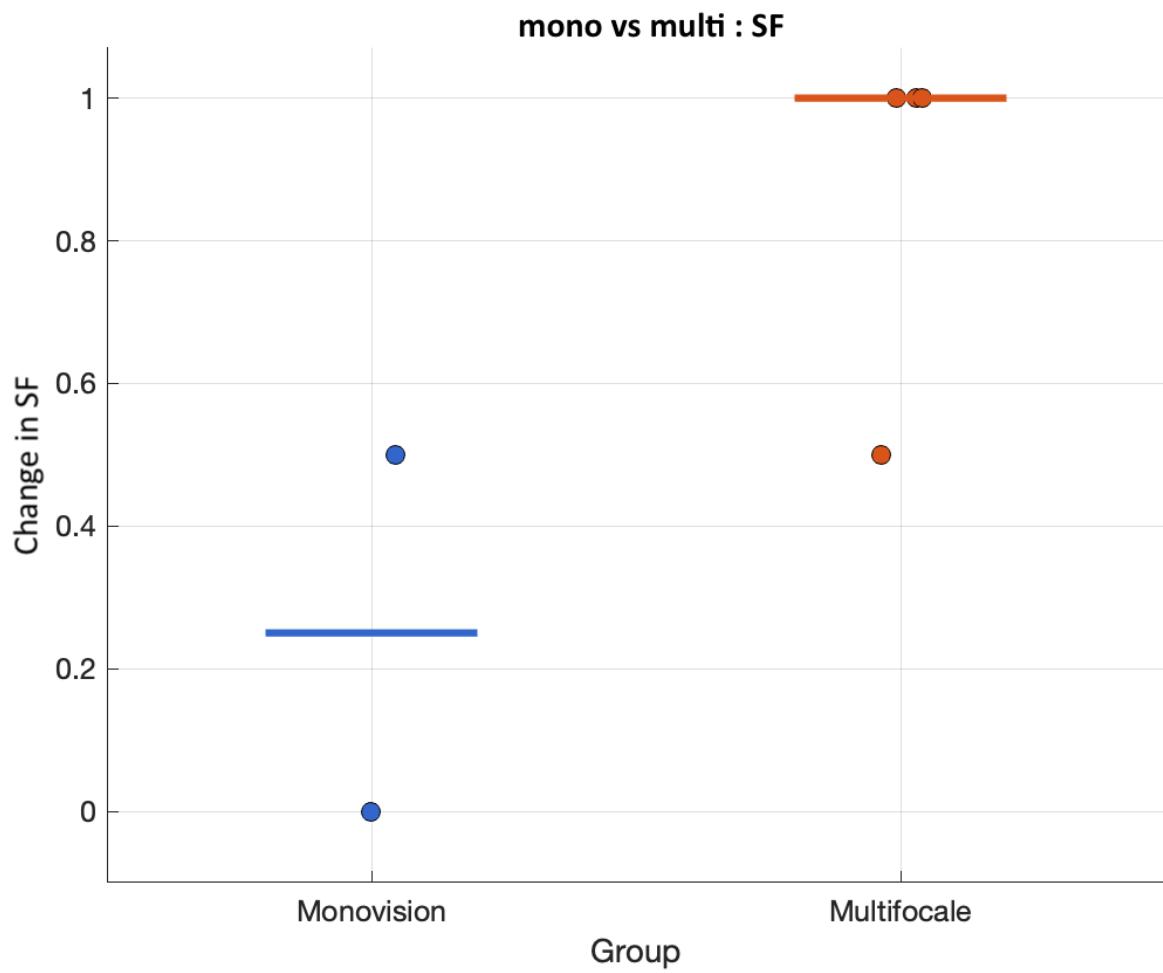


Figure 25 : Comparaison intergroupe de l'effet sur les signes fonctionnels

