



Année 2025

Thèse N°006/25

# VALIDITÉ DES MODULES DE CHIRURGIE DE LA CATARACTE SUR LE SIMULATEUR EYESI

THÈSE

PRÉSENTÉE ET SOUTENUE PUBLIQUEMENT LE 03/01/2025

PAR

Mr. LAAMOUD ISMAIL

Né le 01 Novembre 1998 à Meknès

POUR L'OBTENTION DU DOCTORAT EN MÉDECINE

MOTS-CLÉS :

Simulation- Chirurgie - Ophtalmologie - Formation - Cataracte

JURY

- M. SQALLI HOUSSAINI TARIK** ..... PRÉSIDENT  
Professeur de Néphrologie
- M. BENATIYA ANDALOUSSI IDRIS** ..... RAPPORTEUR  
Professeur d'Ophtalmologie
- M. BOUKATTA BRAHIM**.....
- Mme. ABDELLAOUI MERIEM** .....
- M. CHRAIBI FOUAD** .....
- M. BENNIS AHMED** .....
- M. MOUTEI HASSAN** ..... MEMBRE ASSOCIÉ  
Professeur assistant d'Ophtalmologie
- } JUGES

## SOMMAIRE

I.	INTRODUCTION .....	22
II.	RAPPEL ANATOMIQUE .....	24
1.	ANATOMIE DESCRIPTIVE .....	24
2.	ANATOMIE BIOMÉTRIQUE .....	25
3.	ANATOMIE MICROSCOPIQUE .....	28
4.	RAPPORTS ANATOMIQUES: .....	30
III.	PHYSIOLOGIE DU CRISTALLIN. ....	32
A.	MÉTABOLISME DU CRISTALLIN .....	32
1.	COMPOSITION CHIMIQUE DU CRISTALLIN :.....	32
2.	PERMÉABILITÉ CAPSULAIRE :.....	34
3.	MÉTABOLISME ENERGETIQUE : .....	36
4.	DOMMAGE OXYDATIVE ET MECANISMES DE PROTECTION :.....	36
B.	RÔLE ET PROPRIÉTÉS OPTIQUES.....	37
1.	TRANSPARENCE: .....	37
2.	TRANSMISSION DE LA LUMIERE :.....	37
3.	RÉFRACTION : .....	38
4.	ACCOMMODATION :.....	38
5.	ABERRATIONS CHROMATIQUES :.....	39
6.	ABERRATIONS SPHERIQUES :.....	39
C.	SYNTHÈSE DES FIBRES CRISTALLINIENNES.....	39
D.	CHANGEMENTS AVEC L'ÂGE : .....	40
1.	MORPHOLOGIE .....	40
2.	PRESBYTIE .....	41
3.	CHANGEMENTS BIOCHIMIQUES.....	41

---

<b>IV. PHYSIOPATHOLOGIE DE LA CATARACTE .....</b>	<b>42</b>
<b>V. TECHNIQUES CHIRURGICALES DE LA CATARACTE .....</b>	<b>44</b>
<b>A. LA PHACOÉMULSIFICATION .....</b>	<b>44</b>
1. PRINCIPES D'INCISIONS.....	44
2. INJECTIONS DES SUBSTANCES VISCOELASTIQUES (SVE).....	45
3. CAPSULORHEXIS .....	48
4. HYDRODISSECTION – HYDRODÉLINÉATION.....	48
5. TRAITEMENT DU NOYAU .....	50
6. ASPIRATION DES MASSES.....	52
7. IMPLANTATION: .....	53
8. ASPIRATION DE LA SUBSTANCE VISCOELASTIQUE (SVE) .....	54
9. FERMETURE DE L'INCISION.....	55
<b>B. L'EXTRACTION EXTRACAPSULAIRE MANUELLE .....</b>	<b>56</b>
<b>C. L'EXTRACTION INTRACAPSULAIRE.....</b>	<b>57</b>
<b>D. CHIRURGIE DE CATARACTE ASSISTÉE PAR LASER FEMTOSECONDE .....</b>	<b>57</b>
<b>VI. LA SIMULATION .....</b>	<b>60</b>
<b>A. HISTORIQUE.....</b>	<b>60</b>
1. DANS LE DOMAINE DE L'AVIATION .....	60
2. DANS LE DOMAINE MILITAIRE .....	61
3. LA SIMULATION EN MÉDECINE.....	62
4. AVÈNEMENT DE LA SIMULATION EN SANTÉ AU MAROC.....	64
<b>B. TYPES DE SIMULATION EN MÉDECINE .....</b>	<b>67</b>
1. SIMULATION ORGANIQUE .....	68
2. SIMULATION NON ORGANIQUE.....	70
3. SIMULATION HYBRIDE .....	74

---

4. SIMULATION IN SITU .....	74
C. AVANCÉES TECHNOLOGIQUES DANS LA SIMULATION EN MÉDECINE.....	75
1. RÉALITÉ VIRTUELLE .....	75
2. RETOUR HAPTIQUE.....	76
D. INTÉRÊTS DE LA SIMULATION EN SANTE .....	78
E. LIMITES DE LA SIMULATION EN SANTÉ .....	82
VII. SIMULATION EN OPHTALMOLOGIE.....	84
A. TYPE DE SIMULATION EN OPHTALMOLOGIE MÉDICALE.....	84
1. EYESI SLIT LAMP .....	84
2. SIMULATEURS D'OPHTALMOSCOPIE DIRECTE .....	85
3. SIMULATEURS D'OPHTALMOSCOPIE INDIRECTE.....	87
4. AUTRES SIMULATEURS SPÉCIFIQUES EN OPHTALMOLOGIE MÉDICALE.....	92
B. LA SIMULATION EN CHIRURGIE OPHTALMOLOGIQUE.....	93
1. WET LABS ET DRY LABS.....	94
2. SIMULATION EN RÉALITÉ VIRTUELLE.....	105
3. AUTRES SIMULATEURS SPÉCIFIQUES EN OPHTALMOLOGIE CHIRURGICALE .....	117
VIII. HOPITAL UNIVERSITAIRE DE SIMULATION DE LA FACULTE DE MEDECINE, DE PHARMACIE ET DE MEDECINE DENTAIRE DE FES.....	121
IX. MATÉRIELS ET MÉTHODES.....	127
A. CONCEPTION DE L'ÉTUDE .....	127
B. MATÉRIELS .....	127
1. MICROSCOPE CHIRURGICAL .....	128
2. INSTRUMENTS CHIRURGICAUX.....	130
3. MACHINE DE PHACOÉMULSIFICATION/VITRECTOMIE.....	132
4. PLATEFORME VRMNET.....	133

---

<b>C. MÉTHODES</b> .....	<b>134</b>
1. POPULATION DE L'ÉTUDE .....	134
2. DÉROULEMENT DE L'ÉTUDE.....	135
<b>D. ANALYSE STATISTIQUE DES DONNÉES</b> .....	<b>142</b>
<b>X. RÉSULTATS</b> .....	<b>144</b>
<b>A. CARACTÉRISTIQUES DÉMOGRAPHIQUES DES PARTICIPANTS</b> .....	<b>144</b>
1. NOMBRE DE PARTICIPANTS PAR GROUPE. ....	144
2. RÉPARTITION SELON L'ÂGE. ....	145
<b>B. FACTEURS INFLUENÇANT LES PERFORMANCES SUR SIMULATEUR EYESI</b> .....	<b>146</b>
1. RÉPARTITION SELON SEXE : .....	146
2. EXPÉRIENCE EN CHIRURGIE.....	147
3. EXPÉRIENCE EN JEUX VIDÉO :.....	148
<b>C. RÉSULTATS DES PERFORMANCES SUR LE SIMULATEUR EYESI</b> .....	<b>149</b>
1. PERFORMANCES GLOBALES DES PARTICIPANTS SUR EYESI :.....	149
2. PERFORMANCES PAR ÉTAPE DES PARTICIPANTS SUR EYESI.....	150
3. ÉVALUATION DES PERFORMANCES VIA L'OSACSS .....	173
4. LES FACTEURS INFLUENÇANT LES PERFORMANCES SUR LE SIMULATEUR EYESI .....	177
<b>XI. DISCUSSION</b> .....	<b>182</b>
<b>A. ÉVALUATION DU SIMULATEUR EYESI : ÉTUDES, MODULES ET MÉTHODOLOGIE</b> .....	<b>183</b>
1. CARACTÉRISTIQUES DES ÉTUDES.....	183
2. MODULES ÉTUDIÉS .....	186
3. NOMBRE DE RÉPÉTITIONS .....	188
<b>B. VALIDITÉ DES MODULES ÉTUDIÉS :</b> .....	<b>190</b>
1. VALIDITÉ APPARENTE : .....	190
2. VALIDITÉ DE CONTENU : .....	190

---

3. VALIDITÉ DE CONSTRUCTION :.....	191
4. VALIDITÉ CONCURRENTÉ DU SIMULATEUR EYESI :.....	203
5. VALIDITÉ DISCRIMINANTE :.....	210
6. VALIDITÉ PRÉDICTIVE :.....	210
B. DÉVELOPPEMENT DE PROGRAMMES DE FORMATION STRUCTURÉS.....	214
1. PREMIER PROGRAMME (SPITERI ET AL.).....	215
2. DEUXIÈME PROGRAMME (THOMSEN ET AL.).....	216
3. TROISIÈME PROGRAMME (BERGQVIST ET AL.).....	217
4. QUATRIÈME PROGRAMME (McCANNEL ET AL.).....	218
C. FACTEURS INFLUENÇANT LES PERFORMANCES SUR LE SIMULATEUR EYESI .....	220
1. INTÉRÊT DANS LE DÉVELOPPEMENT DE LA DEXTÉRITÉ DE LA MAIN NON DOMINANTE : ...	220
2. IMPACT DU SEXE SUR LES PERFORMANCES CHIRURGICALES.....	222
3. EXPÉRIENCE DANS LE JEU VIDÉO ET PERFORMANCE DANS LE SIMULATEUR .....	223
4. EFFET DE L'EXPÉRIENCE EN EEC .....	225
D. CRITIQUES ET LIMITES DU SIMULATEUR EYESI : .....	227
E. JUSTIFICATION ÉCONOMIQUE DU SIMULATEUR EYESI :.....	228
1. ÉCONOMIES LIÉES À LA RÉDUCTION DES COMPLICATIONS.....	228
2. REDUCTION DU TEMPS OPERATOIRE .....	229
F. LIMITES DE NOTRE ÉTUDE .....	230
XII. RECOMMANDATIONS ET PERSPECTIVES .....	232
A. RECOMMANDATIONS .....	232
1. MISE EN PLACE D'UN PROGRAMME STRUCTURÉ DE FORMATION EN CHIRURGIE DE LA CATARACTE.....	232
2. INTÉGRATION DU SIMULATEUR EYESI DANS L'ÉVALUATION ET LA FORMATION CONTINUE.....	232

<b>3. COMPLÉMENTARITÉ DES OUTILS DE FORMATION.....</b>	<b>233</b>
<b>4. MISE EN ŒUVRE D'UNE STRATÉGIE INSTITUTIONNELLE.....</b>	<b>233</b>
<b>B. PERSPECTIVES.....</b>	<b>233</b>
<b>XIII. CONCLUSION.....</b>	<b>235</b>
<b>XIV. RESUMES .....</b>	<b>236</b>
<b>XV. BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>244</b>

## LISTE DES FIGURES

Figure 1: l'hôpital universitaire de simulation à la faculté de médecine de pharmacie et de médecine dentaire de Fès.....	23
Figure 2: Représentation schématique des principaux éléments du cristallin et ses rapports .....	24
Figure 3: Représentation des constantes anatomiques et physiques permettant de calculer la puissance optique du cristallin.....	27
Figure 4: Anatomie descriptive du cristallin (traduction en français à partir de 17) .....	30
Figure 5: : Coupe transversale du globe oculaire et rapports du cristallin....	32
Figure 6: Les protéines du cristallin, traduction en français à partir de.....	33
Figure 7: Théorie Pump-leak, traduction en français à partir de.....	35
Figure 8: Voies principales de métabolisme du glucose au niveau du cristallin (GLUT= transporteurs de glucose).....	36
Figure 9: différenciation des fibres cristalliniennes depuis l'épithélium cristallinien au niveau de l'équateur, traduction en français depuis.....	40
Figure 10: Pathogénie et clinique de la cataracte, traduction en français à partir de .....	43
Figure 11: incision cornéenne principale de 2.4mm (photo du service) .....	45
Figure 12: Principaux produits visco-élastiques sur le marché français classés en fonction de leur cohésion.....	46
Figure 13: Injection de substance viscoélastique en intracaméculaire (photo du service).....	47
Figure 14: Capsulorhexis (photos du service). .....	48
Figure 15: Hydrodissection (photos du service). .....	49

---

Figure 16: représentation schématique de l'hydrodélinéation .....	50
Figure 17: Phacoémulsification du noyau : divide and conquer (photos du service).....	52
Figure 18: Aspiration des masses corticales (photos du service). ....	53
Figure 19: Injection d'un implant pliable dans le sac cristallinien (photos du service).....	54
Figure 20: Irrigation et aspiration de la substance viscoélastique (photo du service).....	55
Figure 21: Hydrosuture de l'incision (photo du service). ....	56
Figure 22: Chirurgie de cataracte assistée par laser femtoseconde : incision (en haut) capsulorhexis (au milieu) traitement du noyau (en bas).....	59
Figure 23: Simulateur de vol développé par Edwin Link.....	61
Figure 24: Simulateur pour entraînement militaire.....	61
Figure 25: Mannequin d'obstétrique réalisé par Angélique Du Coudray.....	62
Figure 26: Démonstration sur Resusci-Anne (à gauche). Dr. Michael Gordon avec le simulateur Harvey (à droite).....	63
Figure 27:Inauguration du centre de simulation de l'UM6SS par Sa Majesté le Roi Mohammed VI.....	66
Figure 28: Visite d'une délégation officielle à l'Hôpital Universitaire de Simulation en septembre 2024. ....	67
Figure 29: Les différents champs de simulation en santé selon Chiniara G, 2007 .....	68
Figure 30:Simulation de trachéotomie sur modèle porcin vivant .....	69

Figure 31: Bloc opératoire dans un simulateur en réalité virtuelle (RV) de chirurgie oncologique(en haut) Interface d'un jeu sérieux sur écran d'ordinateur (en bas) .....	71
Figure 32: Multiples simulateurs synthétiques pour la gestion des voies aériennes en arrière-plan et simulateur d'ophtalmoscopie direct en avant (en haut) Simulateur haute-fidélité 'grandeur nature (en bas) (Hôpital Universitaire de Simulation de Fès).....	73
Figure 33: Utilisations de la RV en ophtalmologie : Simulateur en RV Eyesi à l'Hôpital Universitaire de Simulation de Fès(à gauche) Examen du champ visuel en RV, étude pilote au service d'ophtalmologie du CHU Hassan II (à droite). 76	76
Figure 34: Boucle de la simulation haptique .....	77
Figure 35: Exemples de moteurs haptiques commercialisé (A: Phantom Omni; B: Novint Falcon; C: Phantom Desktop.....	78
Figure 36: cycle d'apprentissage selon le modèle de Kolb.....	79
Figure 37: Eyesi Slit Lamp (en haut à gauche). : Kératite herpétique sur Eyesi Slit Lamp (en haut à droite). Fibrose conjonctivale (trachome) (en bas à gauche). Mélanome irien visible à la gonioscopie (en bas à droite).....	85
Figure 38: Eye Exam Simulator .....	86
Figure 39: Eyesi Direct .....	87
Figure 40: OPHTOSIM.....	87
Figure 41: Eyesi indirect ophtalmoscope .....	88
Figure 42: Débriefing élaboré par le logiciel après la procédure d'ophtalmoscopie indirecte. Après l'examen, différents aspects sont évalués et présentés à l'examineur.....	89

---

Figure 43: Modèle du Globe oculaire présenté par Lewallen pour pratiquer l'ophtalmoscopie indirect.....	90
Figure 44: Avec une lampe frontale et une lentille convergente asphérique, le résident examine le modèle d'œil en boîte de plastique .....	90
Figure 45: Eyesi Indirect ROP.....	91
Figure 46: Lancement du programme de simulation de la ROP par l'AAO et FundamentVR le 17 octobre 2024. ....	92
Figure 47: Un bras mécanique est ajusté pour placer le modèle à l'endroit approprié pour effectuer la capsulotomie. A : Connecteur réglable qui se fixe à l'appui-tête de la lampe à fente et contrôle l'emplacement vertical du modèle. B : Connecteur ajustable qui contrôle la position horizontale du modèle. C : Plaque en bois qui maintient l'œil du modèle .....	93
Figure 48: exemple de wet-lab avec œil porcine fixé à une perruque par des épingles .....	97
Figure 49: Kitaro Wet Lab.....	99
Figure 50: Composants du kit de simulation du KITARO WetLab .....	99
Figure 51: Tête porteuse des yeux synthétiques Phillips .....	100
Figure 52: Réalisation du capsulorhexis sur un œil simulé pour chirurgie de cataracte .....	101
Figure 53: Œil synthétique SimuloRhexis.....	103
Figure 54: Exemples de modèles du kit Bioniko. A. Pelage de membrane. B. Suture d'un volet scléral. C. Chirurgie des muscles oculomoteurs .....	104
Figure 55: Tâches basiques et procédurales de chirurgie de cataracte sur Eyesi (version 3.10). ....	107

---

Figure 56: Tâches basiques et procédurales de chirurgie de vitréorétinienne sur Eyesi (version 3.10).....	108
Figure 57: Modules de la chirurgie de cataracte sur Eyesi .....	109
Figure 58: Modules de la chirurgie du segment postérieur sur Eyesi. ....	109
Figure 59: Le simulateur Phacovision .....	110
Figure 60: MicroVisTouch ; simulation d'une incision et d'un capsulorhexis, système haptique du simulateur .....	111
Figure 61: Le simulateur HelpMeSee (MSICS).....	112
Figure 62 : (a) capture d'écran du simulateur HelpMeSee d'un apprenant disséquant le tunnel scléral. (b) réalisation d'une paracentèse. (c) injection de substance viscoélastique dans la chambre antérieure à travers la paracentèse. (d) accès à la chambre antérieure par l'incision sclérale.....	113
Figure 63: Système Alcon Fidelis (casque RV, moteurs haptiques, pédale centurion, ordinateur).....	115
Figure 64: Fundamental VR bloc opératoire ophtalmologique .....	116
Figure 65: Fundamental VR ; deux chirurgiens en discussion dans un bloc opératoire virtuel.....	117
Figure 66 : Le dispositif de formation montrant le résident en train d'insérer la seringue dans le mannequin du système de simulation d'anesthésie ophtalmique (OASiS). ....	118
Figure 67: Simulateur de préparation et administration de thérapie génique rétinienne.....	120
Figure 68: Sous-sol de l'HUS : Salle polyvalente de simulation (en haut à droite) entrées des salles de radiologie et locaux techniques (en haut à droite) salle de stockage du matériel (en bas).....	122

---

Figure 69: Rez-de-chaussée de l'HUS : Salle dédiée au simulateur Eyesi (en haut à gauche) salle de déchocage (en bas à gauche) salles de simulation polyvalentes (à droite).....	123
Figure 70: 1er étage de l'HUS: Salle d'accouchement (en haut) Pharmacie et laboratoire (milieu) Salle de néonatalogie (en bas).....	124
Figure 71: 2ème étage de l'HUS: Salle d'endoscopie et cœlioscopie (en haut) Bloc opératoire et salle de formation (milieu) Simulateur de cas cliniques et salle de jeux sérieux (en bas).....	125
Figure 72: EyeSi Ophthalmic Surgical Simulator, centre de simulation de la FMPDF.....	129
Figure 73: Configuration par défaut de la pédale du microscope (centre de simulation de la FMPDF).....	130
Figure 74: Instruments physiques et tête dédiée aux modules de la chirurgie de cataracte (Centre de simulation de la FMPDF).....	131
Figure 75: Tête dédiée aux modules de chirurgie du segment postérieur (Centre de simulation de la FMPDF).....	132
Figure 76: Contrôle des paramètres de la machine de phacoémulsification	133
Figure 77: Vue d'ensemble des modules de chirurgie de cataracte, chaque module comprend plusieurs niveaux (Centre de simulation de la FMPDF)..	135
Figure 78: Description du niveau 1 du module capsulorhexis (à gauche) début du niveau (à droite). (centre de simulation de la FMPDF).....	137
Figure 79: Description du niveau 4 du module hydrodissection(à gauche) début du niveau (à droite) (centre de simulation de la FMPDF).....	137
Figure 80: Description du niveau 5 du module Divide and Conquer (à gauche) début du niveau (à droite) (centre de simulation de la FMPDF).....	137

---

Figure 81: Description du niveau 3 du module Irrigation/Aspiration (à gauche) début du niveau (à droite) (centre de simulation de la FMPDF). .....	138
Figure 82: Description du niveau 3 du module insertion d'implant (à gauche) début du niveau (à droite) (centre de simulation de la FMPDF). .....	138
Figure 83: Nombre de participants par groupe. ....	145
Figure 84: Répartition des participants selon l'âge dans chaque groupe....	146
Figure 85: Répartition des participants selon le sexe dans chaque groupe.	147
Figure 86: Distribution des participants selon leur pratique des jeux vidéo .....	148
Figure 87: Score total moyen obtenu par groupe d'expérience.....	149
Figure 88: le temps moyen nécessaire pour compléter les cinq étapes sur simulateur EyeSi. ....	150
Figure 89: les scores moyens obtenus dans le capsulorhexis entre les différents groupes d'expérience.....	151
Figure 90: Temps moyen nécessaire pour la réalisation du capsulorhexis selon les groupes d'expérience .....	152
Figure 91: Centrage moyen du capsulorhexis selon les groupes d'expérience .....	153
Figure 92: : Cette figure compare visuellement et quantitativement les performances d'un Résident Novice (à gauche) et d'un Enseignant expérimenté (à droite) lors de la réalisation du capsulorhexis (rondeur 12,9% vs 100% ; centrage 0,46mm vs 0,056mm ; déviation du rayon 0,17mm vs 0,023mm ; extension maximale du rayon 3,4mm versus 2,7mm).....	154
Figure 93: Cette figure illustre une comparaison visuelle et métrique des performances entre un Résident Novice (à gauche) et un Enseignant	

expérimenté (à droite) lors de la réalisation du capsulorhexis. (Rondeur du capsulorhexis : 0 % (Novice) contre 100 % (Enseignant), Centrage : 0,12 mm (Novice) contre 0,062 mm (Enseignant), Déviation moyenne du rayon : 0,66 mm (Novice) contre 0,013 mm (Enseignant), Extension maximale du rayon : 3,8 mm (Novice) contre 2,7 mm (Enseignant).) .....	155
Figure 94: Cornée endommagée par un cystitome avec apparition d'un message d'erreur et opacification de la zone lésée. ....	157
Figure 95: Scores moyens obtenus lors de l'hydrodissection selon les groupes d'expérience.....	158
Figure 96: Injection de BSS lors de l'hydrodissection.....	160
Figure 97: Volume moyen de BSS injecté lors de l'étape de l'hydrodissection par groupe. ....	160
Figure 98: Scores moyens réalisés dans l'étape "Divide and Conquer" selon les groupes d'expérience .....	162
Figure 99: Cette figure présente plusieurs complications survenues au cours de la phacoémulsification du noyau, illustrées dans quatre sous-images. En haut à gauche : Fibres zonulaires endommagées sur une étendue de 10h à 3h. En haut à droite : Rupture capsulaire postérieure (RCP), entourée en vert, survenue durant la manipulation du noyau. En bas à gauche : Dommages zonulaires sévères avec luxation complète du noyau dans le vitré. En bas à droite : Dommages cornéens significatifs accompagnés d'une rupture capsulaire postérieure. ....	165
Figure 100: Scores moyens réalisés dans l'étape d'aspiration des masses selon les groupes d'expérience .....	166

---

Figure 101: Grande rupture capsulaire postérieure survenue lors de l'aspiration d'une masse vers midi .....	169
Figure 102: Dommages important des fibres zonulaires avec désinsertion du sac survenue lors de l'aspiration des masses corticales. ....	169
Figure 103: Scores moyens réalisés dans l'étape d'implantation selon les différents groupes d'expérience.....	170
Figure 104: Impact du sexe des résidents sur le score total des performances chirurgicales.....	177
Figure 105: Mise en place d'un anneau de Malyugin sur Eyesi.....	193
Figure 106 :Plan de l'étude (OSACSS = Objective Structured Assessment of Cataract Surgical Skills).....	205
Figure 107 :Score GRASIS (Global Rating Assessment of Skills in Intraocular Surgery).....	206
Figure 108: Programme de formation en phacoémulsification proposé sur le simulateur EyeSI. (v) valeur ; (s) seconde. ....	216
Figure 109: Programme de formation en chirurgie de cataracte compose de 2 parties et 6 étapes.....	217
Figure 110: 1–Programme de formation. Il contient 4 modules de compétences basiques (en vert) et 4 modules d'entraînement chirurgical (en rouge) ; 2–Présentation des différentes étapes à réaliser durant ce programme.....	218
Figure 111: Le programme de formation "Capsulorhexis Intensive Training Curriculum" (CITC) est composé de 33 étapes. Chaque étape contient le score minimal qu'il faut réaliser pour passer à l'étape suivante et le nombre de répétitions à réussir. Avec la progression du programme, les étapes deviennent de plus en plus difficiles. ....	219

Figure 112: courbe d'apprentissage de la main D et ND, la courbe d'apprentissage de la main ND est légèrement plus raide.....221

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Stages cliniques classiques versus simulation.....	80
Tableau 2: les différents niveaux de difficulté programmés sur le simulateur utilisé dans notre étude .....	136
Tableau 3: Objective Structured Assessment of Cataract Surgical Skill (OSACSS). .....	140
Tableau 4: Expérience des participants en phacoémulsification et en EEC.	148
Tableau 5: Comparaisons inter-groupes des scores moyens réalisés dans l'étape du capsulorhexis .....	151
Tableau 6 Scores moyens de rondeur du capsulorhexis selon les groupes d'expérience.....	153
Tableau 7: Déviation moyenne du rayon du capsulorhexis selon les groupes d'expérience.....	155
Tableau 8: Extension maximale moyenne du rayon du rhexis selon les groupes d'expérience.....	156
Tableau 9: Complications lors de la réalisation du capsulorhexis.....	157
Tableau 10: Comparaisons inter-groupes des scores moyens réalisés dans l'étape divide and conquer.....	162
Tableau 11: Quantité moyenne d'énergie ultrasonique (US) fuitée dans le sac et dans la chambre antérieure.....	163
Tableau 12: Complications par groupe lors de l'étape "Divide and Conquer" .....	165
Tableau 13: Comparaisons inter-groupes des scores moyens réalisés dans l'étape aspiration des masses .....	167

---

Tableau 14: Complications par groupe lors de l'aspiration des masses corticales.....	168
Tableau 15: Comparaisons inter-groupes des scores moyens réalisés dans l'étape implantation.....	171
Tableau 16: Complications par groupe lors de l'étape d'implantation. ....	172
Tableau 17: Scores globaux d'OSACSS selon les groupes d'expérience. ....	173
Tableau 18: Comparaison des scores OSACSS par groupe pour chaque étape de la procédure chirurgicale.....	175
Tableau 19: Corrélation entre les scores Eyesi et OSACSS pour chaque étape de la procédure chirurgicale.....	176
Tableau 20: Impact du sexe des résidents sur leur scores par modules.....	178
Tableau 21: Impact de l'expérience en extraction extracapsulaire sur les performances des novices.....	179
Tableau 22: Influence de la pratique des jeux vidéo sur les performances des résidents novices.....	180
Tableau 23 : Influence de la pratique des jeux vidéo sur les performances des résidents avancés (Groupes 2A et 2B) et des enseignants dans différentes étapes de la procédure chirurgicale.....	181
Tableau 24: Caractéristiques des études rapportées dans notre thèse. ....	185
Tableau 25: Modules de chirurgie de cataracte évalués par étude.....	187
Tableau 26: Type de validité évaluée par chaque étude et nombre de répétitions effectués par les participants sur les modules évalués.....	189
Tableau 27: Comparaison des résultats des études sur la validité de construction du module capsulorhexis.....	194

Tableau 28: Comparaison des résultats des études concernant les survenues de complications par groupe d'expérience (capsulorhexis). .....	195
Tableau 29: Comparaison des résultats des études sur la validité de construction du module hydrodissection.....	196
Tableau 30: Comparaison des résultats des études sur la validité de construction du module Divide And Conquer. ....	198
Tableau 31: Comparaison des résultats des études concernant les survenues de complications par groupe d'expérience (Divide And Conquer).....	199
Tableau 32: Comparaison des résultats des études sur la validité de construction du module aspiration des masses. ....	200
Tableau 33: Comparaison des résultats des études sur la validité de construction du module implantation.....	202
Tableau 34: Comparaison des résultats des études concernant la validité concurrente des modules.....	210
Tableau 35: Comparaison des études sur l'impact de la pratique des jeux vidéo sur les performances en simulation virtuelle. ....	225

## LISTE DES ABRÉVIATIONS

- **3D** : Trois dimensions
- **ANOVA** : Analyse de la variance (Analysis of Variance).
- **BSS** : Solution saline équilibrée (Balanced Salt Solution).
- **CELESTE** : Centre d'E-Learning d'Enseignement par Simulation et de Télémédecine Educative.
- **CESU** : Centres d'Enseignement en Soins et Gestes d'Urgence.
- **CHU** : Centre hospitalier universitaire.
- **CRM** : Cockpit Resource Management
- **CRM** : Crew Resource Management
- **EEC** : Extraction extracapsulaire.
- **FMPDF** : Faculté de Médecine, de Pharmacie et de Médecine Dentaire de Fès.
- **GRASIS** : The Global Rating Assessment of Skills in Intraocular Surgery).
- **HMS** : HelpMeSee
- **HTIC** : Healthcare Training & Innovation Conference.
- **HUS** : Hôpital universitaire de simulation.
- **I/A** : Irrigation/Aspiration.
- **IOL** : Lentille intraoculaire (Intraocular Lens).
- **LASIK** : Laser-Assisted in Situ Keratomileusis.
- **MSICS** : Chirurgie de la cataracte par petite incision manuelle (Manual Small Incision Cataract Surgery).
- **OCT** : Tomographie par cohérence optique.
- **OSACSS** : Score d'évaluation objective des compétences chirurgicales (Objective Structured Assessment of Cataract Surgical Skills).

- **PCR** : Rupture capsulaire postérieure (Posterior Capsular Rupture).
- **PVE** : Produit viscoélastique
- **RA** : Réalité augmentée.
- **ROP** : Rétinopathie du prématuré (Retinopathy of Prematurity).
- **RV** : Réalité virtuelle (Virtual Reality).
- **SVE** : Substance viscoélastique.
- **UM6SS** : Université Mohammed VI des Sciences de la Santé.
- **US** : Ultrason.
- **UV-A** : Ultraviolet de type A.
- **UV-B** : Ultraviolet de type B.
- **YAG** : Yttrium–Aluminum Garnet.

## I. Introduction

La chirurgie de la cataracte est l'intervention la plus pratiquée dans le monde<sup>1</sup>. La formation chirurgicale actuelle est basée sur le modèle traditionnel de Halsted<sup>2</sup> où le novice acquiert des connaissances chirurgicales en lisant, en observant et en opérant un patient tout en étant supervisé par un chirurgien senior. Cet apprentissage est long, difficile et non dénué de risques pour le patient<sup>3</sup>. On note en effet, un taux de complications peropératoires chez les jeunes chirurgiens allant de 5 à 7% selon les séries, soit un taux 3 à 50 fois supérieur à celui des chirurgiens expérimentés<sup>4,5</sup>.

Des simulateurs de chirurgie ont été développés dans le but de minimiser les risques liés à l'apprentissage classique principalement axé sur la pratique au bloc opératoire<sup>6,7</sup>. Le simulateur EyeSi, est le plus commercialisé parmi les simulateurs de chirurgie ophtalmologique. Notre institution s'est procurée un modèle récent disponible à l'Hôpital Universitaire de Simulation de la Faculté de Médecine, de Pharmacie et de Médecine Dentaire de Fès (Figure 1). Il propose des modules regroupant des exercices d'entraînement de difficulté croissante qui contribuent à la formation des jeunes chirurgiens aux différentes techniques des chirurgies de cataracte et vitréorétinienne. Pour chaque exercice, un score est établi afin d'évaluer les compétences du chirurgien et de juger de sa progression au cours de la répétition de celui-ci.

De nombreuses études ont évalué la validité des modules de chirurgie de la cataracte. En effet, les recherches disponibles soutiennent leur efficacité dans la formation des résidents. Récemment, Thomsen et coll. ont établi à partir de ces résultats, un programme de formation type comprenant à la fois

des exercices d'appréhension et des exercices représentant chaque étape de la chirurgie (7 exercices de 7 modules différents).

Cette thèse s'inscrit dans cette perspective, avec pour objectif principal d'évaluer la validité du simulateur EyeSi dans sa nouvelle version et son impact sur la formation des résidents en ophtalmologie. Outre cet objectif principal, cette étude vise également à :

- Analyser la validité de construction des exercices étudiés.
- Évaluer la validité concurrente du système de notation du simulateur.
- Étudier l'impact du sexe des résidents, de l'expérience en chirurgie extracapsulaire et de la pratique des jeux vidéo sur l'apprentissage de la phacoémulsification.



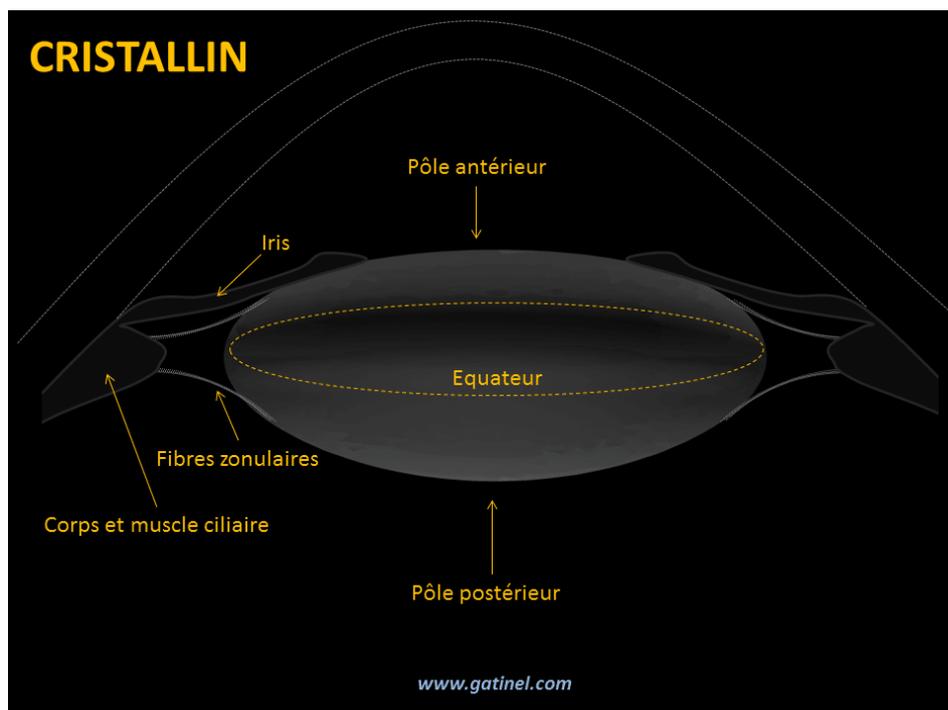
**Figure 1: l'hôpital universitaire de simulation à la faculté de médecine de pharmacie et de médecine dentaire de Fès.**

## II. Rappel anatomique

### Cristallin

#### 1. Anatomie descriptive

Le cristallin présente une configuration de lentille biconvexe aplatie en avant, avec une face antérieure et une face postérieure reliées par un équateur<sup>8</sup>. Chaque face est centrée par un pôle, respectivement le pôle antérieur et le pôle postérieur, également appelés apex antérieur et postérieur. Il est situé dans le segment antérieur de l'œil, plus précisément dans la chambre postérieure, où il est en avant de la cavité vitrénne, et en arrière de l'iris. Le cristallin est suspendu à l'anneau formé par le corps ciliaire par l'intermédiaire de la zonule cristallinienne<sup>9</sup>(Figure 2).



**Figure 2: Représentation schématique des principaux éléments du cristallin et ses rapports<sup>9</sup>.**

La zonule, ou ligament suspenseur, attache le cristallin au corps ciliaire et transmet l'action du muscle ciliaire. Elle se compose d'un anneau de fibres, appelées "fibres zonulaires", qui présente une forme triangulaire sur les coupes sagittales et méridiennes du globe oculaire (coupes passant par l'axe antéropostérieur). Le sommet externe périphérique du triangle, très allongé, correspond à l'insertion de ses fibres sur le corps ciliaire au niveau de l'orbiculus et de la corona ciliaris. Les fibres à direction radiée se dirigent vers la région péri-équatoriale, définissant ainsi les côtés antérieur et postérieur du triangle. L'insertion de ces fibres zonulaires en avant et en arrière de l'équateur cristallinien forme le dernier côté du triangle appliqué sur le cristallin. Cet arrangement crée un espace appelé espace de Petit<sup>10</sup>.

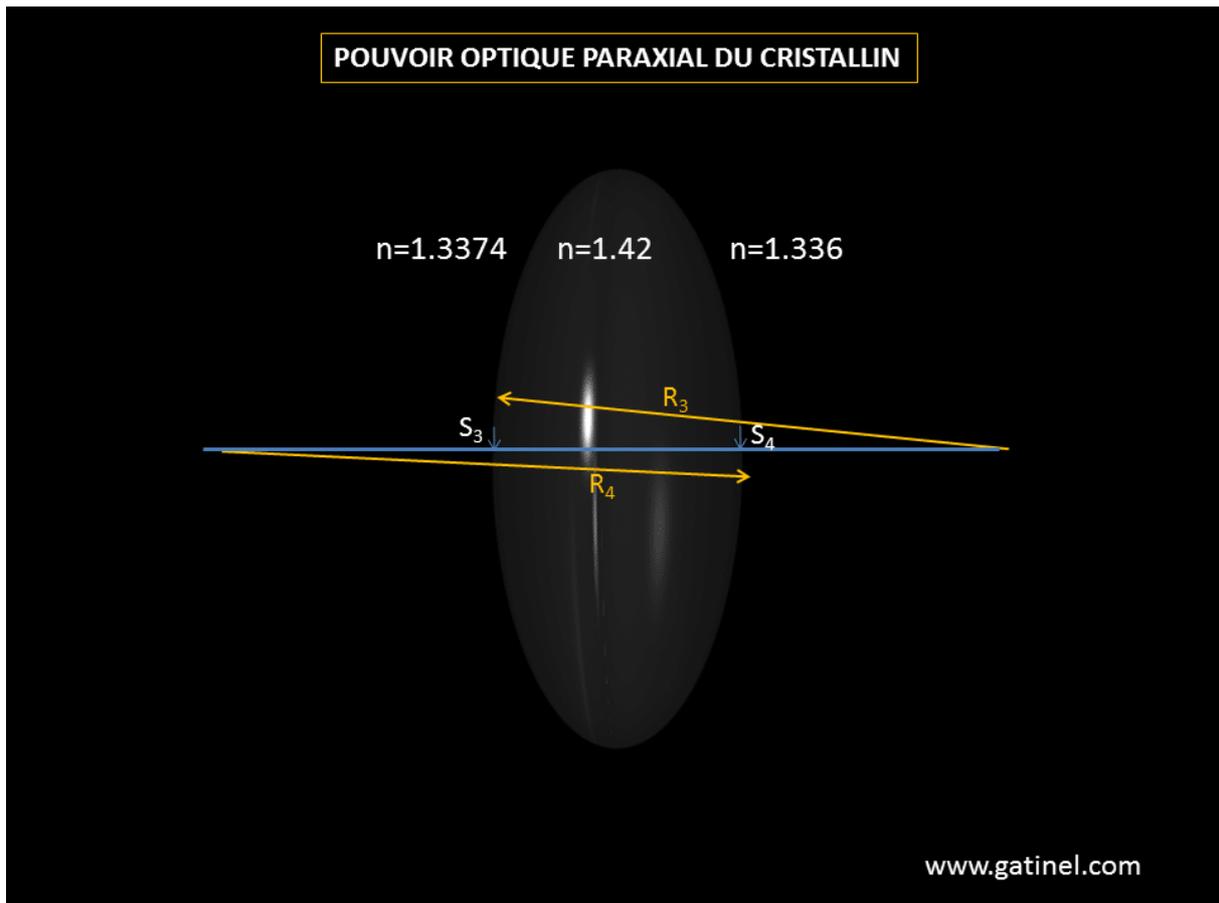
## **2. Anatomie biométrique**

La croissance du cristallin débute pendant la période fœtale et persiste tout au long de la vie. L'épaississement cumulatif des couches cristalliniennes influence la réfraction du cristallin.

En ce qui concerne les dimensions et les variations lors de l'accommodation, le rayon de courbure des faces d'une lentille revêt une importance cruciale. Chez l'adulte jeune, la cornée possède un rayon de courbure d'environ 8 mm, déterminant ses propriétés optiques. Ce rayon de courbure, plus petit que celui du reste du globe oculaire, contribue à la proéminence antérieure, conférant à l'œil une forme de sphère irrégulière légèrement aplatie dans le sens antéropostérieur. Les dimensions antéropostérieure et transversale de cette sphère mesurent respectivement 24 à 25 mm et 23 à 24 mm. À l'intérieur de l'œil se trouve le cristallin, avec un diamètre frontal ou équatorial de 9 à 10 mm et un diamètre antéropostérieur

de 4 mm. Les rayons de courbure des faces du cristallin diffèrent au repos et lors du processus d'accommodation. Le rayon de courbure de la face antérieure, en particulier, varie considérablement : passant de 10 mm à l'état de repos, il diminue à 6 mm pendant l'accommodation, tandis que celui de la face postérieure connaît une variation moins prononcée, passant de 6 mm à 5,5 mm<sup>11,12</sup>.

Le cristallin joue un rôle fondamental dans le pouvoir optique global de l'œil, contribuant à environ 22 dioptries en état de repos accommodatif. La puissance optique du cristallin dépend de plusieurs paramètres anatomiques et biométriques : la courbure de ses faces antérieure et postérieure et son épaisseur évoqués ci-dessus, ainsi que son indice de réfraction. L'indice de réfraction du cristallin, qui varie entre son noyau et son cortex, est en moyenne de 1,42. Ces dimensions, combinées à la transition des indices de l'humeur aqueuse (1,337) et du vitré (1,336), confèrent au cristallin une puissance d'environ 22 dioptries dans un œil non accommodé (Figure 3)<sup>13</sup>.



**Figure 3: Représentation des constantes anatomiques et physiques permettant de calculer la puissance optique du cristallin<sup>13</sup>**

En ce qui concerne le poids et le volume, avec un poids moyen de 190 à 220 mg chez l'adulte (représentant 2 % à 3 % du poids total de l'œil de 7 à 8 g), le cristallin affiche un poids d'environ 65 mg à la naissance. Selon les calculs de Spencer en 1976, la croissance du cristallin serait d'environ 1,32 mg/an. Cette croissance se poursuit tout au long de la vie, atteignant un poids d'environ 260 mg chez les individus de plus de 80 ans. L'évolution du volume suit une tendance similaire, avec une moyenne de 72 mm<sup>3</sup> à la naissance, 180 mm<sup>3</sup> chez l'adulte jeune, et environ 238 mm<sup>3</sup> chez les sujets de 80 à 90 ans.

En ce qui concerne les dimensions et les variations liées à la croissance, à la naissance, le cristallin présente un diamètre antéropostérieur d'environ 4 mm et un diamètre équatorial d'environ 6,5 mm. À l'âge adulte, le diamètre

antéropostérieur ne dépasse pas 5 mm au repos, tandis que le diamètre équatorial est d'environ 8,8 à 9,2 mm entre 30 et 60 ans. De plus, l'épaisseur du cristallin augmente de 0,25  $\mu\text{m}/\text{an}$  de 20 à 80 ans<sup>10-12</sup>.

### **3. Anatomie microscopique**

À l'échelle histologique, le cristallin se compose de trois éléments principaux :

- Une capsule périphérique enveloppant la totalité du cristallin.
- Un épithélium situé sous la capsule, principalement du côté antérieur.
- Des fibres cristalliniennes formant la masse essentielle du cristallin.

#### **Capsule cristallinienne :**

La capsule, une lame basale épaisse, entoure le cristallin et forme une barrière entre les fibres cristalliniennes et l'humeur aqueuse ou le vitré. L'épaisseur de la capsule est de 13  $\mu\text{m}$  en avant et de 4  $\mu\text{m}$  en arrière, atteignant son épaisseur maximale à l'équateur et formant une "couronne" à 3 mm du centre. elle présente une structure homogène en microscopie optique<sup>14</sup>. Les analyses immunohistochimiques révèlent la présence de collagène de type IV, de laminines, d'entacine et de fibronectine. En microscopie électronique, la constitution lamellaire de la capsule est visible à des forts grossissements<sup>10</sup>.

#### **Épithélium :**

L'épithélium, situé exclusivement sur la face antérieure du cristallin en raison des processus de croissance embryologique. Ces cellules présentent une forme aplatie dans la région centrale, devenant cubiques puis cylindriques vers la région équatoriale. La membrane plasmique des cellules épithéliales est lisse dans les régions basale et apicale, avec des jonctions communicantes

entre elles. Ces cellules présentent quatre zones distinctes en fonction de la densité cellulaire croissante du pôle antérieur à l'équateur : la zone épithéliocentrale, la zone épithéliodistale, la zone mitotique et la zone de protofibres où les cellules s'orientent à 90° en s'allongeant, puis s'éloignent de l'équateur en perdant progressivement leur noyau. Les cellules servent de réservoir pour générer les fibres cristalliniennes, contribuant à la croissance continue du cristallin<sup>11</sup>.

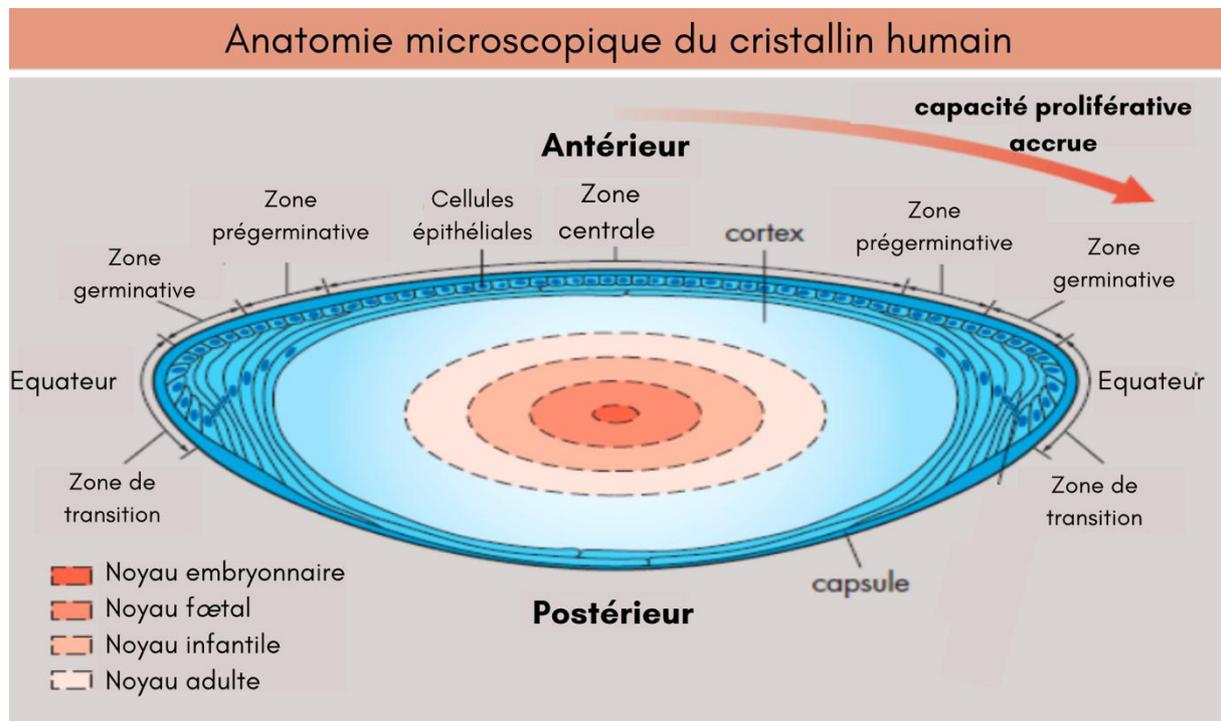
#### **Fibres cristalliniennes :**

Les fibres cristalliniennes, essentielles à la masse du cristallin, proviennent des cellules de l'épithélium antérieur basculées vers l'équateur. Ces fibres cristalliniennes ont une structure mésoscopique spécifique et se superposent progressivement au cours de leur formation. En coupe transversale, elles ont une forme hexagonale aplatie, s'engrenant latéralement. Les fibres les plus superficielles, récemment formées, conservent un noyau ovale, tandis que les plus profondes perdent leur noyau au fil de la différenciation. Les cristallines synthétisées par ces fibres appartiennent aux familles alpha et bêta-gamma, représentant 90% des protéines cristalliniennes et contribuant à l'indice de réfraction stable du cristallin<sup>15,16</sup>.

#### **La Zonule ciliaire ou Zonule de Zinn :**

Formée de fibres zonulaires, la zonule de Zinn maintient le cristallin en place en exerçant une traction périphérique. Les microfibrilles de fibrilline composent ces fibres, les reliant à la basale de l'épithélium et à la cristoïde. La tension exercée sur la zonule, contrôlée par les muscles ciliaires, joue un rôle crucial dans le processus d'accommodation. Les phénomènes d'apoptose

cristallinienne, bien que ne conduisant pas à la mort cellulaire, contribuent significativement à la transparence du cristallin<sup>10</sup>.



**Figure 4: Anatomie descriptive du cristallin (traduction en français à partir de <sup>17</sup>)**

#### 4. Rapports anatomiques:

##### Relations anatomiques antérieures

La face antérieure du cristallin entre en contact avec la face postérieure de l'iris, dont l'orifice central, la pupille, définit trois zones concentriques<sup>10</sup> :

- Une calotte centrée sur son pôle antérieur, alignée avec la pupille. Sa surface varie de 2 à 10 mm en fonction de la dilatation pupillaire et est séparée de la cornée par l'humeur aqueuse dans la chambre antérieure. La distance entre la face postérieure de la cornée et la face antérieure du cristallin dans cette région est d'environ 4 à 5 mm, représentant ainsi la profondeur de la chambre antérieure.

– Un anneau correspondant à la partie médiane de la face antérieure, où l'iris est étroitement lié au cristallin.

– Une couronne périphérique où le cristallin s'éloigne progressivement de l'iris pour former la chambre postérieure, délimitée par l'angle iridociliaire et la face antérieure de la zone ciliaire.

### **Relations anatomiques postérieures**

La face postérieure du cristallin interagit avec le corps vitré, présentant deux zones concentriques<sup>10</sup> :

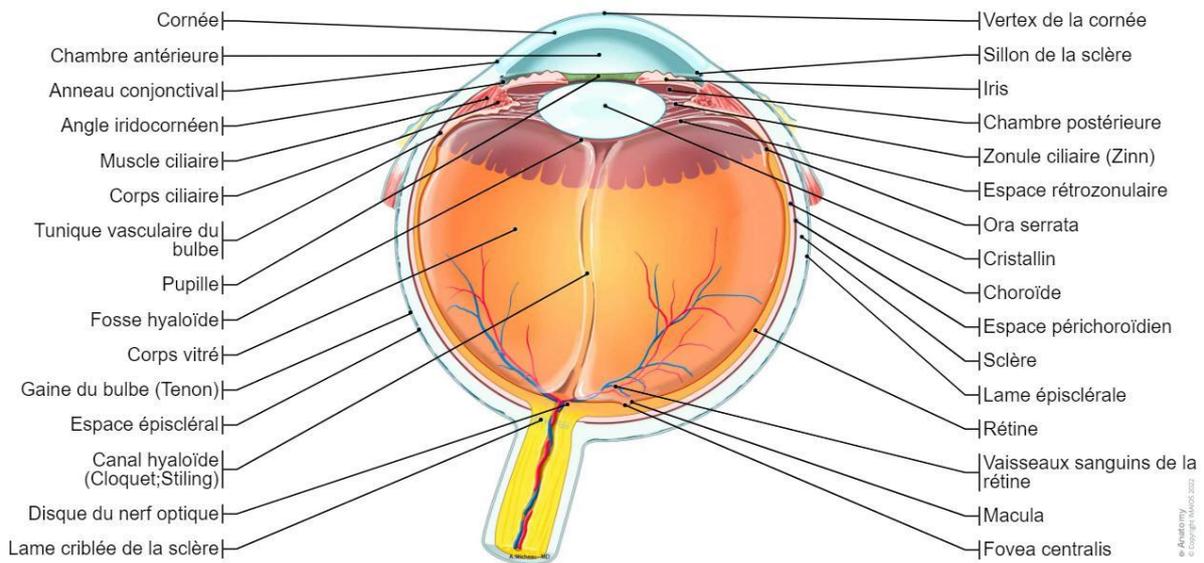
– La première est centrée sur le pôle postérieur et forme une calotte de 5 mm de diamètre, étroitement liée à la hyaloïde antérieure, qui constitue la limite antérieure du vitré. Cette zone, également connue sous le nom d'"aire de Vogt" ou de "fossette patellaire", est circonscrite par une ligne d'adhérence forte et circulaire entre la hyaloïde et le cristallin, représentée par le ligament de Wieger, également appelé ligament de Berger ou ligament hyaloïdocapsulaire de Berger–Wieger, qui se solidifie chez l'enfant mais devient plus lâche avec l'âge.

– La seconde forme une couronne en dehors du ligament de Wieger, où la hyaloïde s'écarte progressivement, créant un espace virtuel rétrozonulaire. Cet espace, parfois appelé à tort "canal de Hannover", peut être insufflé et est plus précisément dénommé "espace de Hannover".

### **Relations équatoriales ou périphériques**

L'équateur du cristallin est en relation avec la zone ciliaire ou le ligament suspenseur du cristallin. Les fibres zonulaires de ce ligament s'attachent au cristallin du côté central et au corps ciliaire du côté périphérique, occupant l'espace en anneau de 1 mm qui sépare le cristallin des procès ciliaires. Cet

arrangement crée un espace triangulaire au sein de la zonule, connu sous le nom d'espace de Petit<sup>10</sup> (Figure 5).



**Figure 5: : Coupe transversale du globe oculaire et rapports du cristallin<sup>18</sup>.**

### III. Physiologie du cristallin.

#### A. Métabolisme du cristallin

##### 1. Composition chimique du cristallin :

###### a) Glucides

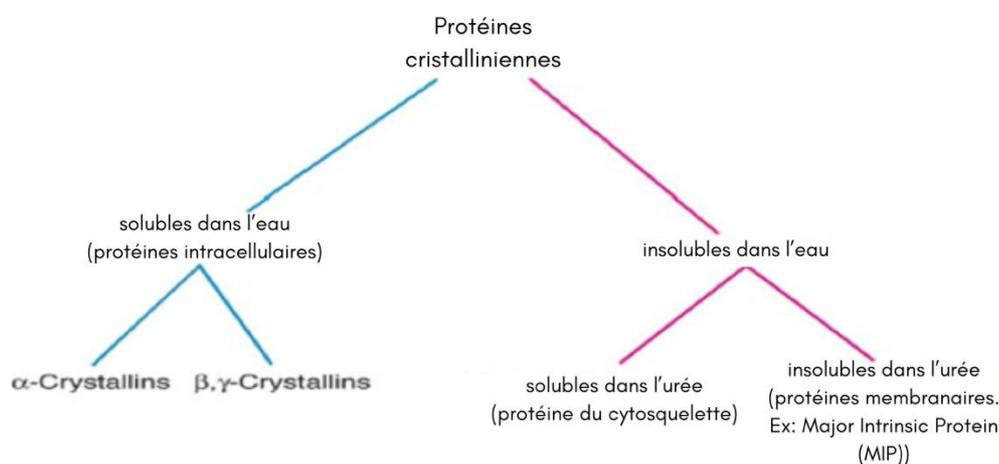
Les glucides, principalement représentés par le glucose à une concentration de 10 mg/100 g, constituent une source énergétique essentielle pour le cristallin. Ce glucose est acheminé activement depuis l'humeur aqueuse jusqu'aux cellules cristalliniennes via des systèmes de transport spécifiques<sup>19</sup>.

### b) Lipides :

Les lipides constituent seulement 1% de la masse totale du cristallin. Cependant, ils représentent 55% du poids sec de la membrane plasmique, cette dernière contient une concentration importante de lipides qui contribuent à l'étanchéité «tight packing» et à la faible fluidité de la membrane<sup>20</sup>.

### c) Protéines :

Le cristallin contient la concentration la plus importante en protéines au niveau du corps humain. On distingue 2 types de protéines : solubles dans l'eau et insolubles (Figure 6). Elles jouent un rôle important dans le maintien de la structure et transparence du cristallin<sup>21</sup>.



**Figure 6: Les protéines du cristallin (traduction en français à partir de<sup>22</sup>.)**

### d) Eau, électrolytes et enzymes

Le cristallin se caractérise par une faible teneur en eau, représentant environ 65 % de sa masse totale, ce qui lui confère un indice de réfraction élevé et contribue à ses propriétés optiques uniques. Sur le plan des électrolytes, il

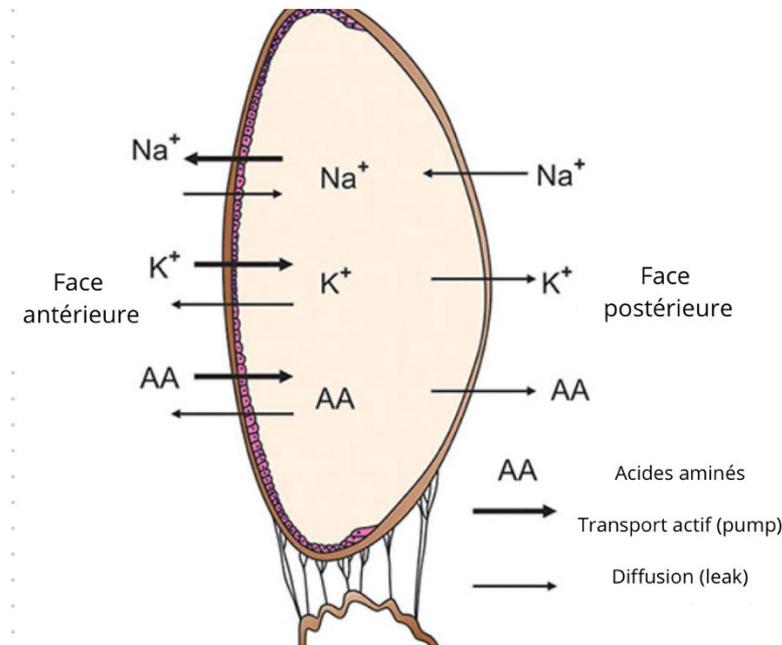
contient des concentrations importantes de potassium (170 mg/100 g), de sodium (90 mg/100 g), de chlore (60 mg/100 g) et de calcium (1,4 mg/100 g). Ces électrolytes jouent un rôle important dans la régulation de la perméabilité cellulaire et dans les processus métaboliques. Le magnésium, présent, agit en tant que cofacteur dans plusieurs réactions enzymatiques. Par ailleurs, les vitamines A, B1, B2 et C, ainsi que diverses enzymes, interviennent dans les métabolismes des lipides et glucides, contribuant au maintien de la transparence du cristallin<sup>21</sup>.

## 2. Perméabilité capsulaire :

L'aspect le plus important de la physiologie du cristallin est le mécanisme qui contrôle la balance d'eau et des électrolytes, qui est critique pour la transparence du cristallin. Après l'involution de l'artère hyaloïde, les besoins métaboliques du cristallin proviennent de l'humeur aqueuse et du corps vitré. La capsule est librement perméable à l'eau, aux ions et à d'autres molécules et protéines avec un poids moléculaire < 70 KDa. En plus, les cellules épithéliales et les fibres cristalliniennes contiennent des canaux, des pompes et des transporteurs qui permettent des mouvements transépithéliaux depuis et vers le milieu extracellulaire. Les cellules épithéliales et cellules extérieures du cortex utilisent l'oxygène et le glucose pour assurer le transport actif des électrolytes, carbohydrates et les acides aminés vers le cristallin.