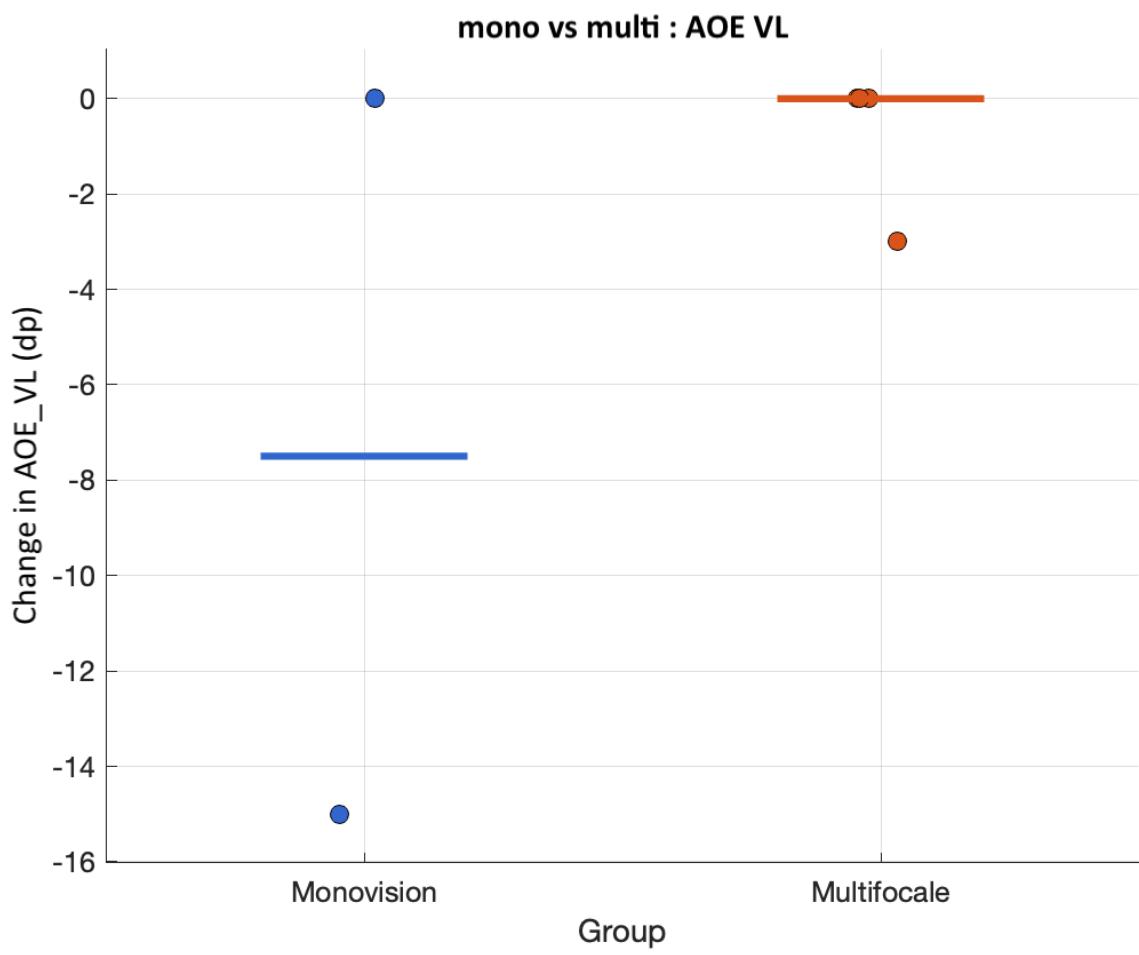


Figure 26: Comparaison intergroupe de l'effet sur l'AOE de loin

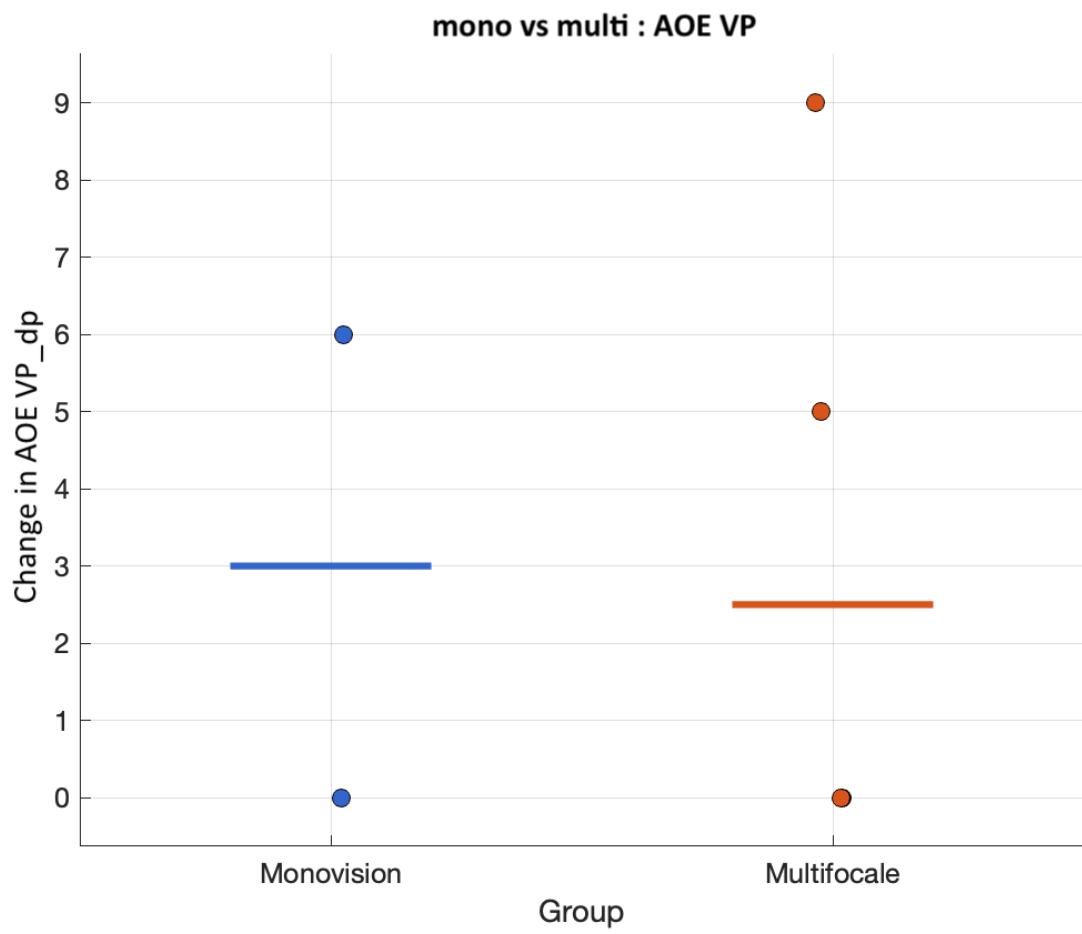


Figure 27: Comparaison intergroupe de l'effet sur l'AOE de près

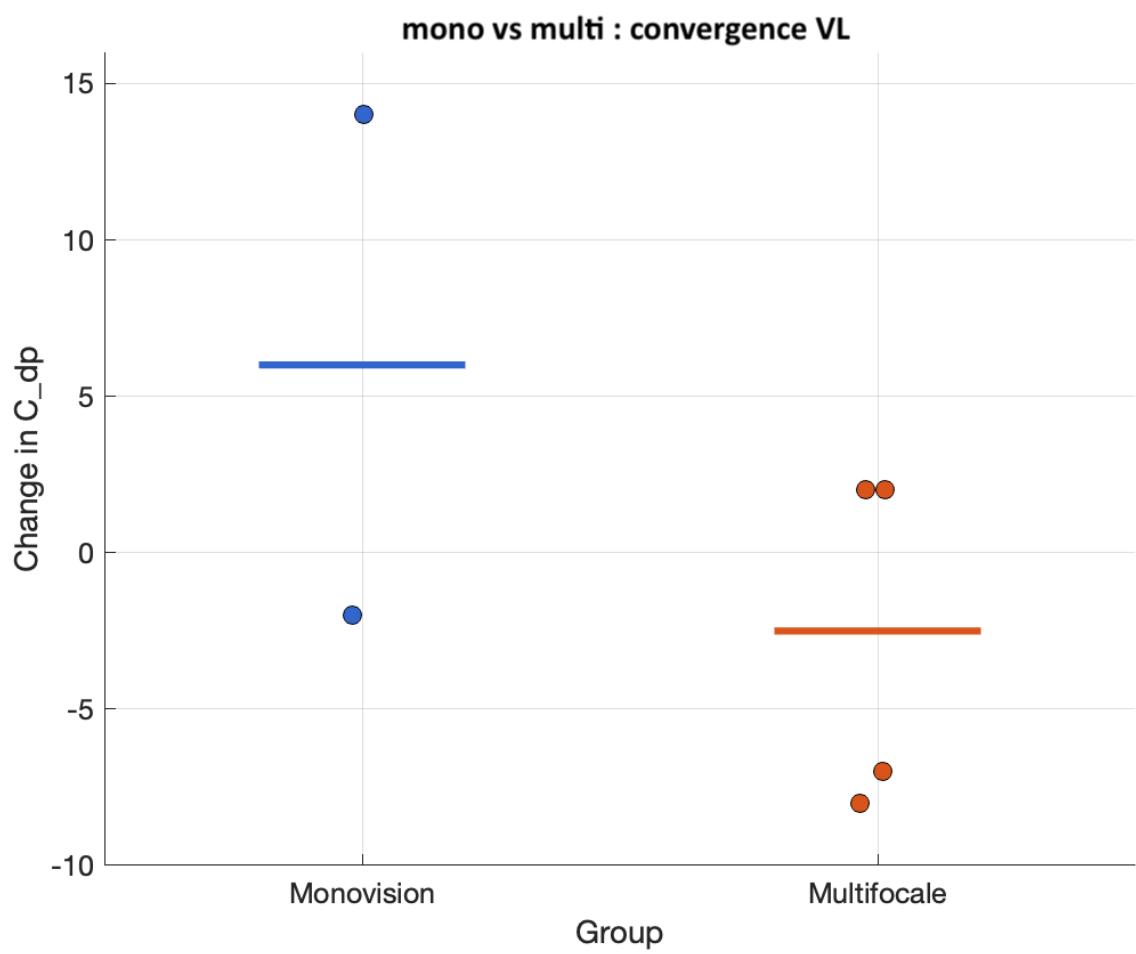


Figure 28 : Comparaison