La théorie Pump-Leak explique la balance ionique du cristallin, qui contient une concentration élevée en potassium ( $K^+$ ) et en acides aminés par rapport à l'humeur aqueuse et au corps vitré (Figure 7). À l'inverse, il présente des concentrations plus faibles en sodium ( $Na^+$ ), chlore ( $Cl^-$ ) et en eau. Cette balance est le résultat de la perméabilité des membranes cellulaires et de

l'activité de la pompe sodium-potassium, qui expulse le sodium ( $\text{Na}^+$ ) vers l'extérieur tout en faisant entrer le potassium ( $\text{K}^+$ ) à l'intérieur<sup>17,20</sup>.



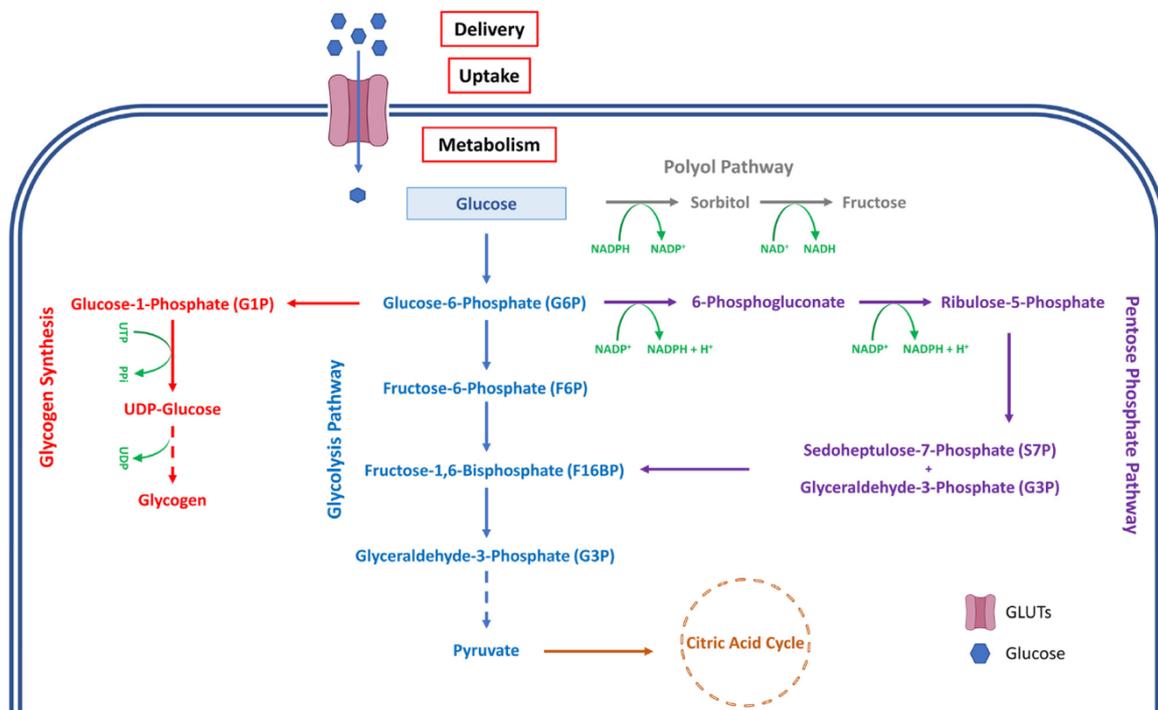
**Figure 7: Théorie Pump-leak, traduction en français à partir de<sup>23</sup>.**

Il existe un gradient de pH qui augmente du noyau du cristallin vers sa périphérie. Pour maintenir un pH autour de 7, les fibres cristalliniennes éliminent en continu les protons intracellulaires, lesquels s'accumulent en raison du mouvement des ions positifs depuis le milieu extracellulaire et de la production d'acide lactique issue de la glycolyse anaérobie.

La communication entre les fibres cristalliniennes centrales et les cellules superficielles est assurée par les jonctions communicantes GAP. Ces jonctions permettent l'échange de petites molécules (< 1 kDa) entre les cellules, un processus indispensable pour l'apport des nutriments aux fibres cristalliniennes, qui sont éloignées des sources nutritives telles que l'humeur aqueuse et le corps vitré<sup>24</sup>.

### 3. Métabolisme énergétique :

La production énergétique dans le cristallin dépend essentiellement du métabolisme glycolytique anaérobie (70% de l'ATP nécessaire au cristallin). Les cellules superficielles utilisent aussi des voies oxydatives du cycle du Krebs pour produire l'énergie à partir du glucose, le glucose est également catabolisé dans le cristallin par la voie des pentoses et du sorbitol. Le glucose nécessaire provient de l'humeur aqueuse, par diffusion facilitée et simple (Figure 8)<sup>25</sup>.



**Figure 8: Voies principales de métabolisme du glucose au niveau du cristallin<sup>25</sup> (GLUT= transporteurs de glucose).**

### 4. Domage oxydative et mécanismes de protection :

Le stress oxydatif et photo-oxydatif (induits par les ultraviolets A et B) conduit à la formation de radicaux libres qui ont un potentiel d'entraîner des dommages au niveau des lipides, des protéines, et des acides nucléiques. Le cristallin contient plusieurs enzymes qui protègent contre le dommage du

stress oxydatif ; notamment ; la Superoxyde dismutase, la Catalase et Glutathione peroxidase. Dans la cataracte sénile par exemple, les radicaux libres générés dépassent les capacités antioxydantes du cristallin, il en résulte des modifications structurales complexes des protéines et des membranes cellulaires aboutissant à la perte de transparence du cristallin<sup>17,20</sup>.

## **B. Rôle et propriétés optiques**

### **1. Transparence:**

La transparence du cristallin repose sur plusieurs caractéristiques biologiques et structurales spécifiques. Elle est principalement assurée par l'organisation régulière des fibres cristalliniennes et l'uniformité des espaces extracellulaires entre ces fibres ainsi que l'absence de noyau et d'organites cellulaires dans les fibres mature du cristallin. De plus, la forte concentration de cristallines, protéines spécialisées présentes dans le cytoplasme des fibres, contribue à maintenir la transparence en minimisant les phénomènes de diffusion

### **2. Transmission de la lumière :**

Le cristallin se présente sous forme d'un filtre spectral qui absorbe les UV-B (300-315 nm) et la majorité des UV-A (315-400 nm).

Chez un sujet jeune, La transmission de la lumière augmente rapidement à partir de 310 nm et attend 90% vers 450 nm. Avec l'âge, la transmission de la lumière visible à travers le cristallin diminue due à des modifications de la transparence.

### 3. Réfraction :

Les propriétés réfractives du cristallin sont la résultante de :

- La grande concentration et la distribution graduée des protéines cristallines dans le cytoplasme des fibres cristalliniennes.
- La courbure des surfaces réfractives du cristallin.

La puissance de réfraction du cristallin se mesure en dioptries grâce à la formule suivante :  $D=D1 + D2 - \frac{e}{n} D1 * D2$

- D1 : représente le dioptre antérieur du cristallin
- D2 : représente le dioptre postérieur du cristallin
- e : représente l'épaisseur du crist
- n : représente l'indice de réfraction moyen du cristallin

### 4. Accommodation :

L'accommodation est la propriété que possède le cristallin de modifier sa puissance de manière que l'image rétinienne reste nette quand l'objet se déplace entre le punctum remotum (le point le plus éloigné que l'œil puisse voir net sans mettre en jeu son accommodation) et le punctum proximum (le point le plus proche qu'un œil peut voir nettement, en accommodant au maximum).

Chez un sujet jeune, l'effort d'accommodation entraîne une triade physiologique appelée, la triade accommodative : de vergence, accommodation, myosis. Durant l'accommodation, La contraction du muscle ciliaire entraîne une diminution du diamètre du cristallin, une augmentation de l'épaisseur du cristallin et l'augmentation de la courbure de la partie centrale de la surface antérieure et avec un moindre degré celle de la surface postérieure. La surface antérieure devient donc plus antérieure et la surface

postérieure devient plus postérieure, ce qui augmente le pouvoir optique de l'œil.

Ces changements accommodatifs physiques du cristallin et de l'œil entraînent non seulement une augmentation du pouvoir optique mais aussi des modifications au niveau des aberrations oculaires.

#### 5. Aberrations chromatiques :

Quand la lumière passe à travers le cristallin, Elle se décompose en plusieurs bandes de couleurs (différentes longueurs d'onde). La différence de la dispersion entre le rouge (620–770 nm) et le bleu (440–500 nm) est à 1,5–2 D, ce qui induit des modifications minimales dans la netteté de l'image. Cependant lors de l'accommodation, la réfraction augmente ce qui entraîne une augmentation des aberrations chromatiques

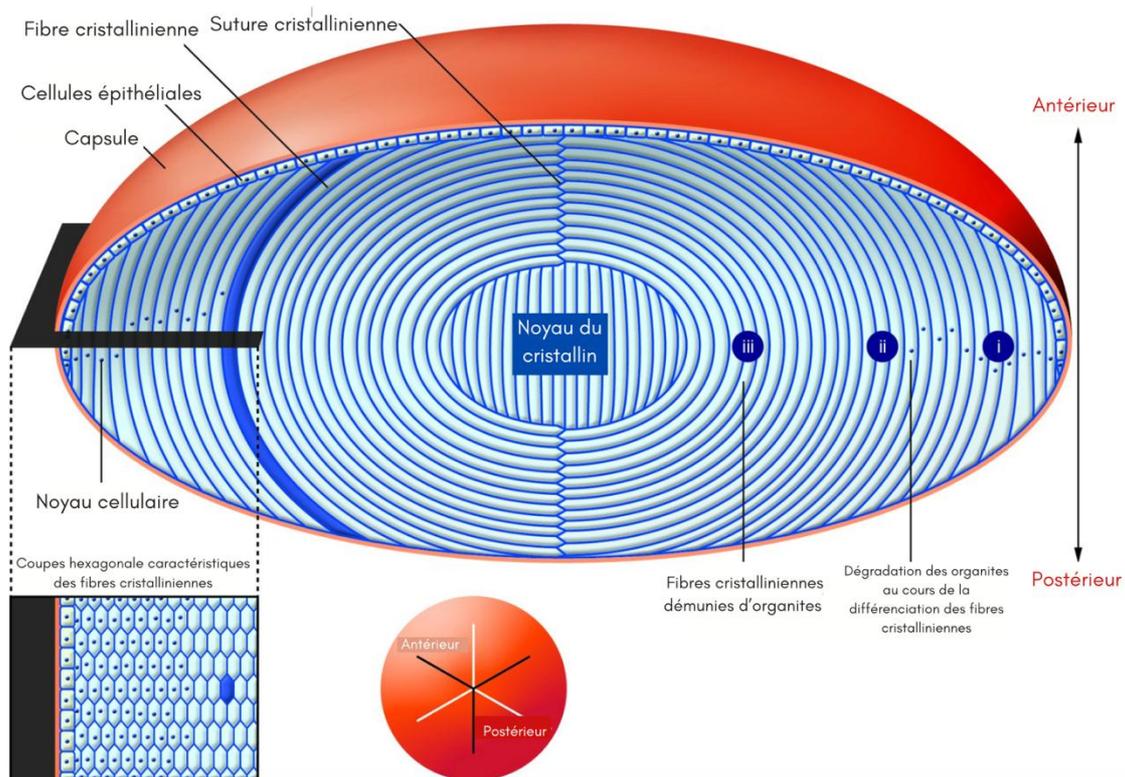
#### 6. Aberrations sphériques :

Le cristallin réduit les aberrations optiques grâce à plusieurs mécanismes. Tout d'abord, son indice de réfraction augmente progressivement de la périphérie vers le centre, permettant une meilleure focalisation des rayons lumineux. De plus, la courbure des capsules antérieure et postérieure s'accroît progressivement en direction des pôles, contribuant à optimiser la convergence des rayons. Enfin, la capsule antérieure présente une courbure plus marquée que celle de la capsule postérieure<sup>26</sup>.

### C. Synthèse des fibres cristalliniennes

Durant leur différenciation, les fibres cristalliniennes connaissent plusieurs modifications (Figure 9). Dans un premier temps, les fibres cellulaires "se retirent" du cycle cellulaire des cellules épithéliales proches de l'équateur du cristallin. Puis elles subissent un allongement progressif, des

protéines spécifiques ou cristallines sont synthétisées et s'accumulent dans le cytoplasme avec acquisition de spécialisations au niveau des membranes plasmiques. Enfin, une dégradation du noyau et des organites cellulaires se fait par autophagie.



**Figure 9: différenciation des fibres cristalliniennes depuis l'épithélium cristallinien au niveau de l'équateur, traduction en français depuis<sup>27</sup>.**

## D. Changements avec l'âge :

### 1. Morphologie

La capsule du cristallin s'épaissit et s'étend en surface avec la croissance du cristallin. Au niveau de l'épithélium, les cellules deviennent plus plates, la densité cellulaire diminue, et leur capacité proliférative se réduit. Avec le vieillissement, les fibres cristalliniennes subissent une dégradation de protéines essentielles comme MIP26 et les protéines cytosquelettiques,

accompagnée d'une augmentation du ratio cholestérol/phospholipide, ce qui réduit la fluidité membranaire et augmente la sclérose nucléaire (durcissement).

## **2. Presbytie**

L'amplitude de l'accommodation diminue progressivement avec l'âge, passant de 14 D à 10 ans à presque 0 D vers 60 ans. Cette diminution est causée par une perte d'élasticité de la capsule, une rigidité accrue du cristallin, et une réduction de la déformabilité du noyau. De plus, la zonule est moins efficace pour maintenir la tension sur le cristallin. De plus, les modifications anatomiques (courbure, épaisseur) n'affectent pas la réfraction en raison d'altérations du gradient d'indice.

## **3. Changements biochimiques**

L'activité métabolique globale du cristallin diminue avec l'âge, particulièrement dans le noyau et le cortex, en raison d'une réduction de l'activité enzymatique. Bien que le cristallin conserve une capacité notable de synthèse de protéines et lipides, il devient plus vulnérable aux dommages oxydatifs et à la peroxydation lipidique, en lien avec une diminution des antioxydants, surtout dans le noyau.

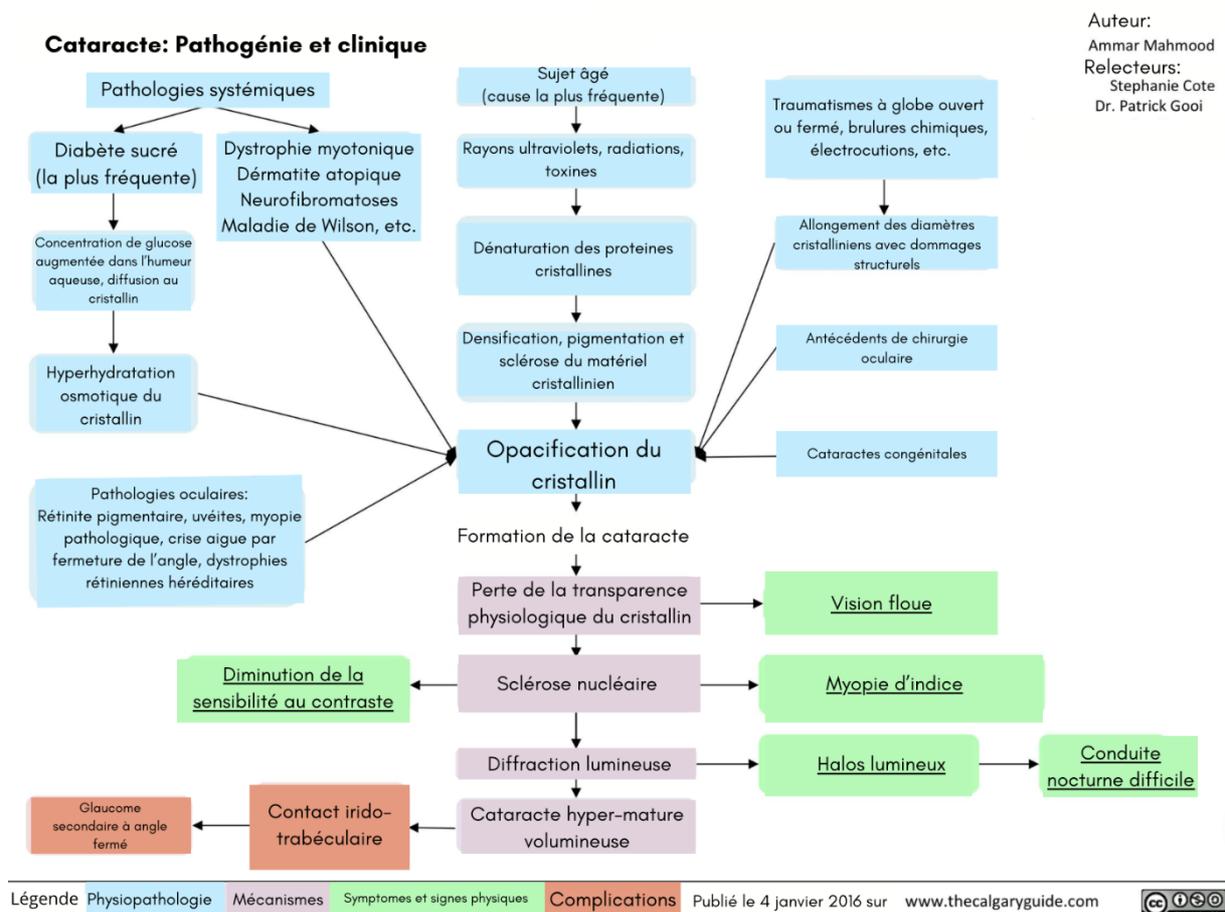
## IV. Physiopathologie de la cataracte

La physiopathologie de la cataracte sénile est complexe et encore mal comprise, impliquant des interactions entre divers processus physiologiques modulés par des facteurs environnementaux, génétiques, nutritionnels et systémiques. Le développement de la cataracte, de nature multifactorielle, repose sur plusieurs mécanismes. Tout d'abord, la sclérose nucléaire résulte de la compression et du durcissement progressifs du noyau central, dus à l'agencement successif de nouvelles couches dans le cortex cristallinien. Par ailleurs, l'épithélium cristallin subit des modifications liées à l'âge, telles qu'une diminution de la densité cellulaire et une différenciation anormale des fibres du cristallin. Avec le vieillissement, la perméabilité de l'épithélium et du cortex aux métabolites hydrosolubles de faible poids moléculaire diminue, entraînant une réduction du transport de l'eau, des nutriments et des antioxydants, ce qui favorise un stress oxydatif progressif et le développement de la cataracte. Enfin, les protéines cytoplasmiques solubles de faible poids moléculaire se transforment en agrégats solubles de haut poids moléculaire et en protéines membranaires insolubles, provoquant des variations brutales de l'indice de réfraction, une dispersion des rayons lumineux et une perte de transparence du cristallin<sup>28</sup>.

Il existe trois types de cataractes séniles<sup>28</sup> :

- **Cataractes nucléaires** : résultent d'une sclérose nucléaire excessive. Dans certains cas, le noyau peut devenir très opaque et brun, ce qu'on appelle une cataracte nucléaire brune.

- **Cataractes corticales** : Les modifications de la composition ionique du cortex du cristallin et la modification éventuelle de l'hydratation des fibres du cristallin produisent une cataracte corticale.
- **Cataractes sous capsulaires postérieures** : se caractérise par la formation d'opacités granulaires et de plaquettes juste en avant de la capsule postérieure du cristallin.



**Figure 10: Pathogénie et clinique de la cataracte, traduction en français à partir de<sup>29</sup>.**

## V. Techniques chirurgicales de la cataracte

### A. La phacoémulsification

La phacoémulsification décrite par Kelman en 1967, est une technique mécanisée d'extraction extracapsulaire qui est basée sur la fragmentation du noyau cristallinien à travers une incision étroite<sup>30</sup>.

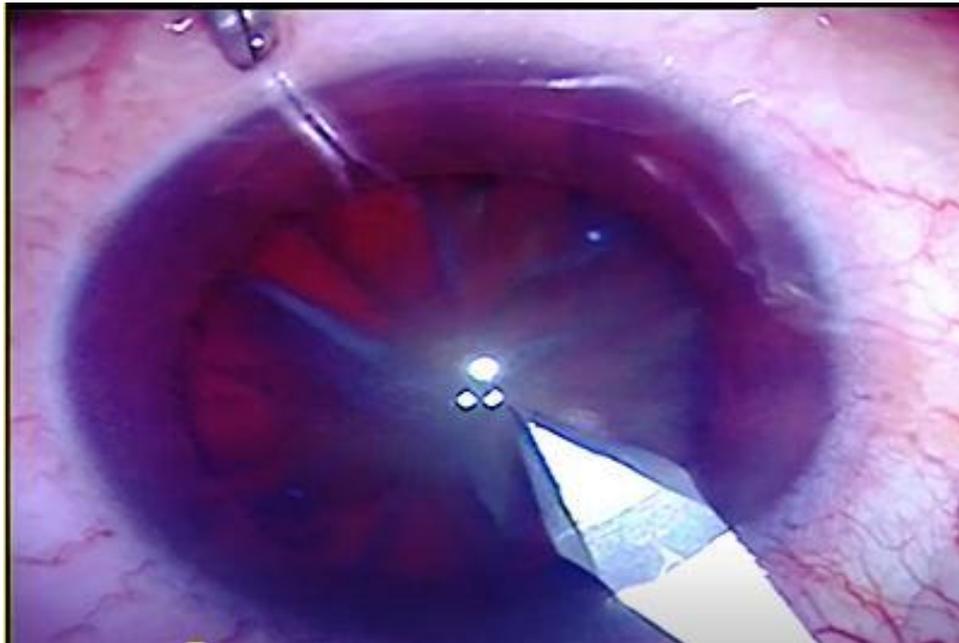
C'est la technique de référence qui utilise les ultrasons pour creuser le cristallin en pulvérisant et en aspirant en même temps les fragments. Elle comprend les temps suivants : l'incision cornéenne, le capsulorhéxis, l'hydrodissection, le traitement du noyau, l'aspiration du cortex et, enfin, la mise en place de l'implant<sup>31</sup>.

#### 1. Principes d'incisions

Plusieurs incisions ont été décrites comme l'incision limbique ou sclérale, mais nous allons décrire l'incision en cornée claire qui est la plus courante actuellement.

##### a) Incision cornéenne principale

Elle commence dans la cornée claire au niveau du limbe cornéen anatomique. Pouvant être directe ou en marche d'escalier, elle conserve le principe du tunnel dans un but d'étanchéité permettant d'éviter les sutures en fin d'intervention. Sa longueur est de 1,6 à 3mm. Sa largeur est celle de la sonde de phacoémulsification, soit de 1,8mm à 3,2mm, réalisée à l'aide un couteau précalibré<sup>32</sup> (Figure 11).



**Figure 11: incision cornéenne principale de 2.4mm (photo du service)**

#### **b) Incision de service**

C'est une incision cornéenne de 1 mm à 2 mm de largeur, oblique dans le plan cornéen, pratiquée à l'aide d'un couteau de 15° de type BEAVER. Elle est située 60° à 120° environ sur la gauche ou la droite de l'incision prévue de la phacoémulsification selon la main dominante de l'opérateur<sup>33</sup>.

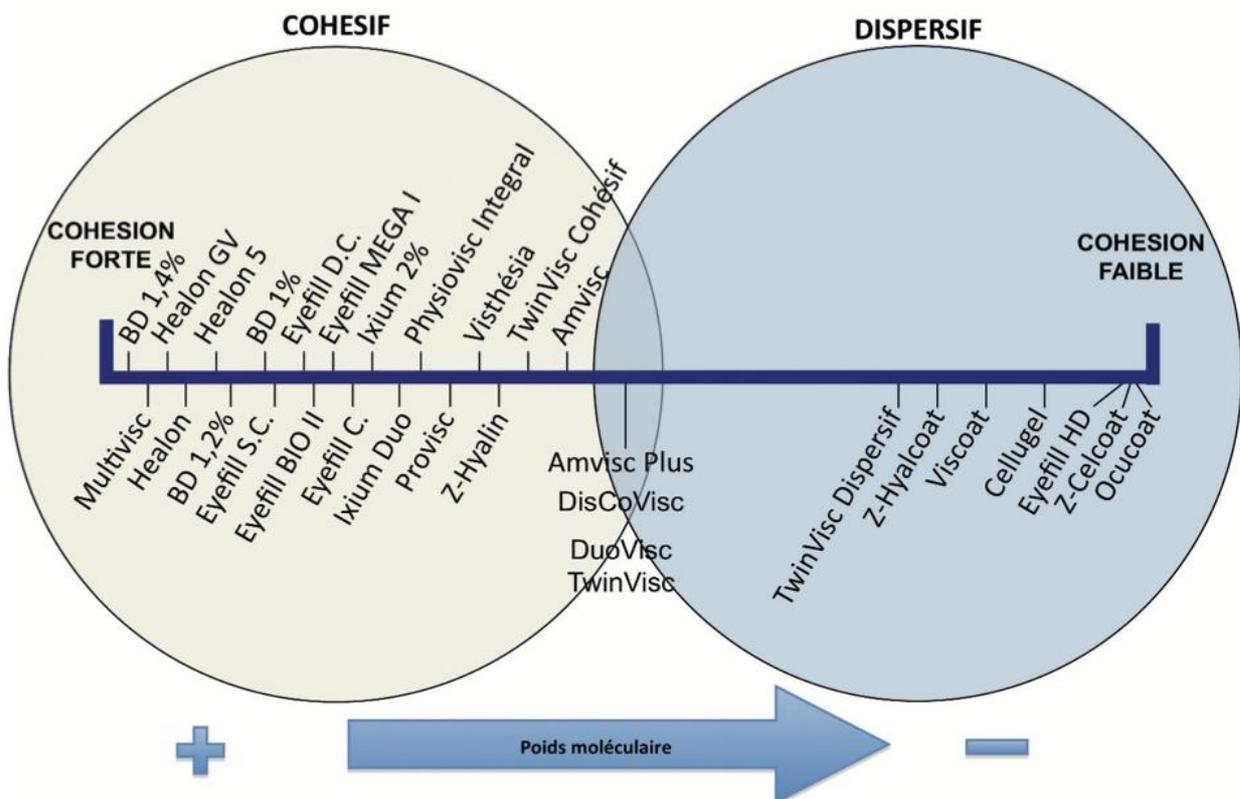
Une injection d'adrénaline diluée est réalisée pour améliorer la dilatation pupillaire<sup>34</sup>, et l'injection de bleu de trypan permet de colorer la capsule antérieure<sup>35</sup>.

#### **2. Injections des substances viscoélastiques (SVE)**

Les substances injectées maintiennent la profondeur de la chambre antérieure et permettent de protéger les structures intraoculaires (endothélium cornéen), d'une part et d'autre part, elles permettent de réaliser le capsulorhexis (Figure 13). Il existe de nombreux produits viscoélastiques disponibles pour la chirurgie de la cataracte qui varient par leur viscosité et

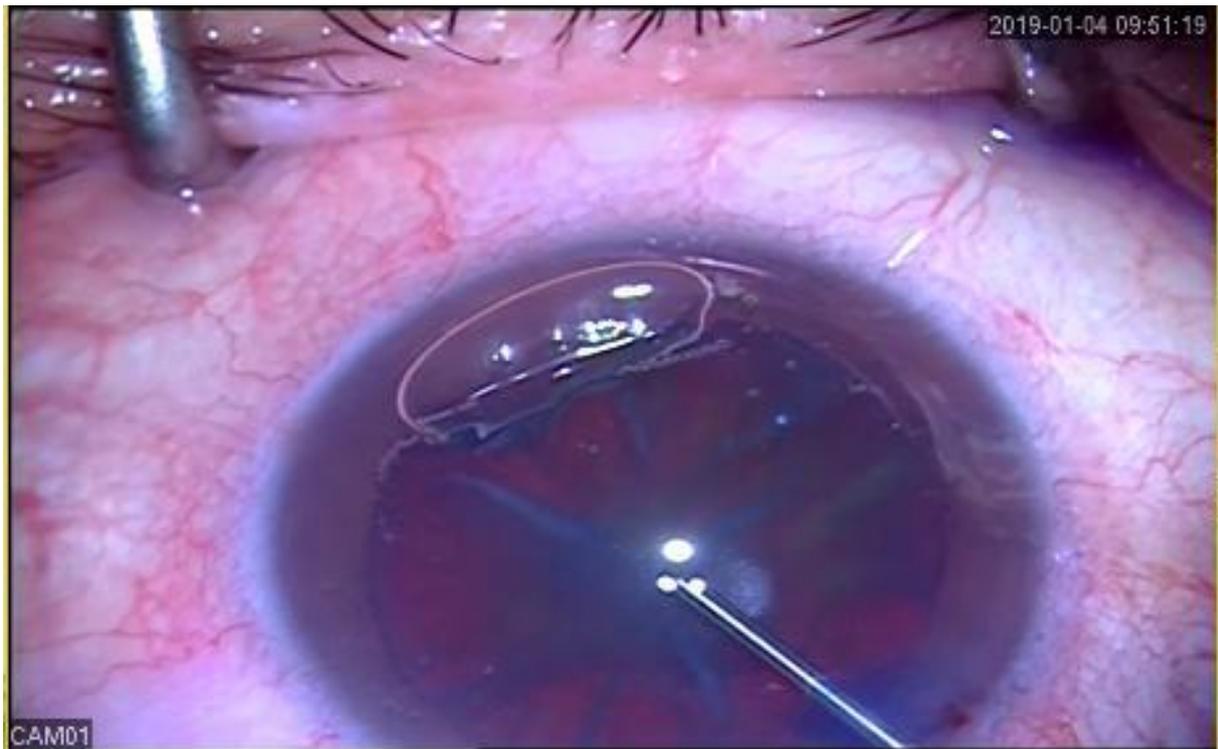
leur poids moléculaire. Les plus utilisés sont des hyaluronates de sodium. Elles se classent en deux catégories<sup>36</sup>.

- Les viscoélastiques de type dispersif : hyaluronates de bas poids moléculaire, dont le but principal est d'isoler certaines structures intraoculaires, comme l'endothélium cornéen, la capsule postérieure ou un éventuel prolapsus de l'iris (plus difficile à retirer).
- Les viscoélastiques cohésifs : hyaluronates de haut poids moléculaire servant à approfondir et maintenir l'espace de la chambre antérieure ou le sac capsulaire.



**Figure 12: Principaux produits visco-élastiques sur le marché français classés en fonction de leur cohésion<sup>37</sup>.**

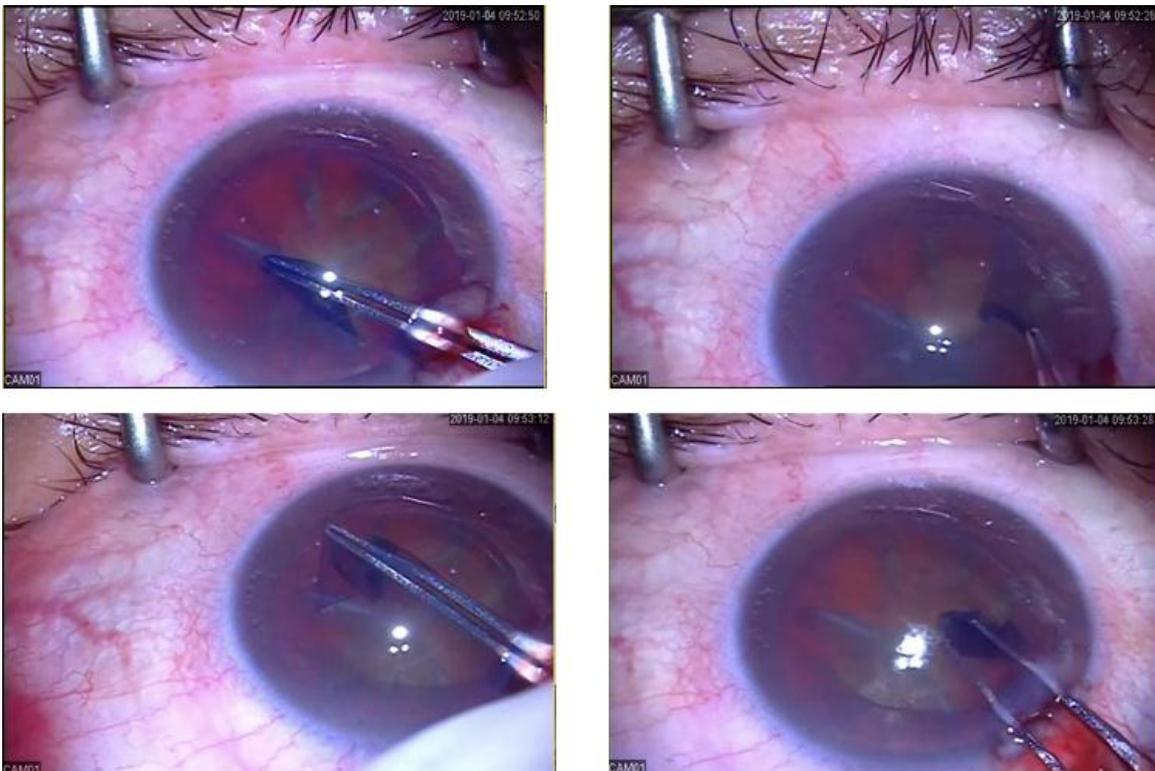
À noter que certains visqueux permettent également une anesthésie intracaméculaire par la combinaison du hyaluronate de sodium et de la lidocaïne. Ce qui améliore le confort du chirurgien et optimise l'anesthésie du patient, même en cas de chirurgie longue<sup>38</sup>.



**Figure 13: Injection de substance viscoélastique en intracaméculaire (photo du service).**

### 3. Capsulorhexis

Le capsulorhexis est une découpe capsulaire continue, circulaire et centrée décrite par Gimbel et Neuhann en 1984, qui consiste à enlever une partie de la capsule antérieure (6mm de diamètre en moyenne). La technique actuelle du capsulorhexis débute par une incision de 2.5mm, faite à l'aiguille de 23G doublement coudée, appelée kystitome, complétée à la pince à rhéxis donnant accès au noyau<sup>39</sup> (Figure 14).

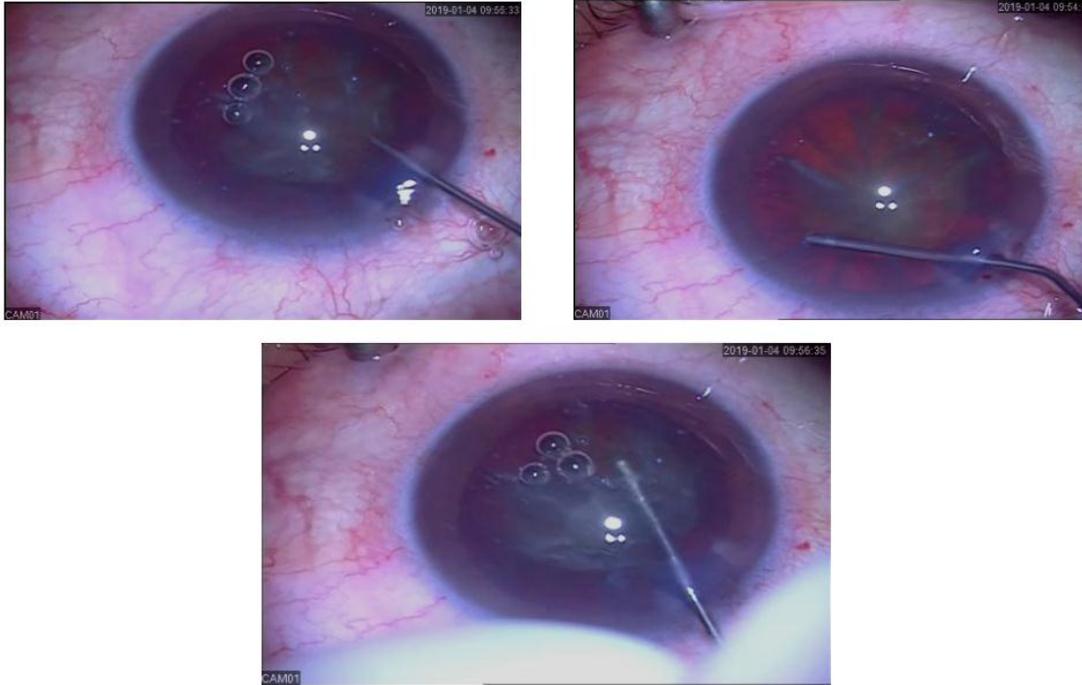


**Figure 14: Capsulorhexis (photos du service).**

### 4. Hydrodissection – Hydrodéliéation

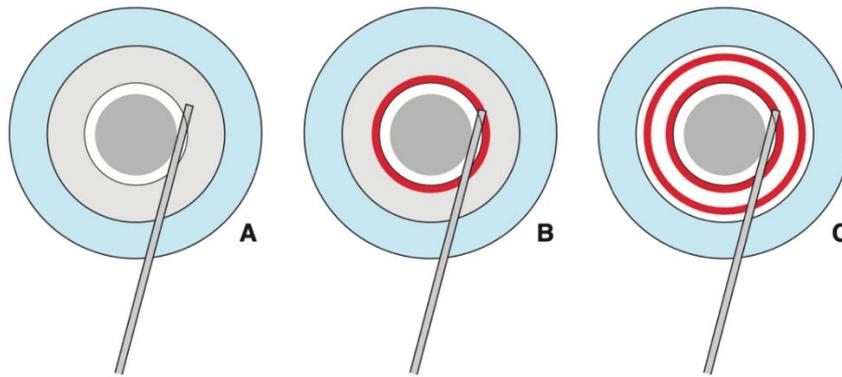
L'**hydrodissection** consiste à injecter du liquide entre la capsule et le cortex (Figure 15). Le 'Balanced Salt Solution' (BSS) est injecté grâce à une canule fine (30 G ou Rycroft) sous la face postérieure de la capsule antérieure. Le liquide va fuser le long de la capsule réalisant un aspect de vague. L'injection se poursuit jusqu'à envahissement de la totalité de l'aire pupillaire.

Ce temps opératoire est obligatoire pour mobiliser le noyau, aussi en cas d'échec, il est impératif de réitérer le geste.



**Figure 15: Hydrodissection (photos du service).**

L'**hydrodélinéation** (Figure 16) a pour objectif séparer le noyau du cortex. En pratique, la canule est insérée dans l'épaisseur du cortex en visant le bord équatorial du noyau et en se rapprochant de sa partie centrale jusqu'à ce qu'elle bute sur le noyau dur. L'injection de liquide se traduit alors par l'apparition de l'anneau d'or.



**Figure 16: représentation schématique de l'hydrodéliéation<sup>31</sup>**

## 5. Traitement du noyau

Une fois l'hydrodissection réalisée et vérifiée, le traitement du noyau peut se faire selon différentes techniques:

-La **nucléofracture**, également connue sous le nom de "**divide and conquer**", est la méthode la plus couramment utilisée. Elle implique la création de zones de fragilité dans le noyau afin de le diviser en quartiers, qui sont ensuite déplacés vers le centre pour être émulsifiés. Cette technique nécessite une hydrodissection précise pour faciliter la rotation du noyau. Des sillons sont sculptés perpendiculairement, d'une largeur d'environ 3 mm, avec une puissance d'ultrasons ajustée en fonction de la dureté du noyau (Figure 17)<sup>31</sup>..

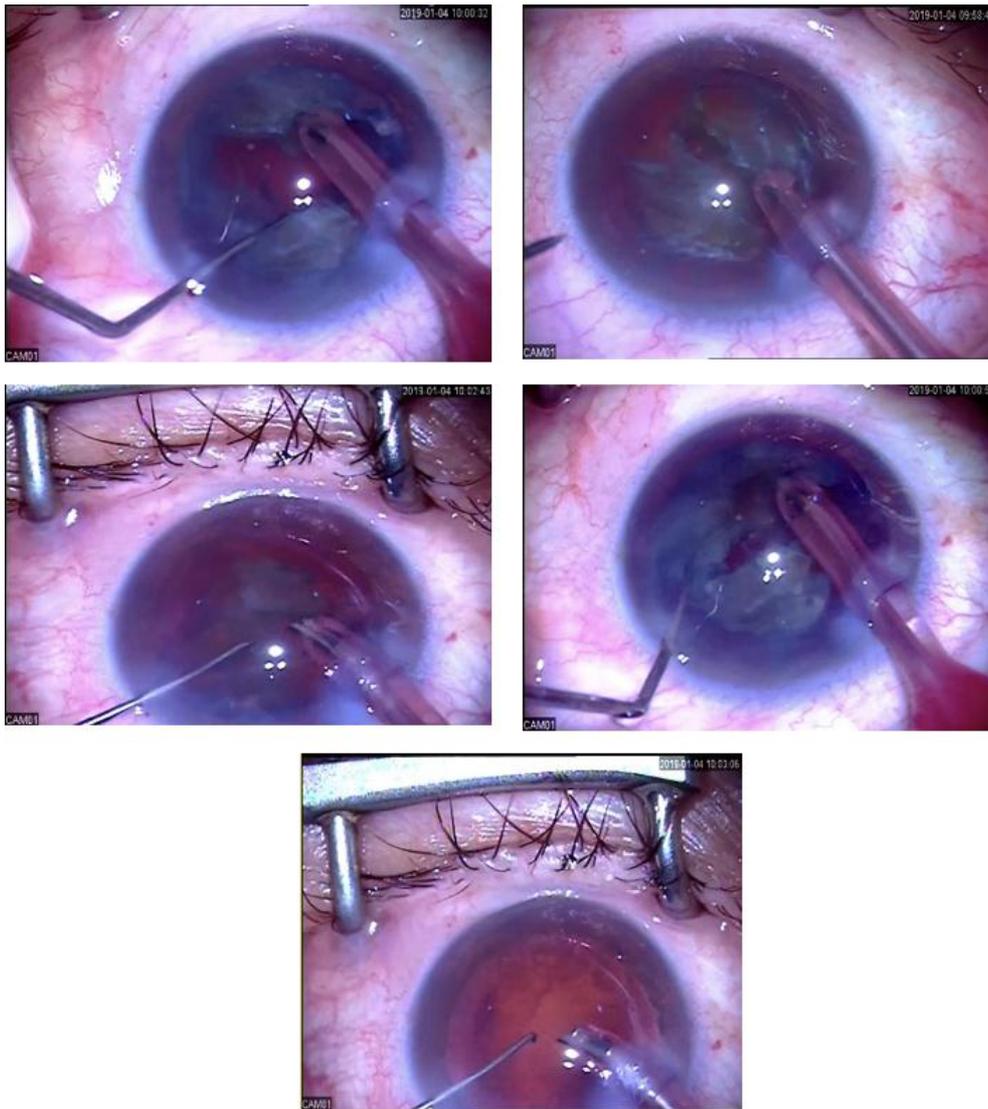
Le "cracking" est réalisé en bimanuel en utilisant le biseau de la sonde à ultrasons et le micromanipulateur pour séparer les quartiers, qui sont ensuite émulsifiés un par un. En cas de noyau très dur, une augmentation du vacuum et l'utilisation en mode pulsé des ultrasons peuvent faciliter l'extraction, mais cela peut entraîner un collapsus caméculaire avec une possible rupture capsulaire postérieure.

-Le **phaco chop**, une technique décrite par Nagahara en 1993, permet l'extraction du noyau sans la nécessité de sculpter des sillons. Dans cette

méthode, l'épinoyau est aspiré à la surface, puis un phaco chop ou un crochet est introduit sous les côtés de la capsule antérieure et utilisé pour casser le noyau. Cette manœuvre est répétée plusieurs fois pour obtenir de multiples fragments, ce qui en fait une option particulièrement adaptée aux noyaux durs et aux petites pupilles.

-Le **stop and chop** est une technique dérivée du phaco chop, dans laquelle un sillon central est réalisé pour fracturer le noyau en deux parties égales. La fragmentation restante est ensuite réalisée selon la méthode du phaco chop. Cette technique est particulièrement utile en cas de noyau dur ou de défaut dans le capsulorhexis, car elle réduit le temps d'utilisation des ultrasons.

D'autres variantes techniques de traitement du noyau ont également été décrites dans la littérature, telles que la phacospirale, le sabot de Kratz-Maloney et la technique chip and flip de Fine .



**Figure 17: Phacoémulsification du noyau : divide and conquer (photos du service).**

### **6. Aspiration des masses**

Il s'agit en réalité d'une irrigation-aspiration (I /A) des masses (figure 14), en chambre antérieure fermée, ce qui permet de tenir la capsule postérieure à distance de la sonde. La difficulté de l'I/A des masses va dépendre de la qualité de l'hydrodissection et de l'importance du cortex restant, qui sera d'autant plus volumineux que le noyau sera mou. Le capsulorhèxis a rendu ce temps plus délicat, en particulier pour l'aspiration des masses de 12h (à proximité de l'incision).

Elle se fait en disposant l'orifice d'aspiration juste en dessous du bord du rhexis, orienté d'abord vers le haut puis latéralement jusqu'à obtenir l'occlusion par la partie antérieure des masses. La masse est ensuite mobilisée dans la partie centrale du sac et aspirée. Il est préférable de débiter l'aspiration du cortex à midi pour profiter de l'effet masse. L'I/A se termine par un polissage de la capsule antérieure et postérieure en réglant l'aspiration de 5 à 20mmHg et en baissant la hauteur de perfusion si la capsule postérieure a tendance à fuir sous la sonde<sup>31</sup>.



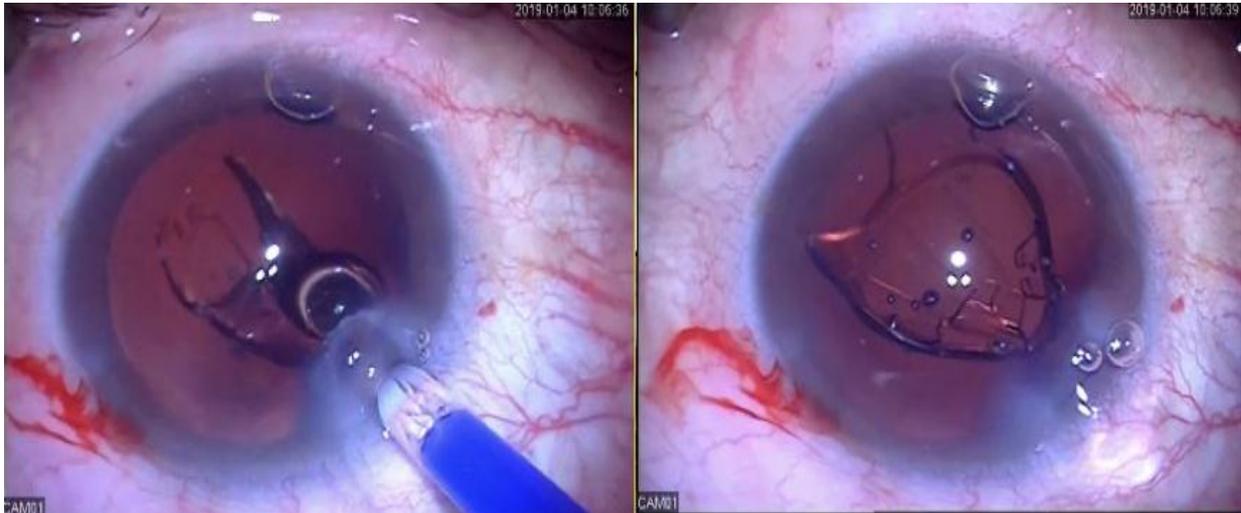
**Figure 18: Aspiration des masses corticales (photos du service).**

## **7. Implantation:**

Avant d'insérer l'implant, il faut réaliser une injection de substance viscoélastique dans le sac capsulaire pour mieux positionner son implant entre le feuillet antérieur et postérieur. L'injection du SVE, de type cohésif débute à 6 h et se poursuit jusqu'à l'incision. Cette manœuvre permet ainsi de gonfler légèrement le sac et de séparer feuillet antérieur du feuillet postérieur.

Afin de conserver le bénéfice de la petite taille de l'incision, il fallait proposer la mise en place d'une lentille intraoculaire passant par le même orifice sans l'élargir. Les implants en PMMA rigides, bien que biocompatibles ne pouvaient répondre à cette exigence. Le premier implant pliable en

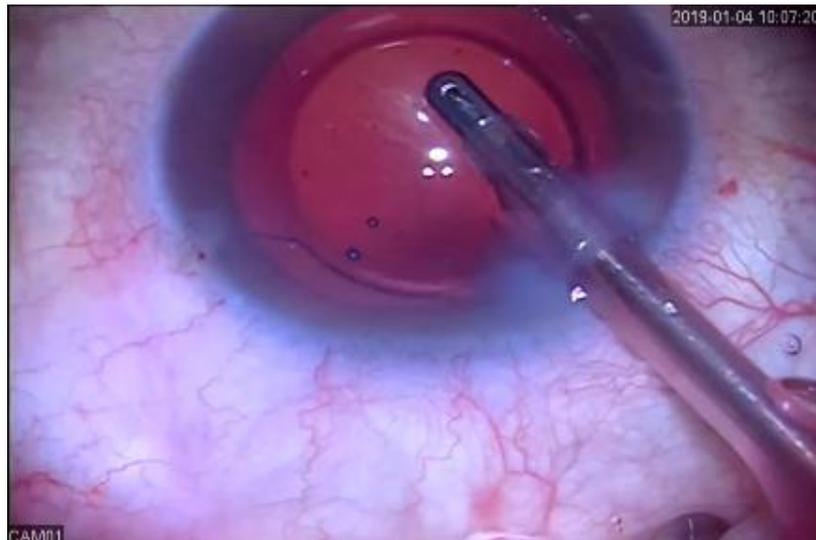
silicone a été proposé par Mazzocco en 1984<sup>40</sup>. Puis sont apparus les acryliques et les hydrogels. Afin de ne pas augmenter la taille de l'incision, la plupart des implants sont introduits pliés ou sont injectés dans la chambre postérieure (Figure 19).



**Figure 19: Injection d'un implant pliable dans le sac cristallinien (photos du service).**

#### **8. Aspiration de la substance viscoélastique (SVE)**

Il est impératif après avoir introduit l'implant de retirer l'intégralité du SVE pour éviter les hypertonies précoces, liées à la substance viscoélastique. Cette étape s'effectue avec la sonde I/A, l'aspiration se fait derrière et devant la lentille intraoculaire (Figure 20).



**Figure 20: Irrigation et aspiration de la substance viscoélastique (photo du service)**

### **9. Fermeture de l'incision**

L'incision doit être hydratée avec une solution saline pour bien assurer l'étanchéité de l'incision. Ceci est réalisé en injectant une solution saline équilibrée dans les berges de l'incision. L'hydratation accole les deux berges de l'incision, ce qui crée une barrière étanche. La pompe cellulaire endothéliale peut alors retirer du liquide en avant et en arrière de l'incision, ce qui augmente la cohésion de l'incision (Figure 21). Une bonne incision cornéenne interne et externe est nécessaire pour permettre une fermeture sans suture fiable<sup>31</sup>.

Certains opérateurs préfèrent placer un point séparé au monofilament 10/0 enfoui sur leur incision cornéenne.

Le premier contrôle postopératoire doit avoir lieu dans les premières 72h après la chirurgie, et est en pratique le plus souvent effectué le lendemain de l'intervention. Il est destiné à vérifier l'étanchéité de l'incision, la bonne position de l'implant et l'absence d'infection ou d'inflammation.

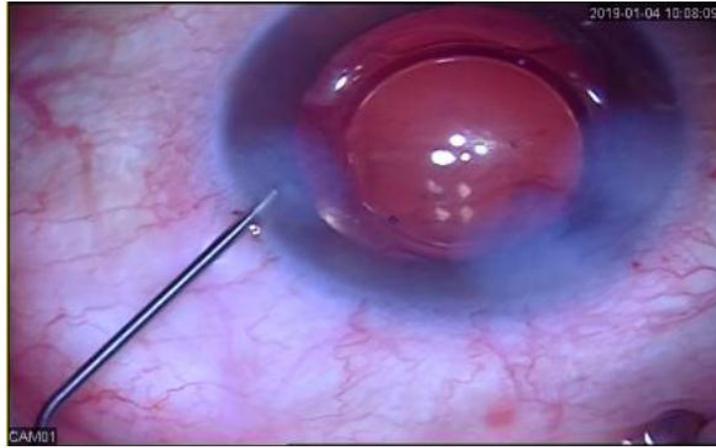


Figure 21: Hydrosuture de l'incision (photo du service).

## **B. L'extraction extracapsulaire manuelle**

L'extraction extracapsulaire, introduite par KELMAN dans les années 1960, consiste à retirer le contenu du cristallin cataracté par une large incision d'environ 8 mm, permettant l'expulsion complète du noyau en une seule pièce à travers une ouverture de la capsule antérieure, tout en conservant la capsule postérieure. Cette technique est principalement indiquée pour les cataractes où la phacoémulsification est impraticable, notamment en présence de noyaux très durs, de cataractes hypermûres ou en cas de complications peropératoires nécessitant une conversion vers cette technique.

Elle présente l'avantage d'exiger un équipement minimal, ce qui la rend accessible dans des contextes de ressources limitées. Toutefois, la nécessité d'une grande incision cornéenne peut entraîner un astigmatisme postopératoire significatif, ce qui constitue une limite importante de cette méthode<sup>41</sup>.

### C. L'extraction intracapsulaire

C'est une technique qui a été abandonnée en raison de ses inconvénients. A travers une incision limbique étendue, le cristallin est extrait en totalité dans son sac capsulaire au moyen d'une cryode réfrigérée à  $-80^{\circ}$  et systématiquement associée à une iridectomie périphérique pour éviter un blocage pupillaire par le vitré et une hypertonie<sup>42</sup>.

### D. Chirurgie de cataracte assistée par laser femtoseconde

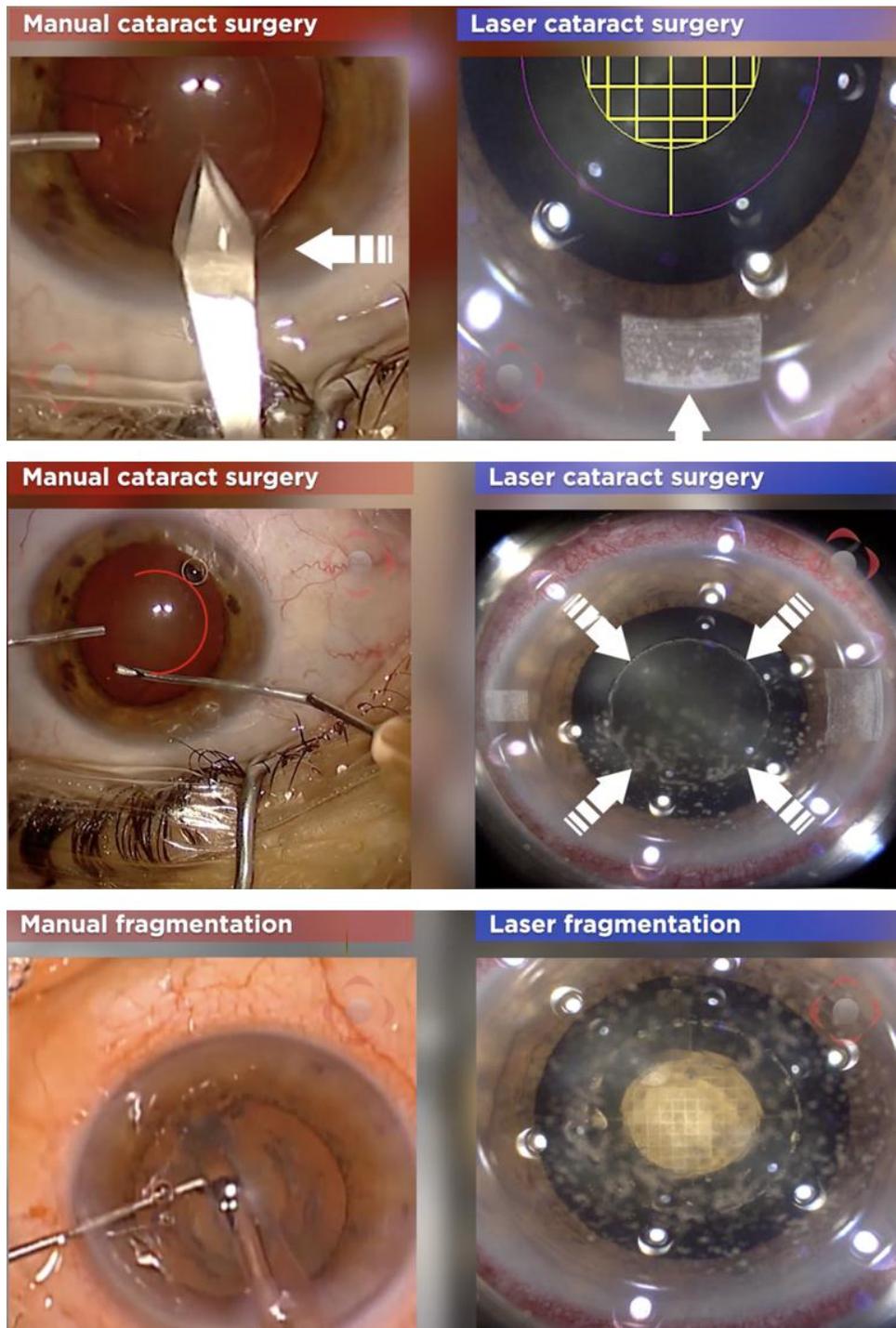
La chirurgie de la cataracte assistée au laser femtoseconde représente une avancée technologique permettant une standardisation des incisions cornéennes, de la capsulotomie et une pré-fragmentation du cristallin. Bien que cette innovation améliore la précision et la sécurité de certaines étapes, son coût et ses contraintes techniques limitent actuellement son utilisation généralisée<sup>43</sup>.

Le laser femtoseconde, utilisé initialement en chirurgie réfractive pour le LASIK, délivre des impulsions ultra-brèves de l'ordre de la femtoseconde ( $10^{-15}$  seconde). Grâce à sa précision, il cible spécifiquement les tissus cristalliniens sans affecter les structures adjacentes. Il induit un effet de dissection mécanique par photodisruption, permettant une vaporisation contrôlée des tissus<sup>44</sup>.

Parmi les avantages notables, la capsulotomie réalisée au laser se distingue par sa précision et sa régularité, surpassant la reproductibilité du capsulorhéxis manuel. Cela favorise un meilleur centrage et une stabilité réfractive accrue des implants. Les incisions cornéennes réalisées au laser présentent une meilleure stabilité et améliorent la gestion de l'astigmatisme cornéen induit. De plus, la pré-fragmentation du cristallin permet de réduire

la puissance et la durée des ultrasons nécessaires lors de la phacoémulsification, diminuant ainsi la perte de cellules endothéliales, bénéfique notamment pour les patients présentant une cornée fragilisée, comme dans la cornea guttata<sup>45</sup>.

Cette technique montre aussi un intérêt pour les cataractes complexes telles que les cataractes blanches, congénitales ou associées à des pathologies comme le syndrome de Marfan, en assurant une sécurité supplémentaire. Toutefois, des études multicentriques à grande échelle restent nécessaires pour confirmer ces bénéfices à long terme.



**Figure 22: Chirurgie de cataracte assistée par laser femtoseconde : incision (en haut) capsulorhexis (au milieu) traitement du noyau (en bas)<sup>46</sup>.**

## VI. La simulation

### A. Historique

La simulation a évolué dans plusieurs secteurs avant de devenir un outil clé dans l'éducation médicale. Dans des domaines comme l'aviation et le militaire, elle est désormais essentielle pour la formation et la certification.

#### 1. Dans le domaine de l'aviation

Dans le domaine de l'aviation, l'histoire de la simulation remonte à 1929, avec la création du Link Trainer par Edwin Link<sup>47</sup>. un simulateur de vol primitif sans affichage visuel (Figure 23). Durant la Seconde Guerre mondiale, la formation des pilotes a pris un tournant majeur avec la construction de simulateurs à grande échelle pour les équipages, permettant de s'entraîner individuellement et en équipe pour des missions complexes. En 1979, la NASA a introduit la formation CRM (Cockpit Resource Management), visant à améliorer la communication dans le cockpit, identifiée comme une cause majeure d'accidents aériens<sup>48</sup>. Dans les années 1990, cette formation a évolué en Crew Resource Management (CRM), incluant tous les membres de l'équipage, avec un accent sur la gestion des facteurs humains, tels que le travail d'équipe, la gestion du stress et les erreurs humaines<sup>49</sup>.



**Figure 23: Simulateur de vol développé par Edwin Link<sup>50</sup>.**

## **2. Dans le domaine militaire**

La simulation et les jeux de guerre sont utilisés depuis longtemps dans le domaine militaire pour concevoir et tester des stratégies de combat<sup>51</sup>. Ces jeux consistent à simuler des batailles ou des campagnes militaires dans le but d'évaluer des concepts et des techniques. Initialement, les simulations et jeux de guerre étaient développés sur des ordinateurs géants dédiés à des fins militaires (Figure 24). Cependant, avec l'avènement des plateformes de jeux vidéo grand public de plus en plus performantes, leur utilisation à des fins militaires s'est largement démocratisée.