intergroupe de l'effet sur la convergence de loin

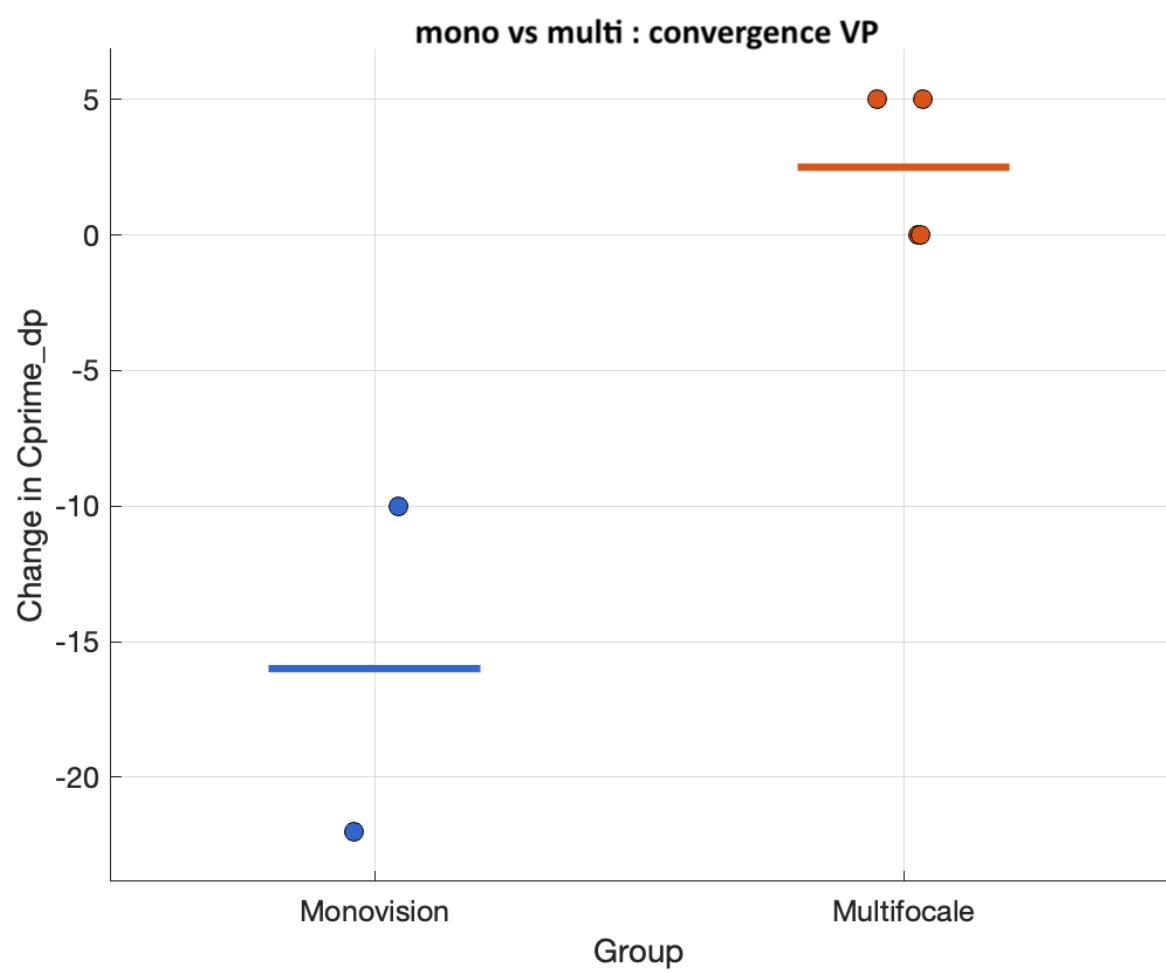


Figure 29: Comparaison intergroupe de