**Figure 24: Simulateur pour entraînement militaire**

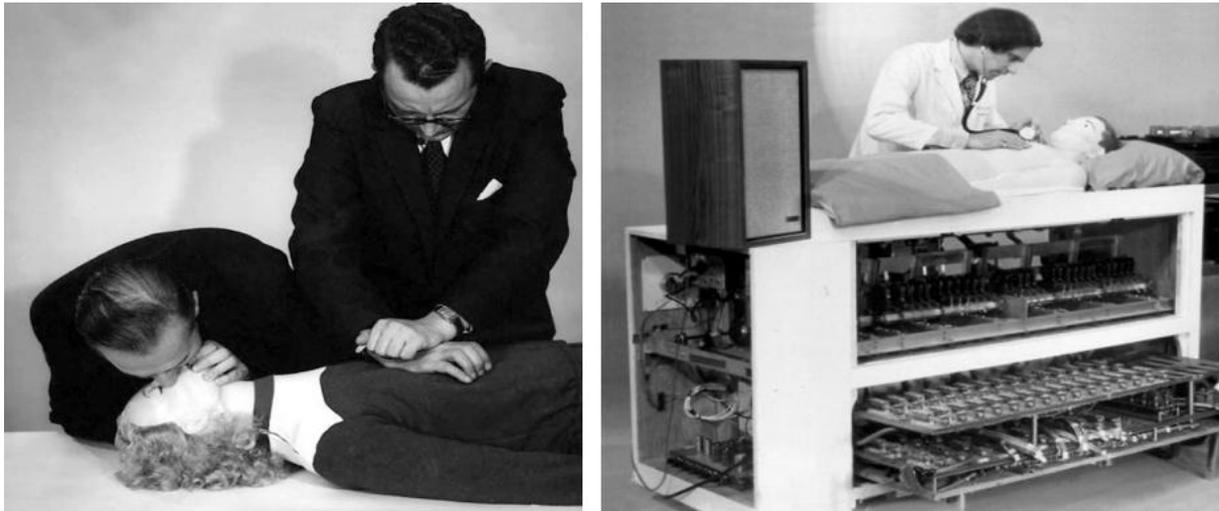
### 3. La simulation en médecine

Le premier mannequin pour simulation médicale à été décrit au 16ème siècle, Lorsqu'une maïeuticienne, Angélique Du Coudray a eu l'idée de créer un mannequin (Figure 25) et faire le tour de la France afin d'apprendre aux autres sage-femmes les différentes techniques d'accouchement.



**Figure 25: Mannequin d'obstétrique réalisé par Angélique Du Coudray<sup>52</sup>.**

La simulation proprement dite, dans le domaine des soins de santé, remonterait au temps du premier simulateur procédural « Resusci-Anne » (Figure 26) développé par la société Laerdal dans les années 1950. Pour faire suite à une étude publiée sur l'efficacité de la ventilation bouche à-bouche dans la réanimation cardio-pulmonaire<sup>53</sup>, Resusci-Anne a été développé pour permettre l'apprentissage de ce geste.



**Figure 26: Démonstration sur Resusci-Anne<sup>54</sup> (à gauche). Dr. Michael Gordon avec le simulateur Harvey<sup>55</sup> (à droite).**

Au début des années 1960, le concept de patients standardisés ou simulés (acteurs formés) a été introduit afin de développer les compétences de communication (l'anamnèse du patient à titre d'exemple) mais également le savoir-faire clinique, offrant ainsi les conditions optimales pour évaluer les compétences cliniques et de communication dans des situations spécifiques<sup>56</sup>

Une autre avancée dans la simulation dans le domaine des soins de santé a été le développement d'un simulateur moderne contrôlé par ordinateur à la fin des années 1960, Sim One<sup>57</sup>. Sim One était contrôlé par un ordinateur hybride numérique et analogique. Il possédait de nombreuses spécificités des simulateurs à haute-fidélité physique d'aujourd'hui : Sim One pouvait respirer, avoir un rythme cardiaque, afficher une pression artérielle, cligner des yeux, ouvrir et fermer sa bouche. Il pouvait même réagir à l'administration de quatre médicaments par voie intraveineuse.

Parallèlement, le simulateur Harvey (Figure 26) permettant d'effectuer un examen cardiopulmonaire a été développé à l'université de Miami. La version actuelle du simulateur Harvey reproduit les maladies cardiaques et

pulmonaires, notamment en offrant la possibilité de prendre la pression artérielle, ausculter les râles respiratoires, les bruits et souffles du cœur.

Et si la simulation médicale est aujourd'hui largement acceptée, c'est grâce aux travaux de Gaba à l'université de Stanford et de Good et Grevenstein à l'université de Floride dans les années 1980. En 1986, Gaba développa le projet CASE (Comprehensive Anesthesia Simulation Environment), qui devint ensuite MedSim Eagle Simulation grâce à un partenariat avec CAE Link Corporation dans les années 1990.

Au cours de la même décennie, Medical Education Technologies, Inc. développa un simulateur haute-fidélité ; puis Laerdal Medical vint intégrer le marché en 2000 avec le fameux SimMan, et ainsi une industrie fut créée<sup>58</sup>.

Et depuis, plusieurs spécialités ont pu profiter de l'avènement de la simulation, notamment l'anesthésie-réanimation, l'obstétrique, la médecine d'urgence et puis la chirurgie où le souci de sécurité tant pour le patient que pour le praticien reste une préoccupation quotidienne.

#### **4. Avènement de la simulation en santé au Maroc**

L'histoire de la simulation médicale haute-fidélité au Maroc débute en février 2009, lors d'une première session organisée dans une salle dédiée au sein des locaux du SAMU de Casablanca<sup>59</sup>. Cette initiative s'inscrivait dans le cadre d'un projet du Ministère de la Santé visant à doter les Centres d'Enseignement en Soins et Gestes d'Urgence (CESU) de matériel de simulation, avec pour public cible les internes, résidents, étudiants en médecine, infirmiers et techniciens ambulanciers. Durant les deux premières années, 368 apprenants ont bénéficié de cette formation, marquant ainsi un tournant dans l'approche pédagogique des sciences de la santé. Le succès de

cette initiative a encouragé l'intégration de la simulation dans la formation médicale au sein des facultés du royaume.

Progressivement, des centres de simulation ont vu le jour. Le premier, le Casablanca Sim Center, a été lancé en 2010. Ensuite, le Centre de Simulation et d'Innovation en Sciences de la Santé (CSI2S) de Marrakech a ouvert ses portes en 2013. En 2016, l'International Medical Simulation Center (IMSC) de l'Université Mohammed VI des Sciences et de la Santé a été inauguré par Sa Majesté le Roi Mohammed VI. Aujourd'hui, presque toutes les facultés de médecine marocaines disposent de centres de simulation, parmi lesquels le Centre d'E-Learning d'Enseignement par Simulation et de Télémédecine Educative (CELESTE) à de la Faculté de Médecine, de Pharmacie et de Médecine Dentaire de Fès qui s'est remis à niveau en 2023 par l'inauguration de l'Hôpital Universitaire de Simulation (HUS), le Centre de Simulation et École de Chirurgie de Rabat, le Tangier'Sim Center à Tanger, ainsi que les centres de simulation d'Oujda et d'Agadir.



**Figure 27:Inauguration du centre de simulation de l'UM6SS par Sa Majesté le Roi Mohammed VI.**

Le développement de ces structures a également favorisé l'organisation d'événements pédagogiques innovants, tels que la SIMCUP, une compétition interuniversitaire nationale initiée en 2015 par la Société Marocaine de Simulation en Santé (Morocco Sim), qui regroupe des équipes de différentes facultés. Cet événement a permis à des équipes marocaines de se démarquer à l'international, notamment en octobre 2019, où l'équipe d'Oujda a remporté le premier prix de la SIMCUP organisée à Prague par la Société Européenne de Médecine d'Urgence.

En février 2022, le Tangier'Sim Center a accueilli le premier congrès national dédié à la simulation et à l'innovation pédagogique, intitulé Healthcare Training & Innovation Conference (HTIC). Ce congrès a marqué un jalon important en mettant en lumière l'importance croissante de la simulation médicale dans la formation des professionnels de santé au Maroc. La deuxième

édition a été organisée à Casablanca Sim Center et la troisième édition à la FMPDF à l'Hôpital Universitaire de Simulation.

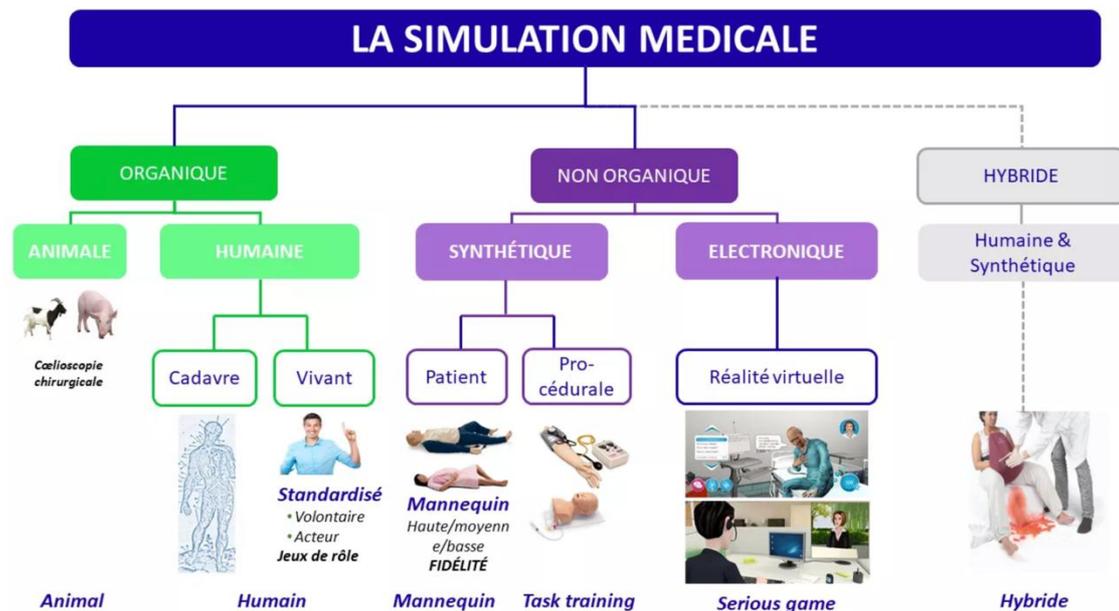


**Figure 28: Visite d'une délégation officielle à l'Hôpital Universitaire de Simulation en septembre 2024<sup>60</sup>.**

## **B. Types de simulation en médecine**

On distingue **trois grands types** ou modalités de simulation en médecine<sup>61,62</sup>: la **simulation humaine**, la **simulation synthétique** et la **simulation numérique**<sup>63</sup> (Figure 29). On peut également ajouter la **simulation hybride**, la **simulation de masse** comme d'autres types de simulation particuliers.

Ces modalités doivent être considérées comme des outils permettant aux formateurs de faciliter l'apprentissage. Comme pour tout autre outil éducatif, chaque type de simulation présente des caractéristiques uniques permettant d'atteindre des objectifs spécifiques ou d'évaluer des compétences cliniques et techniques à des niveaux variables. Le but derrière toutes ces modalités est d'atteindre un degré de fidélité optimal afin de permettre un engagement de l'apprenant tant au niveau comportemental qu'émotionnel et cognitif, aboutissant ainsi à une participation et un apprentissage efficaces.



**Figure 29: Les différents champs de simulation en santé selon (Chiniara G, 2007)<sup>61,63</sup>**

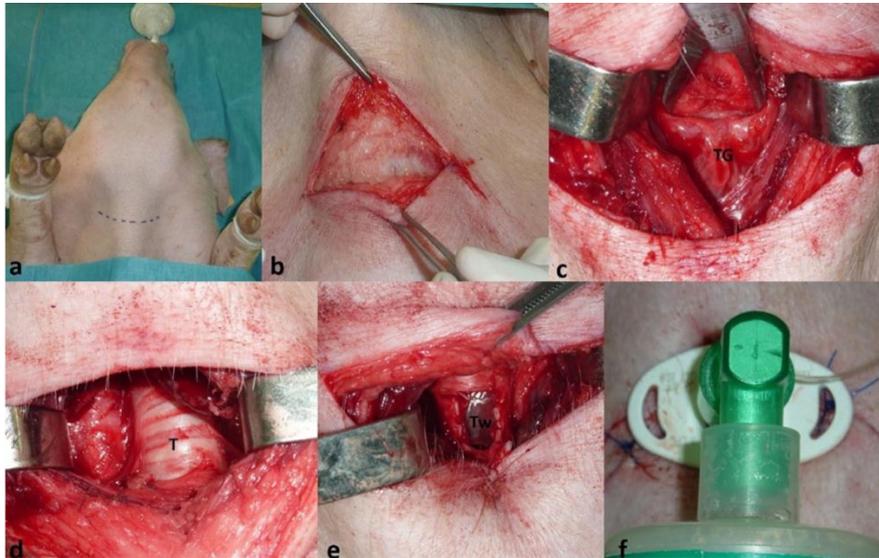
### 1. Simulation organique

La simulation organique repose sur l'utilisation d'éléments biologiques humains ou animaux, qu'ils soient vivants ou cadavériques.

- **Simulation animale** :

Elle s'apparente à l'expérimentation animale et permet aux apprenants de maîtriser des gestes chirurgicaux, qu'ils soient simples, comme les sutures,

ou complexes, tels que la cœliochirurgie ou les greffes d'organes. Les modèles animaux offrent un environnement réaliste et pratique pour la formation, notamment en chirurgie.



**Figure 30:Simulation de trachéotomie sur modèle porcin vivant<sup>64</sup>.**

- **Simulation humaine :**

Que ce soit sur corps humain entier ou sur organe de cadavre, elle est particulièrement utile pour apprendre des gestes techniques en chirurgie, en anesthésie-réanimation ou en médecine d'urgence. Cependant, malgré la présence d'un cadre législatif au Maroc, le don d'organe et de tissus reste limité par des convictions sociales<sup>65</sup>. Ou que ce soit par la participation d'humains vivants. Elle inclut les patients standardisés ou simulés, joués par des acteurs ou des volontaires. Ces derniers incarnent des scénarios préétablis pour reproduire des cas cliniques réalistes. Cette méthode est utilisée pour améliorer les compétences en communication, l'interrogatoire médical ou l'examen physique, tout en mettant l'accent sur l'interaction soignant-patient.

## 2. Simulation non organique

La simulation non organique fait appel à des dispositifs technologiques ou synthétiques pour recréer des environnements cliniques. Elle se divise en deux sous-catégories.

- Simulation électronique :

La simulation électronique se divise en deux catégories principales. La première, à interface non naturelle, utilise des simulateurs logiciels, également appelés "serious games", qui permettent un apprentissage interactif dans des environnements virtuels en trois dimensions. Ces outils, adaptés à l'auto-apprentissage, à l'e-learning et à la pratique de protocoles complexes, offrent des avantages significatifs en termes de mobilité et de coût. La seconde, à interface naturelle, repose sur des simulateurs dotés de technologies avancées, telles que des casques de réalité virtuelle ou des moteurs haptiques, qui imitent des instruments réels pour fournir un retour sensoriel immersif et réaliste.



**Figure 31: Bloc opératoire dans un simulateur en réalité virtuelle (RV) de chirurgie oncologique(en haut)<sup>66</sup> Interface d'un jeu sérieux sur écran d'ordinateur (en bas)<sup>67</sup>.**

- **Simulation synthétique :**

La simulation synthétique regroupe deux catégories principales. La première est la simulation procédurale, qui inclut des simulateurs conçus pour reproduire des gestes techniques spécifiques. Les simulateurs simples, dits « low-tech », sont utilisés pour l'apprentissage de gestes de base, tels que la ponction lombaire ou l'intubation oro-trachéale, tandis que les simulateurs avancés ou haute-fidélité recréent des interventions complexes en intégrant des signaux visuels, sonores et haptiques pour un réalisme accru. La seconde catégorie, la simulation mannequin-patient, repose sur des mannequins commandés par ordinateur depuis des salles de régie, capables de reproduire

de manière réaliste les réactions physiologiques d'un patient. Ces mannequins permettent l'acquisition de compétences à trois niveaux : cognitif (validation de connaissances théoriques), psychomoteur (maîtrise de gestes techniques) et affectif (aptitudes en communication et comportement). Certains mannequins nécessitent l'intervention humaine pour répondre aux actions des participants (script-driven), tandis que d'autres intègrent des modèles physiologiques pour réagir automatiquement (model-driven). Ces outils sont particulièrement adaptés à la formation individuelle et collective, notamment pour la gestion de situations critiques.



**Figure 32: Multiples simulateurs synthétiques pour la gestion des voies aériennes en arrière-plan et simulateur d'ophtalmoscopie direct en avant (en haut) Simulateur haute-fidélité 'grandeur nature' (en bas) (Hôpital Universitaire de Simulation de Fès).**

### 3. Simulation hybride

La simulation hybride combine plusieurs modalités pour enrichir l'expérience de formation. Par exemple, elle peut associer un patient standardisé avec un simulateur procédural pour pratiquer la mise en place d'un cathéter intraveineux. Cette approche permet de simuler des scénarios complexes et réalistes, tels que la prise en charge d'un arrêt cardio-pulmonaire impliquant un simulateur pédiatrique et un acteur jouant le rôle d'un parent. En intégrant différentes technologies, la simulation hybride offre des expériences interactives et variées adaptées à divers niveaux de difficulté<sup>62</sup>.

### 4. Simulation in situ

La simulation in situ se déroule directement dans l'environnement de travail des apprenants, comme un service hospitalier. Elle vise à renforcer les compétences techniques et non techniques des équipes en reproduisant des situations critiques dans leur cadre réel d'exercice. Cette approche favorise la gestion des ressources en temps de crise (CRM) et l'amélioration des interactions pluridisciplinaires, tout en identifiant les aspects organisationnels susceptibles d'être optimisés.

En regroupant ces différentes approches, la simulation médicale offre un éventail de possibilités pédagogiques adaptées à tous les niveaux de formation, des étudiants débutants aux praticiens expérimentés. L'évolution constante des technologies, notamment avec l'intégration de la réalité virtuelle et des interfaces haptiques, promet de repousser encore plus loin les limites de l'apprentissage immersif en santé<sup>62</sup>.

## C. Avancées technologiques dans la simulation en médecine

### 1. Réalité virtuelle

La réalité virtuelle (RV) peut être définie comme une expérience immersive multisensorielle qui donne à l'utilisateur l'illusion de participer à un environnement synthétique plutôt que de l'observer de l'extérieur. Cette technologie repose sur plusieurs composants clés : des affichages tridimensionnels (3D) stéréoscopiques associés au suivi des mouvements de la tête, un suivi des mains et du corps, ainsi qu'une restitution sonore immersive. L'objectif principal de la réalité virtuelle est de recréer une interaction naturelle et réaliste avec un monde numérique, en exploitant les sens humains pour immerger pleinement l'utilisateur dans cet environnement artificiel<sup>68</sup>.

La RV permet d'intégrer des interactions à la fois visuelles, auditives et haptiques, ce qui la distingue des simples interfaces utilisateur graphiques traditionnelles<sup>68</sup>. L'évolution de la RV a été marquée par des avancées majeures, notamment dans les domaines de l'aéronautique (simulateurs de vol), de l'exploration spatiale, et des applications médicales, où elle joue aujourd'hui un rôle central dans plusieurs spécialités<sup>69</sup>. En ophtalmologie, elle trouve des applications variées dans le diagnostic, le traitement et la formation<sup>70,71</sup>. Concernant les méthodes diagnostiques, la RV facilite l'évaluation des déficits visuels, tel que les atteintes du champ visuel dans le glaucome et d'autres pathologies neuro-ophtalmologiques. La RV est également exploitée pour le traitement de pathologies comme l'amblyopie ou l'insuffisance de convergence, où des environnements immersifs permettent des exercices spécifiques. Enfin, les simulateurs de réalité virtuelle, tels que

l'EyeSi Surgical, offrent une alternative intéressante aux wet-labs et dry-labs en créant un environnement immersif où les apprenants peuvent s'exercer de façon illimitée et sans risque pour les patients. Ces avancées technologiques contribuent à une prise en charge améliorée des patients, une formation plus efficace et une évaluation standardisée des résidents.

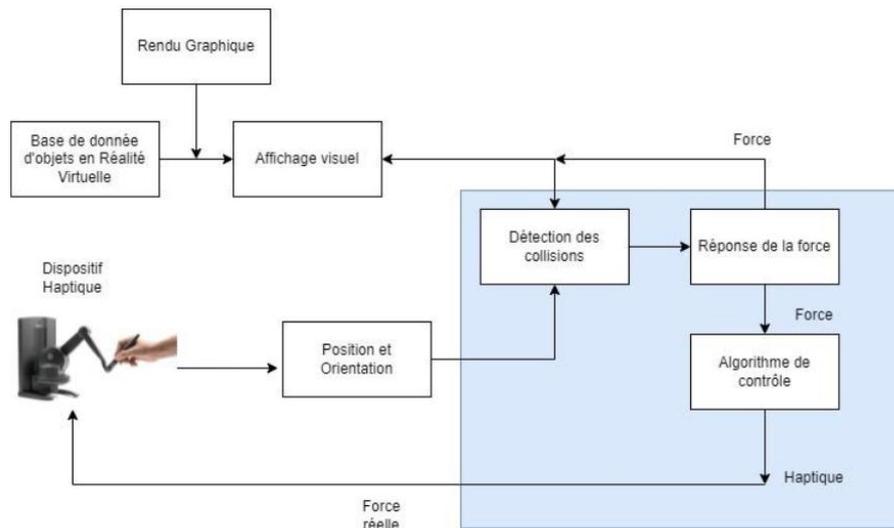


**Figure 33: Exemples de l'utilisation de la RV en ophtalmologie : Simulateur en RV EyeSi à l'Hôpital Universitaire de Simulation de Fès(à gauche) Examen du champ visuel en RV, étude pilote au service d'ophtalmologie du CHU Hassan II (à droite)**

## **2. Retour haptique**

La technologie haptique, dérivée du grec ancien "haptikós" signifiant "capable de toucher"<sup>72</sup> repose sur l'intégration des perceptions tactiles et kinesthésiques pour créer une interaction réaliste avec des objets virtuels<sup>73</sup>. Cette technologie permet de générer des sensations tangibles grâce à des dispositifs équipés d'un système de retour de force, offrant ainsi à l'utilisateur

une expérience immersive qui reproduit fidèlement le contact avec des objets ou surfaces simulés<sup>74</sup>. Elle repose sur un algorithme sophistiqué qui détecte les collisions entre le dispositif haptique (comme un stylet) et l'environnement virtuel, calcule la force de la réponse, et transmet cette information à l'utilisateur en temps réel<sup>75</sup>.



**Figure 34: Boucle de la simulation haptique<sup>74</sup>.**

Initialement utilisée dans les années 1970 dans l'aviation et les jeux vidéo, la technologie haptique a rapidement trouvé des applications dans la santé, en particulier dans les domaines nécessitant un apprentissage précis des compétences psychomotrices. En médecine, elle s'est particulièrement développée en simulation chirurgicale. Des études ont démontré son efficacité pour améliorer la précision, la rapidité et la réduction des erreurs techniques des apprenants. Par exemple, les travaux de Panait et al.<sup>76</sup> ont révélé que les simulateurs haptiques augmentaient significativement la précision et la performance des étudiants en laparoscopie, justifiant ainsi leurs coûts supplémentaires. De même, Strom et al.<sup>77</sup> ont montré que l'utilisation de simulateurs haptiques offrait de meilleurs résultats pour des tâches comme la

diathermie, comparé aux simulateurs conventionnels. Cette association entre retour tactile immersif et réalité virtuelle représente ainsi une avancée majeure dans la formation des professionnels de santé, leur permettant de perfectionner leurs compétences dans des conditions proches de la réalité clinique.

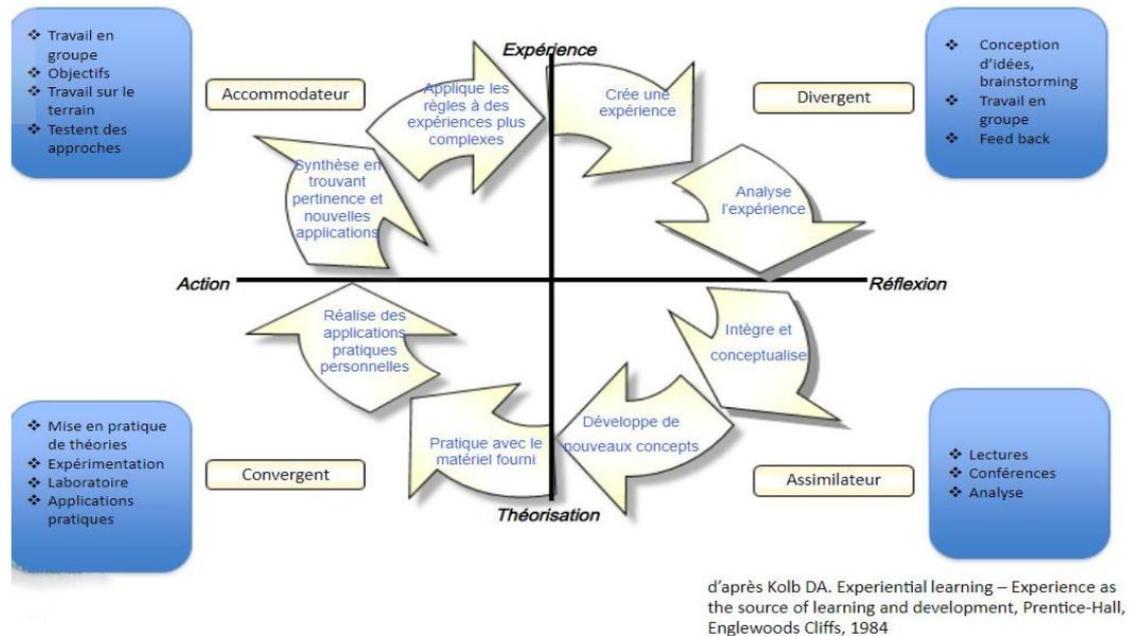


**Figure 35: Exemples de moteurs haptiques commercialisés (A: Phantom Omni; B: Novint Falcon; C: Phantom Desktop<sup>62</sup>.**

#### **D. Intérêts de la simulation en santé**

La simulation en santé et l'enseignement par simulation en santé reposent essentiellement sur les principes de Kolb pour l'apprentissage des adultes<sup>78</sup>. Nous apprenons par l'expérience. Ce principe constitue la base du concept de l'apprentissage expérientiel.

En effet, Le cycle d'apprentissage expérientiel est le concept le plus largement reconnu et utilisé dans la théorie de l'apprentissage expérientiel (ELT). La simplicité et l'utilité du cycle en quatre étapes – expérience, réflexion, pensée et action – sont les principales raisons de sa popularité (Figure 36). Il s'agit d'un modèle adaptable pour la création de programmes éducatifs qui impliquent activement les apprenants dans le processus d'apprentissage, offrant une alternative au modèle traditionnel de transmission d'informations souvent utilisé<sup>78</sup>.



**Figure 36: cycle d'apprentissage selon le modèle de Kolb<sup>78</sup>.**

Toutes les expériences offrent des leçons à notre apprentissage. Lorsque nous vivons un phénomène ou un évènement, nous le percevons par nos sens et nous y associons des pensées et des émotions pour lui donner un sens. Ensuite, soit nous le rattachons à d'autres évènements et expériences du passé, soit nous le projetons dans nos projets d'avenir.

En comparaison avec l'enseignement par simulation en médecine et en chirurgie, l'approche traditionnelle consiste à fragmenter les connaissances médicales en une série de composantes plus simples, afin de faciliter l'apprentissage. Cependant, ce n'est jamais le cas une fois sur le terrain, dans la mesure où la prise en charge du patient varie en fonction de plusieurs paramètres, et les apprenants ainsi formés peuvent ne pas être capables de concevoir la dynamique de variation et d'adaptation nécessaire afin d'intégrer ou de faire le lien entre les différentes composantes et aboutir à un diagnostic concret ainsi qu'une prise en charge adéquate<sup>79</sup>.

Pour pallier ces problèmes de compartimentation et de fragmentation, l'enseignement moderne adopte une approche plus holistique et a recours à une intégration de l'expérience dans l'apprentissage<sup>80</sup>.

**Tableau 1: Stages cliniques classiques versus simulation.**

	<b>Stage clinique</b>	<b>Simulation</b>
<b>Situations critiques</b>	<input checked="" type="checkbox"/> Impossible	✓Reproductibles
<b>Types d'enseignement</b>	<input checked="" type="checkbox"/> Cours + démo	✓Mise en pratique
<b>Rétention</b>	<input checked="" type="checkbox"/> Faible	✓Meilleure
<b>Ethique</b>	<input checked="" type="checkbox"/> Patient=cobaye	✓Jamais la première fois sur le patient

La simulation en santé offre aux apprenants l'opportunité de s'exercer de manière active et immersive, en appliquant les connaissances acquises en cours théoriques, et en renforçant leurs compétences tant techniques que non techniques. Elle vise à créer un environnement psychologiquement sûr qui permet de discuter de façon constructive des erreurs commises, favorisant ainsi un apprentissage efficace.

Bien que l'expérience clinique réelle reste indispensable, la simulation constitue un complément essentiel à l'apprentissage auprès de patients réels pour plusieurs raisons<sup>80,81</sup> :

**Contrôle des séquences d'apprentissage** : La simulation permet de structurer les activités en fonction de la difficulté, en commençant par des tâches simples pour ensuite progresser vers des situations plus complexes. Les exercices simulés sont reproductibles et peuvent être standardisés, ce qui est bénéfique pour la formation et l'évaluation.

**Accompagnement personnalisé** : Un soutien et une guidance pédagogiques peuvent être apportés aux apprenants dans un environnement simulé, ce qui est souvent difficile dans le cadre hospitalier. L'apprentissage peut ainsi être individualisé, en tenant compte des forces et faiblesses de chaque apprenant pour offrir une expérience éducative cohérente et des résultats homogènes.

**Sécurité des patients** : La simulation permet aux apprenants de s'entraîner sans mettre en danger les patients, tout en leur donnant la possibilité de faire des erreurs et d'identifier leurs propres limites. Cela aide à réduire les risques associés aux erreurs humaines et contribue à la prévention d'incidents graves.

**Expérience des situations cliniques rares** : Certaines situations sont peu fréquentes dans la pratique clinique. La simulation offre un cadre pour aborder ces situations rares, permettant aux apprenants de s'y familiariser avant de les rencontrer en milieu hospitalier.

**Renforcement de la collaboration interprofessionnelle** : La pratique médicale évolue vers un travail d'équipe entre professionnels de santé. La simulation facilite cet apprentissage collaboratif, brisant les barrières entre professions et préparant les jeunes praticiens à travailler de manière coordonnée<sup>82</sup>.

Ainsi, l'intégration de la simulation dans la formation médicale contribue à identifier les lacunes structurelles, à améliorer la qualité des formations initiales et continues, et à optimiser l'efficacité des soins et les résultats pour les patients.

## E. Limites de la simulation en santé

Bien que la simulation en santé offre aux apprenants un apprentissage dans un environnement immersif, avec une exposition à des contextes proches de la réalité<sup>83</sup>, et qu'elle devienne de plus en plus répandue, son acceptation reste incomplète dans certaines spécialités et contextes, pour les raisons suivantes :

**Limites technologiques** : Certains scénarii peuvent être trop complexes pour être reproduits efficacement. Les limitations techniques peuvent également restreindre la fidélité de certaines caractéristiques physiques ou signes cliniques, tels que les changements de couleur de la peau ou les expressions faciales du mannequin. Par conséquent, les attentes des apprenants peuvent ne pas être pleinement satisfaites en comparaison à des situations réelles, rendant la simulation moins efficace en tant qu'outil pédagogique<sup>84</sup>.

**Appui de la littérature** : L'absence de résultats sur l'impact direct de certains simulateurs sur les résultats cliniques suscite des préoccupations. Bien que la formation par la simulation améliore les connaissances, les compétences techniques, l'attitude et la communication en équipe des professionnels de santé, il manque des études qui démontrent l'impact direct de l'utilisation de ces outils sur la pratique clinique<sup>85,86</sup>. Cette incertitude freine parfois l'adhésion et le soutien financier pour cette méthode de formation.

**Coût élevé** : La simulation est souvent perçue comme une technologie coûteuse. Bien que les simulateurs de haute-fidélité soient onéreux, certaines formations peuvent s'effectuer avec des mannequins de moindre sophistication pour réduire les dépenses<sup>87</sup>. La simulation in situ permet aussi

de former le personnel dans leur environnement de travail habituel, réduisant les coûts d'infrastructure. Cependant, le manque de disponibilité dans des services hospitaliers très sollicités peut limiter les opportunités de formation à l'hôpital. La formation par simulation nécessite en outre des sessions en petits groupes, ce qui peut entraîner des coûts de formation plus élevés.

**Formation des instructeurs :** Il est essentiel de disposer de formateurs qualifiés et de mettre en place un système d'accréditation pour garantir le respect des normes. De nombreux enseignants en simulation sont des professionnels de santé exerçant à temps plein, ce qui limite leur disponibilité pour dispenser des sessions régulières. Par conséquent, il est crucial d'investir dans des infrastructures et des organisations permettant d'assurer une continuité pédagogique et d'atteindre les objectifs de la formation par simulation.

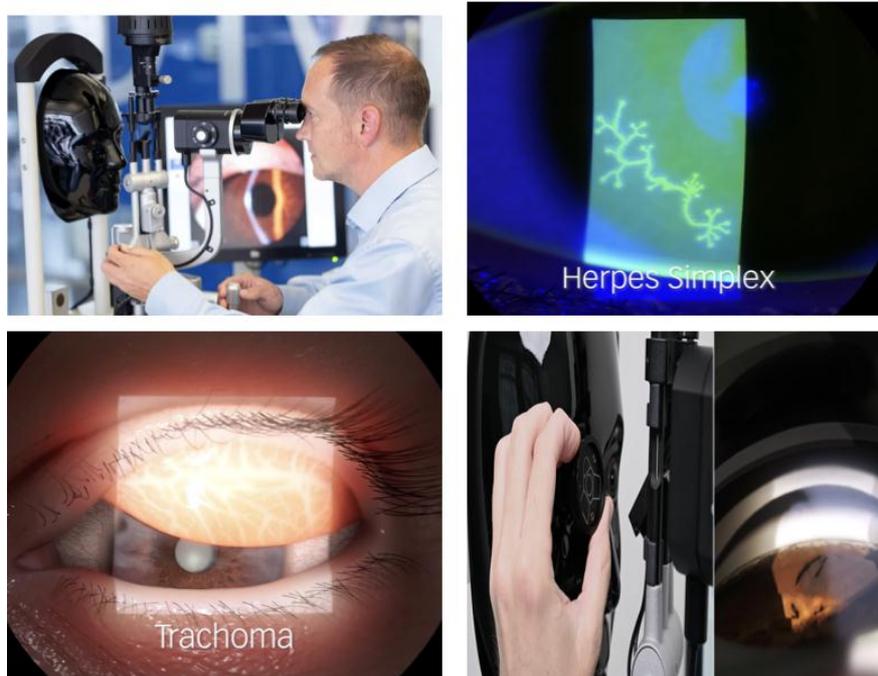
## VII. Simulation en ophtalmologie

La simulation est apparue tardivement en ophtalmologie par rapport à d'autres spécialités<sup>88</sup>. Elle représente un outil moderne, efficace et diversifié pour la formation des futurs ophtalmologistes. Avec l'évolution des technologies, plusieurs types de simulateurs ont été développés. Ces simulateurs permettent d'acquérir et de perfectionner des compétences diagnostiques et chirurgicales, tout en offrant un environnement sécurisé et moins stressant pour les apprenants. Ils se répartissent en wet labs (tissus animaux ou cadavériques), dry labs (tissus synthétiques) et des dispositifs en réalité virtuelle (RV). Il est donc important d'utiliser chacun de ces outils de manière pertinente selon ses points forts et limitations et de penser à une utilisation complémentaire et synergique des différentes modalités.

### A. Type de simulation en ophtalmologie médicale

#### 1. Eyesi Slit Lamp

Le simulateur Eyesi Slit Lamp est un dispositif de réalité virtuelle conçu pour l'examen à la lampe à fente. Intégré dans le modèle original de lampe à fente BQ 900 de "Haag-Streit", il recrée toutes les fonctionnalités d'une véritable lampe à fente. Les apprenants peuvent examiner des patients virtuels en utilisant le biomicroscope, les lentilles de fond d'œil, et la gonioscopie. Les scénarii de difficulté croissante permettent aux débutants d'apprendre de manière autonome les techniques de manipulation et d'illumination, tandis que les utilisateurs plus avancés peuvent s'entraîner avec un large éventail de cas cliniques (Figure 37). Des systèmes de notation standardisés sont inclus, facilitant le développement de compétences diagnostiques, qui pourraient autrement être limitées par la disponibilité des superviseurs ou des patients<sup>89</sup>.



**Figure 37: EyeSi Slit Lamp<sup>89</sup>(en haut à gauche). : Kératite herpétique sur EyeSi Slit Lamp (en haut à droite). Fibrose conjonctivale (trachome) (en bas à gauche). Mélanome irien visible à la gonioscopie (en bas à droite)<sup>89</sup>.**

## 2. Simulateurs d'ophtalmoscopie directe

L'ophtalmoscopie directe est une technique d'examen du fond d'œil offrant une vision restreinte et peu de relief. Bien qu'elle soit relativement simple, son utilisation par d'autres spécialités médicales peut être restreinte par un manque de pratique. Plusieurs simulateurs ont été développés pour pallier ces lacunes. Voici trois des plus populaires :

- Eye Exam Simulator (EYE)

Conçu par Koyoto Kagaku, ce simulateur permet aux apprenants d'effectuer un examen du fond d'œil en utilisant leur propre ophtalmoscope direct (Figure 38). Il propose différents cas grâce à des combinaisons de diapositives et à des options de réglage du diamètre pupillaire. La texture douce du mannequin rend l'expérience plus réaliste, permettant des gestes

comme le relèvement de la paupière<sup>90</sup>. Ce simulateur est disponible à l'Hôpital Universitaire de Simulation (HUS) de Fès (Figure 32).



**Figure 38: Eye Exam Simulator<sup>90</sup>.**

- **Eyesi Direct**

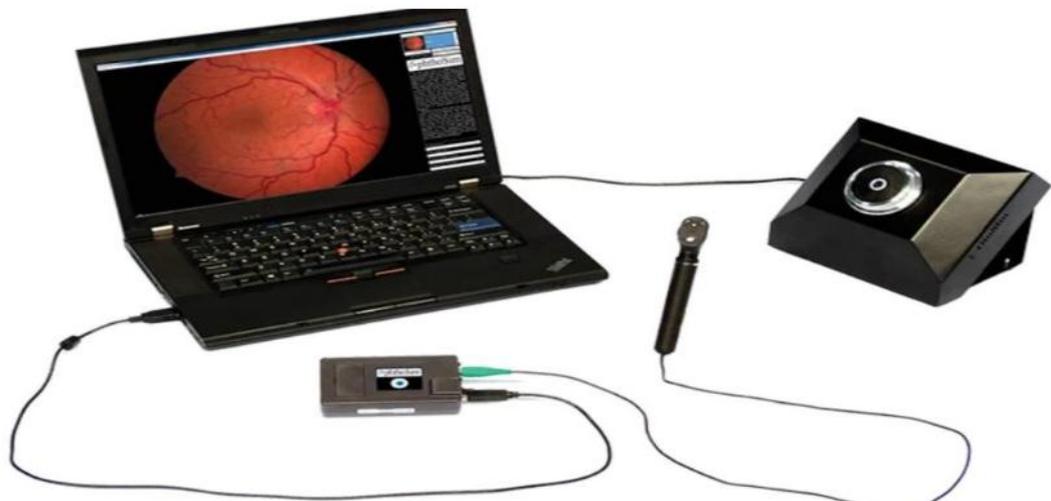
Développé par VRmagic, ce simulateur associe un écran tactile et un modèle de visage humain grandeur nature, permettant une exploration réaliste du fond d'œil normal et pathologique avec l'ophtalmoscope direct (Figure 39). Ce dispositif se distingue par la possibilité de débriefing, offrant un retour détaillé sur les performances de l'apprenant, avec des commentaires sur les images pathologiques<sup>91</sup>.



**Figure 39: Eyesi Direct<sup>91</sup>.**

- **OPHTOSIM**

OPHTOSIM est un simulateur combinant un modèle d'œil et un ophtalmoscope adapté à la simulation, accompagné d'un logiciel de gestion des données (Figure 40)<sup>92</sup>.



**Figure 40: OPHTOSIM<sup>92</sup>.**

### **3. Simulateurs d'ophtalmoscopie indirecte**

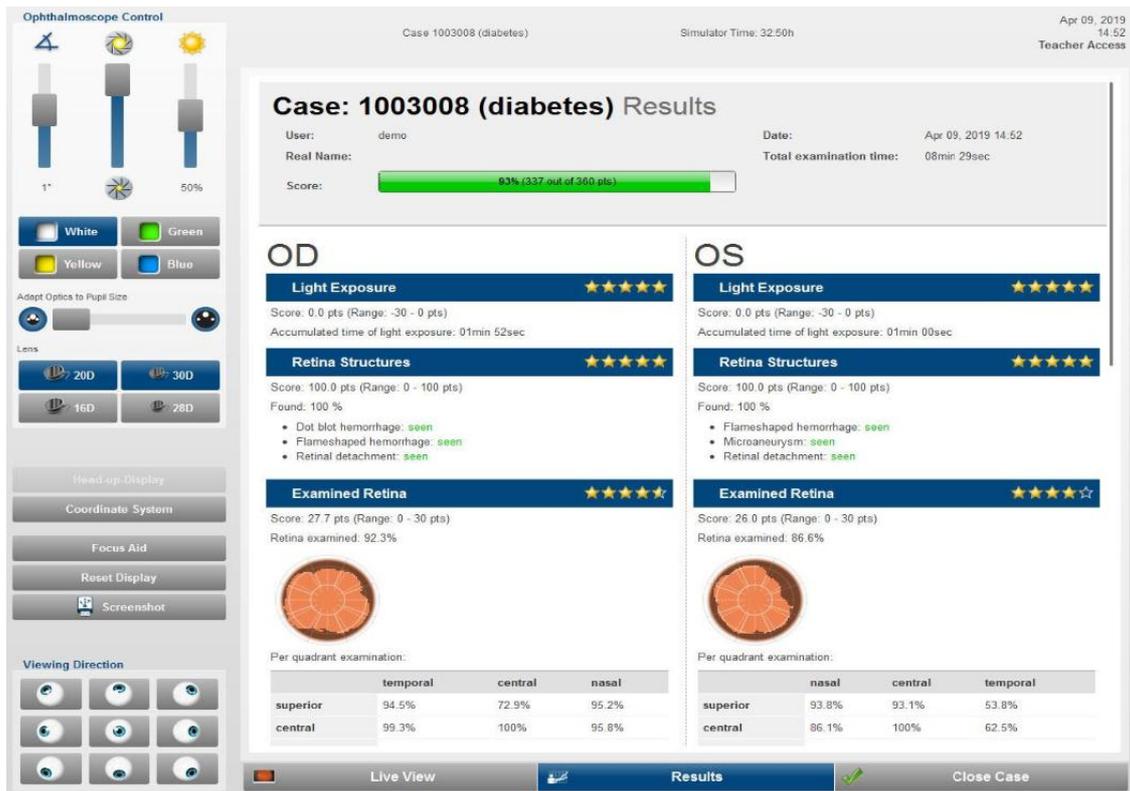
Nous distinguons trois modèles principaux pour l'ophtalmoscopie indirecte : le simulateur VRmagic, le modèle de globe oculaire, et le modèle de canister en plastique.

- **Eyesi indirect ophtalмосcope**

Ce modèle comporte un ordinateur de contrôle et un visage humain simulé. L'examen se fait avec un casque émettant un faisceau lumineux dirigé sur une lentille mobile, qu'il faut positionner correctement devant l'œil simulé. Ce simulateur inclut des paramètres réglables (filtres, intensité lumineuse, etc.) et permet d'analyser les mouvements de l'apprenant. Il intègre aussi un logiciel pédagogique avec des modules de formation, des annotations de l'instructeur, et une base de données d'images pathologiques (Figure 41)<sup>93</sup>.



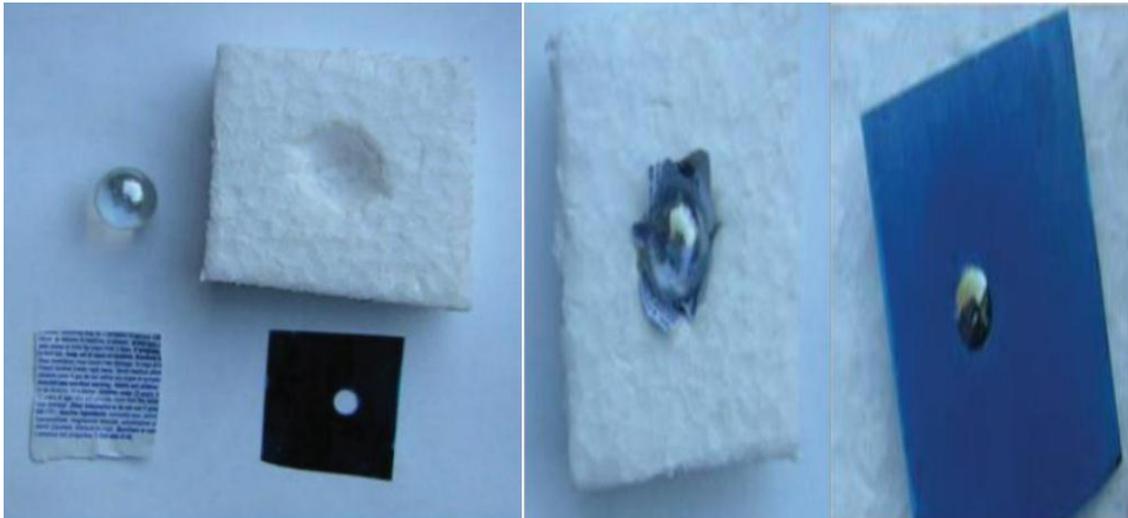
**Figure 41: Eyesi indirect ophtalмосcope<sup>93</sup>.**



**Figure 42: Débriefing élaboré par le logiciel après la procédure d'ophtalmoscopie indirecte. Après l'examen, différents aspects sont évalués et présentés à l'examineur<sup>93</sup>.**

- **Modèle de globe oculaire**

Créé en 2006 par Lewallen, ce modèle simple et économique consiste en une sphère de verre immobile avec des lettres placées sous sa surface, simulant ainsi la pupille (Figure 43). Il aide à enseigner le positionnement correct de la lentille convergente et de la lumière, permettant une première introduction aux principes de l'ophtalmoscopie indirecte<sup>94</sup>.



**Figure 43: Modèle du Globe oculaire présenté par Lewallen pour pratiquer l’ophtalmoscopie indirecte<sup>94</sup>.**

- **Plastic Canister Model**

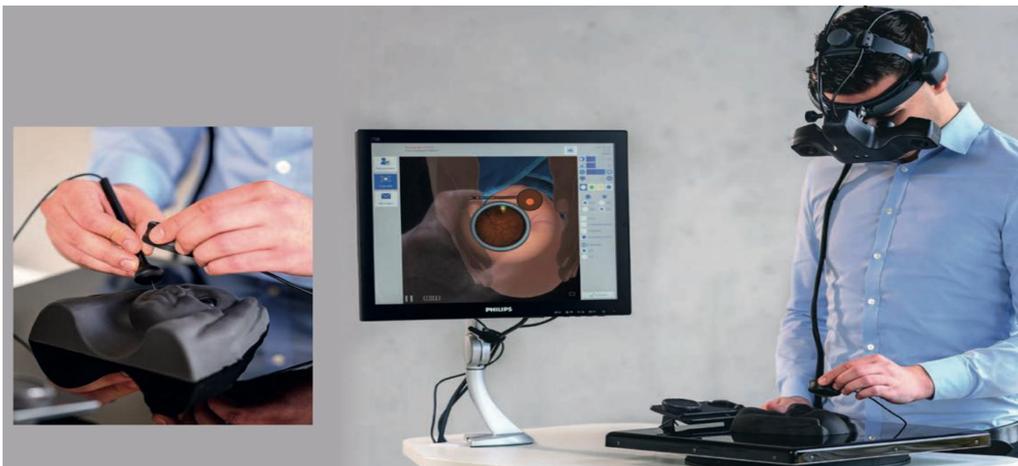
Basé sur une conception similaire, ce modèle de 2009 de Chung et Watzke, Lantz a été conçu pour initier les résidents en médecine légale à l’ophtalmoscopie indirecte dans le cadre des autopsies. Il comporte une pupille artificielle et une image du fond d’œil en couleur amovible (Figure 44), permettant aux étudiants de s’exercer à l’identification et à la description des anomalies rétiniennes<sup>95</sup>.



**Figure 44: Avec une lampe frontale et une lentille convergente asphérique, le résident examine le modèle d’œil en boîte de plastique<sup>95</sup>.**

- **Eyesi Indirect ROP**

Eyesi Indirect ROP est un simulateur en réalité augmentée (RA) conçu pour la formation à l'examen rétinien chez les prématurés et à la classification de la rétinopathie du prématuré (ROP). Ce simulateur permet aux apprenants d'acquérir des compétences essentielles en ophtalmoscopie indirecte en offrant une interface immersive et des scénarios réalistes. Les utilisateurs peuvent s'exercer à identifier différents stades de la ROP et à réaliser des manœuvres tel que l'indentation sclérale, ainsi que de prendre des décisions pour le suivi et le traitement de la ROP selon les différentes guidelines (Figure 45)<sup>96</sup>.



**Figure 45: Eyesi Indirect ROP<sup>96</sup>.**

- **Simulateur AAO/FundamentalVR pour la ROP**

Le simulateur développé en collaboration par l'American Academy of Ophthalmology et FundamentalVR (Figure 46), propose un programme de formation en réalité virtuelle axé sur la rétinopathie du prématuré. Ce simulateur VR permet aux résidents et aux ophtalmologistes en formation de maîtriser l'examen de la rétine chez le nouveau-né, ainsi que la réalisation de gestes tel que les injections intravitréennes et le traitement au laser, dans un

environnement contrôlé et sûr. En offrant un retour en temps réel et des conseils personnalisés<sup>97</sup>.



**Figure 46: Lancement du programme de simulation de la ROP par l'AAO et FundamentVR le 17 octobre 2024<sup>97</sup>.**

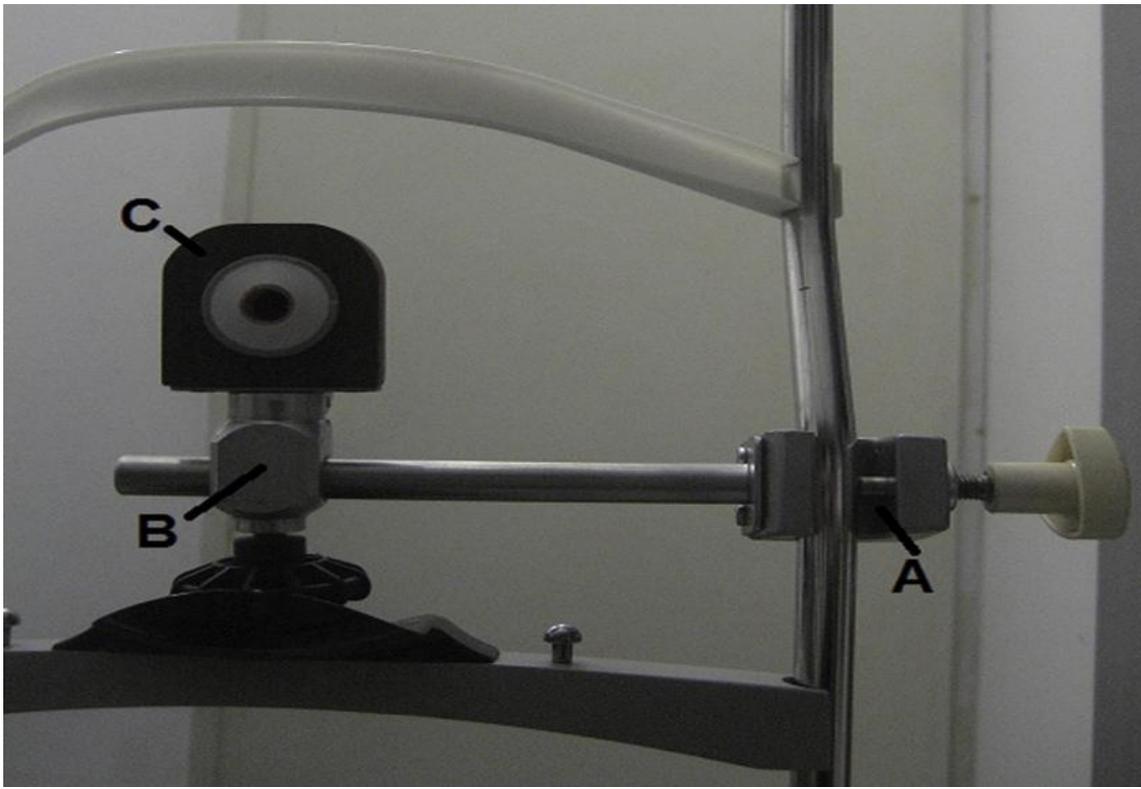
#### **4. Autres simulateurs spécifiques en ophtlamologie médicale**

- **Simulation de la capsulotomie postérieure au laser YAG**

Ce simulateur permet aux ophtalmologistes en formation de s'entraîner à la capsulotomie postérieure au laser YAG sur un modèle recréant une opacification capsulaire postérieure (OCP). Le dispositif comprend plusieurs éléments : un implant intraoculaire (IOL) avec une OCP simulée, une chambre antérieure contenant cet implant, et un bras mécanique réglable permettant de monter la chambre artificielle sur une lampe à fente laser (Figure 47).

Le modèle de simulation offre une vue réaliste de l'IOL avec une OCP adhérente, permettant aux utilisateurs de s'exercer à positionner et utiliser correctement le laser. Grâce à un bras ajustable, le dispositif peut être précisément orienté pour faciliter l'intervention. Cette configuration permet aux résidents de développer leurs compétences en manipulation et en

précision, sans avoir besoin de pratiquer sur des patients, tout en renforçant leur compréhension des paramètres d'ajustement de la lampe à fente<sup>98</sup>.



**Figure 47: Un bras mécanique est ajusté pour placer le modèle à l'endroit approprié pour effectuer la capsulotomie. A : Connecteur réglable qui se fixe à l'appui-tête de la lampe à fente et contrôle l'emplacement vertical du modèle. B : Connecteur ajustable qui contrôle la position horizontale du modèle. C : Plaque en bois qui maintient l'œil du modèle<sup>98</sup>.**

## **B. La Simulation en chirurgie ophtalmologique**

La chirurgie de la cataracte est l'une des techniques chirurgicales les plus importantes à enseigner lors du parcours d'apprentissage d'un résident en ophtalmologie. La formation chirurgicale est basée classiquement sur le modèle traditionnel Halstedien<sup>100</sup> où le novice acquiert des connaissances chirurgicales en étudiant, en observant et en opérant un patient en étant supervisé par un chirurgien senior<sup>101</sup> selon l'adage anglo-saxon « see one, do one, teach one ». Cet apprentissage est long, difficile, stressant et non dénué

de risques pour le patient. Une étude rétrospective réalisée aux États-Unis sur des résidents n'ayant pas reçu de formation par simulation ni en réalité virtuelle ni sur Wet lab a montré que la courbe d'apprentissage de la phacoémulsification nécessitait plus de 80 cas de cataracte pour atteindre un plateau<sup>4</sup>. Jusqu'à 25 % des résidents effectuent moins de 80 phacoémulsification pendant leur résidanat, et la plupart des résidents font entre 80 et 140<sup>102</sup>.

Quant à la chirurgie vitréorétinienne, c'est une chirurgie méticuleuse qui nécessite une longue courbe d'apprentissage. La réalisation d'au moins dix interventions chirurgicales vitréorétiniennes est obligatoire dans la formation des résidents aux États-Unis. Dans une étude américaine menée de 2006 à 2008, la majorité (80 %) des résidents ont déclaré être satisfaits (assez ou très satisfait) de leur expérience chirurgicale vitréorétinienne, mais la même enquête a révélé que 51 % ne se sentaient pas à l'aise pour la réalisation de procédures chirurgicales vitréorétiniennes<sup>103</sup>.

### **1. Wet labs et dry labs**

Pour accélérer la courbe d'apprentissage de la phacoémulsification et d'autres interventions en ophtalmologie, réduire les complications chirurgicales et minimiser les risques pour les malades, les méthodes de formation "En dehors du bloc opératoire" ; basées sur la simulation dans des « laboratoires d'entraînement » puis plus tard, en réalité virtuelle ; ont acquis un grand intérêt dans la formation des résidents à la phacoémulsification, la chirurgie vitréorétinienne, et d'autre procédures telles que la MSICS (manual small incision cararact surgery).

Les « laboratoires d'entraînement » sont subdivisés en deux types. Les « wet labs » ou laboratoires humides utilisent du matériel d'origine animale, que ce soit in vivo (animal vivant anesthésié) ou ex vivo (tissus isolés d'origine animale). Les « dry lab » ou laboratoires secs utilisent quant à eux du matériel de synthèse pour reproduire différents tissus du corps humain. Il est cependant utile de préciser que certains constructeurs utilisent le terme de wet-labs vu sa popularité au sein de la communauté ophtalmologique pour désigner des yeux synthétiques qui sont par définition des dry-labs.

#### a) WETS-LABS en ophtalmologie.

Les wet labs constituent un outil incontournable dans la formation pratique à la chirurgie ophtalmologique, en permettant l'acquisition et le perfectionnement des compétences techniques dans un environnement sécurisé. Ces laboratoires utilisent des yeux de donneurs non adaptés à la greffe de cornée ou des yeux d'animaux, tels que les yeux de chèvre ou de porc, pour simuler diverses procédures chirurgicales ophtalmologiques. Ils offrent ainsi une plateforme de transition entre la théorie et la pratique sur des patients réels.

Les yeux de chèvre sont souvent utilisés pour s'exercer aux techniques de base en chirurgie de la cataracte. Cependant, en raison de la particularité anatomique de l'œil de chèvre (noyau mou et reflexe de rétro illumination bleuâtre), ces yeux sont principalement adaptés à la pratique de l'étape de sculpture en phacoémulsification<sup>104</sup>. Concernant les yeux de porc, ils présentent une capsule antérieure plus épaisse et élastique, reproduisant ainsi la capsule d'un cristallin pédiatrique humain (Figure 48). Pour accroître leur rigidité et faciliter la réalisation du capsulorhexis, des solutions de fixations

utilisant le formol mélangé à un produit viscoélastique peuvent être appliquées avant ou après le remplissage de la chambre antérieure.

**Pour la chirurgie de cataracte**, les wet labs permettent aux résidents de s'exercer aux étapes essentielles de la phacoémulsification, comme le capsulorhexis, le traitement du noyau, et l'implantation. Cette approche est particulièrement utile pour maîtriser la manipulation des instruments et gérer les complications potentielles avant l'intervention sur des patients réels.

**Dans le glaucome**, les yeux de chèvre peuvent également être utilisés pour la pratique des techniques comme la tonométrie par applanation de Goldmann et la gonioscopie, grâce à des dispositifs permettant de les fixer sur lampe à fente (Figure). Par ailleurs, Poretous et al.<sup>105</sup> ont développé une nouvelle technique pour l'apprentissage de la trabeculectomie en utilisant des pommes vertes coupées en deux. Ils jugent que la peau et cortex de ces derniers ont une consistance proche de la sclère humaine et pourraient être utilisés pour s'entraîner aux volets scléraux et aux points de suture.

**Pour la chirurgie vitréorétinienne**, la vitrectomie peut être réalisée dans sur les yeux de chèvre, mais des modèles alternatifs comme les œufs de caille ou de poulet offrent des possibilités de simulation pour des techniques comme le pelage des membranes<sup>106</sup>.

La chirurgie réfractive et les différentes techniques de kératoplastie lamellaires peuvent également être simulées sur des cornées de donneurs non viable en les montant sur des chambres antérieures artificielles<sup>107</sup>.

Les techniques de **suture sclérale et cornéenne** sont souvent répétées sur des yeux animaux ou cadavériques lors des cursus de formation des résidents.