l'effet sur la convergence de près

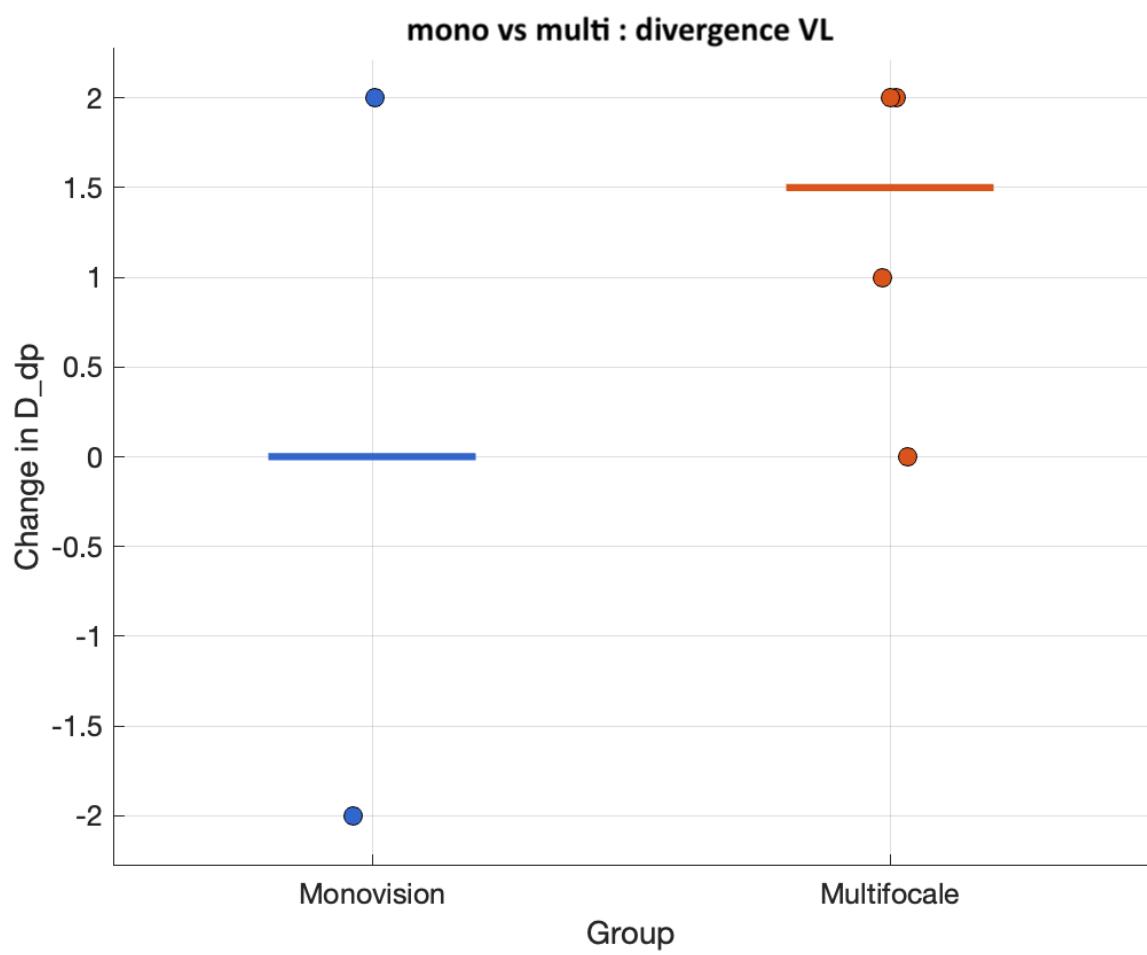


Figure 30: Comparaison intergroupe de l'effet sur la divergence de loin

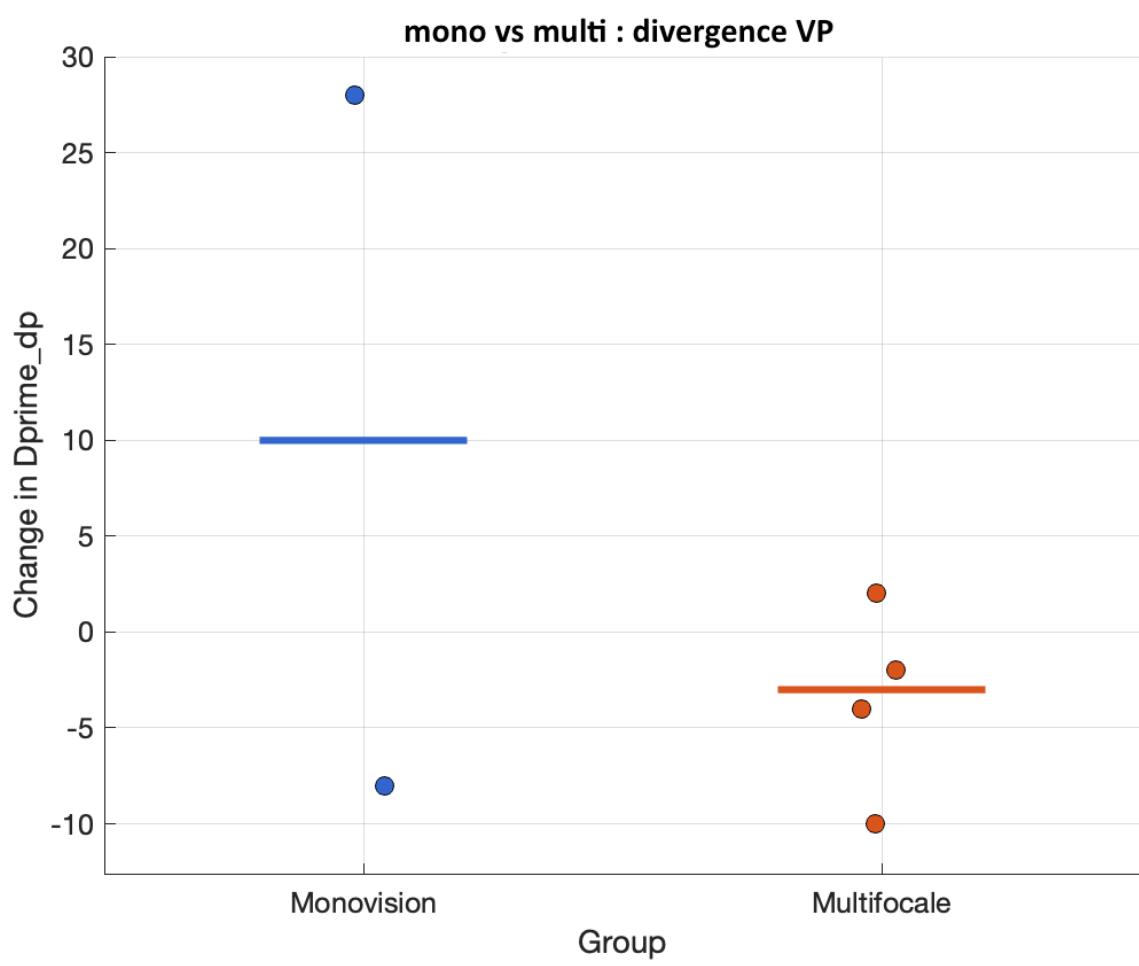


Figure 31: Comparaison intergroupe de l'effet sur la divergence de près