**Figure 48: exemple de wet-lab avec œil porcin fixé à une perruque par des épingles<sup>108</sup>.**

**b) DRY-LABS en ophtalmologie.**

**Le système d'entraînement KITARO**

Il a été développé pour former les ophtalmologistes aux techniques de phacoémulsification et à d'autres interventions chirurgicales. Il propose trois kits principaux<sup>109</sup> :

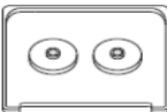
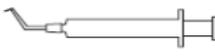
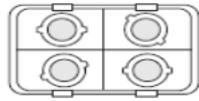
- KITARO DryLab : Ce kit pour débutants permet de s'entraîner aux techniques de base, telles que le capsulorhexis et la segmentation du noyau. Il est pratique pour un usage en cabinet ou à domicile.
- KITARO WetLab : Conçu pour simuler la phacoémulsification sous microscope, ce kit offre une expérience réaliste qui remplace

l'usage d'yeux de porc. Le KITARO WetLab est un kit complet qui intègre un globe oculaire mobile, un masque avec des paupières souples, des instruments de simulation (crochets et pinces), ainsi qu'un système d'irrigation et de drainage pour une expérience de simulation réaliste (Figure 49 et Figure 50).

- KITARO MultiLab : Ce kit avancé permet aux chirurgiens de s'entraîner sur des cas complexes, notamment les petites pupilles, les zonules fragiles, et les ruptures zonulaires. Il inclut également des modules pour des chirurgies de glaucome (trabéculotomie, trabéculéctomie) et de kératoplastie, ainsi que pour l'extraction extracapsulaire et l'implantation de lentilles intraoculaires.



**Figure 49: Kitaro Wet Lab 109**

<b>Partie globe oculaire</b>	① Partie cornée-Iris pour le WetLab (Fixée à la partie sclère dans le kit) 	② Partie sclère 
<b>Plaque de base et masque</b>	③ Plaque de base (avec billes en fer et éponges) 	④ Masque 
<b>Instruments de simulation</b>	⑤ Cystotome avec seringue  ⑥ Crochets pour manipulation du noyau (2 types) Crochet spatulé  Phaco-chopper 	⑦ Canule  ⑧ Pince de Bonn  ⑨ Pince à capsulorhexis 
<b>Poche d'irrigation</b>	⑩ Poche d'irrigation (avec eau du robinet) 	
<b>Consommables</b>	⑪ étui de 4 parties cornée-iris 	⑫ vaseline 

**Figure 50: Composants du kit de simulation du KITARO WetLab<sup>109</sup>**

### Les modèles Philips de chirurgie oculaire :

Développés par Craig Phillips (Phillips Studios Eye), ils sont fabriqués à partir de matériaux qui imitent l'apparence et la sensation des tissus oculaires réels<sup>110</sup>. Ils comprennent des structures telles que la conjonctive, la capsule de Tenon, les muscles oculomoteurs (y compris les obliques supérieur et inférieur), et une sclère manipulable, offrant ainsi une expérience de simulation réaliste. Les têtes porteuses des modèles sont dotées de nez et de sourcils qui reproduisent les contraintes de manœuvres chirurgicales réelles (Figure 51).



Figure 51: Tête porteuse des yeux synthétiques Phillips<sup>110</sup>.

## Les modèles de chirurgie de la cataracte

Les modèles de chirurgie de la cataracte sont disponibles en deux versions :

- **Modèle basique** : Ce modèle hémisphérique avec une cornée réaliste permet aux résidents de s'exercer aux incisions et aux sutures cornéennes. La capsule antérieure du cristallin imite les propriétés humaines, facilitant l'entraînement au capsulorhexis. Le cristallin, fabriqué en gel de différentes consistances, permet de s'exercer aux techniques de sculpture et de phacoémulsification (Figure 52). Cependant, ce modèle ne permet pas l'aspiration du cortex car il ne contient pas de cortex cristallin.



**Figure 52: Réalisation du capsulorhexis sur un œil simulé pour chirurgie de cataracte<sup>110</sup>**

- **Modèle avancé** : De forme sphérique, il intègre un segment antérieur et postérieur, avec un cristallin enfermé dans une capsule, simulant différentes densités de cataractes. La segment postérieure peut être remplie de substitut vitreux pour les

simulations avancées, comme la rupture capsulaire postérieure, la désinsertion du sac, et même les hémorragies expulsives. Les modèles de rétine sont aussi disponibles pour les vitrectomies et le traitement de décollements de rétine, ainsi que pour la chirurgie de strabisme et de glaucome. Ces modèles peuvent être utilisés au bloc opératoire, permettant aux résidents de s'exercer avec le microscope et les instruments chirurgicaux utilisés en pratique réelle.

#### **Les modèles SimulEYE :**

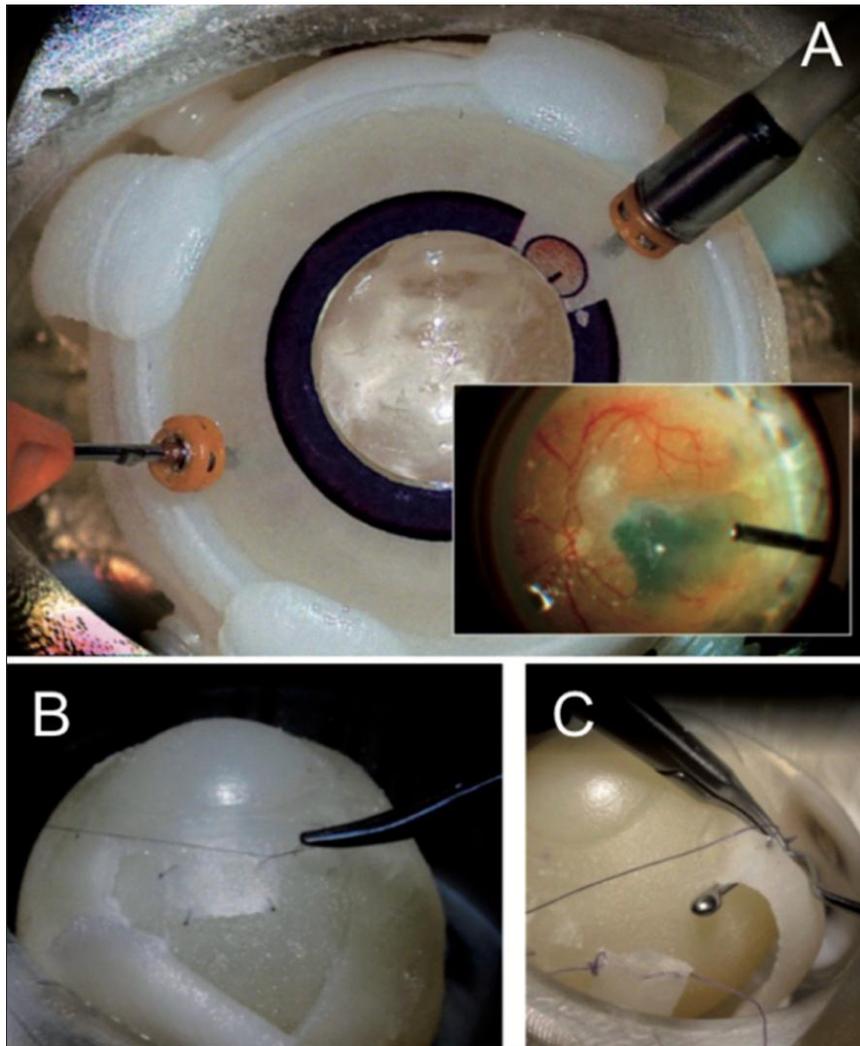
SimulEYE est une entreprise spécialisée dans les modèles d'yeux synthétiques qui propose plusieurs modèles pour chirurgie oculaire (chirurgie de cataracte, sutures iriennes, chirurgie de strabisme...) parmi lesquels le SimuloRhexis (Figure 53), conçu spécifiquement pour l'entraînement à la capsulorhexis. Un kit permet de réaliser de 5 à 10 capsulotomies et coûte entre 50 et 85 USD par unité<sup>111</sup>. Ce modèle est une alternative économique pour les formations nécessitant de répéter cette étape clé de la chirurgie de la cataracte.



**Figure 53: Œil synthétique SimuloRhexis<sup>111</sup>.**

**Les modèles Bioniko :**

Bioniko Models propose également des produits spécialisés pour la formation chirurgicale. Leur modèle OKULO BROWN 8 permet de s'exercer à la gestion des complications en chirurgie de la cataracte, tandis que le modèle OKULO BLUE 5 a été développé pour l'entraînement à la suture de l'iris. Chaque modèle est à usage unique et coûte 84 USD<sup>112</sup>. Ces modèles permettent de simuler des situations précises, idéales pour les résidents souhaitant renforcer leurs compétences dans des contextes de complications chirurgicales.



**Figure 54: Exemples de modèles du kit Bioniko. A. Pelage de membrane. B. Suture d'un volet scléral. C. Chirurgie des muscles oculomoteurs<sup>113</sup>.**

L'un des avantages majeurs des modèles synthétiques (dry-labs) par rapport aux yeux d'animaux (wet-labs) réside dans l'absence de risque de contamination biologique, comme celui lié à la maladie de Creutzfeldt-Jakob, qui peut être transmise par des instruments contaminés<sup>114</sup>. Avec les modèles synthétiques, ce risque est écarté, ce qui permet la réutilisation sécurisée des instruments en chirurgie humaine.

Cependant, les dry-labs et wet-labs comportent quatre obstacles majeurs<sup>115,116</sup> : Le temps, le coût, la qualité et l'objectivité. En effet, l'exercice

ne peut être répété qu'un nombre de limité de fois (tissu animal en quantité restreinte et qui s'abîme vite, préparation du matériel de synthèse nécessaire), et il n'existe aucun système d'évaluation objectif de l'opérateur. De plus elle nécessite l'utilisation de microscopes chirurgicaux qui ne sont pas toujours disponibles car leur utilisation est priorisée vers l'activité de soin.

Le résident ne peut donc pas appréhender sa courbe de progression, ni déterminer les points sur lesquels il doit travailler davantage, à moins d'être accompagné par un senior (lui-même à l'agenda chargé) qui pourrait observer ses gestes et le corriger<sup>17</sup>. D'où l'intérêt d'un milieu d'entraînement plus ergonomique nécessitant moins de préparation avec un système « switch ON/switch OFF », permettant des exercices répétables à volonté d'évaluation objective et standardisée. Ce qui nous amène à l'intérêt de la simulation en réalité virtuelle.

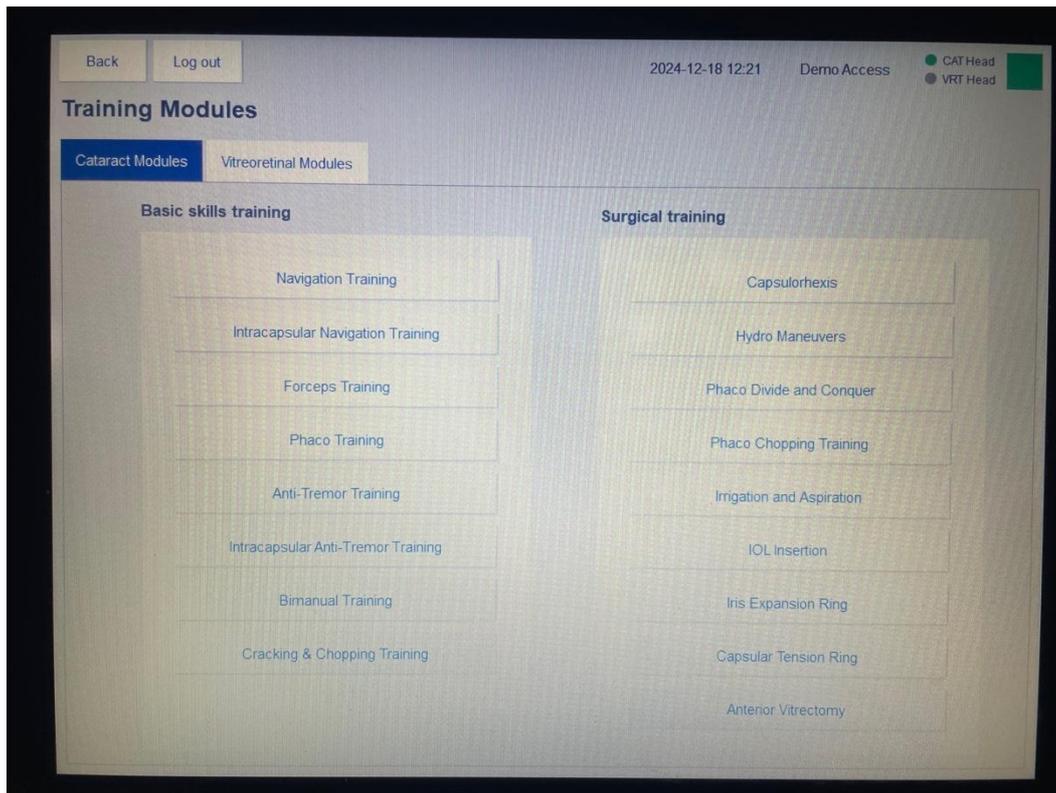
## **2. Simulation en réalité virtuelle**

Plusieurs simulateurs de chirurgie ophtalmologique en réalité virtuelle sont disponibles pour la formation des apprenants. Parmi lesquels nous aborderons six simulateurs pour l'apprentissage de différentes techniques de la chirurgie de cataracte et vitréorétinienne ainsi que deux simulateurs pour l'anesthésie locorégionale en ophtalmologie et la thérapie génique oculaire.

### **a) Eyesi surgical**

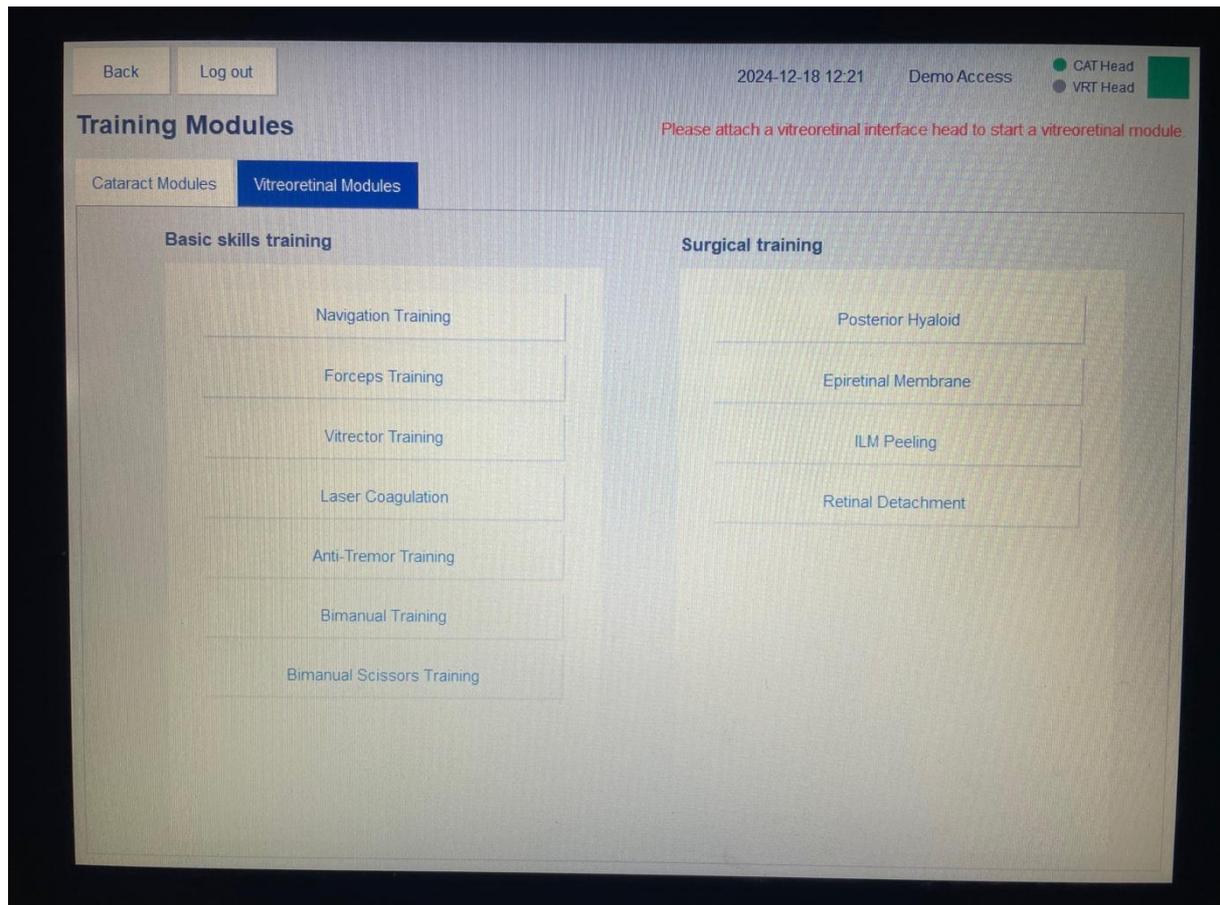
Le simulateur EyeSi® Surgical (VRmagic, Mannheim, Allemagne), constitue une avancée majeure dans la formation en ophtalmologie basée sur la réalité virtuelle. Ce simulateur de haute-fidélité est spécialement conçu pour s'entraîner aux procédures des chirurgies de cataracte et vitréorétinienne. Il est composé d'une tête mannequin intégrant un œil modèle connecté à une

interface informatique avancée et à un microscope opératoire. Grâce à des capteurs internes, le simulateur suit précisément les mouvements et positions des instruments chirurgicaux, projetant une image stéréoscopique virtuelle visible à travers le microscope. Cette configuration recrée fidèlement les conditions d'une salle d'opération, offrant une expérience immersive aux apprenants. Le simulateur Eyesi se distingue par un panel de modules de difficulté croissante subdivisés en tâches basiques et procédurales enrichi par des mises à jours successives depuis la version 1.0 –sortie en avril 2004– qui proposaient uniquement des exercices pour la chirurgie vitréorétinienne et la version 2.0.3 –sortie en novembre 2005– qui a été la première à introduire des exercices de chirurgie de cataracte, jusqu'à la version 3.10 –sortie en avril 2023– qui est disponible sur notre simulateur. Pour les modules de chirurgie de cataracte les tâches basiques comprennent des exercices de navigation dans le sac capsulaire et la chambre antérieure, des exercices d'utilisation du forceps, une introduction à l'utilisation de la pièce à main, des exercices anti-tremblement, des exercices d'entraînement à la chirurgie bimanuelle et des exercices d'entraînement au cracking et au chopping. Les tâches procédurales comprennent des exercices de capsulorhexis, de manœuvres hydriques (hydrodissection et hydrodélinéation), de phacoémulsification du noyau par les techniques de chop et de nucléofracture 'divide and conquer', et des exercices d'aspiration des masses et d'implantation. Il existe également des exercices pour la vitrectomie antérieure et la mise en place d'anneaux de tension pour le sac et d'extension pour l'iris (anneau de Malyugin).



**Figure 55: Tâches basiques et procédurales de chirurgie de cataracte sur Eyesi (version 3.10).**

En ce qui concerne les modules de chirurgie vitréorétinienne, les tâches basiques comprennent des exercices de navigation, d'utilisation des pinces, des ciseaux, du vitréotome et de la sonde de laser, en plus d'exercices anti-tremblement et d'entraînement à la chirurgie bimanuelle. Les tâches procédurales comprennent des exercices d'induction de décollement postérieur du vitré, de pelage des membrane épirétinienne et limitante interne, ainsi qu'un module de décollement de rétine.

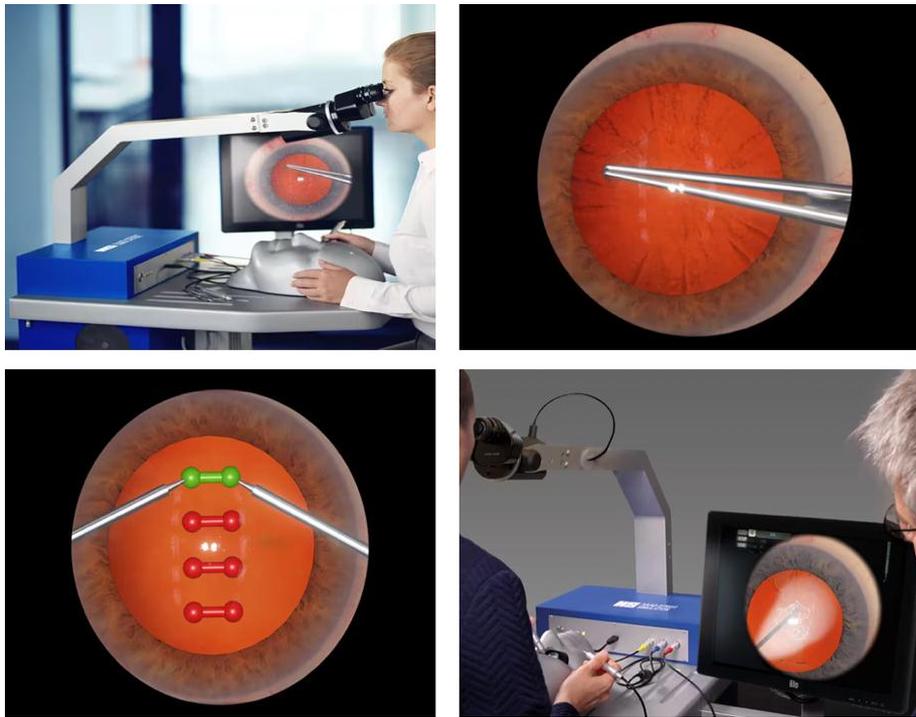


**Figure 56: Tâches basiques et procédurales de chirurgie de vitréorétinienne sur Eyesi (version 3.10).**

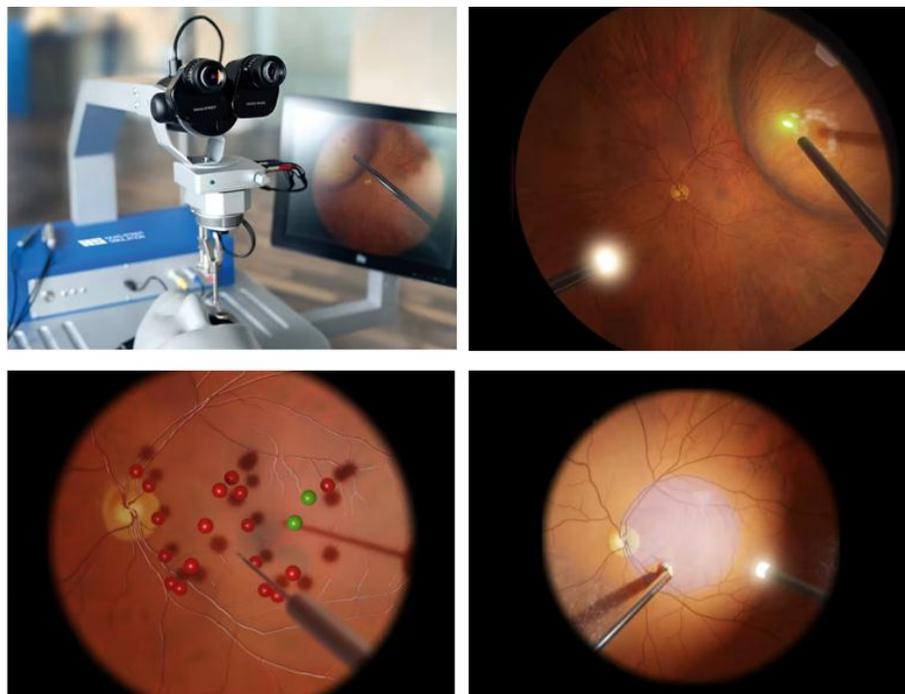
Il s'agit du simulateur qui fait l'objet de notre thèse et dont les niveaux évalués sont énumérés plus bas dans le chapitre 'matériels et méthodes'. C'est le simulateur chirurgical en RV d'ophtalmologie dont les modules ont été les plus évalués et validés<sup>118</sup>. Pour les module de cataracte, les études se sont intéressées à la validité de construction, la validité concurrente et la validité prédictive des modules, ainsi que son rôle dans la diminution de la fréquence des complications<sup>119-121</sup> et d'autres aspects qui seront détaillés dans notre discussion. Les résultats de ces études ont poussé plusieurs centres de formation d'ophtalmologie à acquérir ce simulateur.

Cependant, les exercices de chirurgie vitréorétinienne ont été moins étudiés. Plusieurs travaux ont examiné leurs validité de construction<sup>122 123 124</sup>

<sup>125</sup> <sup>117</sup> <sup>126</sup> mais la validité concurrente et prédictive de ces modules restent à établir<sup>127</sup>.



**Figure 57: Modules de la chirurgie de cataracte sur Eyesi<sup>128</sup>.**



**Figure 58: Modules de la chirurgie du segment postérieur sur Eyesi<sup>128</sup>.**

### b) Phacovision

Phacovision (Melerit Medical, Linköping, Suède) se compose d'un ordinateur, d'une interface visuelle tridimensionnelle en RV, d'une pièce à main de phacoémulsification, un micromanipulateur et des pédales pour le contrôle de la procédure de phacoémulsification et pour le réglage du microscope. Il comporte également un modèle d'œil dont les propriétés peuvent être réglées pour créer des cas virtuels de patients présentant diverses difficultés.

La qualité des performances peut être évaluée à partir des données enregistrées selon un index de performances, ce qui permet d'établir des statistiques sur les progrès des apprenants<sup>129-131</sup>

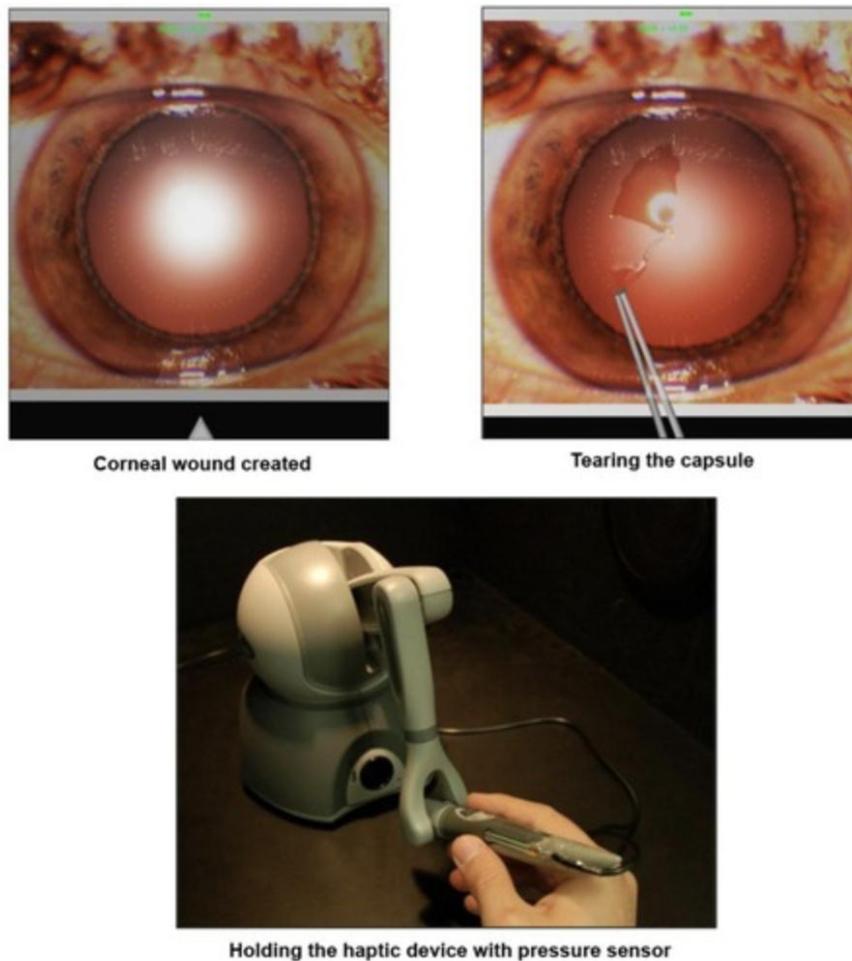


**Figure 59: Le simulateur Phacovision<sup>129</sup>.**

### c) MicroVisTouch

Le MicroVisTouch (Immersive Touch, Inc, Chicago, USA) est équipé d'un système haptique simulant les différentes forces et consistances des tissus qui fait office d'instrument chirurgical pour l'apprenant (Figure 60). La plateforme de réalité virtuelle transforme le stylet haptique en n'importe quel instrument pour la cataracte dont l'apprenant a besoin pour effectuer une étape

chirurgicale donnée au cours d'une procédure simulée<sup>132</sup>. Cependant, les étapes simulées se limitent uniquement à l'incision cornéenne, le capsulorhéxis et la phacoémulsification du noyau<sup>133</sup>



**Figure 60: MicroVisTouch ; simulation d'une incision et d'un capsulorhéxis, système haptique du simulateur<sup>132</sup>.**

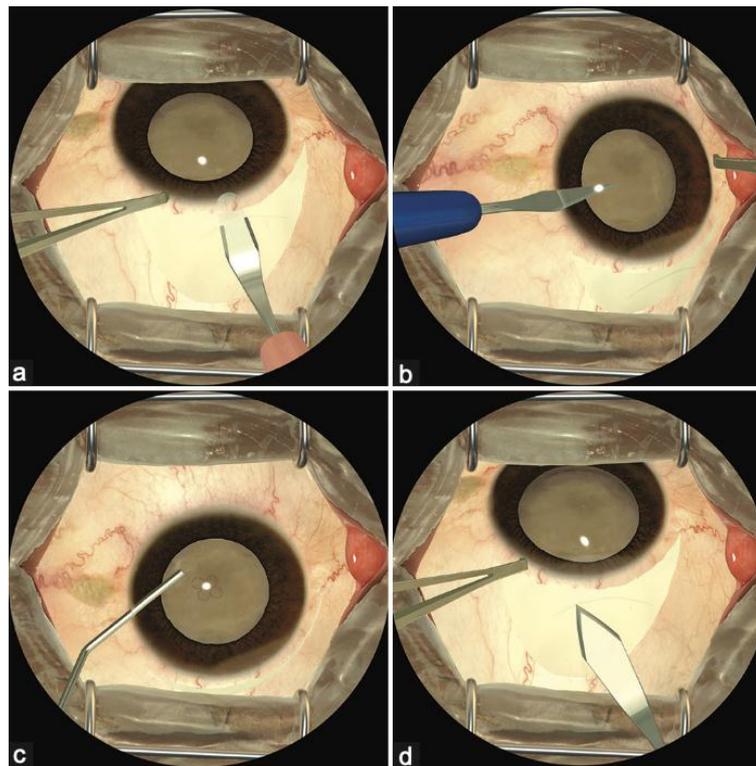
Les simulateurs EyeSi, PhacoVision et MicroVisTouch sont destinés à l'apprentissage de la phacoémulsification. D'autres simulateurs en réalité virtuelle, comme HelpMeSee et Orbis-FundamentalVR visent à rendre l'entraînement sur la MSICS plus accessible aux jeunes résidents et praticiens. La MSICS est couramment pratiquée dans les pays en voie de développement pour son coût estimé à 20 dollars par chirurgie<sup>134</sup>.

#### d) HelpMeSee

Le simulateur Help Me See (HMS) est un dispositif avancé conçu pour offrir un réalisme exceptionnel à la fois haptique, grâce à un système de bras robotisé (retour haptique), et graphique (RV), avec des images stéréoscopiques projetées dans des binoculaires en haute définition. Dédié à l'apprentissage de la Manual Small Incision Cataract Surgery (MSICS), il intègre un modèle de segment antérieur généré par ordinateur et propose un retour haptique bimanuel avec des instruments chirurgicaux, offrant une liberté de mouvement en trois dimensions. Le simulateur recrée une immersion totale en configurant un environnement réaliste de salle d'opération, incluant l'interaction virtuelle avec le patient ainsi que la gestion des complications. Une plateforme pédagogique complète est également intégrée, comprenant un poste de travail pour l'instructeur et un système de gestion des apprentissages, facilitant une progression structurée basée sur les compétences et des niveaux de simulation graduels<sup>135</sup> (Figure 61).



**Figure 61: Le simulateur HelpMeSee (MSICS)<sup>135</sup>.**



**Figure 62 : (a) capture d'écran du simulateur HelpMeSee d'un apprenant disséquant le tunnel scléral. (b) réalisation d'une paracentèse. (c) injection de substance viscoélastique dans la chambre antérieure à travers la paracentèse. (d) accès à la chambre antérieur par l'incision sclérale<sup>135</sup>.**

#### e) Fidelis VR d'Alcon

Le Fidelis VR d'Alcon (2023) est un simulateur de réalité virtuelle conçu spécifiquement pour la chirurgie de la cataracte. Il reproduit un environnement réaliste de bloc opératoire virtuel, où les utilisateurs peuvent s'entraîner aux étapes complexes de la phacoémulsification, comme l'incision de la cornée, la capsulorhexis et le traitement du noyau. Le simulateur est composé de (Figure 63) :

- Un casque de réalité virtuelle
- Deux moteurs haptiques
- Une pédale Centurion®

L'un des principaux avantages du Fidelis VR est l'intégration du système Centurion® d'Alcon, permettant aux chirurgiens de s'entraîner avec des paramètres correspondant aux équipements couramment utilisés dans les chirurgies réelles. Les chirurgiens en formation bénéficient également d'une évaluation en temps réel de leurs performances, leur permettant d'affiner leurs compétences au fil du temps. Le Fidelis crée un environnement de bloc opératoire virtuel réaliste, permettant à des utilisateurs distants et à des instructeurs de se connecter au sein d'un même espace virtuel.

Ses moteurs haptiques imitent les sensations réelles rencontrées lors d'une chirurgie de cataracte, comme la résistance lors de la création d'incisions ou l'application de pression sur la cornée. Alcon prévoit d'étendre les applications du simulateur à la formation en chirurgie vitréorétinienne et au glaucome, tout en rendant la technologie plus accessible aux institutions par un prix fixé à 49 000 dollars par unité<sup>136,137</sup>.



**Figure 63: Système Alcon Fidelis (casque RV, moteurs haptiques, pédale centurion, ordinateur)<sup>138</sup>.**

#### **f) FundamentalVR**

FundamentalVR est une plateforme de simulation chirurgicale immersive qui combine la réalité virtuelle et la technologie haptique pour offrir un environnement de formation réaliste dans plusieurs spécialités chirurgicales, y compris l'ophtalmologie<sup>139</sup> (Figure 64). Contrairement à d'autres simulateurs, FundamentalVR se distingue par sa flexibilité en utilisant des casques de RV et des moteurs haptiques facilement accessibles dans le commerce, ce qui en fait une option plus économique pour les centres de formation.

Les simulations proposées par FundamentalVR permettent de développer les compétences microchirurgicales des apprenants et de renforcer leur confiance dans l'exécution de procédures complexes, telles que la MSICS, l'injection sous rétinienne de thérapie génique ou injections intravitréennes

pour la ROP comme présenté plus haut. Le système offre également des fonctionnalités collaboratives, permettant aux utilisateurs et aux instructeurs d'interagir en temps réel, peu importe leur emplacement géographique (Figure 65).

La plateforme a été adoptée dans de nombreuses institutions notamment dans des pays en voie de développement pour son efficacité dans la réduction des coûts et son accessibilité.



**Figure 64: Fundamental VR bloc opératoire ophtalmologique<sup>140</sup>.**



**Figure 65: Fundamental VR ; deux chirurgiens en discussion dans un bloc opératoire virtuel<sup>140</sup>.**

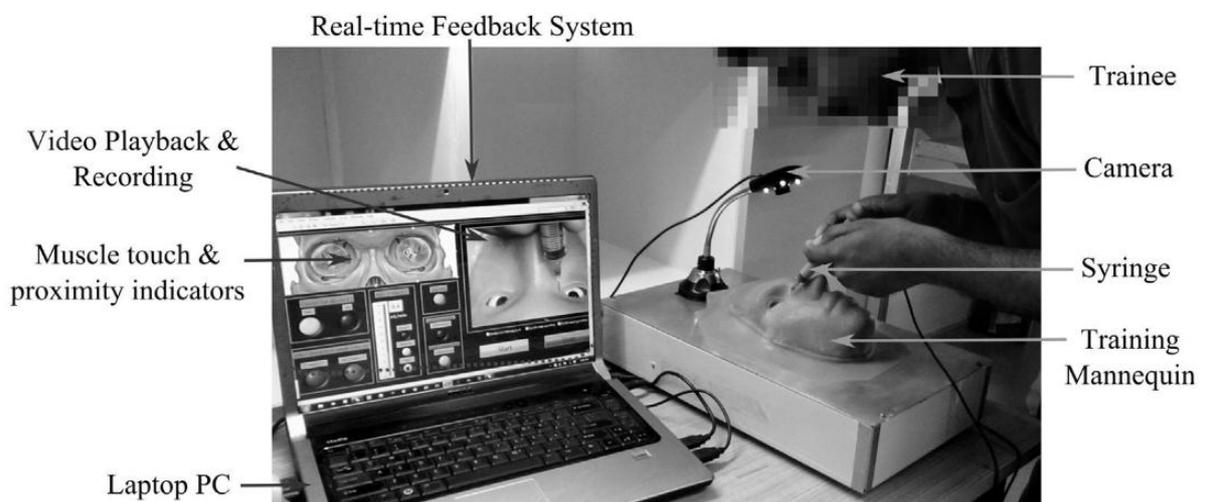
### **3. Autres simulateurs spécifiques en ophtalmologie chirurgicale**

#### **a) Simulateurs d'anesthésie locorégionale en ophtalmologie**

Le Ophthalmic Anesthesia Simulation System (OASiS) est un simulateur conçu pour former les ophtalmologistes à l'anesthésie locorégionale. Développé avec une structure anatomiquement réaliste de la tête et des orbites, ce simulateur intègre un système de détection sophistiqué qui fournit un retour d'information quantitatif et qualitatif sur la position de l'aiguille lors de l'injection. Cela permet aux apprenants de s'entraîner à éviter les structures oculaires et orbitaires critiques.

Ce simulateur couvre les étapes essentielles de l'administration de l'anesthésie régionale, telles que l'identification de l'œil à anesthésier, le choix du point d'entrée de l'aiguille, et le contrôle de son positionnement dans l'espace intraorbitaire. Il inclut également des fonctionnalités pour éviter les

dommages aux muscles extraoculaires et au globe oculaire, pour aspirer la seringue avant injection et pour évaluer le volume d'anesthésique administré. Le dispositif est configurable selon différents objectifs pédagogiques, comme l'ajout d'injections supplémentaires. Grâce à son retour d'information en temps réel et à sa peau en silicone pour un réalisme accru, ce simulateur permet aux résidents de perfectionner leur technique dans un environnement sécurisé, avec un système de débriefing qui enregistre les paramètres pour évaluer la performance<sup>141</sup>.



**Figure 66 : Le dispositif de formation montrant le résident en train d'insérer la seringue dans le mannequin du système de simulation d'anesthésie ophtalmique (OASiS)<sup>141</sup>.**

### **b) Simulateur pour la thérapie génique oculaire**

Ce simulateur en réalité virtuelle (VR) avec intégration haptique a été développé par Novartis en collaboration avec FundamentalVR . Il permet aux chirurgiens de s'entraîner à l'administration sous-rétinienne du voretigène néparvovec (VN), une thérapie génique indiquée dans les dystrophies rétiniennes causées par une mutation du gène RPE65 (certaines formes de

l'amaurose congénitale de Leber et de la rétinopathie pigmentaire)<sup>142</sup>. L'interface utilisateur immersive permet à l'opérateur principal, équipé d'un casque VR, d'exécuter la procédure avec ses deux mains sous microscope, tandis que l'assistant observe et utilise une seringue haptique pour administrer la dose de VN sous la direction du chirurgien principal, offrant un retour précis sur le volume injecté. Le simulateur intègre aussi la possibilité de simuler des complications, comme une canule bloquée, encourageant la communication verbale entre les chirurgiens durant les étapes critiques.

Ce simulateur présente plusieurs avantages notables : il reproduit fidèlement les sensations tactiles liées au passage de la canule à travers les différentes couches tissulaires de l'œil et propose une microscopie binoculaire à deux niveaux de zoom, ainsi qu'une tomographie par cohérence optique (OCT) peropératoire. En offrant une expérience réaliste, il permet une formation approfondie avant l'administration réelle d'un traitement onéreux (850.000 dollars pour les deux yeux)<sup>143</sup>.



**Figure 67: Simulateur de préparation et administration de thérapie génique rétinienne<sup>99</sup>.**

## VIII. Hôpital Universitaire de Simulation de la Faculté de Médecine, de Pharmacie et de Médecine Dentaire de Fès.

L'hôpital universitaire de simulation (HUS) de la FMPDF repose sur la création d'un environnement réaliste qui reproduit fidèlement une structure hospitalière réelle. Cette approche vise à immerger les apprenants dans un cadre proche de leur future pratique professionnelle, facilitant ainsi l'acquisition et le perfectionnement des compétences techniques et non techniques.

L'hôpital universitaire de simulation (HUS) est le nouveau bâtiment du Centre d'E-learning, d'Enseignement par Simulation et de Télémédecine Educative (CELESTE) livré en 2023, c'est une infrastructure moderne de 2027,60 m<sup>2</sup> dédiée à la formation médicale et paramédicale. Cet établissement, organisé sur plusieurs niveaux, offre un environnement pédagogique complet, immersif et multidisciplinaire.

Au sous-sol, des espaces techniques et logistiques, tels que la salle de radiologie, des salles maintenance, des dépôts de matériel et vestiaires, permettent d'assurer un fonctionnement optimal du centre, il existe également un espace dédié à l'arrivée d'une ambulance (Figure 68).



**Figure 68: Sous-sol de l'HUS : Salle polyvalente de simulation (en haut à droite) entrées des salles de radiologie et locaux techniques (en haut à droite) salle de stockage du matériel (en bas).**

Le rez-de-chaussée accueille une salle de simulation dédiée à l'EyeSi qui est connecté à un grand écran mural permettant aux participants un suivi en temps réel du déroulement de la simulation et procurant un support pédagogique supplémentaire pour l'enseignant qui encadre la séance, la salle est équipée de 15 places assises. Le reste de l'étage contient d'autres salles de formation et de simulation polyvalentes, un espace de raisonnement

clinique, une salle de consultation et une salle de déchocage. La régie de contrôle permet une supervision pédagogique efficace des séances, facilitant le débriefing des apprenants (Figure 69).



**Figure 69: Rez-de-chaussée de l’HUS : Salle dédiée au simulateur Eyesi (en haut à gauche) salle de déchocage (en bas à gauche) salles de simulation polyvalentes (à droite).**

Le premier étage accueille des salles dédiées à l’accouchement, à la néonatalogie, à la pharmacie hospitalière et aux consultations. Un laboratoire central et des salles d’hospitalisation offrent aux étudiants et résidents un environnement réaliste pour la prise en charge des patients dans différentes spécialités médicales (Figure 70).



**Figure 70: 1<sup>er</sup> étage de l'HUS: Salle d'accouchement (en haut) Pharmacie et laboratoire (milieu) Salle de néonatalogie (en bas).**

Le deuxième étage est spécialement conçu pour les interventions chirurgicales et les techniques spécialisées. Il comprend un bloc opératoire, une salle de simulation chirurgicale, une salle d'endoscopie, une salle de réveil et des espaces d'hospitalisation chirurgicale. Des salles de jeux sérieux et des

régies de contrôle sont intégrées pour renforcer les compétences techniques et non techniques des apprenants, tout en permettant une évaluation continue.



**Figure 71: 2<sup>ème</sup> étage de l'HUS: Salle d'endoscopie et cœlioscopie (en haut) Bloc opératoire et salle de formation (milieu) Simulateur de cas cliniques et salle de jeux sérieux (en bas).**

Grâce à cette organisation structurée, l'HUS offre un cadre optimal pour l'apprentissage par simulation, favorisant la maîtrise progressive des compétences pratiques et théoriques nécessaires aux professionnels de santé.

## IX. Matériels et méthodes

### A. Conception de l'étude

Il s'agit d'une étude comparative transversale menée au service d'ophtalmologie du CHU Hassan II et à l'Hôpital Universitaire de Simulation de la Faculté de Médecine, de Pharmacie et de Médecine Dentaire de Fès (FMPDF). L'étude s'est déroulée entre le 23 septembre 2024 et le 05 novembre 2024, période durant laquelle les participants ont été recrutés.

L'étude a été conduite conformément aux principes éthiques afin de garantir la sécurité et la confidentialité des participants. Avant de débiter, Chaque participant a signé un formulaire de consentement éclairé détaillant les objectifs de l'étude, les procédures, les risques potentiels ainsi que les bénéfices attendus. La confidentialité des données a été rigoureusement assurée grâce à l'anonymisation des informations des participants.

### B. Matériels

#### Simulateur Eyesi surgical

Cette étude a été réalisée à l'aide du simulateur « EyeSi Ophthalmic Surgical Simulator » (VRMagic, Mannheim, Allemagne, **version 3.10**). Ce simulateur est équipé d'une interface chirurgicale comprenant une tête en plastique avec un modèle d'œil pouvant pivoter et tourner lors de sa manipulation<sup>101</sup>.

Le simulateur dispose d'un microscope et de l'ensemble des instruments nécessaires à la chirurgie de la cataracte notamment : la sonde à phacoémulsification, la sonde d'irrigation-aspiration, le micromanipulateur, le cystitome, la pince à capsulorhexis, la canule d'injection de viscoélastique et l'injecteur d'implant.

Trois instruments physiques, de couleurs et de formes distinctes, peuvent être assignés à des fonctions spécifiques via une console (Figure 74). Le simulateur est également équipé de deux pédales : La première contrôle la pièce à main ainsi que d'autres instruments (injection de viscoélastique, de BSS, ou implant et la machine de phacoémulsification/vitrectomie) et La seconde gère les réglages du microscope.

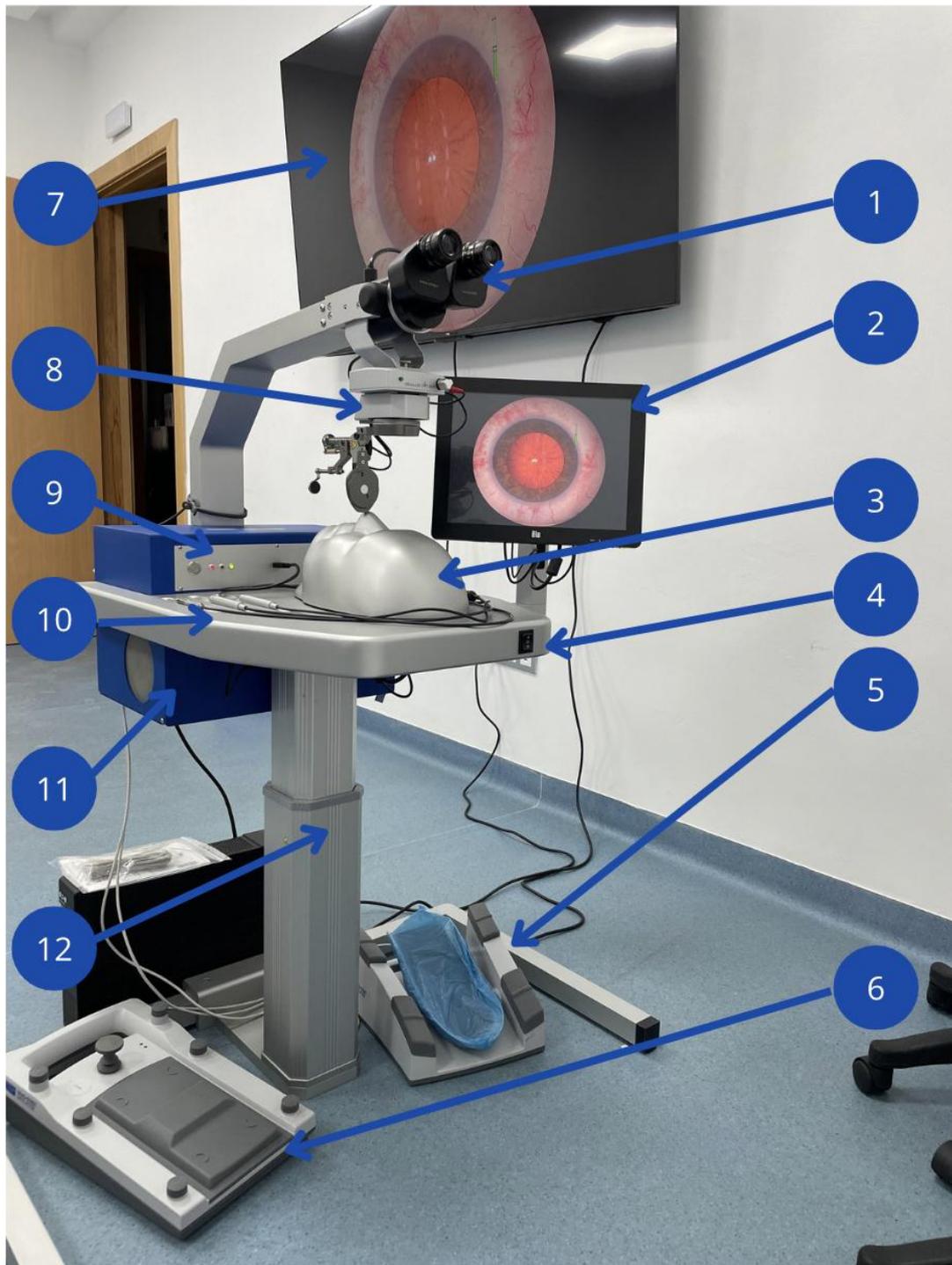
Le logiciel intégré génère une image stéréoscopique du champ opératoire, visible à travers les oculaires du microscope (Figure 72). Un système « eye tracker » enregistre les mouvements des instruments dans l'œil ainsi que les réactions biomécaniques des tissus.

Le simulateur propose différents modules d'entraînement avec des exercices de difficulté croissante. Chaque exercice attribue des points positifs pour les tâches réussies et des pénalités pour les erreurs, permettant d'obtenir un score final allant de 0 à 100.

### 1. Microscope chirurgical

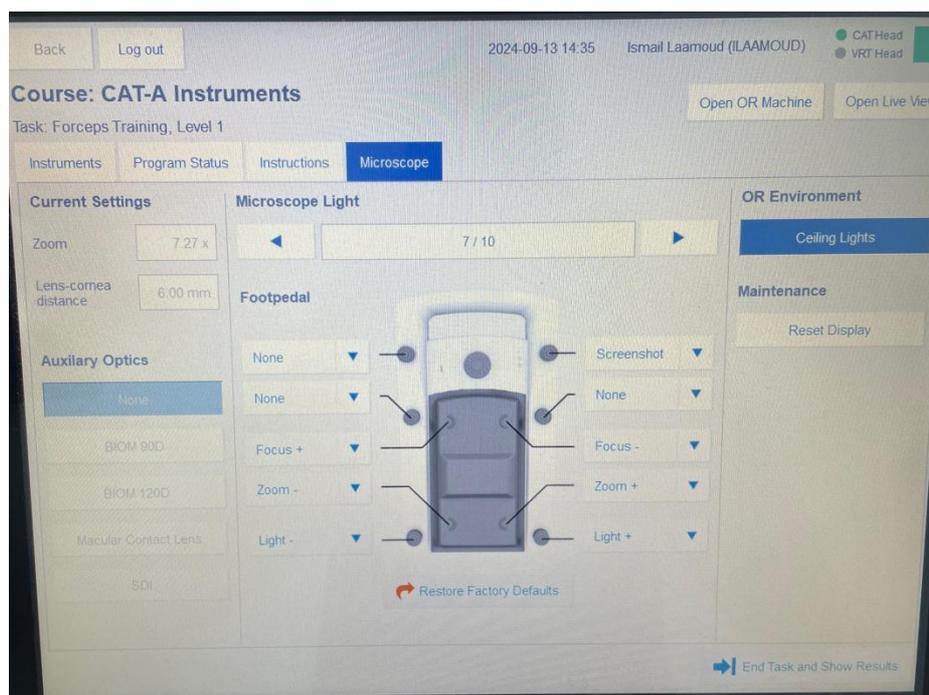
Les utilisateurs d'Eyesi surgical observent le champ opératoire à travers un microscope binoculaire, équipé de systèmes mécaniques et optiques conçus par Haag–Streit. Ce microscope offre une visualisation stéréoscopique précise du champ chirurgical simulé en RV. Le zoom et la mise au point sont contrôlés via une pédale dédiée<sup>128</sup> (Figure 72, Figure 73 ).

Pour les chirurgies du segment postérieur, un système de visualisation peut être intégré, permettant une reproduction fidèle des interactions optiques auxiliaires complexes<sup>128</sup> (Figure 75).



**Figure 72: EyeSi Ophthalmic Surgical Simulator, centre de simulation de la FMPDF.**

**1. Microscope 2. Écran tactile 3. Tête du patient 4. Contrôle de la hauteur de la table 5. Pédale pour contrôle de la machine 6. Pédale pour contrôle du microscope 7. Écran TV connecté 8. Système optique auxiliaire pour modules du segment postérieur 9. Bouton ON/OFF 10. Instruments 11. Ordinateur du simulateur 12. Colonne ajustable.**

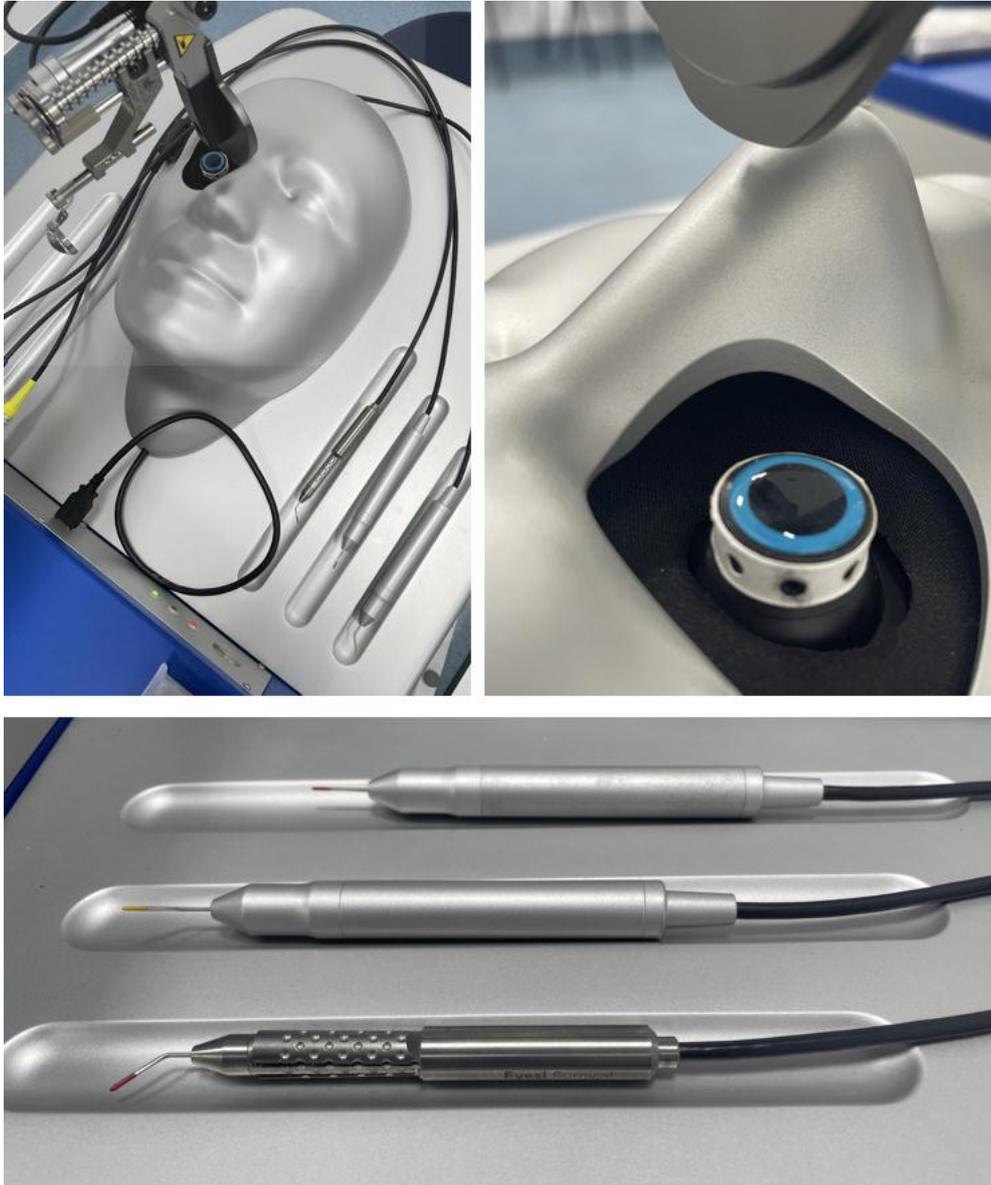


**Figure 73: Configuration par défaut de la pédale du microscope (centre de simulation de la FMPDF).**

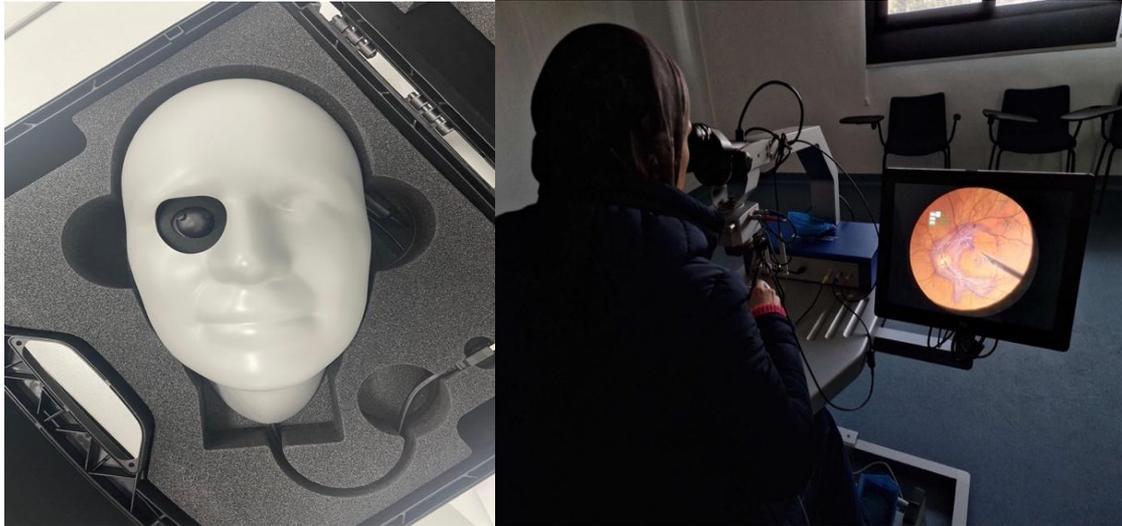
## **2. Instruments chirurgicaux**

Pour les modules de phacoémulsification, Eyesi Surgical propose trois instruments physiques différents : Une pince à embout rouge que l'apprenant peut fermer à volonté qui fait principalement office de pince à rhexis, un deuxième instrument à embout droit et rouge qui fait principalement office de pièce à main mais auquel d'autres instruments virtuels peuvent être assignés à travers la console du simulateur (ex : injecteur d'implant, I/A coaxiale droite, courbe,...), et un troisième instrument à embout courbe et jaune auquel peuvent être assignés virtuellement des seringues remplies d'air, de bleu de trypan, de PVE, de Balanced Salt Solution, ou divers types de micromanipulateurs et de cystitomes. Ces instruments sont insérés à travers des orifices disposés sur différents méridiens du modèle oculaire faisant office d'incisions principale et/ou de service (Figure 74). La tête du modèle peut être pivotée pour des interventions en position temporale. Pour les modules du

segment postérieur, des instruments tels que la sonde lumineuse, les pinces, l'endolaser ou le vitréotome sont disponibles. Dans les modules de décollement rétinien, l'apprenant peut sélectionner une infusion d'air, de gaz ou d'huile de silicone<sup>128</sup>.