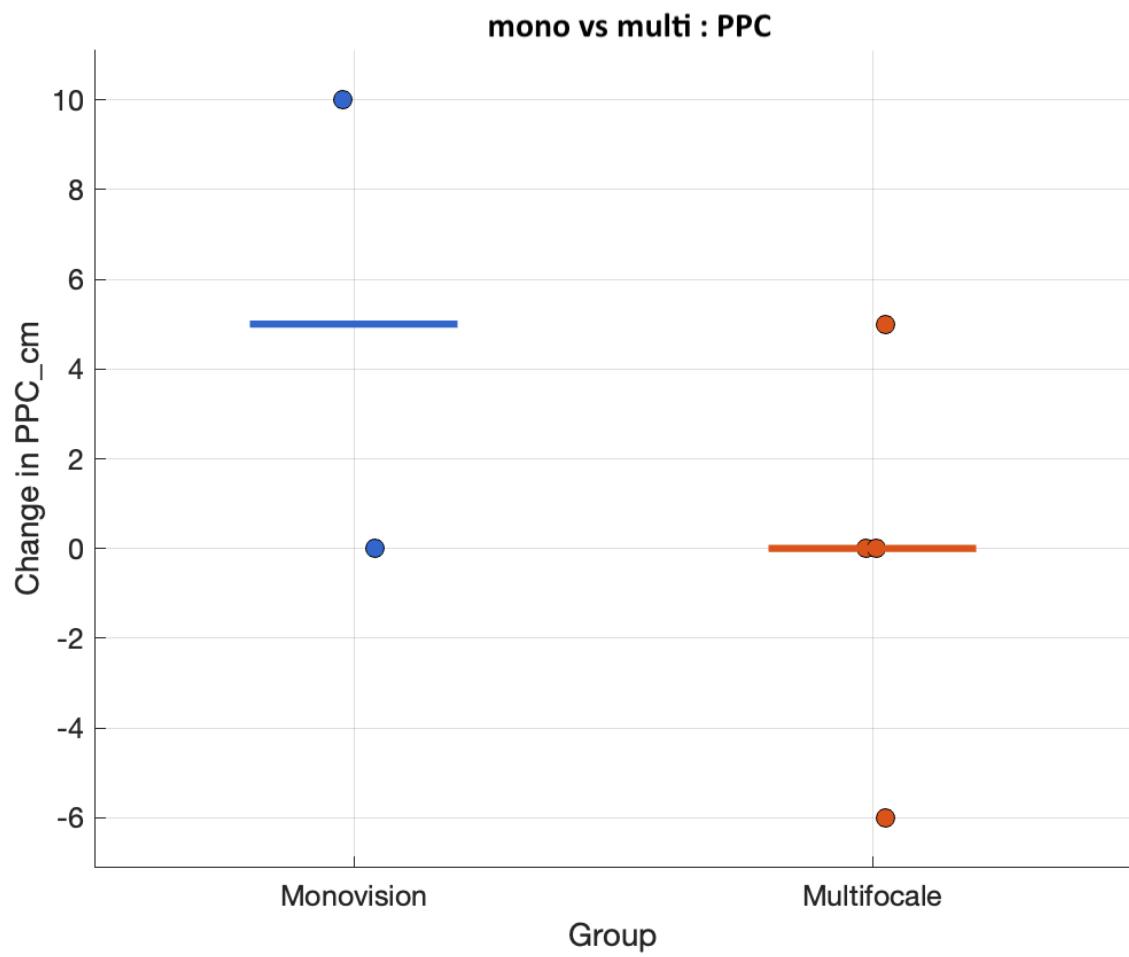


Figure 32: Comparaison intergroupe de l'effet sur le ponctum proximum de convergence (PPC)