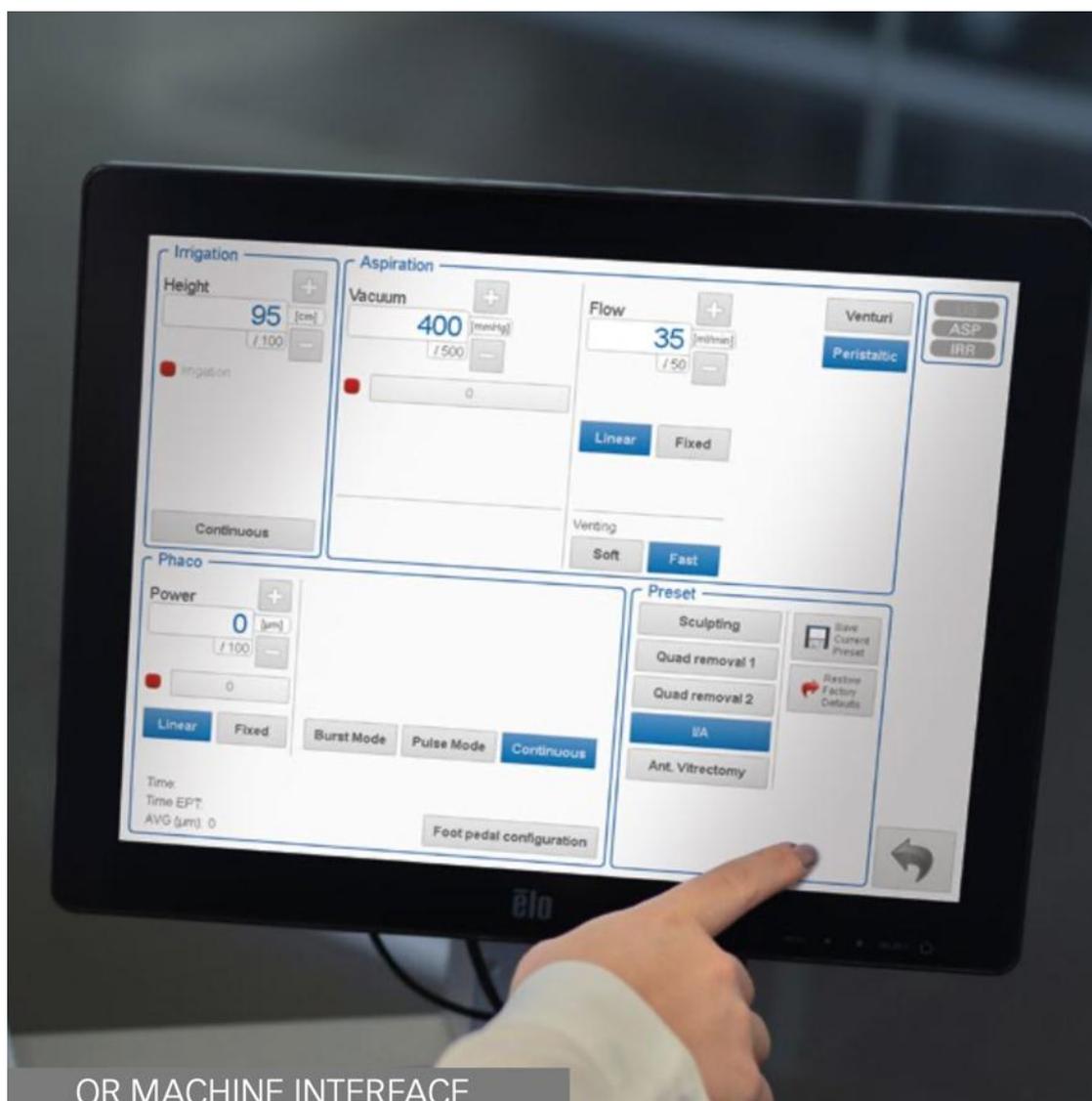
**Figure 74: Instruments physiques et tête dédiée aux modules de la chirurgie de cataracte (Centre de simulation de la FMPDF).**



**Figure 75: Tête dédiée aux modules de chirurgie du segment postérieur  
(Centre de simulation de la FMPDF)**

### **3. Machine de phacoémulsification/vitrectomie**

Le simulateur est doté d'une interface permettant de contrôler les paramètres de la machine de la phacoémulsification (Figure 76). Cette fonctionnalité offre aux utilisateurs la possibilité de modifier ces paramètres afin d'explorer, en temps réel, les effets de leurs changements sur l'interaction entre les instruments et les tissus intraoculaires<sup>128</sup>.



**Figure 76: Contrôle des paramètres de la machine de phacoémulsification**

#### **4. Plateforme VRmNet**

Les utilisateurs du simulateur ont accès à une plateforme en ligne, « VRmNet », via des comptes individuels. Cette plateforme offre diverses fonctionnalités, notamment le suivi de la progression des utilisateurs, l'accès à des cours pédagogiques, et la possibilité de comparer leurs performances à celles d'autres utilisateurs à l'échelle mondiale. De plus, les enseignants peuvent surveiller les courbes d'apprentissage de leurs résidents et évaluer les objectifs atteints<sup>128</sup>.

## C. Méthodes

### 1. Population de l'étude

Les participants ont été recrutés sur la base des critères d'inclusion et d'exclusion suivants :

- Critères d'inclusion :

Pour le groupe 1 :

- Être résident en ophtalmologie en 2<sup>ème</sup>, 3<sup>ème</sup> ou 4<sup>ème</sup> année de formation.
- Ne jamais avoir réalisé de phacoémulsification.
- Avoir signé le consentement éclairé, présentant les bénéfices attendus de l'études et ses éventuels risques.

Pour le groupe 2 :

- Être chirurgien ophtalmologiste ou résident en ophtalmologie en 5<sup>ème</sup> année de formation.
- les participants doivent avoir acquis une expérience en phacoémulsification correspondant à l'un des deux sous-groupes suivants :
  - avoir réalisé au moins 40 phacoémulsifications pour intégrer le **sous-groupe 2A**,
  - avoir effectué un minimum de 500 phacoémulsifications pour appartenir au **sous-groupe 2B**.
- Avoir signé le consentement éclairé, présentant les bénéfices attendus de l'études et ses éventuels risques.

- Critères d'exclusion

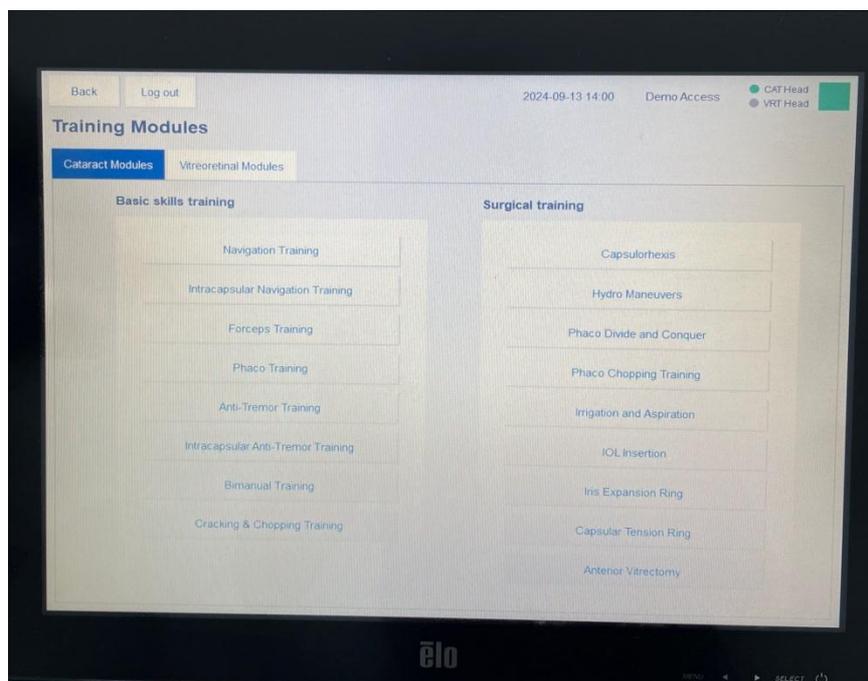
Les critères d'exclusion comprenaient les problèmes de vision non corrigés, les troubles moteurs ou neurologiques affectant les mains, et une

expérience significative sur le simulateur, définie par un antécédent de trois itérations ou plus sur les niveaux sélectionnés pour notre étude en se basant sur l'étude de Selvander et al<sup>144</sup> de la courbe d'apprentissage sur EyeSi.

## 2. Déroulement de l'étude.

### a) Session de formation initiale :

Tous les participants ont bénéficié d'une session de formation initiale d'une heure sur l'utilisation du simulateur EyeSi. Cette session comprenait une introduction aux bases de la manipulation du simulateur ainsi qu'une présentation des modules disponibles pour la pratique des compétences de base (Figure 77). L'objectif était de garantir que tous les participants avaient les compétences nécessaires pour réaliser les tâches exigées dans le cadre de l'étude.



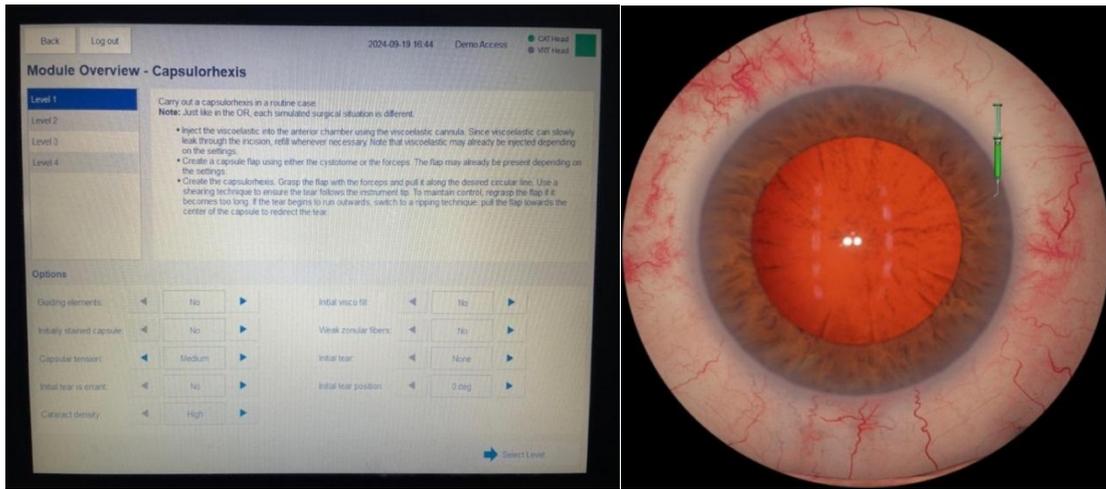
**Figure 77: Vue d'ensemble des modules de chirurgie de cataracte, chaque module comprend plusieurs niveaux (Centre de simulation de la FMPDF).**

### b) Niveaux étudié

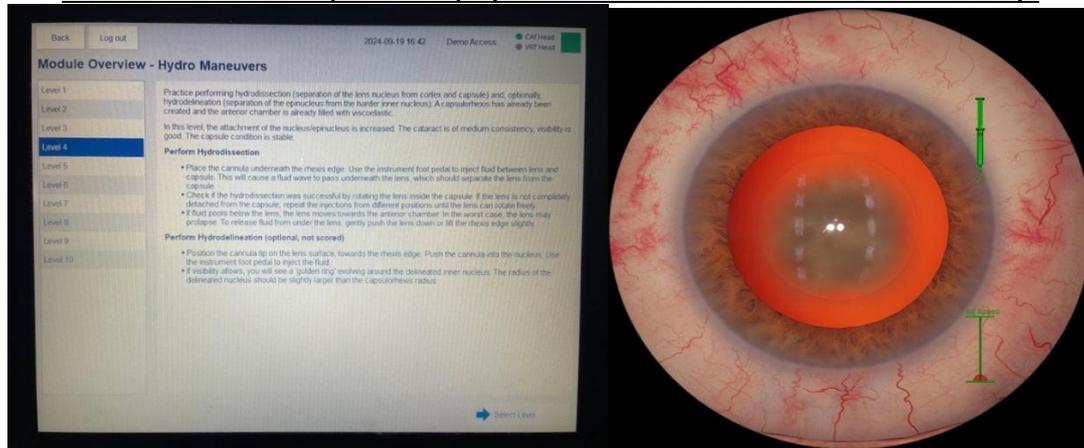
Les niveaux suivants des modules de chirurgie de la cataracte ont été sélectionnés pour cette étude en raison de leur niveau de difficulté et de leur réalisme apparent (Tableau 2) :

**Tableau 2: les différents niveaux de difficulté programmés sur le simulateur utilisé dans notre étude**

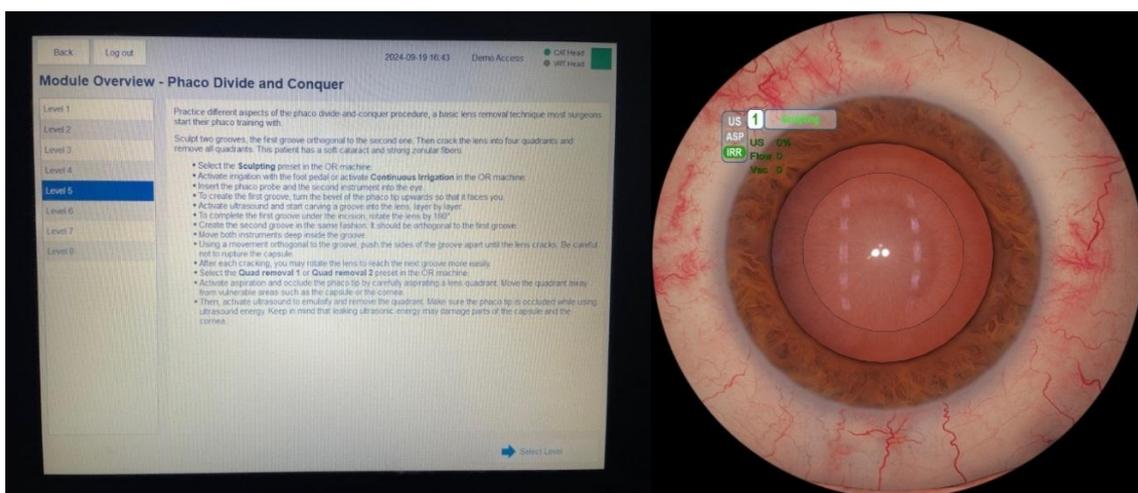
Module	Étape	Description	Niveau	Points
1	Capsulorhexis	Capsulorhexis de A à Z	1	0-100
2	Hydrodissection	Adhérence noyau/épinoyau augmentée, cataracte de densité moyenne, bonne visibilité, pas de faiblesse zonulaire	4	0-100
3	Phaco : divide and conquer	Cataracte molle, pas de faiblesse zonulaire.	5	0-100
4	Irrigation et aspiration	Masses corticales sur 360°	3	0-100
5	Insertion d'implant	Insertion d'un implant en acrylic dans un sac capsulaire vide	3	0-100



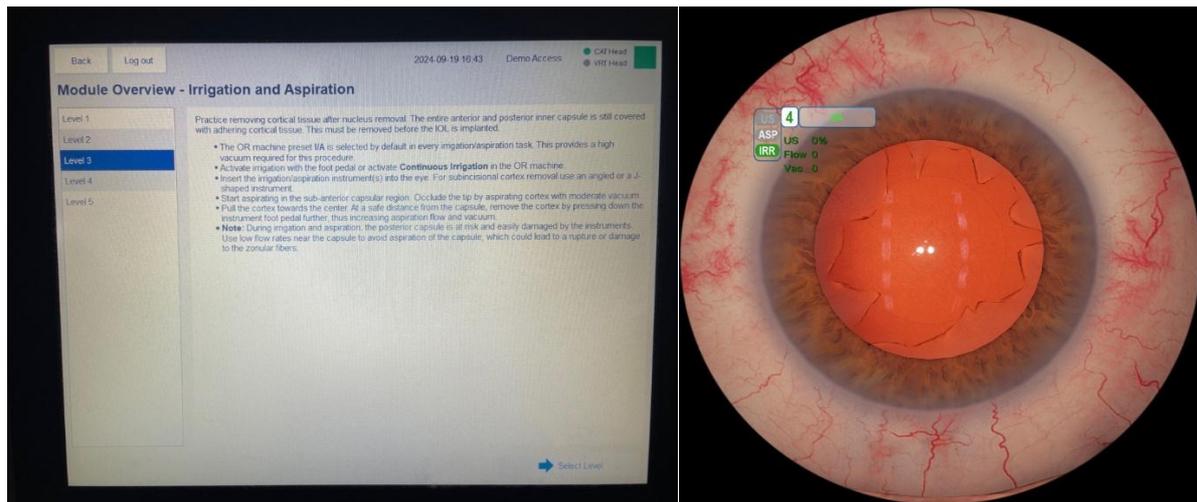
**Figure 78: Description du niveau 1 du module capsulorhexis (à gauche) début du niveau (à droite). (centre de simulation de la FMPDF).**



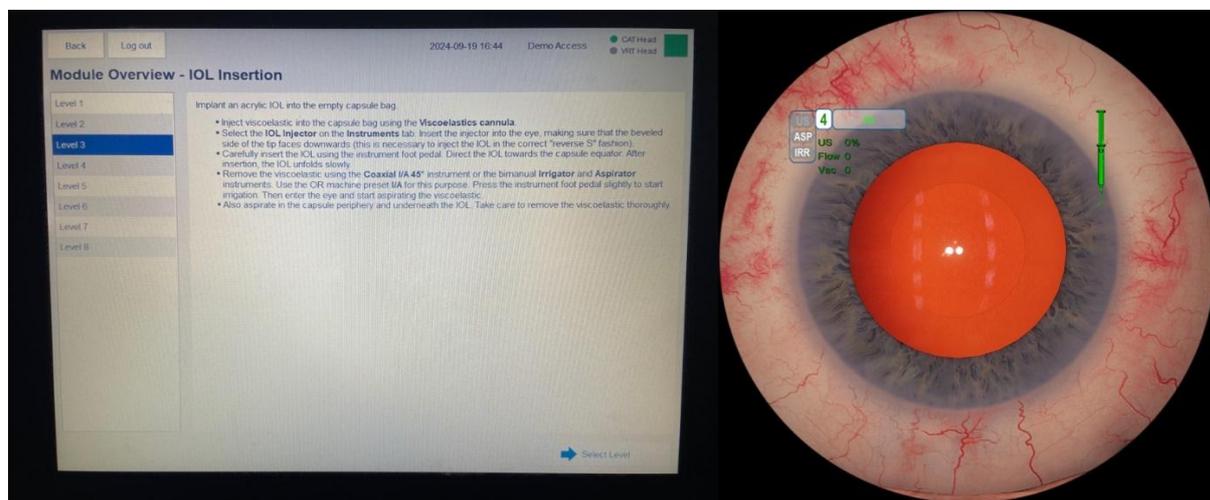
**Figure 79: Description du niveau 4 du module hydrodissection(à gauche) début du niveau (à droite) (centre de simulation de la FMPDF).**



**Figure 80: Description du niveau 5 du module Divide and Conquer (à gauche) début du niveau (à droite) (centre de simulation de la FMPDF).**



**Figure 81: Description du niveau 3 du module Irrigation/Aspiration (à gauche) début du niveau (à droite) (centre de simulation de la FMPDF).**



**Figure 82: Description du niveau 3 du module insertion d'implant (à gauche) début du niveau (à droite) (centre de simulation de la FMPDF).**

### c) Session d'entraînement :

Les sujets du groupe 1 et 2 ont réalisé un premier essai sur les niveaux sélectionnés du simulateur EyeSi, afin de se familiariser avec son fonctionnement et les différentes techniques chirurgicales simulées. Le premier essai visait principalement à permettre aux participants de comprendre le module. Par conséquent, le score obtenu lors de cette première tentative n'a pas été pris en compte dans les analyses.

#### d) Sessions d'évaluation

Trois itérations supplémentaires, en plus de la première session de familiarisation, ont été réalisées. La quatrième et dernière itération a été enregistrée en vidéo pour une évaluation selon les critères de l'Objective Structured Assessment of Cataract Surgical Skill (OSACSS), tel que décrit par Saleh et al. (2007). Parallèlement, Les scores détaillés attribués par le simulateur lors de ces trois essais ont été collectés et enregistrés.

- **Notation OSACSS :**

Les enregistrements vidéo ont été évalués par un enseignant en fonction des critères de l'OSACSS. Afin de minimiser les biais, l'identité des participants, leur groupe d'appartenance ainsi que les scores générés par le simulateur ont été masqués pour l'évaluateur (Tableau 3). Cependant, les items : Draping, incision and paracentesis, et wound closure n'ont pas été notés car le simulateur ne permet pas la réalisation de ces procédures.

**Tableau 3: Objective Structured Assessment of Cataract Surgical Skill (OSACSS).**

	Poorly or Inadequately Performed		Performed With Some Errors or Hesitation		Performed Well With No Prompting or Hesitation	Tick if Not Performed
Draping: Surgical Field Clear of Lashes	1	2	3	4	5	
Incision and Paracentesis: Formation and Technique	1	2	3	4	5	
Viscoelastic: Appropriate Use and Safe Insertion	1	2	3	4	5	
Capsulorrhexis: Commencement of Flap	1	2	3	4	5	
Capsulorrhexis: Formation and Circular Completion	1	2	3	4	5	
Hydrodissection: Visible Fluid Wave and Free Nuclear Rotation	1	2	3	4	5	
Phacoemulsification Probe and Second Instrument: Insertion Into Eye	1	2	3	4	5	
Phacoemulsification Probe and Second Instrument: Effective Use and Stability Within the Eye	1	2	3	4	5	
Nucleus: Sculpting or Primary Chop	1	2	3	4	5	
Nucleus: Rotation and Manipulation	1	2	3	4	5	
Nucleus: Cracking or Chopping With Safe Phacoemulsification of Segments	1	2	3	4	5	
Irrigation and Aspiration Technique With Adequate Removal of Cortex	1	2	3	4	5	
Lens Insertion, Rotation, and Final Position of Intraocular Lens	1	2	3	4	5	
Wound Closure (Including Suturing, Hydration, and Checking Security as Required)	1	2	3	4	5	
<b>Global Indices</b> Wound Neutrality and Minimizing Eye Rolling and Corneal Distortion	1	2	3	4	5	
Eye Positioned Centrally Within Microscope View	1	2	3	4	5	
Conjunctival and Corneal Tissue Handling	1	2	3	4	5	
Capsule: Protection of Anterior and Posterior Capsules	1	2	3	4	5	
Iris Protection	1	2	3	4	5	
Overall Speed and Fluidity of Procedure	1	2	3	4	5	

### e) Évaluation des performances :

La performance des participants sur le simulateur Eyesi a été évaluée en fonction de plusieurs critères :

- **Moyenne des scores** : la moyenne des 3 derniers scores (sur un total de 4 itérations) a été calculée pour analyser la validité de construction.
- **Score unique pour validité concurrente** : seul le score de la 4<sup>ème</sup> itération a été considéré pour évaluer la validité concurrente.

Le score final attribué pour chaque module repose sur des critères précis, qui varient en fonction des modules, mais incluent généralement :

- **Tache achevée** : réalisation complète de l'exercice
- **Efficacité** : temps nécessaire pour accomplir l'exercice et quantité d'énergie ultrasonique (US) utilisée.
- **Utilisation des instruments** : insertion et retrait corrects des instruments (incluant la fermeture et l'horizontalisation des instruments)
- **Traitement des tissus** : capacité à éviter les lésions cornéennes, iriennes ou capsulaires.

### f) Impact de l'expérience en chirurgie d'extraction extra-capsulaire (EEC) :

L'influence de l'expérience en chirurgie EEC a été évalué en comparant les performances des résidents novices ayant une expérience préalable en EEC avec celles des résidents n'ayant jamais pratiqué cette technique. Les performances ont été analysées à l'aide de critères tels que : le temps nécessaire pour réaliser les procédures, la précision des mouvements et le nombre d'erreurs commises. Ces analyses ont permis de déterminer l'impact

de l'expérience en EEC sur l'apprentissage de la phacoémulsification à l'aide du simulateur EyeSi.

#### **g) Impact de la pratique des jeux vidéo :**

L'effet de la pratique des jeux vidéo a également été examiné. Les performances des participants s'auto-déclarant pratiquants réguliers de jeux vidéo ont été comparées à celles des non-pratiquants au sein du même groupe (1 ou 2). Les différences de performance entre ces deux sous-groupes ont été analysées pour évaluer l'influence potentielle des jeux vidéo sur les compétences chirurgicales.

#### **D. Analyse statistique des données**

Les données ont été recueillies à l'aide de la plateforme VRmNet du simulateur Eyesi et consignées sur une fiche d'exploitation préétablie. L'analyse statistique des données collectées a été réalisée grâce au logiciel SPSS 26.0, tandis que le logiciel Jamovi 2.3.28 a été utilisé pour la génération des graphiques.

#### **Variables qualitatives et quantitatives :**

- Nous avons exprimé les variables qualitatives en effectifs et en pourcentages, tandis que les variables quantitatives ont été présentées sous forme de moyennes  $\pm$  écart type. Lorsque les variables ne suivaient pas une distribution normale, les résultats ont été exprimés sous forme de médianes.

#### **Tests statistiques :**

- Pour comparer les performances entre différents groupes (résidents et chirurgiens expérimentés), (résidents et chirurgiens expérimentés) nous avons utilisé des tests t de Student lorsque les distributions présentaient

une normalité. En cas d'absence de normalité, des tests non paramétriques équivalents ont été appliqués.

- Le coefficient de corrélation de Pearson a permis d'évaluer la relation entre les scores obtenus l'OSACSS et ceux fournis par le simulateur EyeSi.
- Pour analyser les performances comparatives des différents groupes de participants (résidents novices, résidents de 5e année et chirurgiens expérimentés), une analyse de la variance (ANOVA) a été réalisée.

Une valeur  $p < 0,05$  est considérée comme statistiquement significative.

## X. Résultats

### A. Caractéristiques démographiques des participants

#### 1. Nombre de participants par groupe.

Un total de 25 participants a été inclus dans l'étude, garantissant une puissance statistique suffisante pour détecter des différences significatives entre les groupes comparés (Figure 83). Les participants ont été répartis en deux groupes :

##### Groupe 1 : Résidents novices en ophtalmologie :

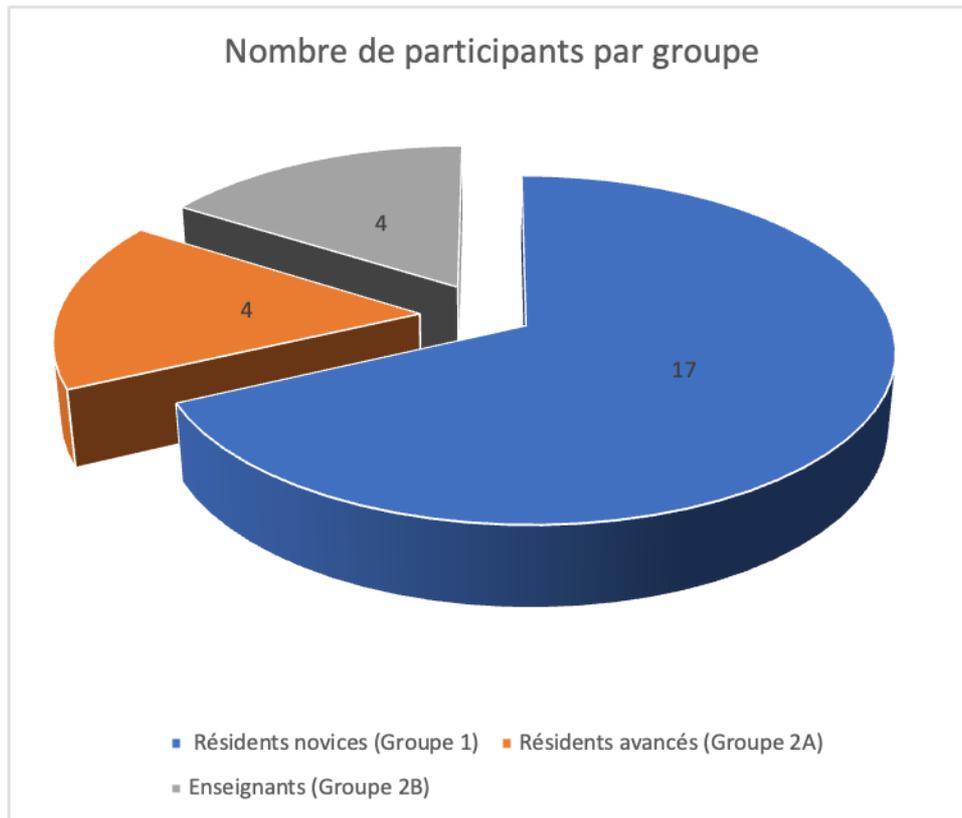
Ce groupe comprenait 17 résidents en ophtalmologie, répartis entre la 2<sup>ème</sup>, 3<sup>ème</sup> et 4<sup>ème</sup> années de formation. Ces résidents n'avaient aucune expérience préalable, ni sur le simulateur EyeSi, ni en chirurgie de phacoémulsification.

##### Groupe 2 : Participants expérimentés

Ce groupe était subdivisés en deux sous-groupes :

- Groupe 2A – Résidents en 5<sup>ème</sup> année : Ce sous-groupe comprenait 4 résidents ayant réalisé au moins 40 phacoémulsifications. Bien qu'ils aient une expérience en chirurgie, ils n'avaient pas d'expérience significative sur le simulateur EyeSi.
- Groupe 2B – Enseignants expérimentés en chirurgie ophtalmologique : Ce sous-groupe était constitué de 4 enseignants ayant au moins 5 ans d'expérience en chirurgie ophtalmologique. Tous étaient certifiés, pratiquaient activement la chirurgie, et avaient réalisé un minimum de 500

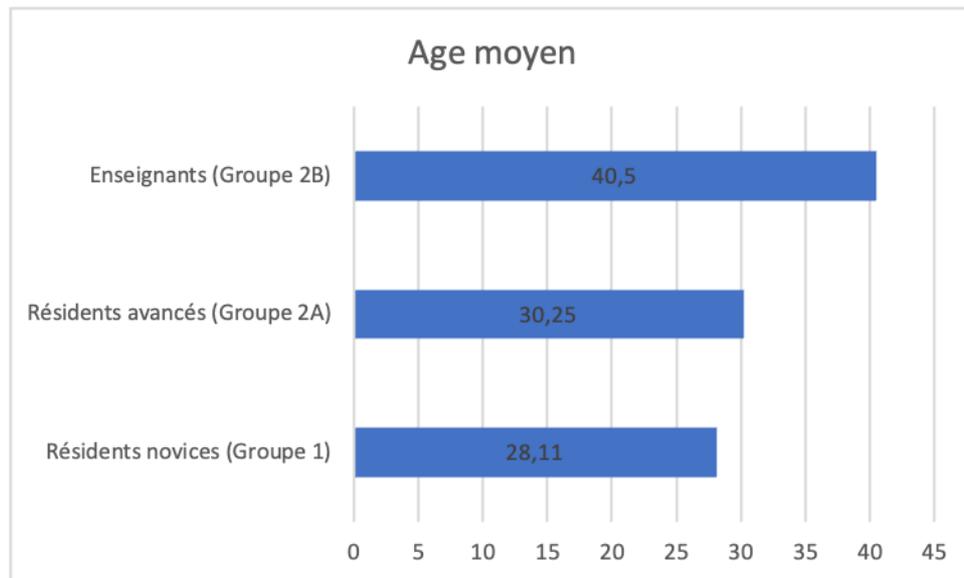
phacoémulsifications. Aucun d'eux n'avait une expérience significative sur le simulateur EyeSi.



**Figure 83: Nombre de participants par groupe.**

## **2. Répartition selon l'âge.**

La moyenne d'âge variait significativement selon les groupes. dans le groupe 1, elle était de 28,11 ans ( $\pm 1,73$ ). Dans le groupe 2A, elle atteignait 30,25 ans ( $\pm 0,43$ ), tandis que le groupe 2B, composé d'enseignants, présentait une moyenne d'âge plus élevée de 40,5 ans ( $\pm 3,11$ ). Ces moyennes d'âge sont illustrées dans la (Figure 84).



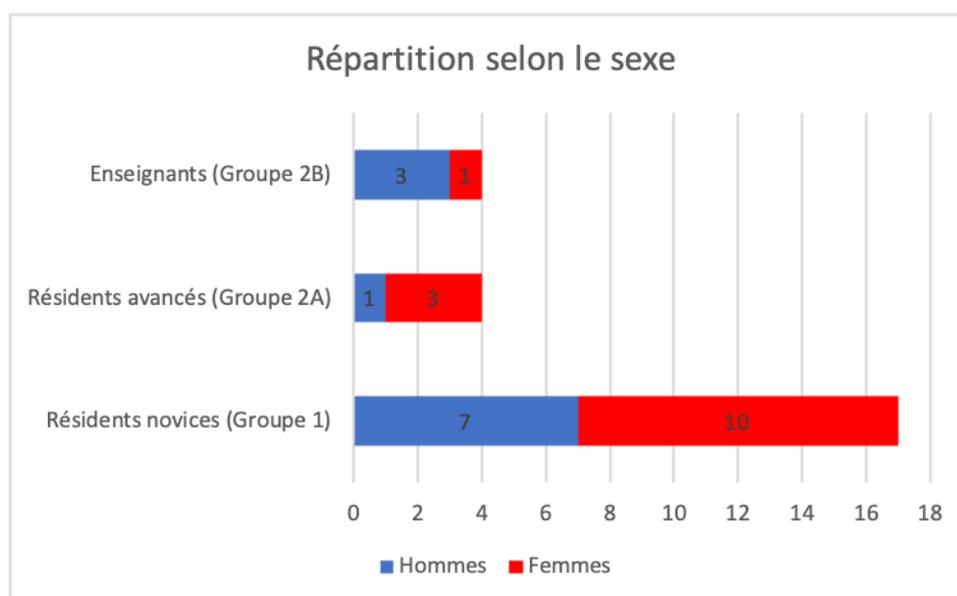
**Figure 84: Répartition des participants selon l'âge dans chaque groupe**

## **B. Facteurs influençant les performances sur simulateur EyeSI**

### **1. Répartition selon Sexe :**

Dans notre échantillon, la répartition hommes/femmes était de 11 hommes et 14 femmes, soit un sexe ratio de 0,78 (Figure 85). La répartition par sexe selon les groupes était la suivante :

- **Groupe 1** : 7 hommes et 10 femmes, avec un sexe ratio de 0.7, indiquant une légère prédominance féminine.
- **Groupe 2A** : 1 homme et 3 femmes, soit un sexe ratio de 0.33, montrant une forte prédominance féminine.
- **Groupe 2B** : 3 hommes et 1 femme, ce qui correspond à un sexe ratio de 3, illustrant une nette prédominance masculine.



**Figure 85: Répartition des participants selon le sexe dans chaque groupe.**

## 2. Expérience en chirurgie

### a) Expérience en phacoémulsification.

Concernant l'expérience en phacoémulsification, Les participants du groupe 1 n'avaient aucune expérience dans ce domaine. En revanche, Les participants du groupe 2A avaient réalisé en moyenne 230 phacoémulsifications ( $\pm 77,03$ ), tandis que Les participants du groupe 2B affichaient une moyenne beaucoup plus élevée de 5500 interventions ( $\pm 1291$ ). Ces résultats mettent en évidence des différences significatives d'expérience chirurgicale entre les groupes, correspondant à leur niveau de formation, et ces différences ont été confirmées par une valeur  $p < 0,0001$  pour les trois catégories (Tableau 4).

### b) Expérience en extraction extra-capsulaire manuelle (EEC).

Les participants du groupe 1 avaient réalisé en moyenne 15,41 EEC ( $\pm 21,64$ ). Les participants du groupe 2A présentaient une moyenne 125 EEC ( $\pm 45,1$ ), tandis que Les enseignants du groupe 2B avaient réalisé en moyenne 700 EEC ( $\pm 142,5$ ). Ces résultats révèlent des différences significatives

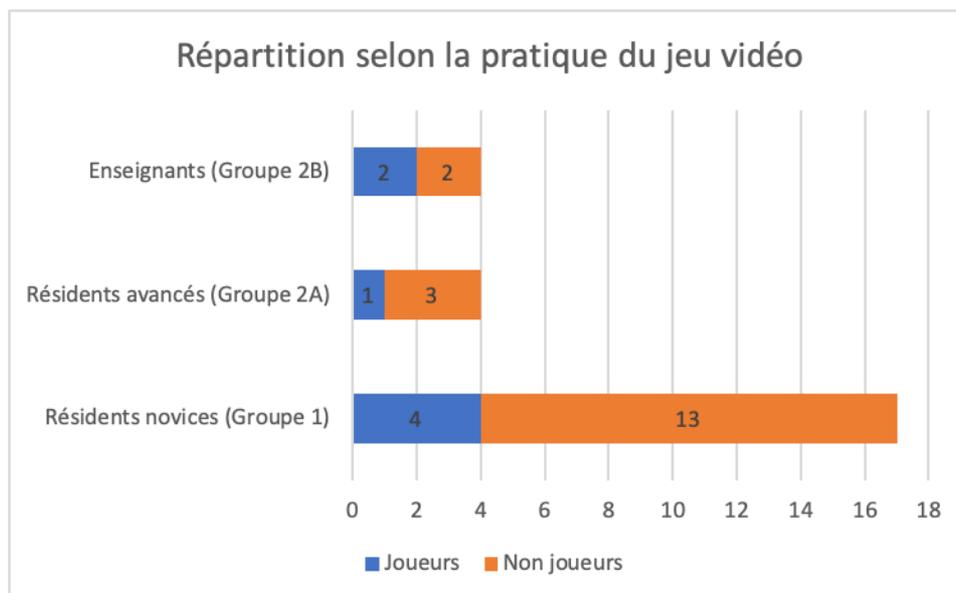
d'expérience chirurgicale entre les trois catégories, confirmées par une valeur de  $p < 0,0001$  (Tableau 4).

**Tableau 4: Expérience des participants en phacoémulsification et en EEC.**

Groupe	Nombre de phacoémulsifications réalisées (moyenne $\pm$ écart-type)	Nombre d'EEC réalisées (moyenne $\pm$ écart-type)
Résidents novices (Groupe 1)	-	15.41 $\pm$ 21.64
Résidents avancés (Groupe 2A)	230.00 $\pm$ 77.03	125.00 $\pm$ 45.09
Enseignants (Groupe 2B)	5500.00 $\pm$ 1290.99	700.00 $\pm$ 355.90
Valeur p (ANOVA)	<b>0,0001</b>	<b>0,0001</b>

### 3. Expérience en Jeux vidéo :

Concernant la pratique des jeux vidéo, 28 % des participants rapportent une pratique régulière. Cette proportion était plus élevée dans le groupe 2B (50 %) par rapport au groupe 1 (23 %) et au groupe 2A (25 %) (Figure 86).

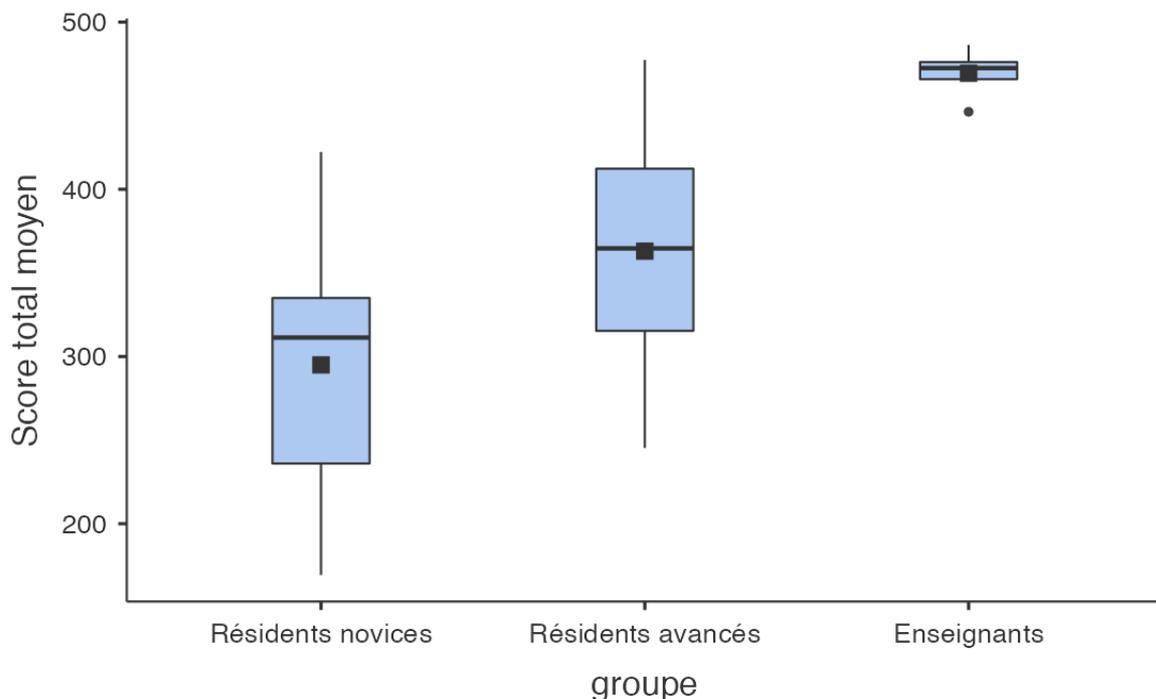


**Figure 86: Distribution des participants selon leur pratique des jeux vidéo**

## C. Résultats des performances sur le simulateur Eyesi

### 1. Performances globales des participants sur Eyesi :

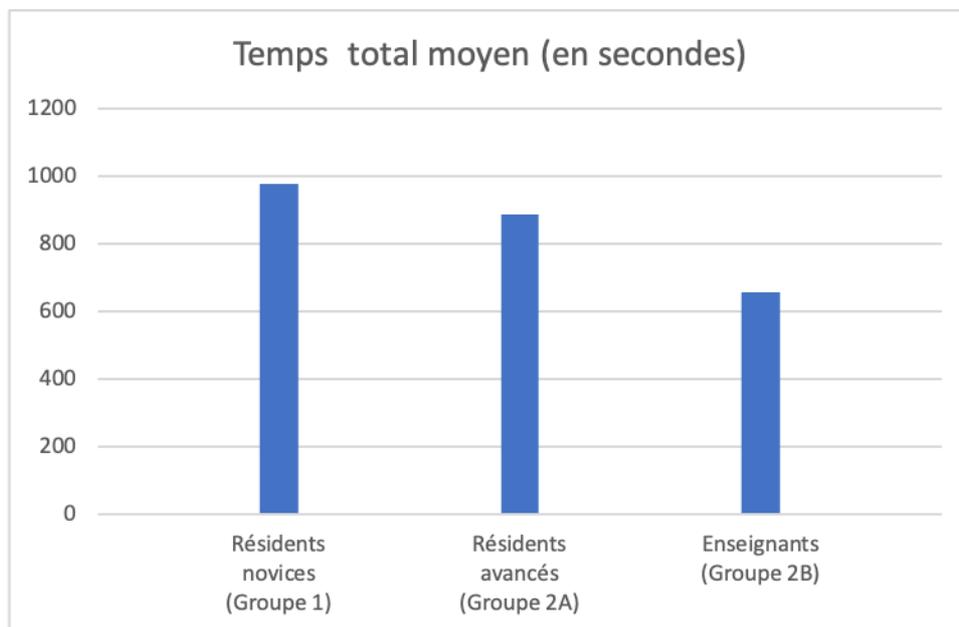
Les performances globales des participants sur le simulateur Eyesi, calculées à partir de la moyenne des scores des cinq étapes, montrent une supériorité significative des performances en fonction du niveau d'expérience. Le score global moyen était de 294,9 ( $\pm 72,02$ ) pour les novices (groupe 1), de 363,0 ( $\pm 97,08$ ) pour les résidents avancés (groupe 2A), et atteignait 469,4 ( $\pm 16,71$ ) pour les enseignants (groupe 2B), avec une différence statistiquement significative ( $p=0,001$ ) (Figure 87).



**Figure 87: Score total moyen obtenu par groupe d'expérience**

Le temps nécessaire pour compléter les cinq étapes sur le simulateur Eyesi diminue de manière notable avec l'expérience des participants. Les enseignants (groupe 2B) réalisent ces étapes en un temps moyen de 655 secondes ( $\pm 161,39$ ) (10 minutes 55 secondes  $\pm 2$  minutes 41 secondes), tandis que les résidents avancés (groupe 2A) prennent en moyenne 886

secondes ( $\pm 242,41$ ) (14 minutes 46 secondes  $\pm 4$  minutes 2 secondes) et les novices (groupe 1) nécessitent 978,76 secondes ( $\pm 241,68$ ) (16 minutes 19 secondes  $\pm 4$  minutes 2 secondes). Bien que cette tendance vers une réduction du temps soit proche de la significativité ( $p = 0,062$ ), elle n'atteint pas le seuil conventionnel de  $p < 0,05$ . Ces résultats suggèrent que l'expérience améliore l'efficacité des participants, probablement grâce à une meilleure maîtrise technique (Figure 88).



**Figure 88: le temps moyen nécessaire pour compléter les cinq étapes sur simulateur EyeSi.**

## 2. Performances par étape des participants sur Eyesi.

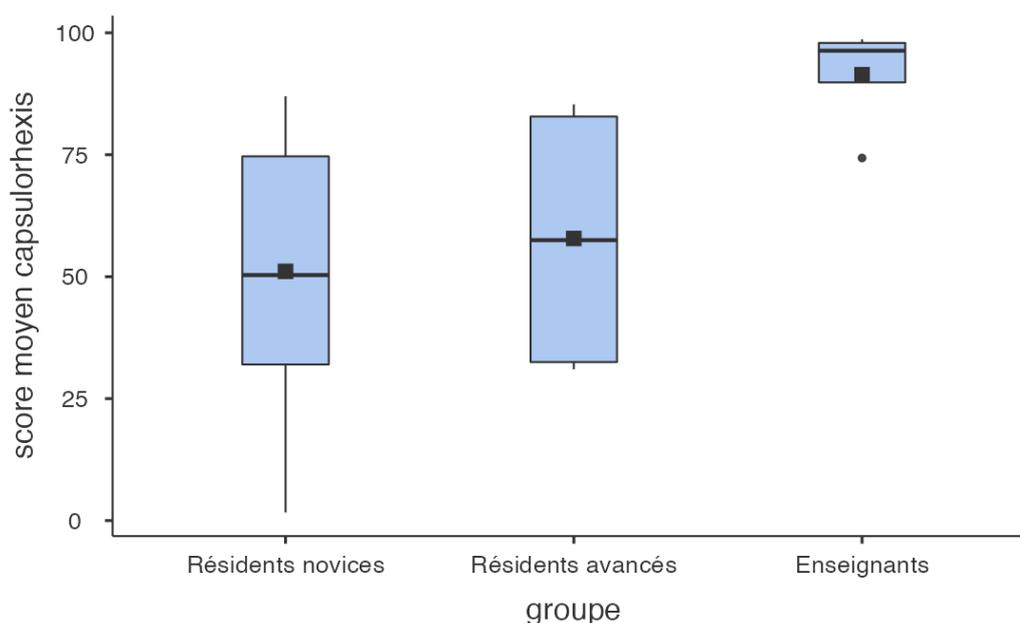
### a) Scores et performances lors du Capsulorhéxis :

#### ➤ Score moyen capsulorhéxis :

Le score moyen des trois itérations de l'étape du capsulorhexis montre une progression des performances avec l'expérience. Les enseignants (groupe 2B) obtiennent une moyenne de 91,42 ( $\pm 11,49$ ), suivis des résidents avancés (groupe 2A) avec 57,83 ( $\pm 29,87$ ), et des novices (groupe 1) avec 51,10 ( $\pm$

28,16). Une analyse ANOVA révèle une différence statistiquement significative entre les groupes ( $p=0,042$ ).

Une analyse post hoc montre que la différence est particulièrement marquée entre les novices et les enseignants ( $p = 0,012$ ), tandis qu'elle est moins significative entre les résidents novices et avancés ( $p=0,675$ ) et entre les résidents avancés et les enseignants ( $p=0,081$ ) (Figure 89).



**Figure 89: les scores moyens obtenus dans le capsulorhexis entre les différents groupes d'expérience.**

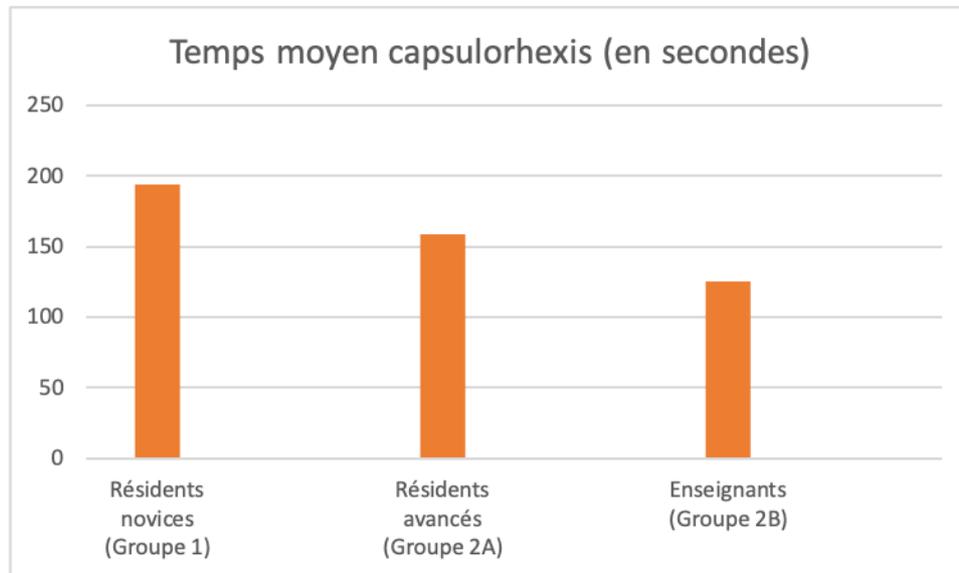
**Tableau 5: Comparaisons inter-groupes des scores moyens réalisés dans l'étape du capsulorhexis**

Comparaison ANOVA	Groupe 1 vs Groupe 2A vs Groupe 2B	Groupe 1 vs Groupe 2B	Groupe 2A vs Groupe 2B	Groupe 1 vs Groupe 2A
valeur p	0,042	0,012	0,081	0,675

➤ **Le temps moyen pour réaliser l'étape du capsulorhexis**

Le temps moyen pour réaliser l'étape du capsulorhexis diminue significativement avec l'expérience des participants. Les enseignants nécessitent en moyenne 125,75 secondes ( $\pm 38,30$ ) (2 minutes 6 secondes

$\pm 38$  secondes), contre 159,25 secondes ( $\pm 16,74$ ) (2 minutes 39 secondes  $\pm 17$  secondes) pour les résidents avancés et 194,18 secondes ( $\pm 52,46$ ) (3 minutes 14 secondes  $\pm 52$  secondes) pour les novices. Cette différence est statistiquement significative ( $p = 0,04$ ) (Figure 90).



**Figure 90: Temps moyen nécessaire pour la réalisation du capsulorhexis selon les groupes d'expérience**

➤ **La rondeur du capsulorhexis.**

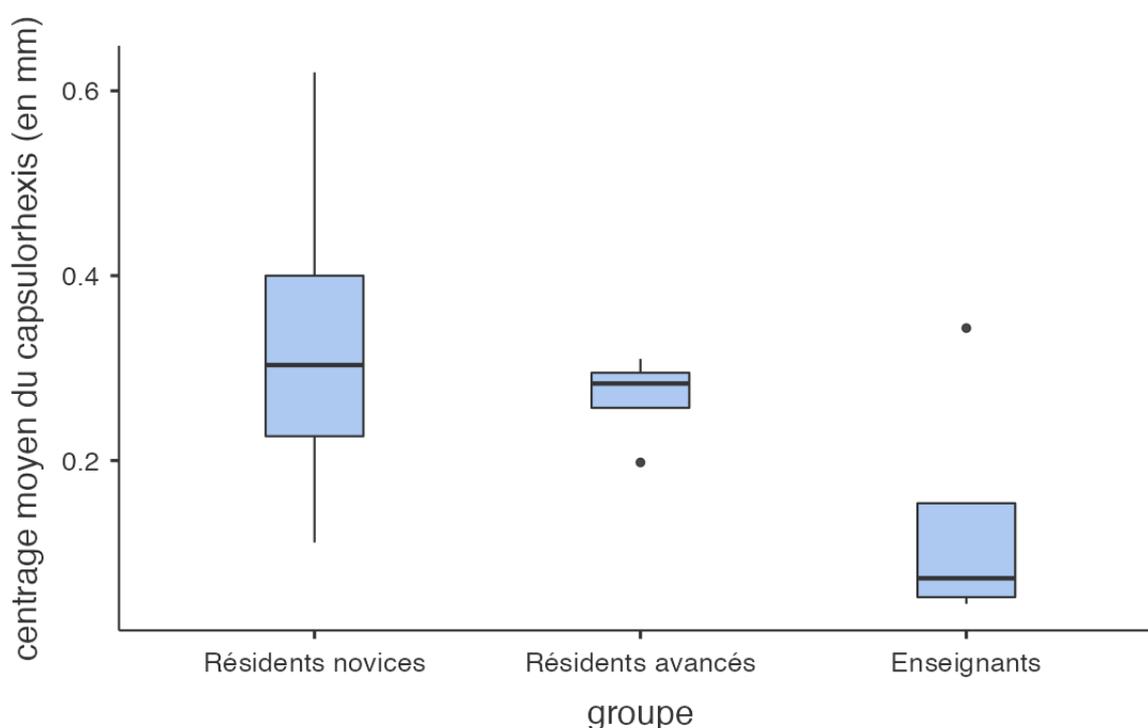
Les scores moyenne de rondeur du capsulorhexis sont respectivement de 87,80 % ( $\pm 20,27$ ) pour les enseignants (groupe 2B), 91,05 % ( $\pm 4,90$ ) pour les résidents avancés (groupe 2A), et seulement 61,95 % ( $\pm 24,32$ ) pour les novices (groupe 1). Ces différences sont statistiquement significatives ( $p = 0,028$ ), soulignant une amélioration des performances avec l'expérience. La rondeur du capsulorhexis, considérée comme indicateur clé de la précision technique en chirurgie, est ainsi significativement meilleure dans les groupes ayant davantage d'expérience (Tableau 6).

**Tableau 6: Scores moyens de rondeur du capsulorhexis selon les groupes d'expérience**

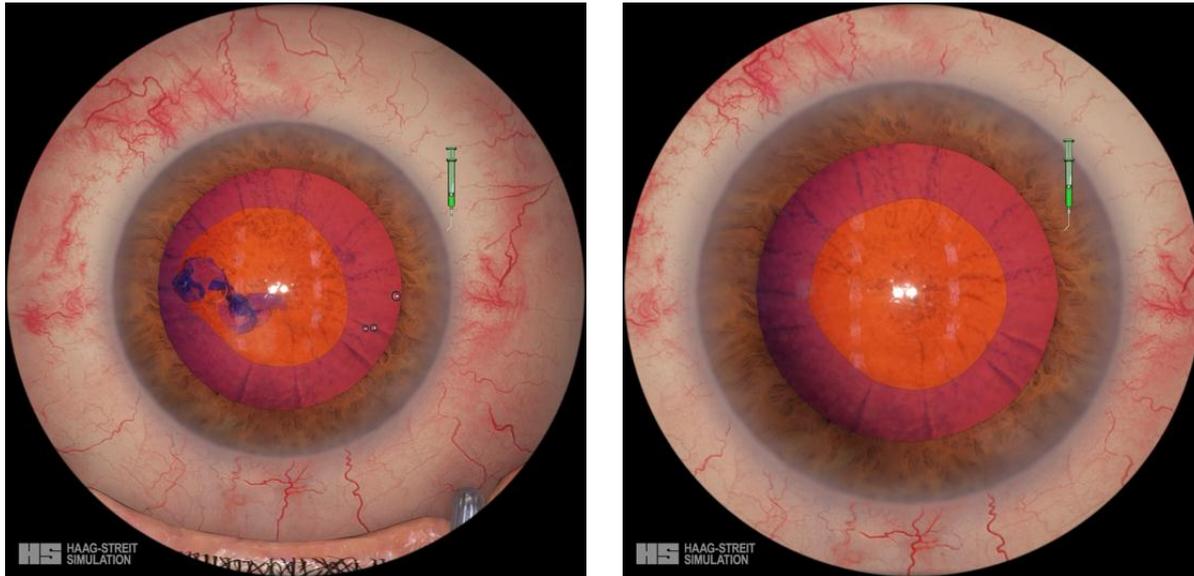
	Rondeur moyenne du capsulorhexis (moyenne $\pm$ écart-type)	valeur p (ANOVA)
Résidents novices (Groupe 1)	61.95 $\pm$ 24.32	
Résidents avancés (Groupe 2A)	91.05 $\pm$ 4.90	<b>0,028</b>
Enseignants (Groupe 2B)	87.80 $\pm$ 20.27	

➤ **Centrage moyen du capsulorhexis.**

Les résultats montrent une meilleure précision chez les enseignants, avec un centrage moyen de 0,13 mm ( $\pm$  0,14), comparé à 0,26 mm ( $\pm$  0,05) pour les résidents avancés et 0,31 mm ( $\pm$  0,13) pour les novices. Une valeur p proche de la significativité ( $p = 0,054$ ) suggère une performance supérieure sur le simulateur avec l'expérience, bien que cette différence ne soit pas encore statistiquement significative au seuil conventionnel de  $p < 0,05$ .



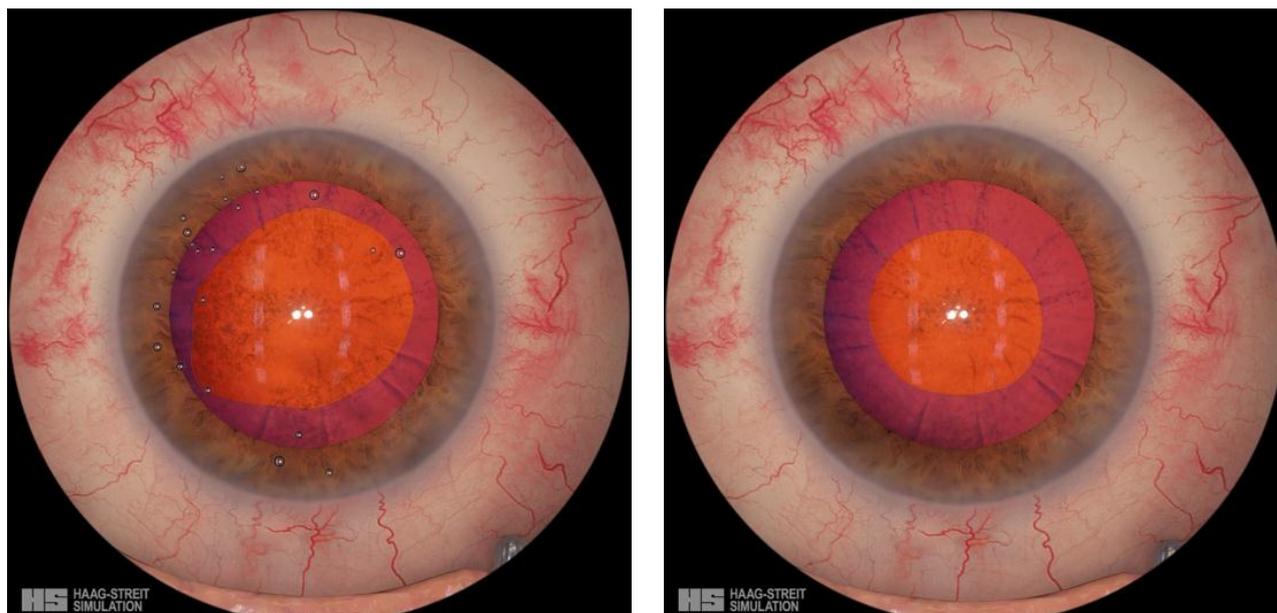
**Figure 91: Centrage moyen du capsulorhexis selon les groupes d'expérience**



**Figure 92: : Cette figure compare visuellement et quantitativement les performances d'un Résident Novice (à gauche) et d'un Enseignant expérimenté (à droite) lors de la réalisation du capsulorhexis (rondeur 12,9% vs 100% ; centrage 0,46mm vs 0,056mm ; déviation du rayon 0,17mm vs 0,023mm ; extension maximale du rayon 3,4mm versus 2,7mm)**

➤ **Déviat**

La déviation moyenne du rayon du capsulorhexis, mesurée par rapport à 2,5 mm, diminue significativement avec l'expérience des participants. Les enseignants (groupe 2B) obtiennent une déviation moyenne de 0,123 mm ( $\pm$  0,137), nettement inférieure à celle des résidents avancés (groupe 2A), qui est de 0,217 mm ( $\pm$  0,130), et à celle des novices (groupe 1), qui présentent une déviation moyenne de 0,335 mm ( $\pm$  0,136). Ces résultats montrent une amélioration significative de la précision chirurgicale simulée en fonction de l'expérience clinique ( $p = 0,023$ ).



**Figure 93: Cette figure illustre une comparaison visuelle et métrique des performances entre un Résident Novice (à gauche) et un Enseignant expérimenté (à droite) lors de la réalisation du capsulorhexis. (Rondeur du capsulorhexis : 0 % (Novice) contre 100 % (Enseignant), Centrage : 0,12 mm (Novice) contre 0,062 mm (Enseignant), Déviation moyenne du rayon : 0,66 mm (Novice) contre 0,013 mm (Enseignant), Extension maximale du rayon : 3,8 mm (Novice) contre 2,7 mm (Enseignant).)**

**Tableau 7: Déviation moyenne du rayon du capsulorhéxis selon les groupes d'expérience**

	Déviation moyenne du rayon du capsulorhexis de 2,5mm (en mm) (moyenne $\pm$ écart-type)	valeur p (ANOVA)
Résidents novices (Groupe 1)	0.335 $\pm$ 0.136	
Résidents avancés (Groupe 2A)	0.217 $\pm$ 0.130	<b>0.023</b>
Enseignants (Groupe 2B)	0.123 $\pm$ 0.137	

➤ **Extension maximale moyenne du rayon du rhexis.**

L'extension maximale moyenne du rayon du capsulorhéxis diminue progressivement en fonction du niveau d'expérience des participants. Les enseignants (groupe 2B) enregistrent une extension moyenne de 2,83 mm ( $\pm$  0,16), inférieure à celle des résidents avancés (groupe 2A), qui est de 3,07 mm

( $\pm 0,21$ ), et à celle des novices (groupe 1), qui présentent une moyenne de 3,27 mm ( $\pm 0,23$ ).

Cette différence entre les groupes est statistiquement significative ( $p = 0,004$ ), ce qui reflète une meilleure maîtrise technique et une capacité accrue à limiter l'extension excessive du rayon du rhexis sur le simulateur en fonction de l'expérience.

**Tableau 8: Extension maximale moyenne du rayon du rhexis selon les groupes d'expérience**

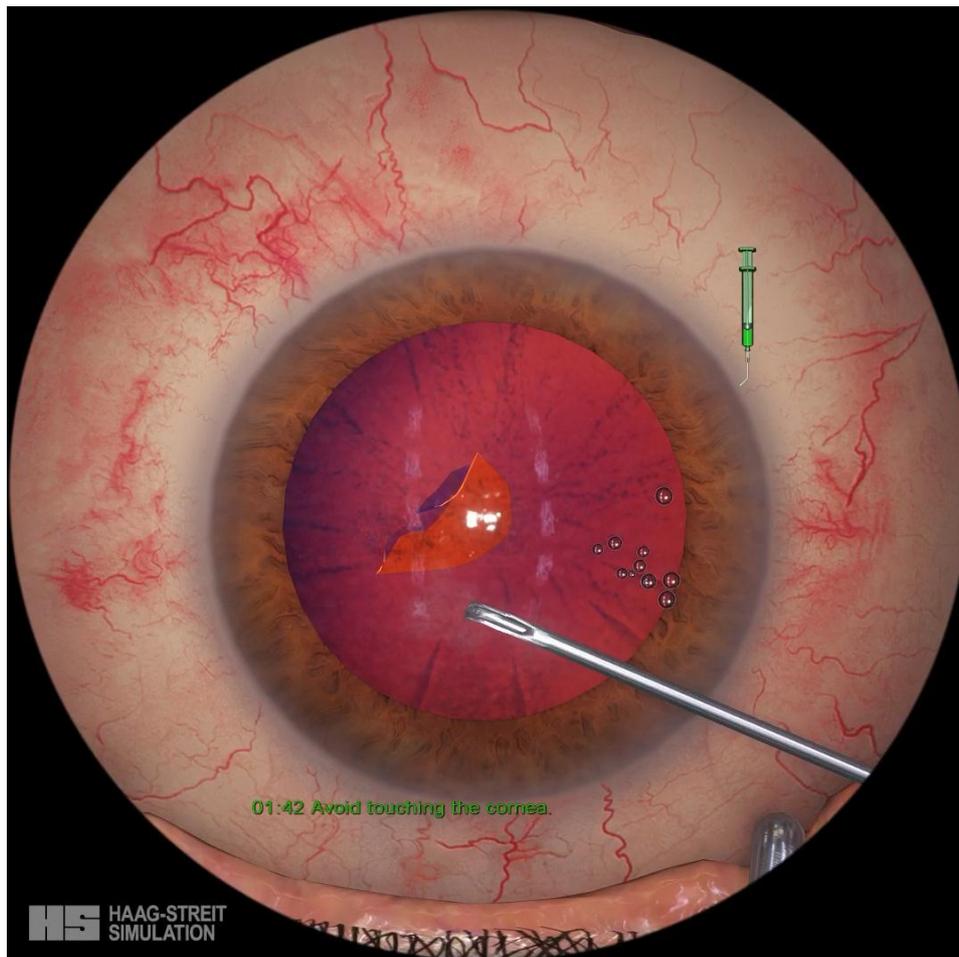
	Extension maximale moyenne du rayon du capsulorhexis (en mm) (moyenne $\pm$ écart-type)	valeur p (ANOVA)
Résidents novices (Groupe 1)	3.27 $\pm$ 0.23	
Résidents avancés (Groupe 2A)	3.07 $\pm$ 0.21	<b>0,004</b>
Enseignants (Groupe 2B)	2.83 $\pm$ 0.16	

➤ **Complications lors de la réalisation du capsulorhexis.**

La surface moyenne de cornée lésée est nettement plus faible chez les enseignants ( $0,03 \text{ mm}^2 \pm 0,038$ ) par rapport aux novices ( $0,75 \text{ mm}^2 \pm 1,28$ ) et aux résidents avancés ( $1,06 \text{ mm}^2 \pm 1,76$ ) (Figure 94). Concernant les fibres zonulaires endommagées, ni les enseignants (groupe 2B) ni les novices (groupe 1) n'enregistrent de lésions. En revanche, les résidents avancés (groupe 2A) présentent une moyenne plus élevée de 8,33 % ( $\pm 16,67$ ). La différence entre les groupes n'est toutefois pas statistiquement significative ( $p = 0,066$ ).

**Tableau 9: Complications lors de la réalisation du capsulorhexis.**

	Surface moyenne de cornée lésée (en mm <sup>2</sup> ) (moyenne ± écart-type)	valeur p (ANOVA)	Moyenne de fibres zonulaires endommagées (en %) (moyenne ± écart-type)	valeur p (ANOVA)
Résidents novices (Groupe 1)	0.75 ±1.28	0,496	0 ±0	0,066
Résidents avancés (Groupe 2A)	1.06 ±1.76		8.33 ±16.67	
Enseignants (Groupe 2B)	0.03 ±0.04		0 ±0	



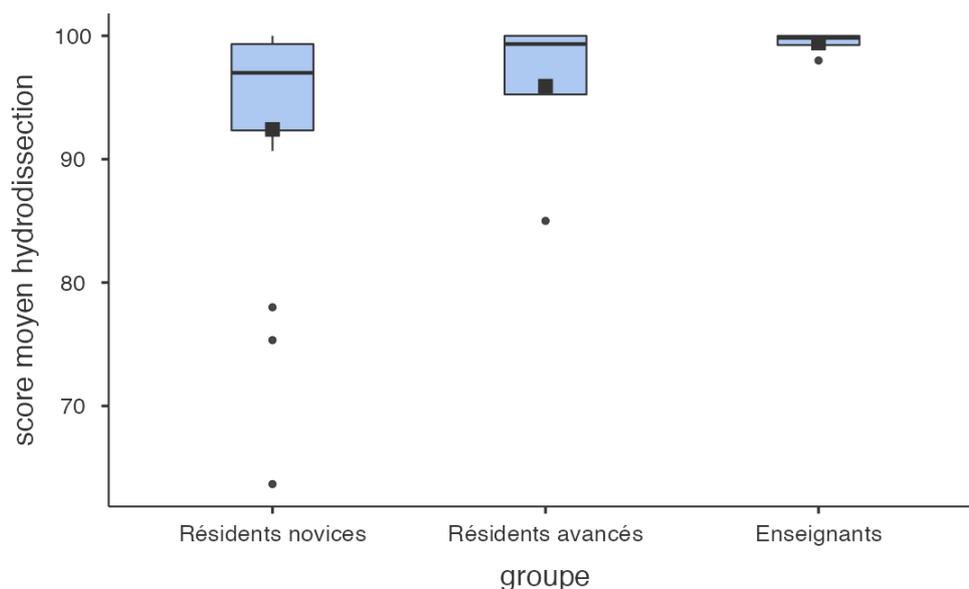
**Figure 94: Cornée endommagée par un cystitome avec apparition d'un message d'erreur et opacification de la zone lésée.**

## b) Scores et performances lors de l'hydrodissection :

### ➤ Score moyen hydrodissection

Lors de l'étape de l'étape d'hydrodissection, les scores moyens sont élevés et relativement proches entre les groupes : 99,41 ( $\pm$  0,96) pour les enseignants, 95,92 ( $\pm$  7,30) pour les résidents avancés, et 92,41 ( $\pm$  10,35) pour les novices. Les valeurs de p montrent que ces différences ne sont pas statistiquement significatives ( $p = 0,376$ ). Ces résultats sont illustrés dans la Figure 95.

Lors des trois itérations de l'étape d'hydrodissection, tous les participants des groupes 1, 2A et 2B ont réussi chacune de leurs tentatives d'hydrodissection. Les résidents avancés (groupe 2A) et les enseignants (groupe 2B) ont, en moyenne, validé toutes leurs vérifications de l'hydrodissection, tandis qu'un seul participant du groupe 1 (novices) a échoué une fois. (novices) a échoué une fois.



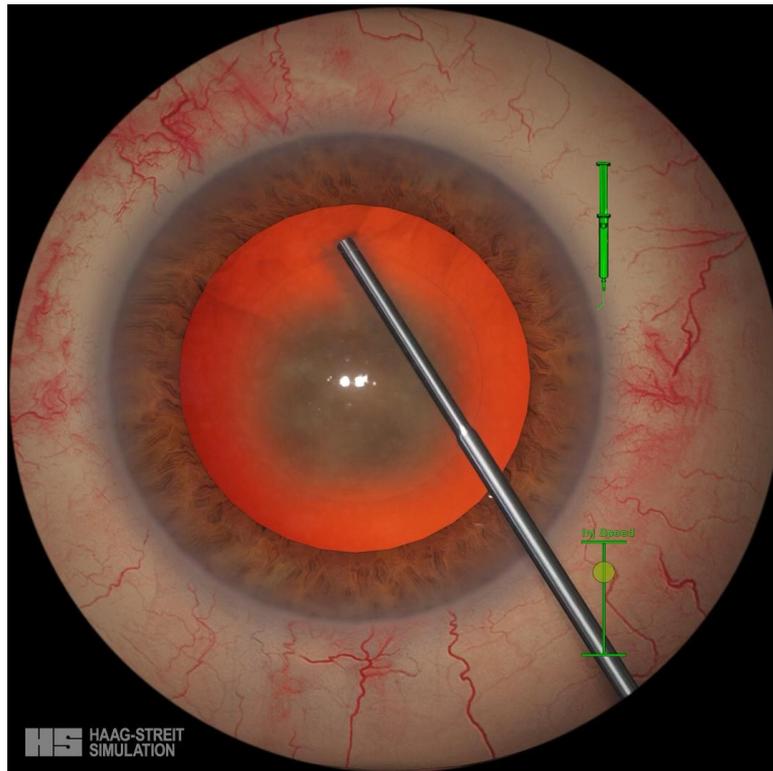
**Figure 95: Scores moyens obtenus lors de l'hydrodissection selon les groupes d'expérience**

➤ **Temps moyen hydrodissection**

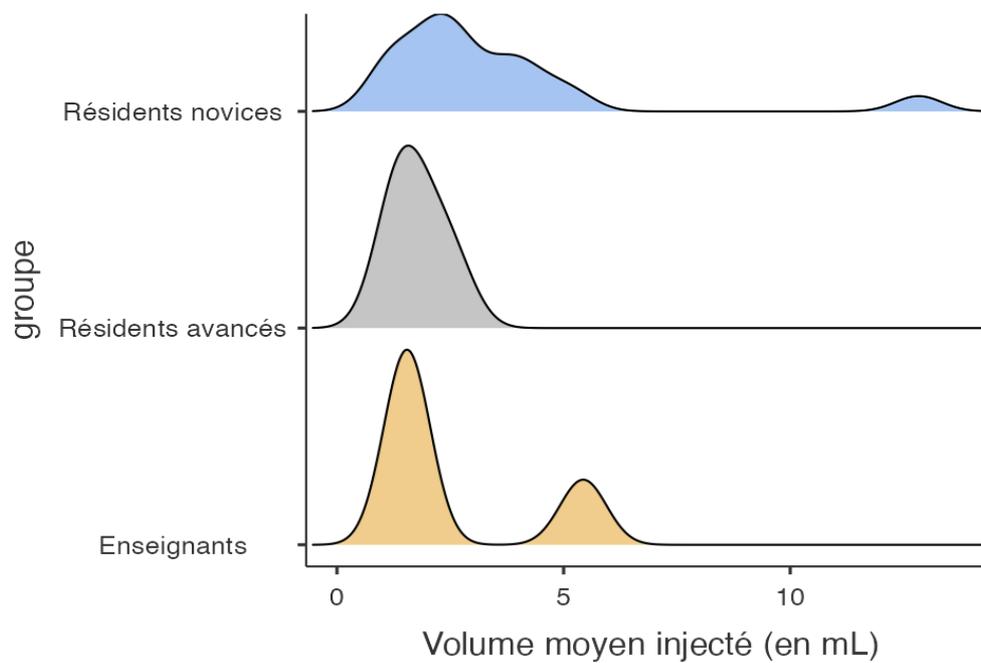
Le temps nécessaire pour réaliser cette étape diminue avec l'expérience. Les enseignants (groupe 2B) effectuent cette étape en un temps moyen de 55,00 secondes ( $\pm 6,78$ ), suivis des résidents avancés (groupe 2A) avec un temps moyen de 82,25 secondes ( $\pm 35,20$ ) (1 minute 22 secondes  $\pm 35$  secondes). Les novices (groupe 1) prennent davantage de temps, avec une moyenne de 104,24 secondes ( $\pm 51,46$ ) (1 minute 44 secondes  $\pm 51$  secondes). Bien que les résultats indiquent une tendance claire vers une réduction du temps avec l'expérience, les différences entre les groupes ne sont pas statistiquement significatives ( $p = 0,160$ ).

➤ **Volume moyen injecté.**

Le volume moyen de Balanced Salt Solution (BSS) injecté lors de l'étape de l'hydrodissection varie entre les groupes, mais les différences ne sont pas statistiquement significatives ( $p = 0,490$ ). Les novices (groupe 1) ont injecté en moyenne 3,33 mL ( $\pm 2,74$ ), ce qui est le volume le plus élevé parmi les groupes. Les enseignants (groupe 2B) ont injecté un volume moyen de 2,51 mL ( $\pm 1,94$ ), tandis que les résidents avancés (groupe 2A) ont utilisé un volume moyen inférieur de 1,77 mL ( $\pm 0,57$ ).



**Figure 96: Injection de BSS lors de l'hydrodissection.**



**Figure 97: Volume moyen de BSS injecté lors de l'étape de l'hydrodissection par groupe.**

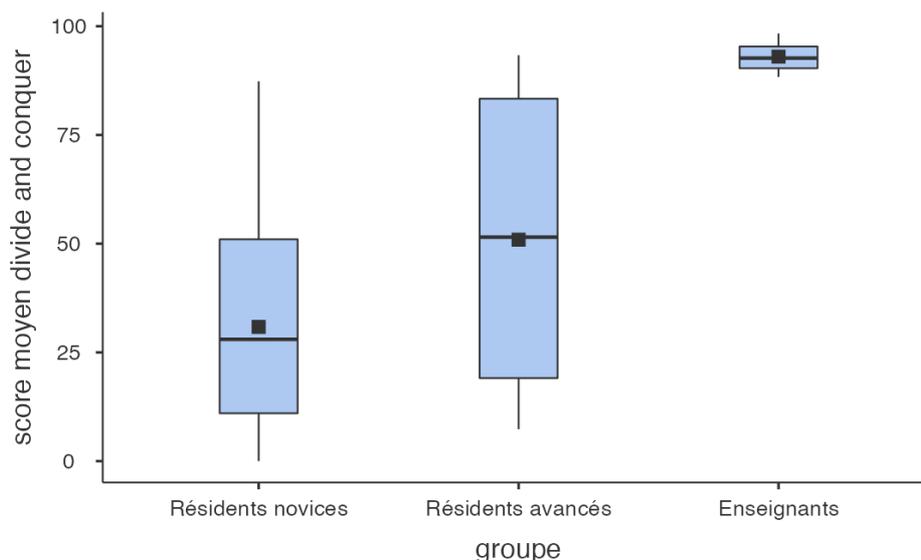
➤ **Complications lors de l'hydrodissection.**

La surface moyenne de cornée lésée pendant l'hydrodissection est la plus faible chez les enseignants ( $0,02 \text{ mm}^2 \pm 0,04$ ), suivie des résidents avancés ( $0,12 \text{ mm}^2 \pm 0,25$ ) et des novices ( $0,11 \text{ mm}^2 \pm 0,23$ ). Cependant, les différences entre les groupes ne sont pas statistiquement significatives ( $p = 0,735$ ), ce qui suggère des performances similaires entre les différents niveaux d'expérience pour cette tâche sur le simulateur. Par ailleurs, aucune rupture capsulaire postérieure n'a été observée lors du module d'hydrodissection.

c) **Scores et performances lors du DIVIDE AND CONQUER :**

➤ **Scores moyens DIVIDE and CONQUER.**

Les scores moyens pour l'étape "Divide and Conquer" varient significativement entre les groupes. Les enseignants (groupe 2B) obtiennent un score moyen de 93,00 ( $\pm 4,32$ ), tandis que les résidents avancés (groupe 2A) atteignent 50,92 ( $\pm 42,13$ ), et les résidents novices (groupe 1) obtiennent un score moyen de 30,86 ( $\pm 25,42$ ). Une analyse ANOVA révèle une différence statistiquement significative ( $p = 0,001$ ), mettant en évidence une maîtrise progressive du module en fonction de l'expérience (**Figure 98**).



**Figure 98: Scores moyens réalisés dans l'étape "Divide and Conquer" selon les groupes d'expérience**

**Tableau 10: Comparaisons inter-groupes des scores moyens réalisés dans l'étape divide and conquer.**

Comparaison ANOVA	Groupe 1 Groupe 2A Groupe 2B	Groupe 1 Groupe 2B	Groupe 2A Groupe 2B	Groupe 1 Groupe 2A
valeur p	0,001	0,0001	0,094	0,224

➤ **Temps moyen pour l'étape "Divide and Conquer"**

Les enseignants accomplissent cette étape en un temps significativement plus court (220,75 secondes  $\pm$ 68,17) (3 minutes 41 secondes  $\pm$ 1 minute 8 secondes), comparé aux résidents avancés (357,25 secondes  $\pm$ 154,81) (5 minutes 57 secondes  $\pm$ 2 minutes 35 secondes) et aux novices (373,88 secondes  $\pm$ 110,80) (6 minutes 14 secondes  $\pm$ 1 minute 51 secondes). Bien que la valeur  $p = 0,072$  n'indique pas de différence statistiquement significative, les résultats montrent une tendance claire à une meilleure efficacité avec l'expérience.

➤ **Quantité moyenne d'énergie ultrasonique (US) fuitée**

Fuite dans le sac capsulaire : La quantité moyenne d'énergie ultrasonique (US) fuitée dans le sac diminue avec l'expérience des participants. Les enseignants (groupe 2B) enregistrent une fuite moyenne de 137,41 ( $\pm$  36,69), significativement inférieure à celle des résidents avancés (groupe 2A) avec 237,83 ( $\pm$  90,61) et des novices (groupe 1) avec 232,02 ( $\pm$  90,18). Bien que ces différences indiquent une meilleure gestion de l'énergie ultrasonique par les enseignants, elles ne sont pas statistiquement significatives ( $p = 0,141$ ).

Fuite dans la chambre antérieure : De manière similaire, la quantité moyenne d'énergie US fuitée dans la chambre antérieure est également plus faible chez les enseignants (groupe 2B), avec une moyenne de 33,92 ( $\pm$  9,03), contre 48,63 ( $\pm$ 31,06) pour les novices (groupe 1) et 77,69 ( $\pm$ 38,05) pour les résidents avancés (groupe 2A). Ces résultats suggèrent une meilleure maîtrise technique chez les enseignants, bien que les différences entre les groupes ne soient pas statistiquement significatives ( $p = 0,128$ ).

**Tableau 11: Quantité moyenne d'énergie ultrasonique (US) fuitée dans le sac et dans la chambre antérieure**

	Quantité d'US fuitée dans le sac (moyenne $\pm$ écart-type)	Quantité d'US fuitée dans la CA (moyenne $\pm$ écart-type)
Résidents novices (Groupe 1)	232.02 $\pm$ 90.18	48.63 $\pm$ 31.06
Résidents avancés (Groupe 2A)	237.83 $\pm$ 90.61	77.69 $\pm$ 38.05
Enseignants (Groupe 2B)	137.41 $\pm$ 36.69	33.92 $\pm$ 9.03
Valeur p (ANOVA)	p=0,141	p=0,128

➤ **Complications lors de 'Divide And Conquer'**

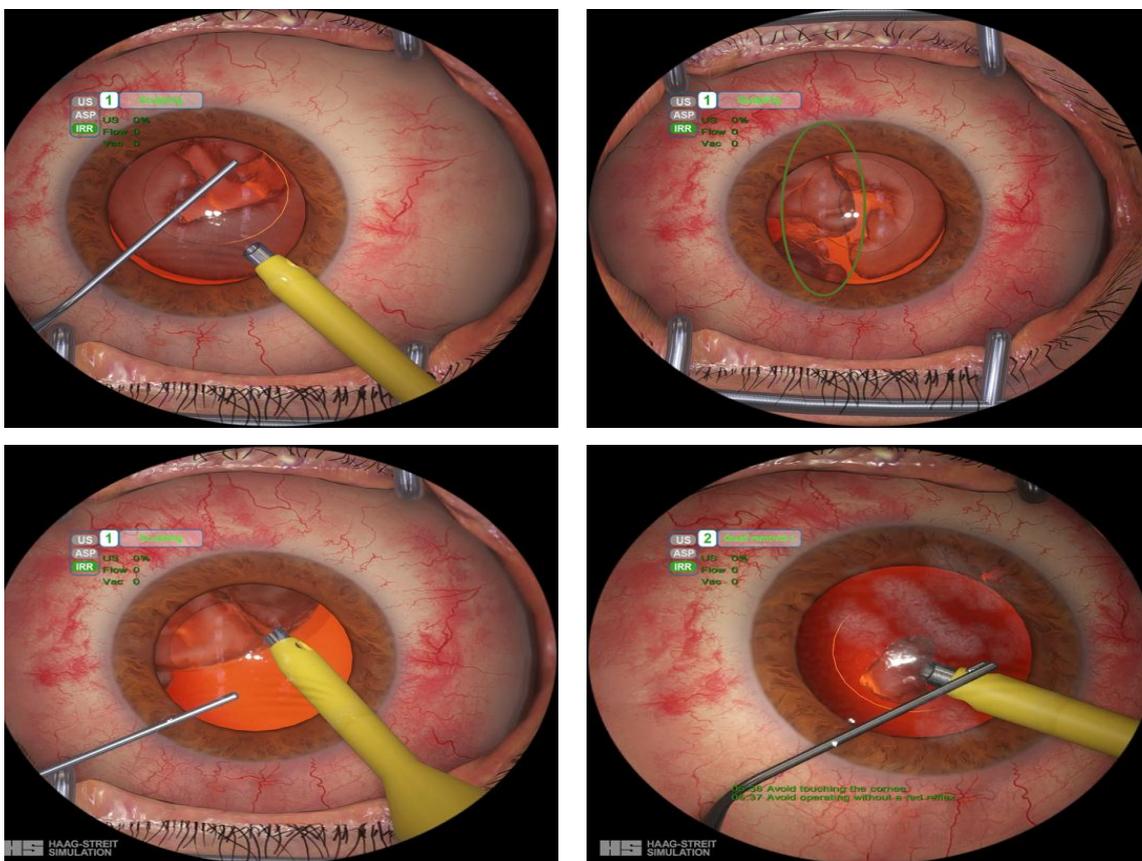
La surface moyenne de cornée lésée est la plus faible chez les enseignants ( $0,00 \text{ mm}^2$ ), suivie des résidents avancés ( $1,07 \text{ mm}^2 \pm 1,24$ ) et des novices ( $0,76 \text{ mm}^2 \pm 2,05$ ). Bien que les enseignants affichent de meilleurs résultats, la valeur p ( $p = 0,679$ ) indique que les différences ne sont pas significatives.

Concernant les fibres zonulaires endommagées, Les novices enregistrent une moyenne de  $15,55 \% (\pm 15,04)$ , tandis que les résidents avancés et les enseignants n'ont enregistré aucune lésion. Les différences entre les groupes sont statistiquement significatives ( $p = 0,033$ ), soulignant une meilleure capacité des groupes expérimentés à éviter cette complication tissulaire.

En ce qui concerne les ruptures capsulaires postérieures (RCP), les différences entre les groupes sont statistiquement significatives ( $p = 0,002$ ), mettant en évidence une meilleure capacité des groupes expérimentés à éviter cette complication. Les enseignants (groupe 2B) et les résidents avancés (groupe 2A) n'ont enregistré aucune rupture, tandis que les novices (groupe 1) ont présenté une moyenne de  $1,29 \text{ RCP} (\pm 0,85)$  (Tableau 12 et Figure 99).

**Tableau 12: Complications par groupe lors de l'étape "Divide and Conquer"**

	Surface moyenne de cornée lésée (en mm <sup>2</sup> ) (moyenne ± écart-type)	Moyenne de fibres zonulaires endommagées (en %) (moyenne ± écart-type)	Nombre de RCP (moyenne ± écart-type)
Résidents novices (Groupe 1)	0.763 ±2.05	15.55 ±15.05	1.29 ±0.85
Résidents avancés (Groupe 2A)	1.07 ±1.24	0.00 ±0.00	0.00 ±0.00
Enseignants (Groupe 2B)	0.00 ±0.00	0.00 ±0.00	0.00 ±0.00
Valeur p (ANOVA)	p=0,679	p=0,033	p=0,002



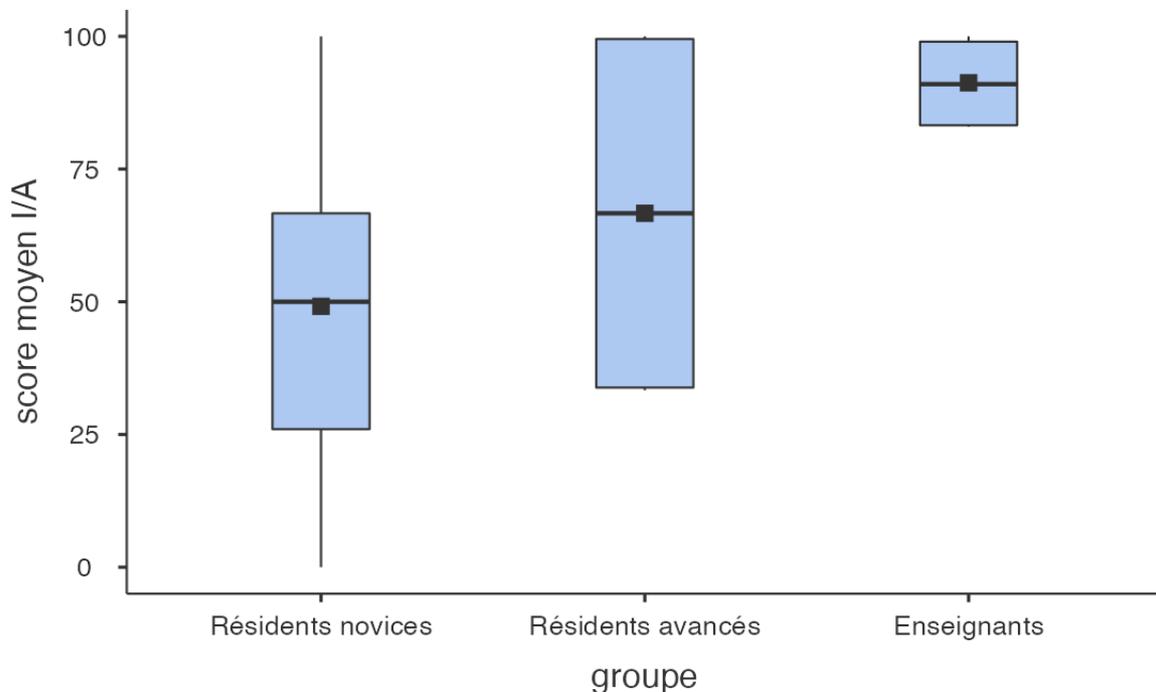
**Figure 99: Cette figure présente plusieurs complications survenues au cours de la phacoémulsification du noyau, illustrées dans quatre sous-images. En haut à gauche : Fibres zonulaires endommagées sur une étendue de 10h à 3h. En haut à droite : Rupture capsulaire postérieure (RCP), entourée en vert, survenue durant la manipulation du noyau. En bas à gauche : Dommages zonulaires sévères avec luxation complète du noyau dans le vitré. En bas à droite : Dommages cornéens significatifs accompagnés d'une rupture capsulaire postérieure.**

#### d) Scores et performances lors de l'aspiration de masses corticales

##### ➤ Scores moyens d'aspiration des masses corticales

Les scores moyens pour l'étape d'aspiration des masses montrent une performance supérieure chez les enseignants, avec un score moyen de 91,25 ( $\pm 9,35$ ), suivis des résidents avancés (groupe 2A) avec un score de 66,67 ( $\pm 38,11$ ), et des novices (groupe 1) avec 49,14 ( $\pm 29,02$ ). la comparaison des scores intergroupes montre une différence particulièrement marquée entre le groupe 1 (novices) et le groupe 2B (enseignants) ( $p=0,011$ ) (Scores moyens réalisés dans l'étape d'aspiration des masses selon les groupes d'expérience

Tableau 13).



**Figure 100: Scores moyens réalisés dans l'étape d'aspiration des masses selon les groupes d'expérience**

**Tableau 13: Comparaisons inter-groupes des scores moyens réalisés dans l'étape aspiration des masses**

Comparaison ANOVA	Groupe 1 Groupe 2A Groupe 2B	Groupe 1 Groupe 2B	Groupe 2A Groupe 2B	Groupe 1 Groupe 2A
valeur p	<b>0,042</b>	<b>0,011</b>	0,257	0,316

➤ **Temps moyen d'aspiration des masses corticales**

Le temps moyen nécessaire pour effectuer l'aspiration des masses varie légèrement entre les groupes, mais les différences ne sont pas statistiquement significatives ( $p = 0,721$ ). Les enseignants (groupe 2B) réalisent cette étape en un temps moyen de 143,75 secondes  $\pm 49,20$  (2 minutes 24 secondes  $\pm 49$  secondes), suivi des novices (groupe 1) avec 157,35 secondes  $\pm 89,66$  (2 minutes 37 secondes  $\pm 1$  minute 30 secondes), et des résidents avancés (groupe 2A) qui prennent en moyenne 188,75 secondes  $\pm 64,03$  (3 minutes 8 secondes  $\pm 1$  minute 4 secondes). Bien que les enseignants soient légèrement plus rapides que les autres groupes, ces résultats suggèrent une relative uniformité dans le temps requis pour cette étape, indépendamment du niveau d'expérience ( $p = 0,721$ ).

➤ **Complications lors de l'aspiration des masses corticales**

La surface moyenne de cornée lésée est la plus faible chez les enseignants (groupe 2B), suivie des résidents avancés (groupe 2A) avec  $0,14 \text{ mm}^2 \pm 0,28$ , et des novices (groupe 1) avec  $0,35 \text{ mm}^2 \pm 0,94$ . Ces différences ne sont pas statistiquement significatives ( $p = 0,697$ ), ce qui suggère une gestion acceptable de cette étape par tous les groupes.

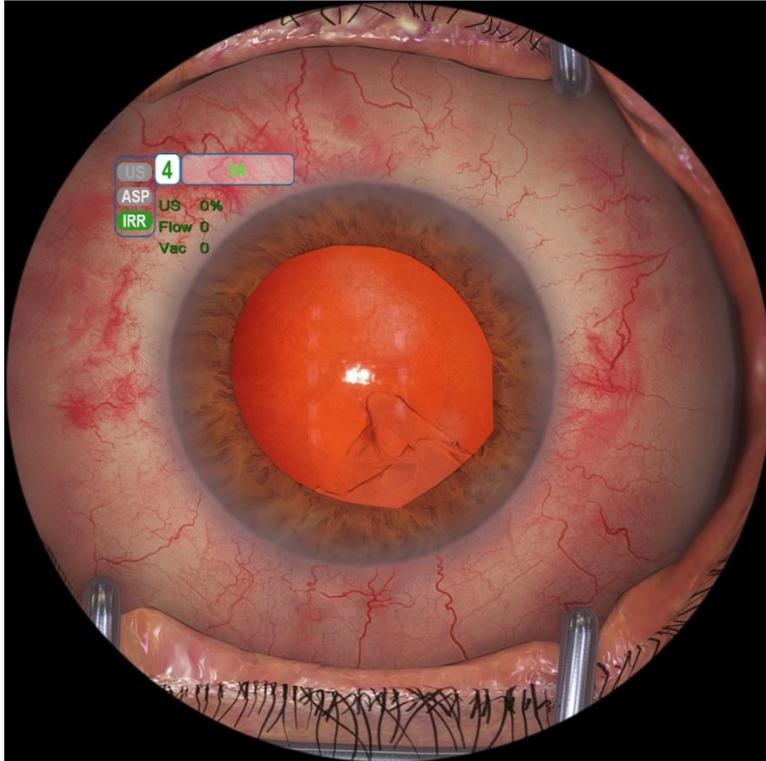
En ce qui concerne les fibres zonulaires endommagées, la moyenne diminue avec l'expérience. Les enseignants (groupe 2B) enregistrent une

moyenne très faible de  $0,05 \% \pm 0,10$ , suivis des résidents avancés (groupe 2A) qui n'ont observé aucun dommage ( $0,00 \pm 0,00$ ), tandis que les novices (groupe 1) présentent une moyenne plus élevée avec  $2,07 \% (\pm 4,09)$ . Les différences entre les groupes ne sont toutefois pas significatives ( $p = 0,406$ ), ce qui suggère que tous les groupes réussissent à minimiser cette complication dans une mesure raisonnable.

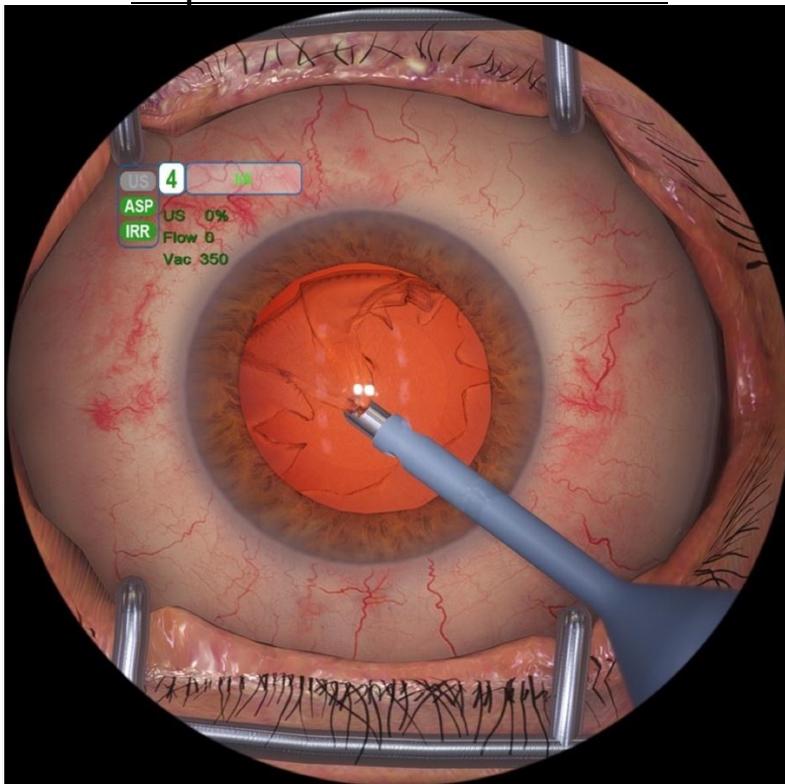
Enfin, le nombre moyen de ruptures capsulaires postérieures (RCP) diminue de manière significative avec l'expérience ( $p = 0,032$ ). Les enseignants (groupe 2B) ont enregistré une moyenne de  $0,50 \text{ RCP} \pm 0,58$ , les résidents avancés (groupe 2A) une moyenne de  $1,25 \text{ RCP} (\pm 1,50)$  et les novices (groupe 1) présentent le plus grand nombre moyen de RCP avec  $2,18 (\pm 1,13)$ . Ces résultats soulignent l'importance de l'expérience dans la gestion des étapes critiques.

**Tableau 14: Complications par groupe lors de l'aspiration des masses corticales.**

	Surface moyenne de cornée lésée (en mm <sup>2</sup> ) (moyenne $\pm$ écart-type)	Moyenne de fibres zonulaires endommagée (en %) (moyenne $\pm$ écart-type)	Nombre de RCP (moyenne $\pm$ écart-type)
Résidents novices (Groupe 1)	$0.35 \pm 0.94$	$2.07 \pm 4.09$	$2.18 \pm 1.13$
Résidents avancés (Groupe 2A)	$0.14 \pm 0.28$	$0.00 \pm 0.00$	$1.25 \pm 1.50$
Enseignants (Groupe 2B)	$0.00 \pm 0.00$	$0.05 \pm 0.10$	$0.50 \pm 0.58$
Valeur p (ANOVA)	$p=0,697$	$p=0,406$	<b><math>p=0,032</math></b>



**Figure 101: Grande rupture capsulaire postérieure survenue lors de l'aspiration d'une masse vers midi**



**Figure 102: Dommages important des fibres zonulaires avec désinsertion du sac survenue lors de l'aspiration des masses corticales.**

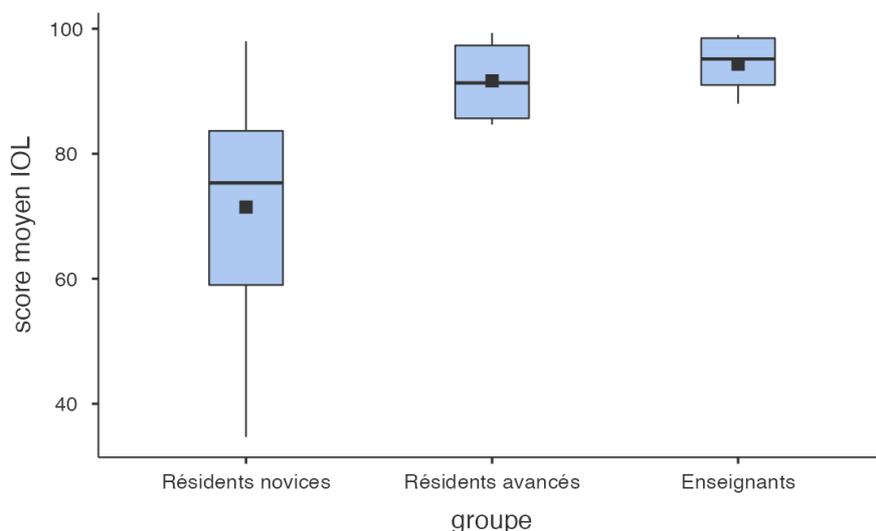
## e) Scores et performances lors de l'implantation d'un implant pliable

### ➤ Scores moyens d'implantation d'un implant pliable

Lors de l'étape d'implantation, les enseignants obtiennent les scores les plus élevés ( $94,33 \pm 5,27$ ), suivis des résidents avancés avec une moyenne de  $91,67 (\pm 7,41)$  et des novices avec  $71,47 (\pm 17,73)$ . La différence entre les groupes est statistiquement significative ( $p = 0,013$ ), confirmant que la performance à cette étape est fortement influencée par le niveau d'expérience des participants.

La comparaison intergroupes révèle une différence particulièrement marquée entre les novices (groupe 1) et les enseignants (groupe 2B), avec une valeur p de 0,021 (Scores moyens réalisés dans l'étape d'implantation selon les différents groupes d'expérience

Tableau 15), soulignant que l'expérience joue un rôle crucial dans la réussite de l'implantation.



**Figure 103: Scores moyens réalisés dans l'étape d'implantation selon les différents groupes d'expérience**

**Tableau 15: Comparaisons inter-groupes des scores moyens réalisés dans l'étape implantation.**

Comparaison ANOVA	Groupe 1 Groupe 2A Groupe 2B	Groupe 1 Groupe 2B	Groupe 2A Groupe 2B	Groupe 1 Groupe 2A
valeur p	<b>0,013</b>	<b>0,021</b>	0,579	<b>0,041</b>

➤ **Temps moyen pour l'implantation d'un implant pliable**

Le temps moyen nécessaire pour réaliser l'implantation est significativement plus court chez les enseignants (109,50 secondes  $\pm$  17,71) (1 minute 49 secondes  $\pm$  18 secondes) et les résidents avancés (97,75 secondes  $\pm$  30,19) (1 minute 38 secondes  $\pm$  30 secondes) par rapport aux novices (149,41 secondes  $\pm$  42,46) (2 minutes 29 secondes  $\pm$  42 secondes). Ces différences sont statistiquement significatives ( $p = 0,034$ ), mettant en avant une meilleure efficacité avec l'expérience.

➤ **Moyenne du pourcentage du produit viscoélastique restant**

La moyenne du pourcentage de produit viscoélastique restant est relativement faible et similaire entre les groupes. Les enseignants (groupe 2B) enregistrent une moyenne de 0,06 %  $\pm$  0,05, comparable aux résidents avancés (groupe 2A) avec 0,03 %  $\pm$  0,02 et aux novices (groupe 1) avec 0,07%  $\pm$  0,06. Ces différences ne sont pas statistiquement significatives ( $p=0,513$ ), reflétant une performance globalement homogène entre les groupes pour ce paramètre.

➤ **Complications lors de l'implantation.**

La surface moyenne de cornée lésée est nulle chez les enseignants (0,00 mm<sup>2</sup>), faible chez les résidents avancés (0,10 mm<sup>2</sup>  $\pm$  0,13) et légèrement plus

élevée chez les novices ( $0,46 \text{ mm}^2 \pm 0,72$ ). Bien que les résultats montrent des différences entre les groupes, ces différences ne sont pas statistiquement significatives ( $p = 0,323$ ).

En ce qui concerne les lésions des fibres zonulaires, Les enseignants et résidents avancés n'enregistrent aucun dommage, tandis que les novices présentent une moyenne de  $0,65\% \pm 2,69$ . Cette différence n'est pas significative ( $p = 0,804$ ).

Quant aux ruptures capsulaires postérieures (RCP), leur nombre moyen est extrêmement faible dans l'étape d'implantation, particulièrement pour les résidents avancés (groupe 2A) et les enseignants (groupe 2B), qui n'enregistrent aucune rupture. Les novices (groupe 1) présentent une moyenne légèrement plus élevée de  $0,06 \pm 0,24$ . Toutefois, les différences ne sont pas significatives ( $p = 0,804$ ).

**Tableau 16: Complications par groupe lors de l'étape d'implantation.**

	Surface moyenne de cornée lésée (moyenne $\pm$ écart-type)	Moyenne de fibres zonulaires endommagés (en %) (moyenne $\pm$ écart-type)	Nombre de RCP (moyenne $\pm$ écart-type)
Résidents novices (Groupe 1)	$0.46 \pm 0.72$	$0.65 \pm 2.69$	$0.06 \pm 0.24$
Résidents avancés (Groupe 2A)	$0.10 \pm 0.13$	$0.00 \pm 0.00$	$0.00 \pm 0.00$
Enseignants (Groupe 2B)	$0.00 \pm 0.00$	$0.00 \pm 0.00$	$0.00 \pm 0.00$
Valeur p (ANOVA)	$p=0,323$	$p=0,804$	$p=0,804$

### 3. Évaluation des performances via l'OSACSS

#### a) Scores globaux d'OSACSS:

Les scores globaux OSACSS, reflétant les performances évaluées par un enseignant à partir d'un enregistrement vidéo de la dernière itération, augmentent légèrement en fonction du niveau d'expérience. Les novices (groupe 1) obtiennent un score moyen de  $65,00 \pm 11,70$ , tandis que les résidents avancés (groupe 2A) et les enseignants (groupe 2B) affichent des scores moyens respectifs de  $73,00 \pm 6,22$  et  $72,25 \pm 5,91$ . Cependant, La différence entre les groupes n'est pas statistiquement significative ( $p = 0,257$ ) (Tableau 17).

**Tableau 17: Scores globaux d'OSACSS selon les groupes d'expérience.**

	Score OSACSS global (de 15 à 80) (moyenne $\pm$ écart-type)	valeur p (ANOVA)
Résidents novices (Groupe 1)	$65.00 \pm 11.70$	
Résidents avancés (Groupe 2A)	$73.00 \pm 6.22$	0,257
Enseignants (Groupe 2B)	$72.25 \pm 5.91$	

#### b) Analyse détaillée des items d'OSACSS (Tableau 18)

##### ➤ Capsulorhexis

Les enseignants obtiennent le score moyen le plus élevé pour cette étape avec une moyenne de 14,00 ( $\pm 1,414$ ), suivis des résidents avancés avec 13,50 ( $\pm 1,732$ ), et des résidents novices avec 12,59 ( $\pm 2,093$ ). Toutefois, Cette différence entre les groupes n'est pas statistiquement significative ( $p = 0,379$ ).

##### ➤ Hydrodissection

Les enseignants atteignent le score maximal possible ( $5,00 \pm 0,000$ ), contre  $4,50 \pm 0,577$  pour les résidents avancés et  $4,41 \pm 0,870$  pour les novices. Bien que les enseignants montrent une performance légèrement meilleure, les différences ne sont pas significatives ( $p = 0,405$ ).

➤ **Divide and conquer**

Les résidents avancés et les enseignants obtiennent des scores similaires (23,00) avec des écarts-types de  $\pm 2,828$  et  $\pm 3,367$  respectivement. Les novices obtiennent un score inférieur de 19,35 ( $\pm 5,408$ ). La valeur de  $p=0,242$  indique qu'il n'y a pas de différence significative entre les groupes.

➤ **Aspiration de masses**

Les résidents avancés obtiennent le score moyen le plus élevé pour cette étape avec une moyenne de  $4,75 \pm 0,5$  suivis des enseignants avec  $4,50 \pm 0,577$ , et des résidents novices avec  $3,88 \pm 1,166$ . Cependant, les différences entre les groupes ne sont pas significatives ( $p = 0,253$ ).

➤ **Implantation**

Les résidents avancés atteignent le score maximal possible 5,00, tandis que les enseignants obtiennent une moyenne de  $4,75 \pm 0,500$ , et les novices  $4,47 \pm 0,717$ . Bien que les enseignants et les résidents avancés présentent des scores plus élevés, la différence entre les groupes reste non significative ( $p = 0,308$ ).

**Tableau 18: Comparaison des scores OSACSS par groupe pour chaque étape de la procédure chirurgicale.**

	groupe	Moyenne (± écart-type)	Valeur p (ANOVA)
Score OSACSS capsulorhexis (de 3 à 15)	Résidents novices	12.59 ±2.093	0,379
	Résidents avancés	13.50 ±1.7732	
	Enseignants	14.00 ±1.414	
Score OSACSS hydrodissection (de 1 à 5)	Résidents novices	4.41 ±0.870	0,405
	Résidents avancés	4.50 ±0.577	
	Enseignants	5.00 ±0.00	
Score OSACSS divide and conquer (de 5 à 25)	Résidents novices	19.35 ±5.408	0,242
	Résidents avancés	23.00 ±2.828	
	Enseignants	23.00 ±3.367	
Score OSACSS aspiration de masses (de 1 à 5)	Résidents novices	3.88 ±1.166	0,253
	Résidents avancés	4.75 ±0.500	
	Enseignants	4.50 ±0.577	
Score OSACSS Implantation (de 1 à 5)	Résidents novices	4.47±0.717	0,308
	Résidents avancés	5.00 ±0.00	
	Enseignants	4.75 ±0.500	

### c) Corrélation entre les scores Eyesi et les scores OSACSS (Tableau 19)

#### ➤ Capsulorhexis

Une corrélation modérée et significative est observée entre les scores Eyesi et OSACSS pour cette étape, avec un coefficient de Pearson  $r = 0,469$  ( $p = 0,018$ ). Cette corrélation suggère qu'à mesure que les performances sur le simulateur Eyesi s'améliorent, les scores évalués à l'aide de l'OSACSS augmentent également.

#### ➤ Hydrodissection

La corrélation pour cette étape est également modérée mais plus faible ( $r = 0,406$ ), tout en restant significative ( $p = 0,044$ ). Cela indique qu'une

relation positive existe entre les scores Eyesi et OSACSS, bien que la force de cette corrélation soit moindre que celle observée pour le capsulorhexis.

➤ **Divide and Conquer**

Cette étape montre la corrélation la plus forte entre les scores Eyesi et OSACSS, avec un coefficient  $r = 0,618$  ( $p = 0,001$ ). Cette corrélation forte et significative suggère que les performances évaluées à la fois sur le simulateur Eyesi et par l'OSACSS sont étroitement liées dans cette phase de la procédure.

➤ **Aspiration des masses**

Une corrélation similaire à celle du module précédent est observée ( $r = 0,641$ ,  $p = 0,001$ ). Ce résultat indique une relation positive et forte entre les scores Eyesi et OSACSS, soulignant que ces deux outils d'évaluation mesurent de manière cohérente les compétences des participants pour cette étape.

➤ **Implantation**

Cette étape montre une corrélation faible et non significative ( $r = 0,289$ ,  $p = 0,161$ ). L'intervalle de confiance  $[-0,120 ; 0,614]$ , ce qui indique l'absence d'une relation fiable entre les deux outils d'évaluation pour cette tâche.

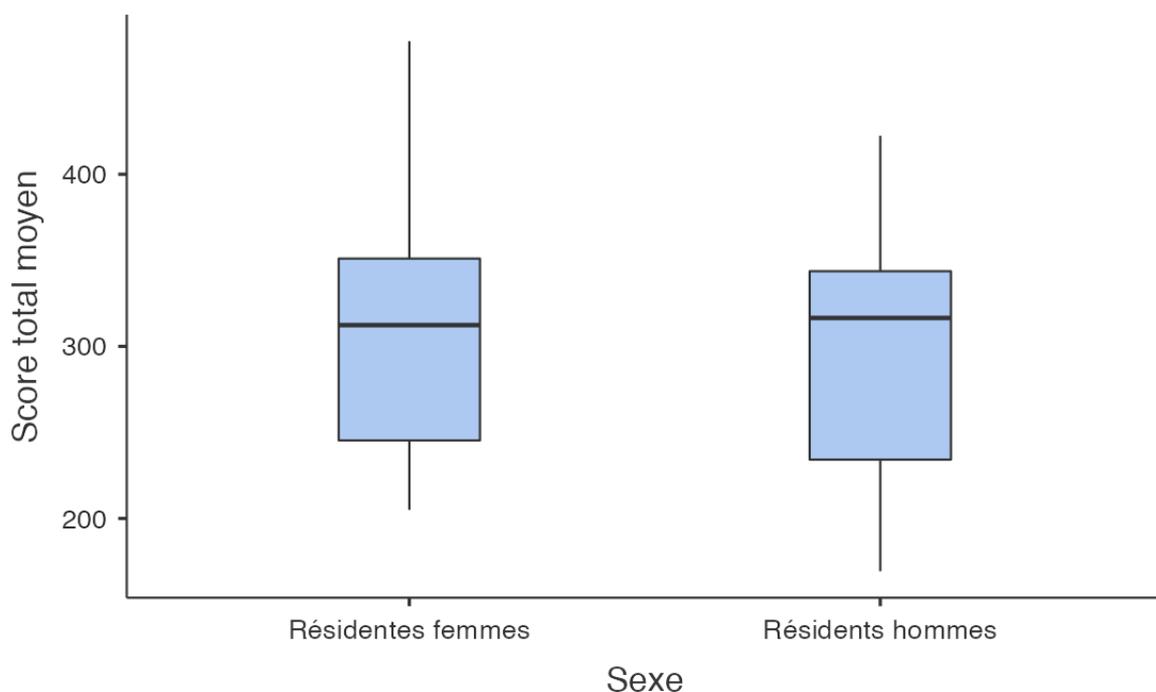
**Tableau 19: Corrélation entre les scores Eyesi et OSACSS pour chaque étape de la procédure chirurgicale**

	Coefficient rho de Pearson	Valeur p (Pearson)	IC à 95%
Capsulorhexis	$r=0,469$	<b><math>p=0,018</math></b>	[0,090 ; 0,729]
Hydrodissection	$r=0,406$	<b><math>p=0,044</math></b>	[0,013 ; 0,691]
Divide and conquer	$r=0,618$	<b><math>p=0,001</math></b>	[0,295 ; 0,814]
Aspiration des masses	$r=0,641$	<b><math>p=0,001</math></b>	[0,330 ; 0,827]
Implantation	$r=0,289$	$p=0,161$	$[-0,120 ; 0,614]$
Global	$r=0,679$	<b><math>p=0,001</math></b>	[0,387 ; 0,847]

#### 4. Les facteurs influençant les performances sur le simulateur EyeSi

##### a) Analyse de l'impact du sexe sur les performances

L'analyse des performances en fonction du sexe chez les résidents (groupes 1 et 2A) dans notre étude n'a révélé aucune différence statistiquement significative ni dans les scores de chaque étape, ni dans le score global ( $p = 0,738$ ) (**Figure 104**). Bien que les résidentes de sexe féminin aient obtenu des scores légèrement supérieurs aux résidents de sexe masculin pour certains modules, ces différences ne sont pas statistiquement significatives. Par exemple, pour l'étape du capsulorhexis, les femmes ont enregistré un score moyen de  $55,3 \pm 30,35$  contre  $47,6 \pm 24,41$  pour les hommes ( $p = 0,553$ ). De même, lors de l'étape de l'implantation, les résidentes féminines ont obtenu un score moyen de  $79,7 \pm 11,73$ , comparativement à  $68,10 \pm 24,48$  chez les résidents masculins ( $p = 0,157$ ).



**Figure 104: Impact du sexe des résidents sur le score total des performances chirurgicales**

**Tableau 20: Impact du sexe des résidents sur leur scores par modules.**

	Résidents de sexe masculin (N=8)	Résidentes de sexe féminin (N=13)	Valeur p (t-student)
Score moyen capsulorhexis (± écart-type)	47,6 (± 24,41)	55,3 (± 30,35)	0,553
Score moyen hydrodissection (± écart-type)	92,5 (±7,63 )	93,4 (± 11,19)	0,849
Score moyen divide and conquer (± écart-type)	42,6 (± 28,89)	29,8 (±29,30)	0,340
Score moyen aspiration des masses (± écart-type)	49,3(± 31,51)	54,4 (±31,29)	0,723
Score moyen implantation (± écart-type)	68,10 (± 24,48)	79,7 (±11,73)	0,157

### b) Analyse de l'impact de l'expérience en EEC

Une analyse des novices (groupe 1) révèle que les opérateurs ayant une expérience en EEC obtiennent des scores légèrement supérieurs pour certaines étapes de la procédure. Par exemple, le score moyen pour le capsulorhexis est de 54,14 (± 27,90) pour les opérateurs expérimentés en EEC, comparativement à 43,80 (± 30,62) pour ceux sans expérience préalable. Cependant, aucune différence statistiquement significative n'a été observée pour cette étape ( $p = 0,508$ ), ni pour les autres scores relatifs aux étapes suivantes : hydrodissection, divide and conquer, aspiration des masses, et implantation.

Ces résultats suggèrent que, bien que l'expérience en EEC puisse améliorer légèrement les performances dans des compétences spécifiques

telles que le capsulorhexis, elle n'a pas d'impact significatif sur la performance globale des novices dans l'ensemble des étapes de la procédure (Tableau 21). Ainsi, l'expérience préalable en EEC pourrait favoriser le développement de certaines compétences techniques particulières sans toutefois influencer de manière générale les performances globales des opérateurs novices.

**Tableau 21: Impact de l'expérience en extraction extracapsulaire sur les performances des novices.**

	Opérateurs EEC du groupe 1	Non opérateurs EEC du groupe 1	Valeur p (ANOVA)
Score moyen capsulorhexis (± écart-type)	54,14 (± 27,90)	43,80 (±30,62)	0,508
Score moyen hydrodissection (± écart-type)	94,83 (± 6,94)	86,60 (± 15,36)	0,140
Score moyen divide and conquer (± écart-type)	24,20 (± 17,78)	33,64 (±28,22)	0,503
Score moyen aspiration des masses (± écart-type)	48,36 (± 32,64)	51,00 (±20,80)	0,871
Score moyen implantation (± écart-type)	62,20 (± 19,51)	75,33 (±16,23)	0,171

### c) Influence de la pratique des jeux vidéo sur les performances

Chez les résidents novices (groupe 1), les joueurs réguliers de jeux vidéo obtiennent des scores moyens plus élevés que les non-joueurs dans 4 modules sur 5 modules évalués, à l'exception de l'implantation. Par exemple, lors de l'étape "Divide and Conquer", les joueurs réguliers enregistrent un score moyen de 52,00 (± 31,49), contre 24,36 (± 20,47) pour les non-joueurs. Bien que cette différence soit proche de la significativité ( $p = 0,054$ ), elle n'atteint pas le seuil statistique conventionnel.

De même, D'autres étapes, comme le capsulorhexis et l'aspiration des masses, montrent également des tendances similaires en faveur des joueurs réguliers. Cependant, les valeurs p associées à ces différences restent non significatives, indiquant qu'il n'y a pas de preuve statistique suffisante pour conclure à un effet réel de la pratique des jeux vidéo sur ces performances spécifiques (Tableau 22).

**Tableau 22: Influence de la pratique des jeux vidéo sur les performances des résidents novices.**

	Score moyen capsulorhexis (± écart-type)	Score moyen hydrodissection (± écart-type)	Score moyen divide and conquer (± écart-type)	Score moyen aspiration des masses (± écart-type)	Score moyen implantation (± écart-type)
Non joueurs N=13	46.00±29.52	42.56±27.75	24.36±20.47	42.56±27.75	72.59±14.91
Joueurs N=4	67.66±16.34	70.50±24.78	52.00±31.49	70.50±24.78	67.83±27.65
Valeur p (ANOVA)	0,187	0,458	<b>0,054</b>	0,092	0,654

Dans les groupes avancés (groupe 2A et 2B), les joueurs réguliers présentent également des scores plus élevés pour certaines étapes de la procédure. Cependant, les écarts de performance entre joueurs réguliers et non-joueurs sont moins marqués comparativement aux résidents novices. Toutefois, cet effet positif semble diminuer à mesure que l'expérience en chirurgie augmente, indiquant que l'influence des compétences acquises par le jeu vidéo est plus prononcée chez les opérateurs moins expérimentés (Tableau 23).

**Tableau 23 : Influence de la pratique des jeux vidéo sur les performances des résidents avancés (Groupes 2A et 2B) et des enseignants dans différentes étapes de la procédure chirurgicale**

	Score moyen capsulorhexis (± écart-type)	Score moyen hydrodissection (± écart-type)	Score moyen divide and conquer (± écart-type)	Score moyen aspiration des masses (± écart-type)	Score moyen implantation (± écart-type)
Non joueurs (N=5)	63.73 ± 29.88	96.53 ± 6.50	61.80 ± 42.95	83.27 ± 28.38	93.47 ± 7.45
Joueurs (N=3)	92.78 ± 9.35	99.55 ± 0,77	88.89 ± 9.18	71.78 ± 34.16	92.22 ± 4,34
Valeur p (ANOVA)	0,163	0,467	0,336	0,624	0,804

## XI. Discussion

La maîtrise de la phacoémulsification constitue un objectif essentiel dans la formation des résidents en ophtalmologie<sup>145</sup>. Historiquement, le modèle traditionnel de Halsted a dominé l'apprentissage chirurgical. Cependant, l'évolution des contextes avec des exigences croissantes en termes de respect des principes éthiques et la réduction du temps passé au bloc opératoire par les résidents<sup>3</sup>, impose l'intégration de modèles d'apprentissage alternatifs et validés. Former de nouvelles générations de chirurgiens pour répondre aux besoins d'une population croissante doit également s'inscrire dans le respect du principe fondamental de la médecine : *primum non nocere* ("d'abord, ne pas nuire"). La simulation s'impose comme une solution robuste permettant de concilier ces deux impératifs.

Au Maroc, le développement de la simulation médicale connaît une progression rapide<sup>59</sup>. En ophtalmologie, plusieurs études réalisées à Casablanca(2020)<sup>146</sup>, Tanger(2021)<sup>147</sup> et Marrakech(2022)<sup>148</sup> ont évalué l'EyeSi Surgical, considéré comme la référence en simulation de chirurgie ophtalmologique. Ces recherches ont unanimement démontré les avantages de son utilisation.

Dans notre travail, nous avons franchi une étape supplémentaire en analysant de manière approfondie et détaillée les modules d'une version récente de ce simulateur. Cette approche innovante nous a permis, pour la première fois, d'évaluer la validité de construction et de validité concurrente de certains exercices clés. Ces résultats mettent en lumière un potentiel significatif pour optimiser un outil pédagogique déjà adopté et validé par de nombreuses institutions internationales.