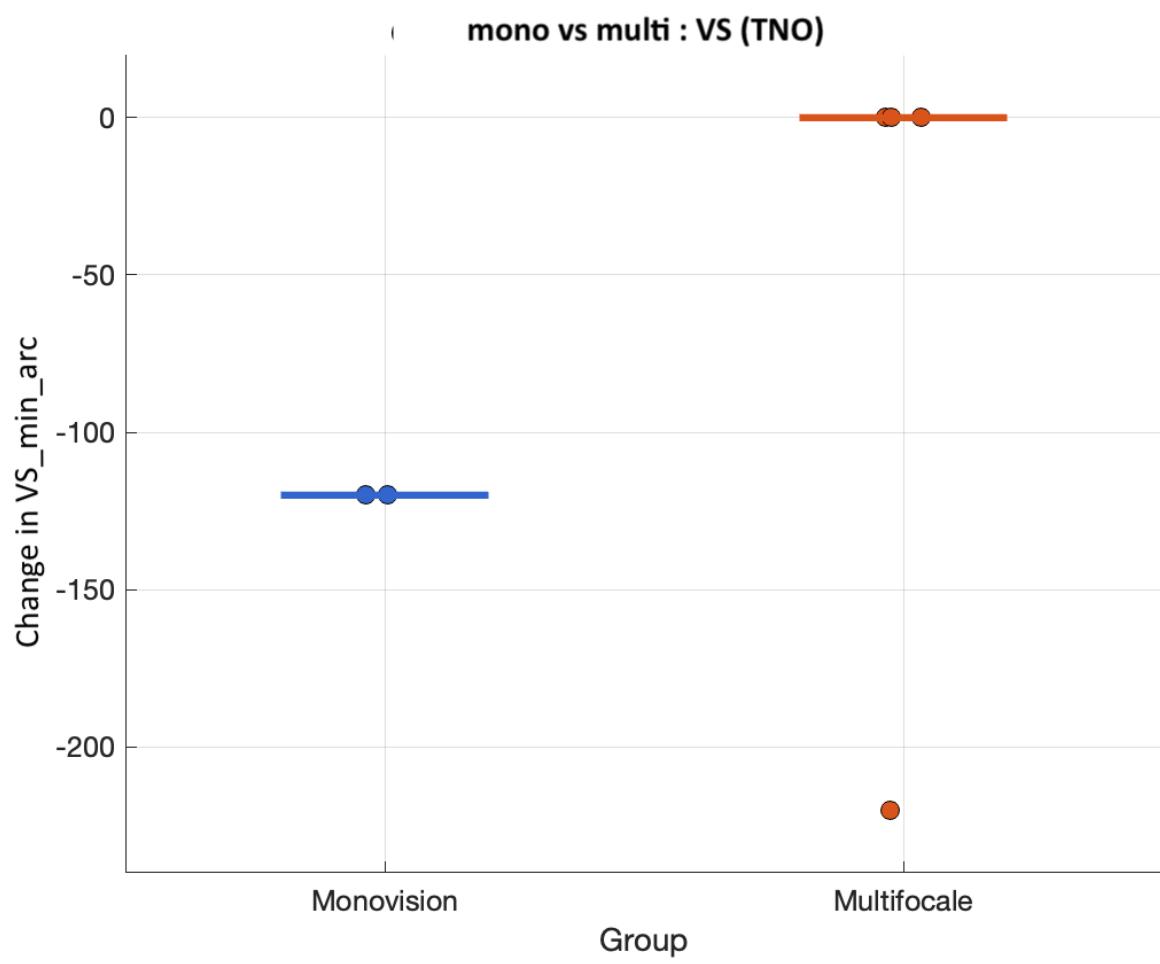


Figure 33: Comparaison intergroupe de l'effet sur la vision stéréoscopique au TNO