En outre, notre étude a identifié et exploré divers facteurs influençant les performances en simulation chirurgicale. Cette analyse offre une perspective enrichissante pour améliorer la formation des futurs chirurgiens, en tenant compte des variables pédagogiques et techniques susceptibles d'impacter leur apprentissage. Grâce à l'utilisation d'une version récente de l'EyeSi Surgical et à notre démarche méthodique, nous avons contribué à renforcer l'efficacité de la simulation en ophtalmologie, consolidant ainsi sa place centrale dans la formation chirurgicale moderne.

## A. Évaluation du simulateur EyeSi : Études, modules et méthodologie

### 1. Caractéristiques des études

Notre étude se distingue par l'utilisation de la version récente du simulateur EyeSi (version 3.10), un atout significatif comparé à de nombreuses études antérieures qui utilisaient des versions moins récentes, telles que la version 2.1 par Feudner et al. (2009), la version 2.5 par Selvander et Asman (2013), ou encore la version utilisée par Thomsen et al. (2015). En outre, notre échantillon de 25 participants, bien qu'intermédiaire, est plus représentatif que celui d'études telles que Baxter et al. (2013), qui n'incluait que 3 résidents, ou Nathoo et al. (2011), avec seulement 10 participants.

Nous avons intégré une diversité d'expériences en regroupant 17 résidents novices, 4 résidents avancés et 4 enseignants, ce qui a permis une analyse approfondie des performances. Contrairement à d'autres études, comme celles de Feudner et al. (2009) et Selvander et al. (2010), qui incluaient des étudiants en médecine, notre échantillon exclu ce groupe. Cette approche

a permis d'éliminer des facteurs confondants, tels que le manque de familiarité des étudiants avec certains aspects théoriques ou leurs limitations de dextérité, afin de mieux se concentrer sur l'effet de l'expérience chirurgicale.

Certaines études, comme celle de Yaïci et al. (2024), ont privilégié l'inclusion de participants avec des niveaux d'expérience plus élevés, ce qui peut sembler pertinent pour valider la construction du simulateur. Cependant, il est essentiel de rappeler que le simulateur EyeSi est principalement conçu pour l'apprentissage et la progression des novices. Ainsi, notre répartition en trois groupes – résidents novices, résidents avancés et enseignants – s'avère particulièrement adaptée pour répondre à l'objectif principal du simulateur, à savoir la formation et l'amélioration progressive des compétences chirurgicales.

**Tableau 24: Caractéristiques des études rapportées dans notre thèse.**

Étude	Pays Année	Version Eyesi	Taille de l'échantillon	Sujets étudiés
Mahr et Hodge <sup>120</sup>	États-Unis 2008	-	15	(a) résidents :12 (b) chirurgiens : 3
Feudner et al <sup>149</sup>	Allemagne 2009	2.1	62	(a) étudiants : 30 (b) résidents : 32
Selvander et al <sup>144</sup>	Suède 2010	2.4	35	étudiants en médecine : 35
Privett et al <sup>119</sup>	États-Unis 2010	2.5.1	23	(a) étudiants et résidents en 1 <sup>ère</sup> année : 16 (b) chirurgiens : 7 Expérience similaire jeux-vidéo
Nathoo et al <sup>150</sup>	Canada 2011	2.3	10	(a)résidents novices :5 (b) résidents avancés :5
Belyea et al <sup>121</sup>	États-Unis 2011	-	42	(a) résidents, groupe simulateur : 17 (b) résidents, groupe contrôle : 25
Selvander et Asman <sup>151</sup>	Suède 2013	2.5	24	(a) étudiants en médecine : 17 (b) chirurgiens : 7
Daly et al <sup>152</sup>	États-Unis 2013	-	21	(a) résidents, groupe wet-lab : 10 (b) résidents, groupe Eyesi : 11
Pokroy et al <sup>153</sup>	États-Unis 2013	-	20	(a) résidents, groupe simulateur : 10 (b) résidents, groupe contrôle : 10
Baxter et al <sup>154</sup>	Royaume-Uni 2013	-	3	Résidents : 3
Spiteri et al <sup>145</sup>	Royaume-Uni 2014	-	30	(a) chirurgiens débutants : 10 (b) chirurgiens intermédiaires : 10 (c) chirurgiens experts : 10
Thomsen et al <sup>155</sup>	Danemark 2015	2.8.10	42	(a) résidents novices : 26 (b) segmentistes antérieurs : 11 (c) chirurgiens vitréo-rétiniens : 5
Roohipor et al <sup>156</sup>	États-Unis/Iran 2017	-	30	Résidents (en 1 <sup>ère</sup> année puis en 3 <sup>ème</sup> année) : 30
Bozkurt et al <sup>157</sup>	Turquie 2018	-	16	(a)résidents novices :7 (b) résidents avancés :6 (c)chirurgiens experts : 3
Le et al <sup>158</sup>	Canada 2019	-	65	(a) étudiants : 4 (b) techniciens : 4 (c) résidents : 36 (d) chirurgiens : 18 (e) assistants :3
Colné et al <sup>101</sup>	France 2019	2.4	18	(a) internes novices :6 (b) internes intermédiaires : 6 (c) chirurgiens : 6
Adnane et al <sup>146</sup>	Maroc 2020	-	12	(a) résidents, groupe simulateur : 6 (b) résidents, groupe contrôle : 6
Yaïci et al <sup>159</sup>	France 2024	3.10	20	(a) chirurgiens >300 cataractes : 10 (b) chirurgiens <300 cataractes :10
Notre étude	Maroc 2024	3.10	25	(a) résidents novices :17 (b) résidents avancés :4 (c) enseignants : 4

## 2. Modules étudiés

Notre étude se distingue par l'évaluation des cinq étapes clés de la phacoémulsification, une approche peu fréquente dans la littérature. Les premières études sur le simulateur EyeSi se sont principalement concentrées sur les modules de tâches abstraites ou « basic skills » (Feudner et al., 2009) et sur le capsulorhexis (Privett et al., 2010). Parmi les travaux recensés, seules deux études, celles de Yaïci et al. (2024) et de Thomsen et al. (2015), ont évalué l'ensemble des modules fondamentaux de la phacoémulsification. Une autre étude, réalisée par Colné et al. (2019), s'est intéressée à trois des cinq étapes principales (capsulorhexis, phaco divide and conquer, et aspiration des masses).

Cependant, ces travaux se limitent souvent à l'analyse de paramètres globaux, tels que les scores finaux ou les temps d'exécution, sans approfondir les spécificités de chaque module. En revanche, notre étude se distingue par une analyse détaillée des performances et des complications pour chacun des cinq modules : capsulorhexis, hydrodissection, divide and conquer, aspiration des masses et insertion d'IOL. Cette approche nous permet d'obtenir une vision complète des paramètres influencés par l'expérience chirurgicale, en tenant compte des scores finaux, des tâches achevées, des temps d'exécution, de l'efficacité et du traitement des tissus.

**Tableau 25: Modules de chirurgie de cataracte évalués par étude.**

Étude	Basic skills	Capsulorhexis (niveau)	Hydrodissection	Divide and conquer	I/A	IOL
<b>Mahr et Hodge</b>	(a) Forceps (b) Anti-tremblement	Non	Non	Non	Non	Non
<b>Feudner et al.</b>	Non	<b>Oui</b>	Non	Non	Non	Non
<b>Selvander et al.</b>	Navigation	<b>Oui</b>	Non	Non	Non	Non
<b>Privett et al.</b>	Non	<b>Oui</b>	Non	Non	Non	Non
<b>Nathoo et al.</b>	(a) Forceps (b) anti-tremblement	Non	Non	Non	Non	Non
<b>Selvander et Asman.</b>	(a) Navigation (b) Forceps (c) Cracking et chopping (entraînement)	<b>Oui</b>	<b>Oui</b>	<b>Oui</b>	Non	Non
<b>Spiteri et al.</b>	(a) Forceps (b) Anti-tremblement	<b>Oui</b>	Non	<b>Oui</b>	Non	Non
<b>Thomsen et al.</b>	(a) Navigation (b) Entraînement bimanuel (c) Forceps (d) Anti-tremblement	<b>Oui</b>	<b>Oui</b>	<b>Oui</b>	<b>Oui</b>	<b>Oui</b>
<b>Rohipoor et al.</b>	(a) Navigation (b) Entraînement bimanuel (c) Forceps (d) Anti-tremblement	<b>Oui</b>	Non	Non	Non	Non
<b>Bozkurt et al.</b>	Non	<b>Oui</b>	Non	Non	Non	Non
<b>Le et al.</b>	(a) Forceps (b) Anti-tremblement	<b>Oui</b>	Non	Non	Non	Non
<b>Colné et al.</b>	Non	<b>Oui</b>	Non	<b>Oui</b>	<b>Oui</b>	Non
<b>Daly et al.</b>	Non	<b>Oui</b>	Non	Non	Non	Non
<b>Yaïci et al.</b>	Non	<b>Oui</b>	<b>Oui</b>	<b>Oui</b>	<b>Oui</b>	<b>Oui</b>
<b>Notre étude</b>	Non	<b>Oui</b>	<b>Oui</b>	<b>Oui</b>	<b>Oui</b>	<b>Oui</b>

### 3. Nombre de répétitions

En ce qui concerne le nombre de répétitions par exercice, nous avons adopté une méthodologie rigoureuse : chaque participant a effectué une tentative d'échauffement suivie de trois répétitions pour chaque exercice. Les moyennes des valeurs obtenues ont ensuite été calculées afin d'atténuer l'impact des performances exceptionnelles ou des échecs isolés sur les résultats globaux. De plus, la dernière tentative a été enregistrée en vidéo pour une évaluation qualitative par un enseignant, basée sur le score OSACSS, dans le cadre de l'évaluation de la validité concurrente.

Cette stratégie diffère de celles adoptées par d'autres études, telles que celles de **Privett et al. (2010)** et **Daly et al. (2013)**, qui se sont limitées à une ou deux répétitions. Bien que ces approches leur aient permis d'explorer un plus grand nombre de niveaux et d'exercices, elles risquent de produire des valeurs moins fiables. À l'opposé, des travaux comme ceux de **Selvander et al. (2010)** et **Nathoo et al. (2011)** ont réalisé jusqu'à 10 répétitions, mais principalement dans le but d'évaluer la progression ou les courbes d'apprentissage, un objectif distinct du nôtre.

**Tableau 26: Type de validité évaluée par chaque étude et nombre de répétitions effectués par les participants sur les modules évalués.**

Étude	Validité de construction	Validité concurrente	Validité prédictive	Autres objectifs	Nombre de répétitions
Mahr et Hodge	Oui	Non	Non	-	20
Feudner et al.	Non	Non	Oui	Impact d'EyeSi sur les performances en wet-labs	2
Selvander et al.	Non	Oui	Non	Progression	10
Privett et al.	Oui	Non	Non	-	2
Nathoo et al.	Oui	Non	Non	-	Répétitions nécessaires pour atteindre un score de 595/600
Belyea et al.	Non	Non	Oui	Courbe d'apprentissage	-
Selvander et Asman.	Oui	Non	Non	-	3 (2 pour l'exercice phaco)
Daly et al.	Non	Non	Oui	Comparaison aux wet-labs	4 (4 niveaux, 1 répétition par niveau)
Pokroy et al.	Non	Non	Oui	Complications et temps opératoire	-
Baxter et al.	Non	Non	Oui	Complications (RCP)	-
Spiteri et al.	Oui	Non	Non	Établir un programme de formation	2
Thomsen et al.	Oui	Oui	Non	Déterminer un score de maîtrise	2
Rohipoor et al.	Non	Non	Oui	-	-
Bozkurt et al.	Oui	Non	Non	-	5+ 1(main non dominante)+ 1 (cataracte mature)
Le et al.	Oui	Non	Non	-	3
Colné et al.	Oui	Non	Non	-	2
Adnane et al.	Non	Non	Oui	Complications et temps opératoire	30 heures de simulation
Yaïci et al.	Oui	Non	Non	Fatigue musculaire après simulation	1
Notre étude	Oui	Oui	Non		4

## **B. Validité des modules étudiés :**

L'adoption de tout nouvel instrument de simulation exige la démonstration préalable de sa validité scientifique et pédagogique <sup>160</sup>. Selon Gallagher et al<sup>100</sup> six critères permettent d'évaluer cette validité :

Notre étude se distingue par l'évaluation conjointe des **validités de construction et concurrente**, une approche peu courante dans les travaux existants sur le sujet. La plupart des études se concentrent sur une seule forme de validité, comme la validité de construction (Spiteri et al., 2014 ; Thomsen et al., 2015) ou la validité prédictive (Pokroy et al., 2013). Cependant, notre étude n'a pas inclus l'évaluation de la validité prédictive (Tableau 26).

### **1. Validité apparente :**

Ce critère évalue si l'instrument « semble » approprié à son objectif. Il repose sur une évaluation subjective réalisée par des experts, généralement lors des phases initiales de développement de l'outil. Cette évaluation vise à déterminer si l'outil paraît crédible et réaliste par rapport à la tâche ou compétence évaluée. Dans le cas d'un simulateur chirurgical, les experts jugeront la fidélité du rendu visuel, l'interaction avec l'environnement et les tissus, ainsi que la capacité à refléter la réalité de la pratique. Il s'agit donc d'une validation subjective

### **2. Validité de contenu :**

La validité de contenu repose sur une analyse plus approfondie réalisée par des experts pour vérifier si l'outil contient tous les éléments nécessaires à l'évaluation de la compétence ciblée. Cette analyse garantit que les tâches incluses dans le test ou le simulateur couvrent bien les étapes importantes du processus à évaluer. Par exemple, pour la phacoémulsification, cela inclut les

différentes étapes de la chirurgie ainsi que les éventuelles complications associées. Ce critère repose également sur une validation subjective.

### **3. Validité de construction :**

Gallagher définit la validité de construction comme étant « la capacité des éléments du test à identifier la qualité, l'aptitude ou la caractéristique qu'ils sont censés mesurer ». En pratique, cela implique que le simulateur doit pouvoir distinguer les novices des experts. Ce critère est donc essentiel pour vérifier que l'outil mesure bien ce qu'il prétend évaluer.

Plusieurs études ont été réalisées pour démontrer cette validité avant d'intégrer le simulateur comme un outil pédagogique dans la formation des résidents<sup>125</sup>. Ces travaux ont comparé les performances entre des groupes homogènes de chirurgiens expérimentés et novices sur divers modules d'entraînement, regroupés en deux catégories principales : les modules des compétences basiques et les modules d'entraînement chirurgical (procéduraux).

#### **a) Modules des compétences basiques :**

Ces modules couvrent des compétences générales non spécifiques à la chirurgie de cataracte :

##### **➤ Forceps Training :**

Ce module représente une tâche complexe pour les résidents novices, qui doivent s'entraîner à naviguer et manipuler dans la chambre antérieure sans provoquer de complications, telles que des lésions accidentelles de la cornée et du cristallin.

➤ **Anti-Tremor :**

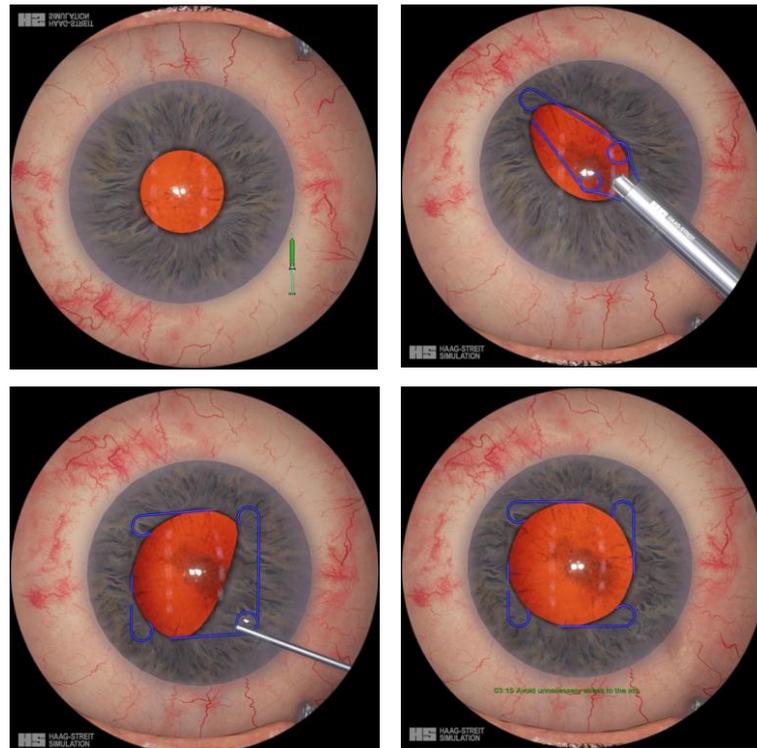
Ce module mesure et améliore la précision des mouvements intraoculaires. Sa conception le rend particulièrement adapté pour développer la dextérité des chirurgiens novices, les plaçant dans une situation où la rapidité peut nuire à la précision et à la sécurité des gestes chirurgicaux.

De nombreuses études ont prouvé la validité de construction de ces modules, notamment les études de **Mahr et Hodge**<sup>120</sup> qui ont rapporté que les chirurgiens expérimentés réalisaient des performances nettement supérieures à celles des novices, en termes de temps global de travail et de réduction des blessures accidentelles<sup>150,156</sup>. **Nathoo et al. (2011)**<sup>150</sup> ont montré, dans une étude rétrospective incluant 10 résidents, que les participants expérimentés atteignaient plus rapidement les objectifs des modules forceps et anti-tremblement ( $p = 0.022$ ).

**b) Modules d'entraînement chirurgical (procéduraux) :**

Les modules d'entraînement procéduraux pour la chirurgie de la cataracte incluent des exercices clés tels que le capsulorhexis, de manœuvres hydriques (hydrodissection et hydrodélinéation), la 'phacoémulsification divide and conquer', le 'cracking and chopping', l'aspiration des masses corticales et l'insertion de l'implant. D'autres exercices spécifiques, comme la manipulation de l'anneau de tension irien (anneau de Malyugin, Figure 105), l'anneau de tension capsulaire et la vitrectomie antérieure, sont également proposés. La validité de construction a été particulièrement bien établie pour les modules de capsulorhexis et de phacoémulsification divide and conquer.

<sup>101,119,151,161</sup>



**Figure 105: Mise en place d'un anneau de Malyugin sur Eyesi**

➤ **Module de Capsulorhexis**

Analyse des performances : Notre étude démontre des performances significativement supérieures des groupes expérimentés sur plusieurs paramètres : score global ( $p=0,042$ ), temps ( $p=0,040$ ), rondeur ( $p=0,028$ ), déviation du rayon de 2,5 mm ( $p=0,023$ ) et extension maximale du rayon ( $p=0,004$ ). Ces résultats corroborent les conclusions de nombreuses études antérieures. **Privett et al. (2010)** ont trouvé des différences significatives pour le score global ( $p=0,000007$ ), le temps ( $p=0,008$ ), et la rondeur ( $p=0,003$ ). **Bozkurt et al. (2018)** ont également rapporté une différence notable du score global entre les groupes d'expérience ( $p=0,009$ ). **Selvander et Asman (2012)** ont identifié une significativité pour le score global ( $p=0,035$ ), mais non pour la rondeur ( $p=0,099$ ). Cependant, des études comme celle de **Yaïci et al.**

(2024) qui utilisaient la même version du simulateur, n'ont pas trouvé de différence significative pour le score global, probablement en raison de l'homogénéité de l'expérience des groupes étudiés. Cela pourrait suggérer une capacité limitée du simulateur à discriminer des niveaux avancés de maîtrise.

**Tableau 27: Comparaison des résultats des études sur la validité de construction du module capsulorhexis.**

	Score	Temps	Rondeur	Centrage	Déviaton du rayon de 2,5mm	Extension maximale du rayon
<b>Privett et al<sup>119</sup></b>	P=0,000007	P=0,008	P=0,003	P=0,001	-	-
<b>Bozkurt et al</b>	P=0,009	-	-	-	-	-
<b>Le et al</b>	P=0,065	P=0,767	-	P=0,929	P=0,243	-
<b>Selvander et Asman</b>	P=0,035	P=0,153	P=0,099	P=0,065	P=0,949	P=0,098
<b>Spiteri et al</b>	P<0,017	-	-	-	P<0,017	P<0,017
<b>Thomsen et al</b>	P=0,000	-	-	-	-	-
<b>Colné et al</b>	P=0,010	NS	P=0,018	-	-	P=0,009
<b>Yaïci et al</b>	NS	-	-	-	-	-
<b>Notre étude</b>	P=0,042	P=0,040	P=0,028	P=0,054	P=0,023	P=0,004

Analyse des complications : Dans notre étude, les novices présentaient des complications légèrement plus fréquentes, notamment pour les fibres zonulaires endommagées (p=0,066), bien que cette différence ne soit pas significative. Concernant la surface cornéenne, aucun résultat significatif n'a

été trouvé ( $p=0,496$ ). En revanche, Privett et al. (2010) et Selvander et Asman (2012) ont rapporté des résultats significatifs pour la surface cornéenne endommagée avec des valeurs de  $p$  respectivement de 0,02 et 0,048.

**Tableau 28: Comparaison des résultats des études concernant les survenues de complications par groupe d'expérience (capsulorhexis).**

	Surface de cornée endommagée	Fibres zonulaires endommagées
Privett et al	$P=0,02$	-
Le et al	$P=0,176$	-
Selvander et Asman	$P=0,048$	-
<b>Notre étude</b>	$P=0,496$	$P=0,066$

Nous rejoignons ainsi une grande partie de la littérature concernant la validité de construction du module capsulorhexis, qui démontre une forte capacité à discriminer les niveaux de compétences dans les différents aspects de la réalisation de cette étape. Toutefois, les résultats divergents de l'étude de Yaïci et al. (2024) pourraient s'expliquer par la sélection de deux groupes d'expertise ayant déjà une maîtrise avancée du capsulorhexis. Cette observation suggère une limite potentielle du simulateur EyeSi à différencier les subtilités de maîtrise entre deux chirurgiens expérimentés.

➤ **module d'hydrodissection**

Analyse des performances : Dans notre étude, les groupes plus expérimentés ne montrent pas de différence significative pour le score global ( $p=0,376$ ) ni pour des paramètres tels que le temps ( $p=0,160$ ) ou le volume injecté ( $p=0,490$ ). Ces résultats sont en accord avec les travaux de **Thomsen et al. (2015)**, qui n'ont également trouvé aucune significativité pour le score global ( $p=0,362$ ), et de **Selvander et Asman (2013)**, qui rapportent des valeurs similaires pour le score ( $p=0,503$ ) et le temps ( $p=0,408$ ).

**Tableau 29: Comparaison des résultats des études sur la validité de construction du module hydrodissection.**

	Selvander et Asman	Thomsen et al	Notre étude
Score	P=0,503	P=0,362	P=0,376
Temps	P=0,408	-	P=0,160
Dissections réussies (/3)	-	-	-
Dissections vérifiées (/3)	-	-	-
Volume injecté (mL)	-	-	P=0,490
Prolapsus du noyau (/3)	-	-	-

Analyse des complications : Concernant les complications, notre étude ne révèle pas de significativité pour la surface cornéenne endommagée

( $p=0,735$ ). À ce jour, aucune autre étude n'a exploré spécifiquement les complications liées au module d'hydrodissection sur simulateur.

la validité de construction du module d'hydrodissection reste relativement faible, ce qui peut s'expliquer par la nature tactile du geste, difficile à simuler avec précision sur un appareil majoritairement axé sur le retour visuel. De plus, un système de notation simplifié pourrait contribuer à ce manque de discrimination entre les niveaux d'expérience. Il convient également de noter que, même avec une évaluation visuelle par un enseignant via un score standard, il demeure difficile de différencier les groupes d'expérience pour cette étape. Ces observations suggèrent la nécessité d'un système d'évaluation plus élaboré pour améliorer la validité pédagogique du module.

➤ **Module de phacoémulsification (divide and conquer)**

Analyse des performances : Notre étude montre des performances significativement supérieures chez les groupes expérimentés pour le score global ( $p=0,001$ ), le temps ( $p=0,072$ ), et le noyau aspiré ( $p=0,003$ ). Cependant, certains paramètres tels que les ultrasons dissipés dans la chambre antérieure ( $p=0,128$ ) et dans le sac capsulaire ( $p=0,141$ ) ne présentent pas de différence significative. Ces résultats sont en accord avec plusieurs études. **Selvander et Asman (2013)** ont trouvé un score global non significatif ( $p=0,081$ ) mais davantage de cracking réussis chez les experts ( $p=0,014$ ). **Spiteri et al. (2014)** et **Thomsen et al. (2015)** rapportent des résultats significatifs pour le score global, avec des valeurs respectives de  $p<0,017$  et  $p=0,030$ . **Colné et al. (2019)** confirment ces observations au niveau 8 ( $p=0,049$ ), bien que d'autres niveaux ne montrent pas de

significativité. Enfin, **Yaïci et al. (2024)**, utilisant la même version du simulateur que notre étude au niveau 6, rapportent un score global significatif ( $p=0,023$ ), mais sans analyser d'autres paramètres.

**Tableau 30: Comparaison des résultats des études sur la validité de construction du module Divide And Conquer.**

	Selvander et Asman	Spiteri et al	Thomsen et al	Colné et al	Yaïci et al	Notre étude
Score	P=0,081	P<0,017	P=0,030	P=0,093	P=0,023	P=0,001
Temps	P=0,092	-	-	P=0,018	-	P=0,072
US dissipés dans la CA	P=0,874	-	-	-	-	P=0,128
US dissipés dans le sac	P=0,874	-	-	P=0,065	-	P=0,141
Noyau aspiré (en %)	-	-	-	-	-	P=0,003

Analyse des complications : Concernant les complications, notre étude identifie des résultats significatifs pour les fibres zonulaires endommagées ( $p=0,033$ ) et les ruptures capsulaires postérieures ( $p=0,002$ ), mais pas pour la surface cornéenne endommagée ( $p=0,679$ ). Ces observations sont partiellement en accord avec **Selvander et al. (2013)**, qui rapportent des résultats non significatifs pour les ruptures capsulaires postérieures ( $p=0,063$ ) sur une version antérieure du simulateur. En revanche, **Colné et al. (2019)**,

utilisant une version plus récente, notent des résultats significatifs pour ce paramètre ( $p=0,044$ ).

**Tableau 31: Comparaison des résultats des études concernant les survenues de complications par groupe d'expérience (Divide And Conquer).**

	Surface de cornée endommagée	Fibres zonulaires endommagées	Ruptures capsulaires postérieures
Selvander et al	P=0,086	-	P=0,063
Colné et al	-	-	P=0,044
<b>Notre étude</b>	P=0,679	P=0,033	P=0,002

Nos résultats confirment la validité de construction du module divide and conquer (niveau 5 dans notre étude), rejoignant la littérature récente. Le simulateur se montre efficace pour reproduire cette étape clé de la phacoémulsification et discriminer les groupes d'expérience sur différents aspects de la technique.

➤ **Module d'aspiration des masses.**

Analyse des performances :

Notre étude révèle des différences significatives pour le score global entre les groupes d'expérience ( $p=0,042$ ), mais pas pour des paramètres tels que le temps ( $p=0,721$ ) ou le cortex aspiré ( $p=0,557$ ). Ces résultats contrastent avec ceux de **Thomsen et al. (2015)** et **Colné et al. (2019)**, qui n'ont pas trouvé de significativité pour le score global ( $p=0,100$  et  $p=0,345$ , respectivement). De même, **Yaïci et al. (2024)**, utilisant la même version du

simulateur au niveau 4, n'ont pas rapporté de différence significative pour ce paramètre.

**Tableau 32: Comparaison des résultats des études sur la validité de construction du module aspiration des masses.**

	Thomsen et al	Colné et al	Notre étude
Score	P=0,100	P=0,345	P=0,042
Temps	-	P=0,073	P=0,721
Cortex aspiré (en %)	-	-	P=0,557

Analyse des complications : Concernant les complications, notre étude ne montre pas de résultats significatifs pour la surface cornéenne endommagée ( $p=0,697$ ) ni pour les fibres zonulaires endommagées ( $p=0,406$ ). Cependant, les novices provoquaient plus fréquemment des ruptures capsulaires postérieures (RCP) que les résidents avancés et les enseignants, soulignant une difficulté accrue à compléter le niveau sans erreur.

Nos résultats suggèrent que le simulateur peut discriminer les niveaux d'expérience (validité de construction) pour le module d'aspiration des masses (niveau 3). Cette capacité, non rapportée dans la littérature antérieure, pourrait s'expliquer par une amélioration du réalisme dans les dernières versions du simulateur. En effet, les novices rencontrent davantage de complications telles

que les RCP, tandis que ces erreurs sont beaucoup moins fréquentes chez les groupes plus expérimentés, renforçant la pertinence pédagogique de ce module.

#### a) **Implantation.**

Analyse des performances : Notre étude montre des performances significatives pour le score global ( $p=0,013$ ) et le temps ( $p=0,034$ ). Ces résultats contrastent avec ceux de Thomsen et al. (2015), qui n'ont pas trouvé de différences significatives pour le score global ( $p=0,079$ ), et de Yaïci et al. (2024), qui, sur la même version du simulateur au niveau 3, n'ont également rapporté aucune significativité pour ce paramètre.

Analyse des complications : En revanche, concernant la fréquence des complications, En revanche, concernant la fréquence des complications, telles que la surface cornéenne endommagée ( $p=0,323$ ) ou les fibres zonulaires endommagées ( $p=0,804$ ), notre étude n'a pas mis en évidence de différences significatives. À noter que les autres travaux ayant évalué ce module n'ont pas exploré ces complications, ce qui limite les possibilités de comparaison directe et met en lumière un aspect encore peu étudié dans la littérature. À noter que les autres travaux ayant évalué ce module n'ont pas exploré ces complications, ce qui limite les possibilités de comparaison directe et met en lumière un aspect encore peu étudié dans la littérature.

Enfin, notre étude met en évidence la capacité du simulateur à discriminer les niveaux d'expérience pour le module d'implantation (niveau 3). Ce résultat contraste avec les conclusions précédemment rapportées, ce qui pourrait s'expliquer par les récents progrès en termes de réalisme apportés à ce module. La distinction principale entre les groupes réside dans le temps de

réalisation de l'exercice. Notons que, mis à part ce paramètre, les novices n'ont rencontré aucune difficulté majeure, soulignant une potentielle homogénéité dans l'apprentissage des compétences pratiques de base.

**Tableau 33: Comparaison des résultats des études sur la validité de construction du module implantation.**

	Thomsen et al	Notre étude
Score	P=0,079	P=0,013
Temps	-	P=0,034
PVE restant (en %)	-	P=0,513

Les différences entre le niveau de compétence des experts et celui des novices pourraient conduire à l'élaboration d'un programme de formation sur le simulateur EyeSi, visant à faciliter et standardiser l'apprentissage de la phacoémulsification. Cette possibilité d'entraînement et de répétition des gestes chirurgicaux selon un programme structuré constitue l'un des principaux atouts de la simulation en réalité virtuelle, comparée à l'apprentissage traditionnel sur des modèles animaux, souvent basés sur l'utilisation d'yeux de porc dans un "Wet-lab".

#### 4. Validité concurrente du simulateur EyeSi :

La validité concurrente compare les résultats obtenus par l'instrument étudié à ceux d'un système d'évaluation reconnu comme référence (gold standard). Une forte corrélation entre les deux systèmes suggère que le nouvel outil mesure correctement le même concept. Diverses études rapportées dans la littérature ont permis de mettre en évidence la validité concurrente du simulateur EyeSi, en comparant les scores d'évaluation générés par celui-ci aux scores traditionnellement utilisés pour mesurer en chirurgie de la cataracte dans des conditions réelles, tels que (OSACSS, GRASIS,...).

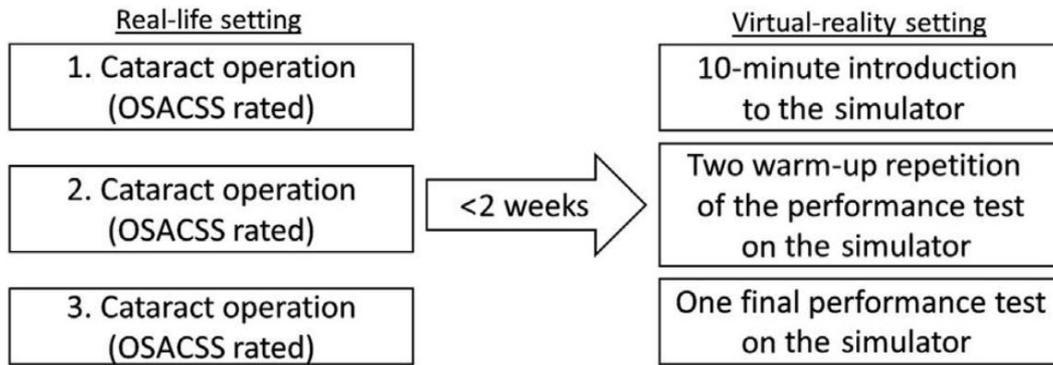
#### The Objective Structured Assessment of Cataract Surgical Skill "OSACSS" :

L'échelle de notation OSACSS a été développée pour évaluer la performance technique des chirurgiens en se basant sur l'analyse des enregistrements vidéo de leurs interventions chirurgicales. Cet outil permet une évaluation précise de la performance à toutes les étapes de la chirurgie de la cataracte. Il est considéré par de nombreux auteurs comme le gold standard pour l'évaluation de cette chirurgie. Plusieurs études ont d'ailleurs validé le score OSACSS comme un outil fiable et pertinent pour l'évaluation des compétences en chirurgie de la cataracte. <sup>162-164</sup> (

### Tableau 3)

Parmi ces études, celle de **Jacobsen et al. (2019)**<sup>165</sup> qui a mené une étude sur 19 chirurgiens de différents niveaux d'expérience. Dans un premier temps, les participants ont réalisé 3 procédures de phacoémulsification au bloc opératoire pour lesquels ils ont été évalué selon les critères du score OSACSS. Par la suite, ces même participants ont réalisé des modules de phacoémulsification sur le simulateur EyeSi (navigation intracapsulaire, anti-tremblement, anti-tremblement intracapsulaire, utilisation du forceps, entraînement bimanuel, capsulorhexis et phaco : divide and conquer) et leurs performances ont été notées par le simulateur (Figure 106). Les résultats ont révélé une corrélation statistiquement significative ( $p = 0,003$ ) entre les scores obtenus sur le simulateur EyeSi et ceux du score OSACSS, quelle que soit l'expérience des participants. Cette étude démontre ainsi la validité concurrente des scores du simulateur et souligne sa pertinence en tant qu'outil d'évaluation des compétences techniques. <sup>165</sup>.

Une autre étude, réalisée par **Selvander et ses collègues**<sup>144</sup> ont comparé les scores du simulateur EyeSi version 2.5 au score OSACSS pour trois modules : capsulorhexis, hydrodissection et phacoémulsification (divide and conquer). L'étude comprenait 7 ophtalmologistes et 17 étudiants en médecine. Les résultats ont montré que le score OSACSS était supérieur à celui du simulateur pour distinguer les deux groupes dans les trois modules évalués. Toutefois, pour les modules d'hydrodissection et de phacoémulsification, le système de notation d'EyeSi version 2.5 n'a pas réussi à différencier efficacement les chirurgiens expérimentés des étudiants en médecine, révélant ainsi des limitations de cette version du simulateur dans ces contextes spécifiques. <sup>166</sup>.



**Figure 106 :Plan de l'étude (OSACSS = Objective Structured Assessment of Cataract Surgical Skills)<sup>165</sup>.**

The Global Rating Assessment of Skills in Intraocular Surgery "GRASIS":

Le GRASIS, proposé par Cremers et al. en 2005, est un score d'évaluation objective des performances chirurgicales en chirurgie de la cata <sup>167</sup>. Il se base sur les items suivants (Figure 107) :

- La manipulation des structures intraoculaires.
- L'efficacité énergétique, les mouvements et le temps.
- L'utilisation du microscope et la position de l'œil,
- La manipulation des instruments et l'usage l'usage de la main non dominante,
- La connaissance des instruments et des équipements
- Le déroulement global de l'intervention.
- La gestion des événements inattendus.
- L'interaction avec le personnel paramédical et l'aide opératoire.
- La performance globale.

<b>Treatment of Intraocular Structures</b>				
1	2	3	4	5
Frequently used unnecessary force or caused damage by inappropriate use of instruments		Careful handling of intraocular tissues but occasionally caused inadvertent damage		Appropriate handling of ocular structures with no damage to ocular tissue (capsule, endothelium, iris, etc.)
<b>Time, Motion, and Energy</b>				
1	2	3	4	5
Many unnecessary movements Entered and exited eye needlessly		Efficient time/motion/energy but some unnecessary moves		Clear economy of movements and maximum efficiency by conserving intraocular motion and energy
<b>Eye Position and Microscope Use</b>				
1	2	3	4	5
Constantly required re-centration and/or re-focusing of microscope or eye				Kept the eye centered, maintained good view with microscope
<b>Instrument Handling and use of Non-dominant hand</b>				
1	2	3	4	5
Repeatedly makes tentative, awkward, or inappropriate movements with instruments		Competent use of instruments but occasionally stiff or awkward		Fluid moves with instruments and no awkwardness, conserving intraocular motion
<b>Knowledge of Phacoemulsification and Vitrector equipment and instruments</b>				
1	2	3	4	5
Frequently asked for wrong instrument or used inappropriate instrument; unaware of proper equipment settings		Knew names of most instruments and used appropriate tool for task		Obviously familiar with the instruments and equipment
<b>Flow of Operation</b>				
1	2	3	4	5
Frequently seemed unsure of surgical plan		Demonstrated some forward planning with reasonable progression of the procedure		Planned course of operation effortless from one move to next
<b>Knowledge of Specific or New Procedure or Technique</b>				
1	2	3	4	5
Required specific instruction at most steps		Knew all important steps of the operation		Familiar with all aspects of the operation
<b>Interaction with Assistants/ Scrub Nurse/ Surgical Preceptor</b>				
1	2	3	4	5
Failed to request or use assistance when needed		Appropriate use of assistants most of the time		Strategically used assistants to the best advantage at all times
<b>Handling of Unexpected Intraocular Events</b>				
1	2	3	4	5
Unable to recognize adverse event or unable to request proper assistance		Professional and competent identification of event. Able to request appropriate assistance		Superior independent management of event
<b>Overall Performance</b>				
1	2	3	4	5
Unable to perform operation independently		Competent, could perform operation with minimal assistance		Clearly superior, able to perform operation independently with confidence

**Figure 107 :Score GRASIS (Global Rating Assessment of Skills in Intraocular Surgery)<sup>167</sup>.**

Dans notre étude, nous avons choisi d'utiliser le score OSACSS pour évaluer la validité concurrente d'EyeSi. Contrairement au GRASIS, qui inclut des critères de performance globale, l'OSACSS propose une évaluation spécifique pour chaque étape de la phacoémulsification. Cela permet une comparaison directe des scores obtenus pour chaque étape avec ceux générés par le simulateur EyeSi, offrant ainsi une analyse plus précise et détaillée.

La validité concurrente évalue la capacité du simulateur Eyesi à discriminer les niveaux de performance des participants en corrélation avec une évaluation de référence externe, telle que l'expérience clinique ou une évaluation vidéo comme l'OSACSS. Notre étude a démontré une corrélation modérée positive pour plusieurs modules, rejoignant les observations rapportées dans la littérature.

➤ Capsulorhexis

La validité concurrente pour le module **capsulorhexis** a été rapportée dans notre étude avec un coefficient de corrélation  $r = 0,469$  ( $p = 0,018$ ). Ce résultat est inférieur à celui observé par **Selvander et al. (2010)** ( $r = 0,704$ ,  $p < 0,0001$ ) et par **Selvander et Asman (2013)** ( $r = 0,669$ ,  $p < 0,0001$ ).

Plusieurs facteurs pourraient expliquer cette différence. Tout d'abord, des variations dans les méthodes d'évaluation peuvent jouer un rôle important. Dans les deux études susmentionnées, l'évaluation vidéo des participants a été réalisée par deux chirurgiens expérimentés, tandis que, dans notre étude, un seul chirurgien expérimenté a noté les performances des participants à l'aide du score OSACSS. Par ailleurs, une différence dans la composition des populations étudiées pourrait également justifier cette divergence. En effet, les études de **Selvander** incluaient à la fois des étudiants en médecine et des chirurgiens, ce qui aurait pu entraîner une plus grande variabilité des scores OSACSS, comparée à notre population étudiée.

➤ Hydrodissection

Pour le module hydrodissection, notre étude a établi une validité concurrente avec une corrélation positive modérée ( $r = 0.406$ ,  $p = 0.044$ ), bien

que légèrement inférieure à celle rapportée par **Selvander et Asman (2013)** ( $r = 0.525$ ,  $p = 0.010$ ).

Comme pour le module capsulorhexis, cette différence pourrait s'expliquer par des variations méthodologiques et des différences dans les populations étudiées. En particulier, le recours à un seul évaluateur dans notre étude, contre deux évaluateurs expérimentés dans l'étude de Selvander et Asman, pourrait avoir réduit la robustesse des évaluations vidéo. De plus, l'inclusion d'étudiants en médecine dans leur étude aurait pu entraîner une plus grande dispersion des scores, augmentant ainsi la corrélation observée.

➤ Divide and Conquer

a montré une validité concurrente avec une corrélation positive modérée dans notre étude ( $r = 0,618$ ,  $p = 0,001$ ), surpassant les résultats rapportés par Selvander et Asman (2013) ( $r = 0,566$ ,  $p = 0,004$ ). Ce résultat vient renforcer la validité globale du module, corroborée par la validité de construction observée dans notre étude et le réalisme subjectif rapporté par les opérateurs lors de la réalisation de cette étape sur le simulateur EyeSi.

➤ Aspiration des masses (I/A)

Notre étude est la première à évaluer la validité concurrente pour le module aspiration des masses. Nous avons obtenu une corrélation positive élevée ( $r = 0,641$ ,  $p = 0,001$ ), démontrant ainsi pour la première fois que ce module présente une validité concurrente, confirmant sa pertinence comme outil d'évaluation des compétences techniques.

➤ Insertion d'IOL

En revanche, le module insertion d'IOL n'a pas montré de corrélation significative dans notre étude ( $r = 0,289$ ,  $p = 0,161$ ). Ce résultat suggère que

ce module est moins sensible pour discriminer les différences de performance. Cette limite pourrait s'expliquer par plusieurs facteurs : la simplicité relative de la tâche, les contraintes méthodologiques d'évaluation vidéo pour ce module, et la capacité du simulateur à détecter et sanctionner des erreurs subtiles (comme de petites quantités de PVE laissées en fin de geste), qui échappent souvent à une évaluation humaine. Par conséquent, ce module ne présente pas de validité concurrente dans notre étude.

➤ Score global

Notre étude a démontré une corrélation globale positive et élevée ( $r = 0,679$ ,  $p = 0,001$ ), soulignant la capacité du simulateur EyeSi à discriminer efficacement les performances globales en fonction de l'expérience des participants. Ce résultat met en évidence la pertinence d'une évaluation intégrée à l'aide de l'OSACSS, qui inclut des critères communs à toutes les étapes de la chirurgie, tels que la neutralité de l'incision, la bonne utilisation du microscope, la protection des capsules antérieure et postérieure, ainsi que la fluidité et la rapidité des gestes. Ces critères globaux ne sont pas toujours reflétés dans les scores spécifiques des modules, mais contribuent à une évaluation plus complète et robuste des compétences techniques.

**Tableau 34: Comparaison des résultats des études concernant la validité concurrente des modules.**

	Selvander et al (2010)	Selvander et Asman (2013)	Notre étude
Capsulorhexis	r = 0.704, p < 0.0001	r = 0.669, p < 0.0001	r = 0.469, p= 0.018
Hydrodissection	-	r = 0.525, p= 0.010	r = 0.406, p= 0.044
Divide and conquer	-	r = 0.566, p = 0.004	r = 0.618, p= 0.001
Aspiration des masses	-	-	r = 0.641, p= 0.001
Insertion d'IOL	-	-	r = 0.289, p= 0.161
Global	-	-	r = 0.679, p= 0.001

### 5. Validité discriminante :

Cette forme avancée de la validité de construction mesure la capacité de l'outil à identifier des différences subtiles au sein d'un même groupe d'expérience. Ce critère est particulièrement utile pour évaluer la finesse de l'instrument dans la distinction des niveaux de compétence.

### 6. Validité prédictive :

La validité prédictive évalue la capacité d'un instrument à prédire les performances futures de ses utilisateurs. Pour un simulateur chirurgical, cela signifie que les scores obtenus lors des sessions de simulation doivent être corrélés aux performances réelles des chirurgiens en bloc opératoire. Ce

critère représente le niveau ultime de validation, car il détermine l'impact clinique directe du simulateur sur les résultats per- et post-opératoires.

Contrairement aux autres formes de validité, comme la validité de face, apparente, de construction, concurrente et discriminante décrites par Gallagher et al.<sup>100</sup>, qui se concentrent sur l'évaluation du simulateur ou du système en lui-même, la validité prédictive va plus loin. Elle mesure directement l'effet concret du simulateur sur les performances chirurgicales.

#### a) Performance au bloc opératoire

L'étude réalisée par **Roohipoor et al. (2019)** sur 30 résidents a exploré la corrélation entre les performances sur le simulateur EyeSi en début de résidanat et les performances chirurgicales en fin de formation, évaluées à l'aide du score GRASIS. Les résultats ont révélé une corrélation significative entre les scores du module "capsulorhexis" sur le simulateur et la performance chirurgicale finale. Cette observation démontre que les scores obtenus en début de formation sur EyeSi peuvent prédire les futures performances chirurgicales des novices, permettant ainsi d'identifier précocement les résidents nécessitant un entraînement supplémentaire en phacoémulsification. Cette étude établit également la validité prédictive du module capsulorhexis.

Dans une autre étude prospective randomisée, **Daly et al. (2013)** ont montré que le temps nécessaire pour compléter le programme de simulation était un prédicteur des performances en salle d'opération, notamment pour la réalisation du capsulorhexis. De même, **Belyea et al. (2011)**, dans une étude rétrospective comparative portant sur 592 chirurgies, ont constaté que les résidents formés avec le simulateur EyeSi avaient un temps de

phacoémulsification réduit ( $p < 0,002$ ), une meilleure gestion de l'énergie de phacoémulsification ( $p < 0,0001$ ), et une courbe d'apprentissage plus courte. Cependant, aucune différence significative n'a été observée concernant le taux de complications entre les groupes formés et non formés.

Une étude multicentrique menée par **Thomsen et al. (2017)** a mis en évidence une amélioration significative des performances chirurgicales, mesurées par le score OSACSS, chez les novices (0 chirurgie) et les intermédiaires (moins de 75 chirurgies) ayant suivi une formation sur EyeSi. Les résultats ont montré une amélioration de 32 % et 38 % respectivement, avec des valeurs significatives ( $p = 0,008$  et  $p = 0,018$ ). De manière générale, les études montrent une amélioration dans divers aspects de la performance chirurgicale après l'introduction du simulateur EyeSi, tels que le temps opératoire, l'énergie dissipée cumulée, et les scores OSACSS et GRASIS.

### **b) Taux de complications**

La phacoémulsification s'accompagne de divers risques de complications, notamment cornéennes (lésions descémétiques, œdème de cornée), iriennes (iridodialyse, hernie irienne), capsulaires et zonulaires. Parmi celles-ci, la rupture capsulaire postérieure (PCR) est l'une des complications les plus fréquentes et graves, influençant souvent le risque d'autres complications. La réduction de ces complications améliore non seulement l'efficacité chirurgicale, mais également le pronostic visuel des patients. Les méthodes d'apprentissage traditionnelles, telles que les techniques wet-lab et dry-lab, ont montré leur efficacité dans la diminution des complications. Cependant, l'introduction du simulateur EyeSi a permis de mieux évaluer

l'impact de la simulation virtuelle sur la formation des résidents et leurs performances en bloc opératoire.

Plusieurs études ont démontré que la formation sur EyeSi réduit significativement le taux de complications chirurgicales, en particulier celui des PCR. L'étude de **Baxter et al. (2013)** a montré un taux de PCR réduit à 1,1 % chez trois résidents ayant suivi une formation intensive sur EyeSi (50 heures sur deux ans), contre 5,5 % rapporté dans la littérature. De même, **Lucas et al. (2019)** ont constaté, dans une étude rétrospective sur 14 résidents, un taux global de complications réduit chez ceux formés sur EyeSi (12,86 % contre 27,14 %,  $p = 0,031$ ). **McCannel et al. (2017)**, dans une étude sur 1037 phacoémulsifications, ont rapporté une diminution des complications vitréennes liées au capsulorhexis après une formation spécifique sur EyeSi ( $p = 0,00016$ ). **Staropoli et al. (2018)** ont également trouvé un taux global de complications significativement plus bas (2,4 % contre 5,1 %,  $p = 0,037$ ) et un taux de PCR réduit ( $p = 0,032$ ) chez les résidents formés sur EyeSi. **Ferris et al. (2020)**, dans une vaste étude rétrospective, ont rapporté une réduction de 38 % des PCR après l'introduction d'EyeSi dans la formation, basée sur une comparaison de 6919 phacoémulsifications réalisées avant et 8648 après cette introduction.

Enfin, **Adnane et al. (2020)**, dans une étude prospective comparative, ont montré que les résidents formés sur EyeSi présentaient des performances supérieures, avec un temps opératoire moyen réduit (20 min contre 37 min,  $p < 0,05$ ), un taux de PCR plus faible (8 % contre 24,6 %) et une énergie dissipée cumulée plus basse (8,1 contre 18,7). Ces résultats confirment l'efficacité de la simulation pour accélérer l'apprentissage et réduire les complications

opératoires. Cependant, dans notre étude transversale, nous n'avons pas pu évaluer la validité prédictive du simulateur en raison d'un nombre insuffisant de résidents et de l'absence d'un groupe témoin. Une étude prospective longitudinale sera nécessaire pour confirmer l'impact du simulateur EyeSi dans notre service.

### **B. Développement de programmes de formation structurés**

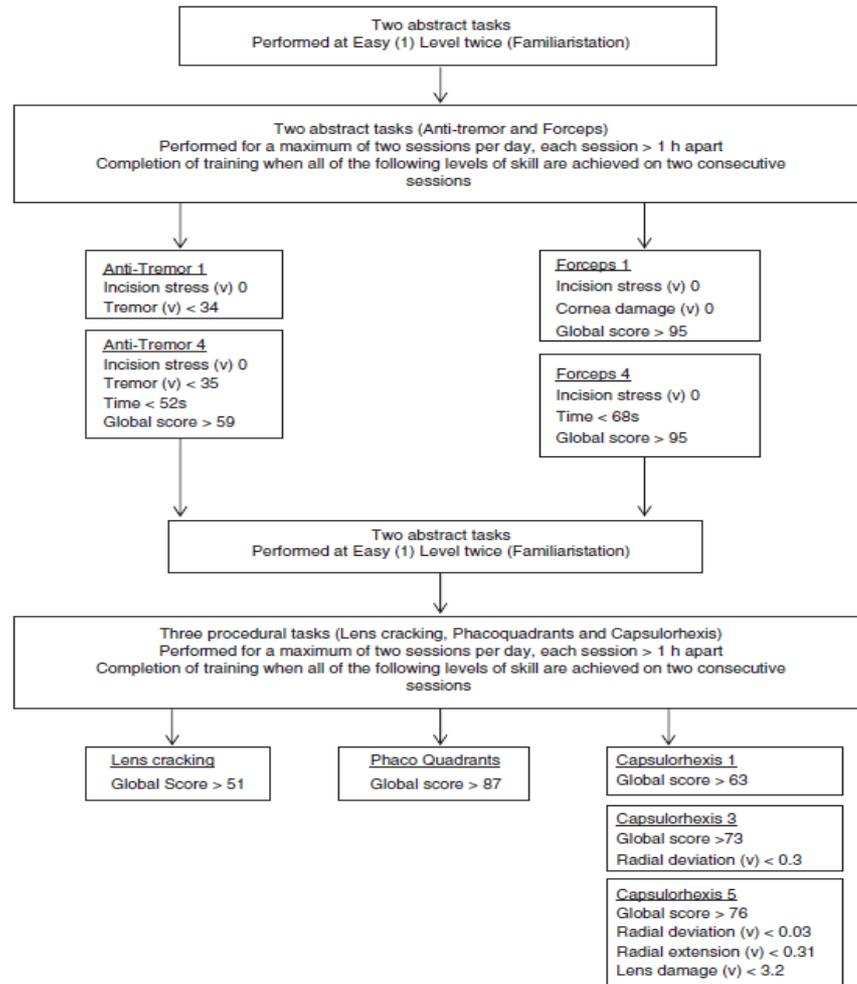
L'utilisation du simulateur de phacoémulsification en réalité virtuelle EyeSi est désormais reconnue comme un outil essentiel pour la formation des résidents en chirurgie. Son efficacité dans l'amélioration des compétences microchirurgicales justifie sa place dans des programmes standardisés. Ces programmes doivent inclure un apprentissage structuré basé sur les connaissances, une progression technique progressive, un retour d'information continu et des objectifs clairement définis. Plusieurs auteurs ont démontré qu'un tel cadre réduit significativement les complications chirurgicales dans la pratique réelle. Par exemple, Baxter et al. ont rapporté un taux de complications exceptionnellement bas de 0,66 % lors de la première année de chirurgie de cataracte par phacoémulsification, après un programme combinant EyeSi, wet-lab et entraînement intensif au bloc opératoire sur deux ans.<sup>154</sup>

Le simulateur EyeSi propose par défaut un curriculum adaptable, offrant aux formateurs la possibilité de personnaliser les exercices en fonction des objectifs pédagogiques. Dans notre étude, nous avons établi les validités de construction et concurrente de plusieurs modules : niveau 1 pour le capsulorhexis, niveau 5 pour le divide and conquer, et niveau 3 pour l'aspiration des masses, justifiant leur adoption dans les programmes de

formation. Voici un aperçu des programmes structurés décrits dans la littérature :

### **1. Premier programme (Spiteri et al.)**

Ce programme repose exclusivement sur le simulateur EyeSi et des modules validés. Il commence par des exercices de compétences basiques, suivis de tâches procédurales, avec des critères stricts de validation. Les compétences sont considérées comme acquises après avoir atteint les critères de référence sur deux sessions consécutives. La formation est distribuée dans le temps, avec un maximum de deux sessions par jour d'une heure chacune, pour limiter l'effet du hasard sur les scores (Figure 108).



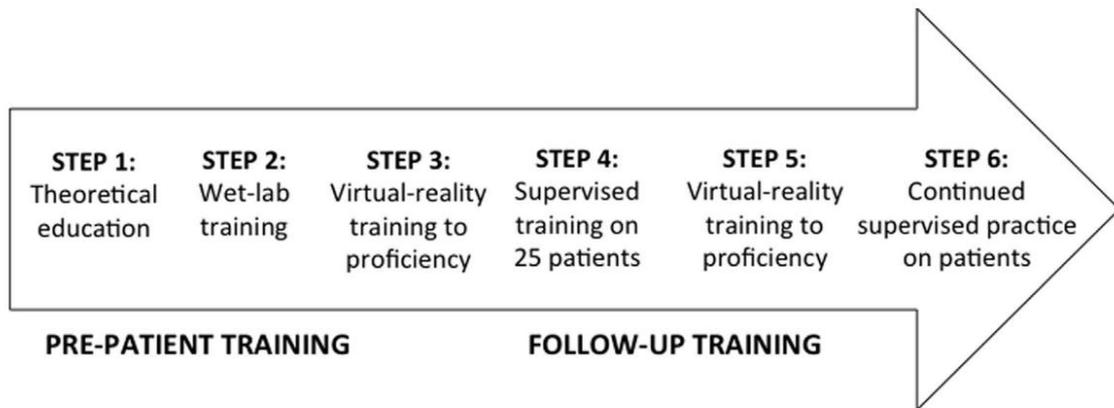
**Figure 108: Programme de formation en phacoémulsification proposé sur le simulateur EyeSi. (v) valeur ; (s) seconde.**

## 2. Deuxième Programme (Thomsen et al.)

Ce programme combine deux phases principales :

- Formation pré-patient : Inclut un enseignement théorique, des séances en wet-lab, et un entraînement sur le simulateur EyeSi (étapes 1 à 3).
- Formation de suivi : Combine un entraînement supervisé sur des patients, un retour au simulateur pour affiner les compétences, et une pratique indépendante sur les patients (étapes 4 à 6).

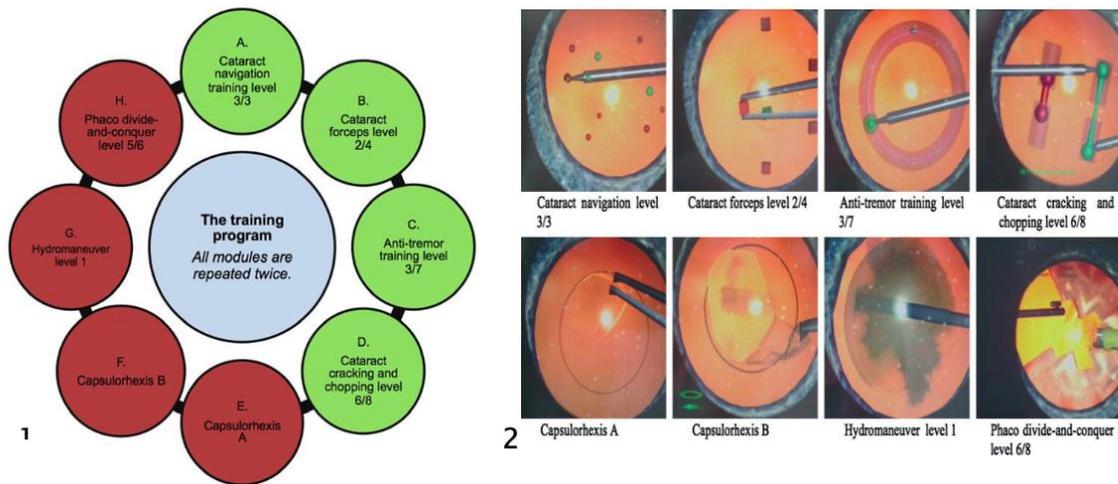
Cette approche a montré un impact positif significatif sur les performances chirurgicales des résidents



**Figure 109: Programme de formation en chirurgie de cataracte compose de 2 parties et 6 étapes<sup>168</sup>.**

### **3. Troisième programme (Bergqvist et al.)**

Ce programme se concentre sur des modules validés du simulateur EyeSi, incluant 4 modules de compétences basiques et 4 modules de tâches procédurales (Figure 105). L'étude conclut qu'un entraînement répétitif avec ce programme permet aux résidents d'acquérir des compétences avancées et d'obtenir des scores élevés, favorisant son intégration dans les formations en chirurgie de cataracte (Figure 110).



**Figure 110: 1-Programme de formation. Il contient 4 modules de compétences basiques (en vert) et 4 modules d'entraînement chirurgical (en rouge) ; 2- Présentation des différentes étapes à réaliser durant ce programme.**

#### 4. Quatrième programme (McCannel et al.)

Ce programme concerne l'entraînement à la réalisation du capsulorhexis en se basant sur le simulateur EyeSi. Ce programme de formation appelé par Mc Cannel et al<sup>169</sup> "Capsulorhexis Intensive Training Curriculum" (CITC) est basé sur le principe d'acquisition des compétences indépendamment du facteur temps nécessaire. Les résidents ne progressent vers les étapes suivantes qu'après avoir atteint un certain niveau de compétence. Ce programme a permis de réduire de 68 % le taux de capsulorhexis errants après son adoption. (Figure 111)

<b>Step 1</b> Cataract Anti-Tremor Training Level 1 req. 30	<b>Step 8</b> Cataract Bimanual Training Level 2 req. 50	<b>Step 15</b> Cataract Anti-Tremor Training Level 5 req. 50x3	<b>Step 22</b> Cataract Forceps Training Level 4 req. 70x3	<b>Step 29</b> Capsulorhexis Level 7 req. 30x3
<b>Step 2</b> Cataract Navigation Training Level 1 req. 30	<b>Step 9</b> Capsulorhexis Level 1 req. 30	<b>Step 16</b> Cataract Navigation Training Level 3 req. 50x3	<b>Step 23</b> Cataract Bimanual Training Level 5 req. 70x3	<b>Step 30</b> Capsulorhexis Level 8 req. 30x3
<b>Step 3</b> Cataract Forceps Training Level 1 req. 30	<b>Step 10</b> Cataract Anti-Tremor Training Level 3 req. 50x2	<b>Step 17</b> Cataract Forceps Training Level 4 req. 50x3	<b>Step 24</b> Capsulorhexis Level 2 req. 30x3	<b>Step 31</b> Capsulorhexis Level 9 req. 50x3
<b>Step 4</b> Cataract Bimanual Training Level 1 req. 30	<b>Step 11</b> Cataract Anti-Tremor Training Level 4 req. 50x2	<b>Step 18</b> Cataract Bimanual Training Level 5 req. 50x3	<b>Step 25</b> Capsulorhexis Level 3 req. 30x3	<b>Step 32</b> Capsulorhexis Level 10 req. 50x3
<b>Step 5</b> Cataract Anti-Tremor Training Level 2 req. 50	<b>Step 12</b> Cataract Navigation Training Level 3 req. 50x2	<b>Step 19</b> Capsulorhexis Level 1 req. 50x3	<b>Step 26</b> Capsulorhexis Level 4 req. 30x3	<b>Step 33</b> Capsulorhexis Level 8 req. 70x5
<b>Step 6</b> Cataract Navigation Training Level 2 req. 50	<b>Step 13</b> Cataract Forceps Training Level 3 req. 50x2	<b>Step 20</b> Cataract Anti-Tremor Training Level 6 req. 50x3	<b>Step 27</b> Capsulorhexis Level 5 req. 30x3	
<b>Step 7</b> Cataract Forceps Training Level 2 req. 50	<b>Step 14</b> Cataract Bimanual Training Level 4 req. 50x2	<b>Step 21</b> Cataract Navigation Training Level 3 req. 70x3	<b>Step 28</b> Capsulorhexis Level 6 req. 30x3	

**Figure 111: Le programme de formation "Capsulorhexis Intensive Training Curriculum" (CITC) est composé de 33 étapes. Chaque étape contient le score minimal qu'il faut réaliser pour passer à l'étape suivante et le nombre de répétitions à réussir. Avec la progression du programme, les étapes deviennent de plus en plus difficiles.**

A partir de ces données de la littérature, l'intégration de programmes structurés, combinant des modules validés et une progression pédagogique rigoureuse, est essentielle pour optimiser la formation des résidents et réduire les complications chirurgicales.

## C. Facteurs influençant les performances sur le simulateur EyeSi

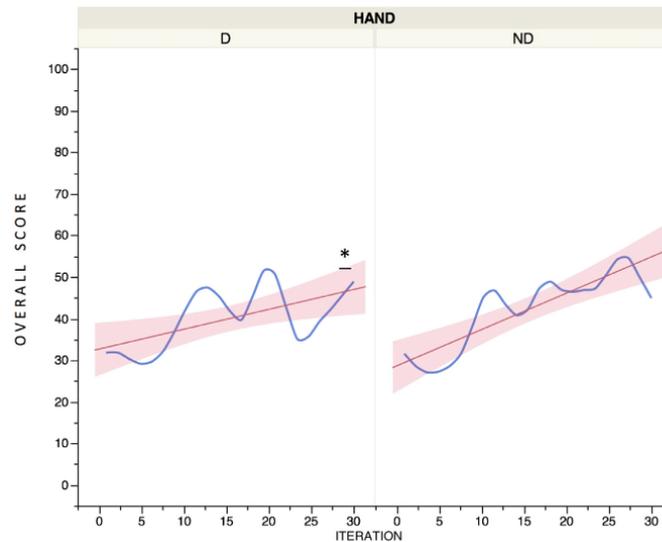
### 1. Intérêt dans le développement de la dextérité de la main non dominante :

Le développement de la dextérité des deux mains, dominante (D) et non dominante (ND), est essentiel en chirurgie ophtalmologique, où l'utilisation coordonnée des deux mains est indispensable. Cependant, la main ND, généralement moins adroite et moins rapide, nécessite un apprentissage particulièrement prudent au bloc opératoire.<sup>170</sup> Des enseignements ciblés à travers des scénarios pratiques se sont avérés efficaces pour améliorer sa dextérité, mais l'utilisation de simulateurs chirurgicaux, tels que l'EyeSi, offre une alternative plus sûre pour développer ces compétences avant leur application en conditions réelles<sup>171</sup>. De nombreuses études ont démontré l'intérêt du simulateur dans l'acquisition de compétences spécifiques, qui se traduisent par de meilleures performances au bloc opératoire, notamment dans le développement de la dextérité de la main ND.<sup>172</sup>

Plusieurs études ont donc pu démontrer l'intérêt d'EyeSi dans le développement de la dextérité de la main ND.

En 2012, **Park et al**<sup>170</sup> ont conclu, dans une étude sur le module forceps dans la chambre antérieure, que l'utilisation de la main ND était moins sûre et plus lente que celle de la main D. Ces résultats soulignent l'importance de maîtriser la technique avec la main D avant de progresser avec la ND, et suggèrent la nécessité de stratégies pédagogiques adaptées, en particulier lorsque la latéralité diffère entre le senior et le résident novice. En 2016, **Gonzalez-Gonzalez et al**<sup>173</sup> ont pu démontrer une amélioration de la dextérité de la main ND dans le module de capsulorhexis après des répétitions itératives

sur le module capsulorhexis. Plus récemment, en 2022, Eltanamly et al<sup>156</sup> ont obtenu les mêmes résultats sur le module de capsulorhexis avec une amélioration de la dextérité de la main ND, chez 26 des 30 chirurgiens inclus dans l'étude qui ont pu atteindre 90% du score de leur main dominante au bout de trois essais au maximum.



**Figure 112: courbe d'apprentissage de la main D et ND, la courbe d'apprentissage de la main ND est légèrement plus raide<sup>173</sup>.**

Ces résultats démontrent l'efficacité du simulateur EyeSi pour renforcer les compétences de la main ND, un aspect fondamental pour les résidents en formation. Cependant, notre étude n'a pas pu évaluer cet aspect, car tous les participants inclus dans notre échantillon étaient droitiers. Nous avons donc jugé nécessaire, dans un premier temps, de valider les modules étudiés avant de planifier une étude secondaire dédiée à l'impact de ces modules sur le développement de la main ND, incluant des participants avec des dominances variées.

## 2. Impact du sexe sur les performances chirurgicales

Dans notre étude, l'analyse des performances en fonction du sexe n'a révélé aucune différence statistiquement significative pour le score global ( $p = 0,738$ ) ni pour les scores des différentes étapes. Les résidentes féminines ont obtenu des scores légèrement supérieurs aux résidents masculins dans certains modules, comme le capsulorhéxis ( $55,3 \pm 30,35$  vs.  $47,6 \pm 24,41$  ;  $p = 0,553$ ) et l'implantation ( $79,7 \pm 11,73$  vs.  $68,10 \pm 24,48$  ;  $p = 0,157$ ), mais ces différences restent non significatives.

Ces observations concordent avec les conclusions de Gupta et al.<sup>174</sup> qui montrent que, bien que les résidentes féminines réalisent un nombre moyen de chirurgies inférieur à celui de leurs homologues masculins (521,8 vs. 662,2), les courbes d'apprentissage sont similaires. Après 300 interventions, les taux de complications intraopératoires sont comparables entre les sexes, suggérant que les différences de volume opératoire ne compromettent pas la qualité des performances chirurgicales.

Cependant, d'autres travaux ont mis en évidence des disparités lors de l'acquisition initiale des compétences. Thorson et al.<sup>175</sup> que, chez des étudiants en médecine sans expérience préalable sur simulateur de laparoscopie, les femmes obtiennent des performances inférieures aux hommes, avec des temps d'exécution plus longs et un taux d'erreurs plus élevé. Ces écarts tendent toutefois à disparaître avec l'expérience, comme le montrent les résultats de Amir Ali et al.<sup>176</sup> dans une revue systématique. Cette étude met en évidence que les différences de performances entre les sexes sont principalement observées chez les étudiants en médecine, tandis qu'aucune distinction significative n'est retrouvée chez les résidents. Cela

pourrait s'expliquer par une sélection plus homogène des participants au niveau de la résidence.

En conclusion, les performances chirurgicales semblent indépendantes du sexe à mesure que l'expérience augmente, ce qui souligne l'importance de l'entraînement continu et structuré pour gommer les écarts initiaux.

### 3. Expérience dans le jeu vidéo et performance dans le simulateur

L'utilisation intensive des jeux vidéo est souvent perçue négativement, notamment chez les adolescents et les enfants, en raison de préoccupations éducatives et sociales.<sup>177,178</sup> Cependant, les jeux vidéo peuvent jouer un rôle positif en améliorant les compétences psychomotrices, telles que la coordination oculo-manuelle, essentielle dans des domaines comme la chirurgie, l'aérospatiale et l'armée.<sup>179</sup> Certains auteurs suggèrent que les jeux vidéo pourraient non seulement renforcer les compétences techniques, mais aussi servir d'outils pour identifier et sélectionner les candidats les plus aptes à des carrières exigeant une haute précision, comme la chirurgie.<sup>180</sup>

Dans les domaines de la chirurgie laparoscopique et robotique, qui reposent sur des techniques mini-invasives, des programmes de formation basés sur des simulations ont été développés pour permettre aux chirurgiens d'acquérir des compétences supplémentaires en dehors du bloc opératoire. Plusieurs études ont montré une association positive entre l'expérience des jeux vidéo et les compétences chirurgicales en laparoscopie et robotique.<sup>181</sup> Ces résultats suggèrent que l'entraînement par les jeux vidéo pourrait constituer un complément utile à la formation chirurgicale. Cependant, l'effet bénéfique de cette expérience pourrait être temporaire.<sup>182-184</sup> Cependant, l'effet bénéfique de cette expérience pourrait être temporaire. Harbin et al<sup>184</sup>

ont observé que seuls les participants ayant joué aux jeux vidéo au cours des trois mois précédant leur étude conservaient un avantage notable dans les modules des simulateurs chirurgicaux.

Dans une étude comparative, Chung et al. (2017)<sup>185</sup>, ont comparé les performances sur le simulateur chirurgical EyeSi entre des joueurs réguliers de jeux vidéo et des non-joueurs. Les résultats ont révélé une supériorité statistiquement significative des scores des joueurs, confirmant les tendances observées dans les études sur les simulateurs de laparoscopie. D'autres travaux ont corroboré ces observations, mettant en évidence une amélioration des performances de base sur les simulateurs EyeSi chez les joueurs réguliers.

Dans notre étude, nous avons également exploré l'impact de l'expérience des jeux vidéo sur les performances dans certains modules du simulateur EyeSi. Les résultats suggèrent que l'exposition aux jeux vidéo pourrait offrir certains avantages aux résidents novices, notamment dans le module Divide and Conquer, où les joueurs ont obtenu de meilleurs scores. Toutefois, ces résultats ne sont pas statistiquement significatifs ( $p = 0,054$ ), probablement en raison du faible nombre de joueurs dans notre échantillon. Ces observations indiquent que des études supplémentaires, avec des échantillons plus larges et des conceptions mieux contrôlées, sont nécessaires pour confirmer l'impact des jeux vidéo sur la formation chirurgicale.

**Tableau 35: Comparaison des études sur l'impact de la pratique des jeux vidéo sur les performances en simulation virtuelle.**

	Chung et al <sup>185</sup> (2017)	Dryden et al <sup>186</sup> (2021)	Khimani et al <sup>187</sup> (2022)	Notre étude (2024)
<b>Taille échantillon</b>	33 étudiants 16 groupe contrôle 17 groupe intervention	41 étudiants en médecine résidents ophtalmologie	20 étudiants en médecine en	17 résidents novices 4 résidents avancés 4 enseignants
<b>Conception étude</b>	Étude prospective contrôlée	Étude prospective contrôlée	Étude prospective contrôlée	Étude prospective observationnelle
<b>Objectif principal</b>	Impact d'un programme d'entraînement de la main non dominante sur l'amélioration de ses performances	Évaluer l'impact de la pratique du jeu vidéo sur les compétences techniques microchirurgicales dans le simulateur Eyesi	Évaluer l'impact à court terme de sessions d'échauffement sur un jeu vidéo sur les performances dans le simulateur Eyesi	Étudier la validité de construction et concurrente du simulateur chirurgical Eyesi
<b>Différences joueurs/non joueurs</b>	Les joueurs réguliers obtenaient de meilleurs score de base dans les modules : navigation (p=0,021) et tâches bimanuelles (p=0,089)	Les participants se déclarant joueurs réguliers obtenaient des scores de base plus élevés que les non joueurs sur le module capsulorhexis (p=0,003)	Le groupe intervention obtenait de meilleurs scores dans les modules :navigation (p=0,225) ; tâches bimanuelles (p=0,211) et forceps (p=0,267)	Chez les novices, les scores des joueurs étaient supérieurs dans 4 modules sur 5 avec une tendance vers la significativité pour le module divide and conquer (p=0,054). Aucune différence significative entre joueurs et non joueurs n'a été retrouvée chez les opérateurs.

#### 4. Effet de l'expérience en EEC

Notre étude est la première à explorer l'impact d'un antécédent en extraction extracapsulaire (EEC) sur les performances des novices sur le simulateur EyeSi. Les résultats montrent que les opérateurs ayant une expérience en EEC obtiennent des scores supérieurs dans les modules de

capsulorhexis et d'hydrodissection, qui sont des étapes avec lesquelles ils sont plus familiers dans la pratique de l'EEC. Cependant, ces différences ne sont pas statistiquement significatives ( $p = 0,508$  pour le capsulorhexis et  $p = 0,140$  pour l'hydrodissection).

Ces observations suggèrent que l'expérience préalable en EEC pourrait offrir une certaine transférabilité des compétences, mais des études supplémentaires avec des échantillons plus importants seraient nécessaires pour confirmer cette hypothèse et évaluer plus précisément son impact sur la formation chirurgicale avec le simulateur EyeSi.

## D. Critiques et limites du simulateur EyeSi :

Le simulateur EyeSi, bien qu'efficace pour l'apprentissage des chirurgiens novices, présente plusieurs limitations qui ont été relevées dans la littérature. Parmi ces critiques, l'intérêt principalement axé sur les **chirurgiens débutants** est souvent souligné. L'amélioration des performances chirurgicales en salle opératoire a été démontrée essentiellement chez les novices<sup>115</sup>, ce qui pourrait limiter son rôle dans la formation continue ou chez les chirurgiens autonomes en phacoémulsification.

Une autre critique porte sur son **système de notation**, jugé par certains auteurs comme insuffisamment précis en comparaison avec d'autres systèmes, notamment l'**OSACSS**, considéré comme le gold standard pour évaluer les compétences en phacoémulsification. Par exemple, au cours des modules de phacoémulsification, une petite erreur qui n'aurait aucun impact en bloc opératoire peut conduire à un score de zéro. De plus, le simulateur note une seule technique chirurgicale avec une succession d'événements bien établie pour chaque étape. Cela conduit parfois à des scores faibles pour des experts qui réalisent les exercices en utilisant une technique différente, mais tout aussi valide. Un système de notation intégrant le **caractère cognitif** de la chirurgie pourrait être envisagé pour valider et sélectionner d'autres exercices pertinents dans les programmes de formation.

Par ailleurs, le simulateur ne propose pas d'exercices permettant d'enchaîner sans interruption toutes les étapes de la chirurgie de cataracte, ce qui constitue une autre limitation. Les experts obtiennent parfois des scores inférieurs aux attentes, car le simulateur ne prend pas en compte les interactions entre les étapes successives. Or, en phacoémulsification, la

réussite de chaque étape est influencée par la qualité de l'étape précédente. À un niveau avancé d'entraînement, le simulateur devrait idéalement proposer des modules permettant un **enchaînement fluide de toutes les étapes** de la chirurgie<sup>101</sup>.

### E. Justification économique du simulateur EyeSi :

Bien que la validité et l'innocuité du simulateur de réalité virtuelle EyeSi dans la formation à la phacoémulsification et à la chirurgie vitréorétinienne soient prouvées, et malgré la validation de plusieurs programmes d'entraînement, son coût élevé reste une limite importante à son acquisition pour de nombreux centres de formation en ophtalmologie. Toutefois, plusieurs études ont été menées pour évaluer les économies potentielles liées à la réduction des taux de complications et à la diminution du temps opératoire qu'il permet.

#### 1. Économies liées à la réduction des complications

Ferris et al. (2020) ont évalué le coût supplémentaire engendré par une rupture capsulaire postérieure (RCP), incluant l'utilisation d'équipements chirurgicaux supplémentaires et des visites ambulatoires additionnelles. Selon leurs estimations, une RCP peut coûter à l'hôpital entre 1650,91 et 2977,12 dollars. Si des complications graves comme un décollement rétinien ou une endophtalmie surviennent, le coût peut augmenter de 7006,07 dollars supplémentaires.

Un autre facteur économique important est lié aux coûts juridiques des fautes médicales. Ali et Little (2010) ont analysé 324 plaintes pour faute professionnelle soumises au National Health Service (NHS) entre 1995 et 2008. Ils ont constaté que les dommages et intérêts moyens pour une complication

chirurgicale, telle qu'une RCP ou une luxation postérieure du noyau cristallinien, s'élèvent à 27 884,18 dollars. En prenant en compte ces facteurs, le coût total moyen d'une RCP pour le NHS a été estimé à 2802,43 dollars.

## **2. Réduction du temps opératoire**

La diminution du temps opératoire après un entraînement sur simulateur EyeSi est également proposée comme un facteur permettant de réduire les coûts de la phacoémulsification. Plusieurs études<sup>188,189</sup> ont exploré cet aspect, mais leurs conclusions restent controversées. Ces études mettent cependant en avant un autre facteur potentiel de rentabilité, suggérant que le simulateur pourrait, à terme, compenser son coût d'acquisition par une meilleure gestion du temps opératoire et une optimisation des ressources.

En conclusion, malgré son coût élevé, le simulateur EyeSi offre des avantages économiques significatifs grâce à la réduction des complications, des coûts juridiques, et possiblement du temps opératoire. Ces économies justifient son intégration dans les centres de formation, surtout lorsqu'il est inclus dans des programmes structurés et validés.

## F. Limites de notre étude

Notre étude présente quelques limites. Tout d'abord, bien que l'échantillon inclut 25 participants, sa taille reste insuffisante pour généraliser pleinement les résultats, notamment dans les sous-groupes des résidents avancés (N = 4) et des enseignants (N = 4). Par ailleurs, bien que nous ayons évalué les cinq étapes principales de la phacoémulsification sur le simulateur EyeSi, notre analyse s'est limitée à un exercice par étape. Nous avons choisi de répéter le même exercice quatre fois afin d'obtenir des données plus fiables et de réduire les biais, mais cela a restreint l'exploration d'autres modules tels que la vitrectomie antérieure, l'anneau de tension capsulaire ou l'anneau de Malyugin. De plus, nous n'avons pas réalisé d'évaluation qualitative du réalisme apparent du simulateur, que ce soit au niveau des graphismes (software) ou du matériel (hardware), un aspect pourtant crucial pour l'expérience utilisateur.

Une autre limite est l'absence d'évaluation de l'impact clinique direct. Notre étude s'est concentrée sur les validités de construction et concurrente du simulateur, ainsi que sur son système de notation, mais n'a pas exploré la validité prédictive en termes de résultats cliniques réels chez les patients. En outre, l'analyse basée sur le score OSACSS a été réalisée par un seul chirurgien expérimenté. L'ajout d'un deuxième évaluateur aurait permis une analyse inter-observateurs, renforçant ainsi la robustesse des résultats. Enfin, notre étude de l'impact des jeux vidéo a également été limitée par la taille restreinte de l'échantillon. Nous avons inclus dans le groupe des joueurs tout participant déclarant un antécédent de pratique régulière des jeux vidéo, même si certains

n'avaient pas joué depuis plusieurs mois, ce qui pourrait avoir biaisé les résultats.

Ces limites offrent des opportunités pour des études futures, notamment avec des échantillons plus larges, des évaluateurs multiples, une analyse diversifiée des exercices et modules de chirurgie de cataracte et vitréorétinienne, ainsi qu'une exploration approfondie des impacts cliniques directs. L'intégration de l'évaluation du réalisme subjectif et une étude plus ciblée de l'impact des jeux vidéo pourraient également enrichir la compréhension de l'efficacité du simulateur EyeSi dans la formation chirurgicale.

## **XII. Recommandations et perspectives**

### **A. Recommandations**

#### **1. Mise en place d'un programme structuré de formation en chirurgie de la cataracte**

Pour améliorer la formation des résidents en ophtalmologie, il est essentiel de mettre en place un programme structuré et standardisé adapté à tous les niveaux d'expertise. Ce programme devrait inclure des sessions régulières de simulation tout au long du cursus, garantissant un apprentissage progressif des compétences techniques. La participation obligatoire des résidents serait cruciale pour maintenir leurs acquis techniques et renforcer leur sécurité au bloc opératoire. Une progression mesurable, avec des objectifs clairs pour chaque année et des critères de compétence validés, devrait être intégrée. Par ailleurs, l'utilisation de programmes de simulation combinés au téléapprentissage pourrait permettre une continuité pédagogique en cas de crises comme la pandémie de COVID-19.

#### **2. Intégration du simulateur Eyesi dans l'évaluation et la formation continue**

L'intégration du simulateur EyeSi comme outil d'évaluation et de formation continue constitue également une recommandation clé. Il pourrait être utilisé pour des examens intermédiaires ou de fin de cursus afin de mesurer objectivement les performances chirurgicales des résidents. De plus, la mise en place de « scores de maîtrise » ou de « permis d'opérer », inspirés des pratiques de l'aviation, pourrait standardiser les attentes pédagogiques, en s'appuyant sur des normes établies par des sociétés savantes nationales. Un programme spécifique axé sur l'entraînement de la main non dominante,

préalablement à son utilisation au bloc opératoire, pourrait également améliorer la formation technique.

### 3. Complémentarité des outils de formation

En complément, il serait pertinent d'associer le simulateur à des méthodes pédagogiques classiques, telles que le préceptorat et le compagnonnage, afin de garantir une meilleure acquisition des compétences théoriques et pratiques. Les wet-labs pourraient également être utilisés pour couvrir des tâches non proposées par EyeSi, telles que l'incision cornéenne ou l'hydrosuture.

### 4. Mise en œuvre d'une stratégie institutionnelle

Enfin, une stratégie institutionnelle globale est nécessaire pour instaurer un suivi régulier des performances des résidents, permettant d'évaluer l'impact clinique direct des programmes de formation en réalité virtuelle. Ces évaluations contribueraient à optimiser les programmes et à encourager leur adoption à une échelle plus large par les institutions publiques, renforçant ainsi l'efficacité globale de la formation en ophtalmologie.

Ces recommandations visent à renforcer la qualité de la formation en ophtalmologie en combinant des outils modernes comme le simulateur EyeSi à des méthodes pédagogiques éprouvées, tout en favorisant une approche institutionnelle pour un impact clinique durable

## B. Perspectives

Notre étude a permis de documenter des **scores de base** qui pourront être réutilisés dans des études futures. En particulier, une étude longitudinale pourra être réalisée lorsque les résidents du groupe 1 auront accès à la chirurgie de phacoémulsification dans la pratique réelle. La comparaison de

leurs performances initiales en bloc opératoire avec les scores obtenus sur le simulateur EyeSi permettra d'évaluer la **validité prédictive** du simulateur et son **impact clinique direct**. Une telle étude pourrait également explorer l'effet des modules validés sur l'amélioration de la **dextérité de la main non dominante**, en mesurant l'évolution de cette compétence au fil du temps.

Il serait également pertinent d'élargir les perspectives de recherche en intégrant de **nouveaux exercices** à travers la plateforme VRMnet du simulateur. L'évaluation régulière des validités des exercices pourrait aider à sélectionner les plus pertinents et les intégrer dans les programmes de formation du service. Par ailleurs, une **extension à d'autres modules**, comme ceux dédiés à la chirurgie vitréorétinienne, permettrait d'explorer l'utilisation du simulateur EyeSi dans d'autres domaines de la formation chirurgicale.

Enfin, les résultats obtenus pourraient être utilisés pour **optimiser les programmes de formation** en ajustant les modules en fonction de leur pertinence pédagogique. Cette démarche contribuerait à renforcer l'efficacité de la formation des résidents en ophtalmologie et à maximiser l'impact du simulateur sur l'acquisition des compétences chirurgicales.

### **XIII. Conclusion**

Notre étude confirme l'intérêt du simulateur EyeSi comme outil de formation dans le cursus des résidents en ophtalmologie. Nous avons démontré la validité de construction des modules de capsulorhexis, divide and conquer, aspiration des masses et implantation, ainsi que la validité concurrente des modules de capsulorhexis, hydrodissection, divide and conquer et aspiration des masses.

Le simulateur offre un environnement sécurisé et standardisé, idéal pour l'apprentissage progressif des compétences techniques et pour réduire les erreurs potentielles avant une mise en pratique en bloc opératoire. Nos résultats montrent une marge de progression notable, particulièrement chez les résidents novices, ce qui souligne la pertinence de cet outil pour les premières étapes de la formation chirurgicale.

Cependant, des études complémentaires sont nécessaires pour explorer l'impact à long terme de cette formation sur la pratique chirurgicale et les résultats cliniques des patients. Ces investigations permettront de mieux comprendre l'efficacité du simulateur dans la préparation des chirurgiens et son rôle dans l'amélioration des soins aux patients.

## **XIV. Résumés**

### **Résumé**

#### **Introduction**

La phacoémulsification est une intervention essentielle dans le traitement de la cataracte, mais son apprentissage traditionnel, basé sur le modèle de Halsted, reste long et risqué, avec un taux de complications élevé (5 à 7 %). Face à ces limites, le simulateur EyeSi Surgical offre une alternative moderne pour un apprentissage progressif et sécurisé. Cette étude vise à évaluer la validité du simulateur de la Chirurgie de la cataracte EyeSi et l'impact de facteurs tels que l'expérience en chirurgie extracapsulaire (EEC), le sexe, et la pratique des jeux vidéo sur les performances des utilisateurs.

#### **Matériels et méthodes**

Une étude transversale a été menée de septembre à novembre 2024 au CHU Hassan II et à l'Hôpital Universitaire de Simulation de Fès, a inclus 25 participants répartis en trois groupes : 17 résidents novices, 4 résidents avancés et 4 enseignants expérimentés. Chaque participant a suivi une session de familiarisation au simulateur, suivie de trois itérations sur des modules spécifiques. Les performances ont été mesurées via les scores du simulateur et les critères d'évaluation structurée (OSACSS). Les données ont été analysées à l'aide de tests statistiques pour comparer les groupes et établir des corrélations ( $p < 0,05$ ).

#### **Résultats**

Les résultats montrent une amélioration significative des performances avec l'expérience. Les enseignants ont obtenu un score moyen de 469,4, contre 363,0 pour les résidents avancés et 294,9 pour les novices ( $p = 0,001$ ).

Les enseignants ont également obtenu de meilleurs résultats dans les étapes critiques telles que le capsulorhexis (score moyen de 91,42 contre 51,10 pour les novices,  $p = 0,042$ ) et le divide and conquer (93,00 contre 30,86 pour les novices,  $p = 0,001$ ). Le temps requis pour accomplir les étapes diminuait également avec l'expérience, bien que cette différence ne soit pas significative ( $p = 0,062$ ). Les complications, notamment les ruptures capsulaires postérieures, étaient plus fréquentes chez les novices (2,18 en moyenne) que chez les enseignants et les résidents avancés, qui n'en ont enregistré aucune ( $p = 0,032$ ). En plus, nos résultats montrent une corrélation significative entre les performances sur le simulateur et les évaluations OSACSS ( $r = 0,469$  à  $0,618$  pour certaines étapes), validant ainsi sa pertinence pour la formation chirurgicale.

Les facteurs influençant les performances ont montré des effets limités. Les participants ayant une expérience en EEC ont obtenu des scores légèrement supérieurs, mais ces différences n'étaient pas significatives ( $p = 0,508$ ). De même, les joueurs réguliers de jeux vidéo ont obtenu de meilleurs scores dans certaines étapes, mais ces résultats n'étaient pas statistiquement significatifs ( $p > 0,05$ ). Aucune différence significative n'a été observée selon le sexe, bien que les femmes aient obtenu de meilleurs scores moyens dans certaines étapes.

### **Discussion**

Cette étude valide l'efficacité pédagogique du simulateur EyeSi Surgical, avec une corrélation significative entre les scores du simulateur et les évaluations OSACSS. Ces résultats s'inscrivent dans la continuité des travaux existants, corroborant la validité de construction des modules consacrés au

capsulorhexis et au "divide and conquer". De plus, notre étude innove en établissant pour la première fois la validité de construction des modules d'aspiration des masses et d'implantation, enrichissant ainsi les données disponibles sur cet outil pédagogique. Par ailleurs, les résultats mettent en exergue le rôle prépondérant de l'expérience clinique dans l'acquisition des compétences chirurgicales, tandis que l'impact d'autres facteurs, tels que l'expérience en EEC et la pratique des jeux vidéo, apparaît relativement limité.

### **Conclusion**

le simulateur EyeSi représente une avancée majeure dans la formation chirurgicale moderne et devrait être intégré dans les programmes de formation en complément des méthodes traditionnelles.

## **Abstract**

### **Introduction:**

Phacoemulsification is a critical procedure for cataract treatment, but the traditional learning model, based on Halsted approach, remains lengthy and risky, with a high complication rate (5–7%). To address these limitations, the EyeSi Surgical simulator offers a modern alternative for progressive and safe learning. This study aims to evaluate the validity of the EyeSi cataract surgery simulator and the impact of factors such as extracapsular surgery (EEC) experience, gender, and video game practice on user performance.

### **Materials and Methods:**

A cross-sectional study was conducted from September to November 2024 at Hassan II University Hospital and the University Hospital for Simulation in Fez, involving 25 participants divided into three groups: 17 novice residents, 4 advanced residents, and 4 experienced instructors. Each participant underwent a familiarization session with the simulator followed by three iterations on specific modules. Performance was measured using simulator scores and structured assessment criteria (OSACSS). Data were analyzed with statistical tests to compare groups and establish correlations ( $p < 0.05$ ).

### **Results:**

The results showed significantly higher performance with experience. Instructors achieved a mean score of 469.4 compared to 363.0 for advanced residents and 294.9 for novices ( $p = 0.001$ ). Instructors also excelled in critical steps such as capsulorhexis (mean score of 91.42 versus 51.10 for novices,  $p = 0.042$ ) and divide and conquer (93.00 versus 30.86 for novices,  $p = 0.001$ ).

The time required to complete steps also decreased with experience, though this difference was not statistically significant ( $p = 0.062$ ). Complications, including posterior capsular rupture, were more frequent among novices (mean of 2.18) compared to no complications among instructors and advanced residents ( $p = 0.032$ ). Additionally, significant correlations were observed between simulator performance and OSACSS evaluations ( $r = 0.469$  to  $0.618$  for certain steps), validating its relevance for surgical training.

Factors influencing performance showed limited effects. Participants with EEC experience had slightly higher scores, but the differences were not significant ( $p = 0.508$ ). Similarly, regular video game players achieved better scores in some steps, but these results were not statistically significant ( $p > 0.05$ ). No significant differences were observed based on gender, although women obtained higher average scores in certain steps.

#### **Discussion :**

This study confirms the effectiveness of the EyeSi Surgical simulator, with a significant correlation between simulator scores and OSACSS evaluations (concurrent validity). These findings align with existing research, supporting the construct validity of modules dedicated to capsulorhexis and divide and conquer. Furthermore, our study is the first to establish the construct validity of the irrigation/aspiration and IOL insertion modules, thereby enriching available data on this pedagogical tool. The results also underscore the pivotal role of clinical experience in acquiring surgical skills, while the impact of other factors, such as EEC experience and video game practice, appears relatively limited.

**Conclusion :**

The EyeSi simulator represents a significant advancement in modern surgical training and should be integrated into training programs as a complement to traditional methods.

## ملخص

### المقدمة:

تُعد تقنية استحلاب العدسة (Phacoemulsification) إجراءً أساسيًا لعلاج داء المياه البيضاء، إلا أن النموذج التقليدي لتعلمها، القائم على منهج هالستيد، يظل طويلًا ومحفوفًا بالمخاطر مع نسبة مضاعفات مرتفعة تتراوح بين 5 و7%. لمواجهة هذه التحديات، يُقدّم جهاز المحاكاة EyeSi Surgical بديلًا حديثًا لتعلم تدريجي وآمن. تهدف هذه الدراسة إلى تقييم صلاحية جهاز المحاكاة لجراحة داء المياه البيضاء EyeSi وتأثير عوامل مثل الخبرة في الجراحة خارج المحفظة (EEC)، والجنس، وممارسة ألعاب الفيديو على أداء المستخدمين.

### المواد والطرق:

أُجريت دراسة مقطعية من سبتمبر إلى نوفمبر 2024 في المستشفى الجامعي الحسن الثاني ومستشفى المحاكاة الجامعي بفاس، وشارك فيها 25 متطوعًا موزعين على ثلاث مجموعات: 17 طبيبًا مبتدئًا، و4 مقيمين متقدمين، و4 أساتذة ذوي خبرة. خضع كل مشارك لجلسة تعريفية بجهاز المحاكاة تلتها ثلاث تكرارات على وحدات محددة. تم قياس الأداء باستخدام درجات جهاز المحاكاة ومعايير التقييم الهيكلية (OSACSS). تم تحليل البيانات باستخدام الاختبارات الإحصائية لمقارنة المجموعات وتحديد الارتباطات ( $p < 0.05$ ).

### النتائج:

أظهرت النتائج تحسنًا كبيرًا في الأداء مع تزايد الخبرة. حقق الأساتذة متوسط درجات بلغ 469.4 مقارنة بـ 363.0 للمقيمين المتقدمين و294.9 للمبتدئين ( $p = 0.001$ ) كما تفوق الأساتذة في خطوات رئيسية مثل إحداث فتحة في محفظة العدسة (Capsulorhexis) متوسط درجة 91.42 مقابل 51.10 للمبتدئين،  $p = 0.042$  وتفتيت العدسة المعتمة بالموجات فوق الصوتية إلى شظايا صغيرة (93.00) مقابل 30.86 للمبتدئين،  $p = 0.001$  انخفض الوقت اللازم لإتمام الخطوات مع زيادة الخبرة، رغم أن هذا الفرق لم يكن ذا دلالة إحصائية  $p = 0.062$  ظهرت المضاعفات، بما في ذلك تمزق الكبسولة الخلفية، بشكل أكثر تكرارًا بين المبتدئين (متوسط 2.18) مقارنة بعدم تسجيل أي مضاعفات لدى الأساتذة والمقيمين المتقدمين ( $p = 0.032$ ). بالإضافة إلى ذلك، أظهرت النتائج ارتباطًا دالًا إحصائيًا بين الأداء على جهاز المحاكاة والتقييمات وفقًا لمعايير OSACSS مما يؤكد أهمية الجهاز في التدريب الجراحي.

### المناقشة:

تُثبت هذه الدراسة الفعالية التعليمية لجهاز المحاكاة EyeSi Surgical، مع وجود ارتباط دال إحصائيًا بين درجات الجهاز وتقييمات OSACSS. تتماشى هذه النتائج مع الدراسات السابقة، حيث تؤكد صلاحية الوحدات المخصصة لإحداث فتحة في محفظة العدسة وتفتيت العدسة المعتمة بالموجات فوق الصوتية. بالإضافة إلى ذلك، تنفرد هذه الدراسة بتأكيد صلاحية الوحدات الخاصة بشفط الشظايا المتبقية من كبسولة العدسة وزرع العدسة داخل العين، مما يثري البيانات

المتاحة حول هذا الجهاز التعليمي. كما تسلط النتائج الضوء على الدور الحاسم للخبرة في اكتساب المهارات الجراحية، بينما يبدو تأثير عوامل أخرى، مثل الخبرة في الجراحة خارج المحفظة (ECCE) وممارسة ألعاب الفيديو، محدودًا نسبيًا.

### الخلاصة:

يمثل جهاز المحاكاة EyeSi تقدمًا كبيرًا في التدريب الجراحي الحديث، ويجب دمجها في برامج التدريب ليكمل الطرق التقليدية.

## **XV. Bibliographie**

1. McGhee, C. N. J., Zhang, J. & Patel, D. V. A perspective of contemporary cataract surgery: the most common surgical procedure in the world. *Journal of the Royal Society of New Zealand* **50**, 245–262 (2020).
2. Osborne, M. P. William Stewart Halsted: his life and contributions to surgery. *Lancet Oncol* **8**, 256–265 (2007).
3. George, B. C., Dunnington, G. L. & DaRosa, D. A. Trainee Autonomy and Patient Safety. *Annals of Surgery* **267**, 820 (2018).
4. Randleman, J. B. et al. The resident surgeon phacoemulsification learning curve. *Arch Ophthalmol* **125**, 1215–1219 (2007).
5. Johnston, R. L., Taylor, H., Smith, R. & Sparrow, J. M. The Cataract National Dataset electronic multi-centre audit of 55,567 operations: variation in posterior capsule rupture rates between surgeons. *Eye (Lond)* **24**, 888–893 (2010).
6. Gillan, S. N. & Saleh, G. M. Ophthalmic surgical simulation: a new era. *JAMA Ophthalmol* **131**, 1623–1624 (2013).
7. Bergqvist, J., Person, A., Vestergaard, A. & Grauslund, J. Establishment of a validated training programme on the Eyesi cataract simulator. A prospective randomized study. *Acta Ophthalmol* **92**, 629–634 (2014).
8. Ducasse A. Le Globe Oculaire Ou Bulbe Oculaire. In: Chevrel JP, Fontaine C Editors. *Anatomie Clinique, Tête et Cou (Vol 3)*. Paris: Springer; 1996. p. 169–212.
9. CASSETTE, N. B., Studio. Le cristallin – Docteur Damien Gatinel. <https://www.gatinel.com/recherche-formation/le-cristallin/> (2013).

10. Brémond-Gignac, D., Copin, H., Laroche, L. & Milazzo, S. Cristallin et zonule : anatomie et embryologie. *EMC – Ophtalmologie* **9**, 1-11 (2012).
11. Brown, N. P. & Bron, A. J. Lens disorders: A clinical manual of cataract diagnosis. *Ophthalmic Literature* **1**, 64 (1996).
12. Gordon, R. A. & Donzis, P. B. Refractive development of the human eye. *Arch Ophthalmol* **103**, 785-789 (1985).
13. CASSETTE, N. B., Studio. Pouvoir optique paraxial du cristallin – Docteur Damien Gatinel. <https://www.gatinel.com/recherche-formation/le-cristallin/pouvoir-optique-paraxial-du-cristallin/> (2013).
14. Marshall, G. E., Konstas, A. G., Bechrakis, N. E. & Lee, W. R. An immunoelectron microscope study of the aged human lens capsule. *Exp Eye Res* **54**, 393-401 (1992).
15. Sivak, J. G., Herbert, K. L., Peterson, K. L. & Kuszak, J. R. The interrelationship of lens anatomy and optical quality. I. Non-primate lenses. *Exp Eye Res* **59**, 505-520 (1994).
16. Fawcett, D. W. (Don W. A Textbook of Histology. (Philadelphia : Saunders, 1986).
17. Myron Yanoff, Jay S. Duker, MD , *Ophthalmology* , Fifth edition , Part 5 : the lens.
18. Œil Illustrations : anatomie normale | e-Anatomy. IMAIOS <https://www.imaios.com/fr/e-anatomy/tete-et-cou/oeil>.
19. Chandorkar, A. G., Bulakh, P. M. & Albal, M. V. Electrolyte composition in normal and cataractous lenses. *Indian Journal of Ophthalmology* **28**, 135 (1980).
20. Adler's Physiology of the Eye. (2011).

21. Özlem, Ç. Biochemistry of the Human Lens.
22. Forrester, J. V., Dick, A. D., McMenamin, P. G., Roberts, F. & PhD, E. P., BSc. The Eye: Basic Sciences in Practice. (Elsevier Health Sciences, 2015).
23. JaypeeDigital | Biochemistry of the Lens. <https://jaypeedigital.com/book/9789350254837/chapter/ch2>.
24. The Eye: Basic Sciences in Practice [5&nbsp;ed.] 0702079936, 9780702079931, 9780702079948. dokumen.pub <https://dokumen.pub/the-eye-basic-sciences-in-practice-5nbsped-0702079936-9780702079931-9780702079948.html>.
25. Zahraei, A. et al. Mapping Glucose Uptake, Transport and Metabolism in the Bovine Lens Cortex. *Front. Physiol.* **13**, (2022).
26. Artal, P. & Guirao, A. Contributions of the cornea and the lens to the aberrations of the human eye. *Opt. Lett.* **23**, 1713 (1998).
27. Song, S. et al. Functions of the intermediate filament cytoskeleton in the eye lens. <https://www.jci.org/articles/view/38277/figure/1> (2009) doi:10.1172/JCI38277.
28. Senile Cataract (Age-Related Cataract): Practice Essentials, Background, Pathophysiology. (2024).
29. admin. Cataract: Pathogenesis and clinical findings | Calgary Guide. <https://calgaryguide.ucalgary.ca/cataract-pathogenesis-and-clinical-findings/> (2016).
30. Phaco-emulsification and aspiration. A new technique of cataract removal. A preliminary report - PubMed. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/6028631/>.
31. Milazzo, S., Laurans, P. & Turut, P. Phacoémulsification. EMC -

Ophthalmologie 2, 77-102 (2005).

32. Fine IH, Hoffman RS, Packer M. Optimizing refractive lens exchange with bimanual microincision phacoemulsification. J Cataract Refract Surg 2004;30:550-4.

33. Votan P, Hannouche D. La phaco pas à pas. Closer communication 1998:7-12.

34. Yu, A.-Y., Guo, H., Wang, Q.-M., Bao, F.-J. & Huang, J.-H. Pupil Dilation with Intracameral Epinephrine Hydrochloride during Phacoemulsification and Intraocular Lens Implantation. Journal of Ophthalmology 2016, 4917659 (2016).

35. Masson, E. Utilisation du bleu trypan pour la réalisation du capsulorhexis dans la chirurgie de la cataracte blanche. EM-Consulte <https://www.em-consulte.com/article/111560/utilisation-du-bleu-trypan-pour-la-realisation-du->.

36. Amzallag T. ue peut-on attendre d'une substance viscoélastique? B L Horizon 2001;4:5-6.

37. Rocher, N. Les visqueux : adapter son choix. (2014).

38. Papaconstantinou, D., Karmiris, T., Diagourtas, A., Koutsandrea, C. & Georgalas, I. Clinical trial evaluating Viscoat and Visthesia ophthalmic viscosurgical devices in corneal endothelial loss after cataract extraction and intraocular lens implantation. Cutaneous and Ocular Toxicology 33, 173-180 (2014).

39. Miyake, K., Asakura, M. & Kobayashi, H. Effect of Intraocular Lens Fixation on the Blood-Aqueous Barrier. American Journal of Ophthalmology 98, 451-455 (1984).

40. Tr, M. Progress report ; Silicone IOLs. *Cataract* **4**, 18-19 (1984).
41. Masson, E. Extraction extra-capsulaire avec implantation en chambre postérieure. EM-Consulte <https://www.em-consulte.com/article/7739/extraction-extra-capsulaire-avec-implantation-en-c>.
42. Masson, E. Extraction intracapsulaire du cristallin. EM-Consulte <https://www.em-consulte.com/article/7737/extraction-intracapsulaire-du-cristallin>.
43. Abell, R. G. & Vote, B. J. Cost-Effectiveness of Femtosecond Laser-Assisted Cataract Surgery versus Phacoemulsification Cataract Surgery. *Ophthalmology* **121**, 10-16 (2014).
44. Masson, E. Chirurgie de la cataracte assistée par laser. EM-Consulte <https://www.em-consulte.com/article/999315/chirurgie-de-la-cataracte-assistee-par-laser>.
45. Conrad-Hengerer, I., Al Juburi, M., Schultz, T., Hengerer, F. H. & Dick, H. B. Corneal endothelial cell loss and corneal thickness in conventional compared with femtosecond laser-assisted cataract surgery: Three-month follow-up. *Journal of Cataract & Refractive Surgery* **39**, 1307-1313 (2013).
46. Which type of cataract surgery: laser or ultrasound? The ELZA Institute <https://www.elza-institute.com/which-surgery-laser-or-ultrasound/>.
47. Des ailes au-dessus de Claresholm : L'École de pilotage militaire no 15 (vidéo). Des ailes au-dessus de Claresholm : L'École de pilotage militaire no 15 de l'ARC pendant la Seconde Guerre mondiale [https://www.histoiresdecheznous.ca/v2/l-arc-a-claresholm\\_the-rcaf-in-claresholm/histoire/ecole-de-pilotage-militaire-no-15-video/](https://www.histoiresdecheznous.ca/v2/l-arc-a-claresholm_the-rcaf-in-claresholm/histoire/ecole-de-pilotage-militaire-no-15-video/).

48. Helmreich, R., Chidester, T., Foushee, H., Gregorich, S. & Wilhelm, J. How effective is cockpit resource management training? Exploring issues in evaluating the impact of programs to enhance crew coordination. *Flight safety digest* (Arlington, Va. : 1988) **9**, 1–17 (1990).
49. Salas, E., Wilson, K. A., Burke, C. S. & Wightman, D. C. Does Crew Resource Management Training Work? An Update, an Extension, and Some Critical Needs. *Hum Factors* **48**, 392–412 (2006).
50. Link Trainer - Prairie. <https://prairieaviationmuseum.org/exhibits/displays/link-trainer/>.
51. Goodman, J., Risi, S. & Lucas, S. AI and Wargaming. Preprint at <https://doi.org/10.48550/arXiv.2009.08922> (2020).
52. Nwanodi, O. Simulation in General Obstetrics and Gynecology. *J Womens Health, Issues Care* **06**, (2017).
53. Safar, P. & McMAHON, M. Mouth-to-airway emergency artificial respiration. *J Am Med Assoc* **166**, 1459–1460 (1958).
54. Åsmund S. Lærdal - ScienceDirect. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0300957202000333>.
55. Cooper, J. B. & Taqueti, V. R. A brief history of the development of mannequin simulators for clinical education and training. *Postgraduate Medical Journal* **84**, 563–570 (2008).
56. Wallace, P. Following the threads of an innovation: the history of standardized patients in medical education. *Caduceus* **13**, 5–28 (1997).
57. Abrahamson, S., Denson, J. S. & Wolf, R. M. Effectiveness of a simulator in training anesthesiology residents. 1969. *Qual Saf Health Care* **13**, 395–397

(2004).

58. Gaba, D. M. The future vision of simulation in health care. *Qual Saf Health Care* **13 Suppl 1**, i2–10 (2004).

59. Mouhaoui, M., Moussaoui, M., Yaqini, K., Khaleq, K. & Louardi, H. La simulation médicale au Maghreb : état des lieux et perspectives.

60. Ministère de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche Scientifique et de l'Innovation. <https://192.168.50.152/fr>.

61. La simulation en santé – Centre de Simulation IMSC. <https://imsc.ma/la-simulation-en-sante/>.

62. Pinot, M. LES OUTILS DE SIMULATION DANS LA FORMATION DES ÉTUDIANTS EN SANTÉ.

63. Chiniara G. Simulation médicale pour acquisition des compétences en anesthésie. Congrès national d'anesthésie et de réanimation 2007. Conférences d'actualisation, p. 041–049 2007 Elsevier Masson SAS. (2007).

64. Alcalá Rueda, I. et al. A live porcine model for surgical training in tracheostomy, neck dissection, and total laryngectomy. *Eur Arch Otorhinolaryngol* **278**, 3081–3090 (2021).

65. Qu'en est-il du don d'organe au Maroc ? – ScienceDirect. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1769725514004052>.

66. Parham, G. et al. Creating a low-cost virtual reality surgical simulation to increase surgical oncology capacity and capability. *ecancermedicalscience* **13**, 910 (2019).

67. Talaa, M., Chahbouni, M., Mounir, S., Radid, M. & Chemsy, G. Medical Students' Perception of a Serious Game (ECOGAME) of Simulating an OSCE

Station: Case of Mohammed VI University of Health Sciences (UM6SS). in 368–378 (2022). doi:10.1007/978-3-031-16290-9\_27.

68. Gigante, M. A. Virtual Reality: Definitions, History and Applications. in 3–14 (Elsevier, 1993). doi:10.1016/B978-0-12-227748-1.50009-3.

69. Li, L. et al. Application of virtual reality technology in clinical medicine. *Am J Transl Res* **9**, 3867–3880 (2017).

70. Virtual Reality and Augmented Reality in Ophthalmology: A Contemporary Prospective – ScienceDirect. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S216209892300097X?via%3Dihub>.

71. Ma, M. K. I. et al. Virtual reality and augmented reality— emerging screening and diagnostic techniques in ophthalmology: A systematic review. *Survey of Ophthalmology* **67**, 1516–1530 (2022).

72. Définition de haptique | Dictionnaire français. La langue française <https://www.lalanguefrancaise.com/dictionnaire/definition/haptique> (2024).

73. <http://www.ixmedia.com>, iXmédia-. Motricité humaine. Fondements et applications pédagogiques – Tome 2. <https://www.puq.ca/catalogue/livres/motricite-humaine-fondements-applications-pedagogiques-tome-195.html>.

74. Richard, G. Étude de l’impact du retour haptique sur le sentiment d’incarnation.

75. Khan, S. Haptics and Virtual Reality. (2011).

76. Panait, L. et al. The role of haptic feedback in laparoscopic simulation training. *J Surg Res* **156**, 312–316 (2009).

77. Ström, P. et al. Early exposure to haptic feedback enhances performance

in surgical simulator training: a prospective randomized crossover study in surgical residents. *Surg Endosc* **20**, 1383–1388 (2006).

78. Kolb, A. Y. & Kolb, D. A. *The Experiential Educator: Principles and Practices of Experiential Learning*. (EBLS Press, Kaunakakai, HI, 2017).

79. Bandaranayake, R. C., Abrahamson, S. & Harden, R. *The Integrated Medical Curriculum*. (CRC Press, London, 2022).  
doi:10.1201/9780429188862.

80. Merriënboer, J. J. G. van & Kirschner, P. A. *Ten Steps to Complex Learning: A Systematic Approach to Four-Component Instructional Design*. (Routledge, New York, 2017). doi:10.4324/9781315113210.

81. Bradley, P. The history of simulation in medical education and possible future directions. *Med Educ* **40**, 254–262 (2006).

82. Salas, E., DiazGranados, D., Weaver, S. J. & King, H. Does team training work? Principles for health care. *Acad Emerg Med* **15**, 1002–1009 (2008).

83. *Scaled Worlds: Development, Validation and Applications*. Routledge & CRC Press <https://www.routledge.com/Scaled-Worlds-Development-Validation-and-Applications/Elliott-Schiflett-Covert/p/book/9781138277618>.

84. Institute of Medicine (US) Committee on Quality of Health Care in America. *Crossing the Quality Chasm: A New Health System for the 21st Century*. (National Academies Press (US), Washington (DC), 2001).

85. Cook, D. A. et al. Technology-enhanced simulation for health professions education: a systematic review and meta-analysis. *JAMA* **306**, 978–988 (2011).

86. Arriaga, A. F. et al. Simulation-based trial of surgical-crisis checklists. *N*

Engl J Med **368**, 246–253 (2013).

87. Effectiveness of simulation-based nursing education depending on fidelity: a meta-analysis | BMC Medical Education | Full Text.

<https://bmcmmededuc.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12909-016-0672-7>.

88. Flanagan, J. L. & De Souza, N. Simulation in Ophthalmic Training. Asia-Pacific Journal of Ophthalmology **7**, 427–435 (2018).

89. Eyesi, L. À. F. Simulateur de formation pour les examens de l'œil.

90. EYE examination Simulator II Disponible sur : [https://www.kyotokagaku.com/products\\_data/manual/m82\\_manual.pdf](https://www.kyotokagaku.com/products_data/manual/m82_manual.pdf).

91. HS\_eyesidirect\_br\_201\_en\_web.pdf.

92. OtoSim Inc: OphthoSim. OtoSim Inc <https://otosim.com/ophthosim/>.

93. HS\_eyesindirect\_br\_201\_en\_web.pdf.

94. Lewallen, S. A simple model for teaching indirect ophthalmoscopy. Br J Ophthalmol **90**, 1328–1329 (2006).

95. Lantz, P. E. A simple model for teaching postmortem monocular indirect ophthalmoscopy. J Forensic Sci **54**, 676–677 (2009).

96.

HS\_eyesindirect\_rop\_pu\_201\_en\_the\_ophthalmologist\_innovators\_article.pdf.

97. American Academy Of Ophthalmology Launches VR Education Program In Collaboration With FundamentalVR To Improve Ophthalmic Care Around The World – Fundamental Surgery. <https://fundamentalsurgery.com/company-updates/american-academy-of-ophthalmology-launches-vr-education-program-in-collaboration-with-fundamentalvr-to-improve-ophthalmic->

care-around-the-world/ (2024).

98. Moisseiev, E. & Michaeli, A. Simulation of neodymium:YAG posterior capsulotomy for ophthalmologists in training. *J Cataract Refract Surg* **40**, 175–178 (2014).

99. Spera, C., Somerville, A., Caniff, S., Keenan, J. & Fischer, M. D. Virtual reality haptic surgical simulation for sub-retinal administration of an ocular gene therapy. *Investigative Ophthalmology & Visual Science* **61**, 4503 (2020).

100. Gallagher, A. G., Ritter, E. M. & Satava, R. M. Fundamental principles of validation, and reliability: rigorous science for the assessment of surgical education and training. *Surg Endosc* **17**, 1525–1529 (2003).

101. Colné, J. et al. Simulateur de chirurgie de cataracte EyeSi : validité de construction des modules capsulorhexis, phacoémulsification et aspiration des masses cristalliniennes. *Journal Français d’Ophtalmologie* **42**, 49–56 (2019).

102. Rowden, A. & Krishna, R. Resident cataract surgical training in United States residency programs. *J Cataract Refract Surg* **28**, 2202–2205 (2002).

103. Shah, V. A., Reddy, A. K., Bonham, A. J., Sabates, N. R. & Lee, A. G. Resident surgical practice patterns for vitreoretinal surgery in ophthalmic training programs in the United States. *Ophthalmology* **116**, 783–789 (2009).

104. Sengupta, S., Dhanapal, P., Nath, M., Haripriya, A. & Venkatesh, R. Goat’s eye integrated with a human cataractous lens: A training model for phacoemulsification. *Indian J Ophthalmol* **63**, 275–277 (2015).

105. Porteous, A. M. & Ahmed, F. A novel wet-lab teaching model for trabeculectomy surgery. *Eye (Lond)* **32**, 1537–1550 (2018).

106. Hirata, A., Iwakiri, R. & Okinami, S. A simulated eye for vitreous surgery

using Japanese quail eggs. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol* **251**, 1621–1624 (2013).

107. Famery, N. et al. Artificial chamber and 3D printed iris: a new wet lab model for teaching Descemet's membrane endothelial keratoplasty. *Acta Ophthalmol* **97**, e179–e183 (2019).

108. Themes, U. F. O. Simulation in Ophthalmology. Anesthesia Key <https://aneskey.com/simulation-in-ophthalmology/> (2017).

109. MultiLab, K. Étape 1 KITARO DryLab Étape 2 KITARO WetLab.

110. [phillipsstudio.co.uk](http://phillipsstudio.co.uk).

111. SimuloRhexis®. SimuleYE  
<https://www.simuleye.com/products/p/simulorhexis-kit>.

112. OKULO BLUE 5 (BL5) IRIS SUTURING. BIONIKO  
<https://bioniko.myshopify.com/products/okulo-blue-5-bl5>.

113. Rousseau, A. & Bourges, J.-L. Intérêt de la simulation dans la formation des internes à la chirurgie.

114. Henderson, B. A., Grimes, K. J., Fintelmann, R. E. & Oetting, T. A. Stepwise approach to establishing an ophthalmology wet laboratory. *Journal of Cataract and Refractive Surgery* **35**, 1121–1128 (2009).

115. Hosler, M. R. et al. Impact of resident participation in cataract surgery on operative time and cost. *Ophthalmology* **119**, 95–98 (2012).

116. Cour, M. la, Thomsen, A. S. S., Alberti, M. & Konge, L. Simulators in the training of surgeons: is it worth the investment in money and time? 2018 Jules Gonin lecture of the Retina Research Foundation. Medline Abbreviated Title: *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol* **257**, 877–881 (2019).

117. Cissé, C., Angioi, K., Luc, A., Berrod, J.-P. & Conart, J.-B. EYESI surgical

simulator: validity evidence of the vitreoretinal modules. *Acta Ophthalmol* **97**, e277–e282 (2019).

118. Lee, R. et al. A systematic review of simulation-based training tools for technical and non-technical skills in ophthalmology. *Eye (Lond)* **34**, 1737–1759 (2020).

119. Privett, B., Greenlee, E., Rogers, G. & Oetting, T. A. Construct validity of a surgical simulator as a valid model for capsulorhexis training. *J Cataract Refract Surg* **36**, 1835–1838 (2010).

120. Mahr, M. A. & Hodge, D. O. Construct validity of anterior segment anti-tremor and forceps surgical simulator training modules: Attending versus resident surgeon performance. *Journal of Cataract & Refractive Surgery* **34**, 980–985 (2008).

121. Belyea, D. A., Brown, S. E. & Rajjoub, L. Z. Influence of surgery simulator training on ophthalmology resident phacoemulsification performance. *J Cataract Refract Surg* **37**, 1756–1761 (2011).

122. Rossi, J. V. et al. Virtual vitreoretinal surgical simulator as a training tool. *Retina* **24**, 231–236 (2004).

123. Solverson, D. J. et al. Virtual reality simulation in acquiring and differentiating basic ophthalmic microsurgical skills. *Simul Healthc* **4**, 98–103 (2009).

124. Deuchler, S. et al. Clinical Efficacy of Simulated Vitreoretinal Surgery to Prepare Surgeons for the Upcoming Intervention in the Operating Room. *PLoS One* **11**, e0150690 (2016).

125. Vergmann, A. S., Vestergaard, A. H. & Grauslund, J. Virtual vitreoretinal surgery: validation of a training programme. *Acta Ophthalmologica* **95**, 60–65

(2017).

126. Rasmussen, R. C., Grauslund, J. & Vergmann, A. S. Simulation training in vitreoretinal surgery: a systematic review. *BMC Ophthalmol* **19**, 90 (2019).

127. Jaud, C. et al. EyeSi Surgical Simulator: validation of a proficiency-based test for assessment of vitreoretinal surgical skills. *Acta Ophthalmologica* **99**, 390-396 (2021).

128. Training simulators. <https://haag-streit.com/en/products/categories/simulators-training/training-simulators/eyes-surgical>.

129. Söderberg, P. et al. Performance index for virtual reality phacoemulsification surgery. in *Ophthalmic Technologies XVII* vol. 6426 262-270 (SPIE, 2007).

130. Söderberg, P. et al. Measuring performance in virtual reality phacoemulsification surgery. in *Ophthalmic Technologies XVIII* vol. 6844 172-180 (SPIE, 2008).

131. Söderberg, P., Erngrund, M., Skarman, E., Nordh, L. & Laurell, C.-G. VR-simulation cataract surgery in non-experienced trainees: evolution of surgical skill. in *Ophthalmic Technologies XXI* vol. 7885 136-143 (SPIE, 2011).

132. Sikder, S. et al. The use of a virtual reality surgical simulator for cataract surgical skill assessment with 6 months of intervening operating room experience. *Clinical Ophthalmology* **9**, 141-149 (2015).

133. Banerjee, P. P. et al. Concurrent and face validity of a capsulorhexis simulation with respect to human patients. *Stud Health Technol Inform* **173**, 35-41 (2012).

134. Bali, J., Bali, O., Sahu, A., Boramani, J. & Deori, N. Health economics and

---

manual small-incision cataract surgery: An illustrative mini review. *Indian J Ophthalmol* **70**, 3765–3770 (2022).

135. Nair, A., Ahiwalay, C., Bacchav, A., Sheth, T. & Lansingh, V. Assessment of a high-fidelity, virtual reality-based, manual small-incision cataract surgery simulator: A face and content validity study. *Indian J Ophthalmol* **70**, 4010 (2022).

136. Alcon introduces VR surgical training technology. *Ophthalmology Times* <https://www.opthalmologytimes.com/view/alcon-introduces-vr-surgical-training-technology> (2022).

137. The Metaverse in Ophthalmology? *CRSToday* <https://crstoday.com/articles/apr-2024/the-metaverse-in-ophthalmology>.

138. <https://fyra.io>. Alcon Introduces Virtual Reality Surgical Training Technology. *Eyewire+* <https://eyewire.news/news/alcon-introduces-virtual-reality-surgical-training-technology>.

139. Hutton, D. Orbis, FundamentalVR team up to target training. **49**, (2024).

140. CollaborationVR – Fundamental Surgery. <https://fundamentalsurgery.com/platform/collaborationvr/> (2022).

141. Mukherjee, B., Venkatakrishnan, J. V., George, B. & Sivaprakasam, M. Evaluation of an Ophthalmic Anesthesia Simulation System for Regional Block Training. *Ophthalmology* **122**, 2578–2580 (2015).

142. Testa, F. et al. Voretigene neparovec for inherited retinal dystrophy due to RPE65 mutations: a scoping review of eligibility and treatment challenges from clinical trials to real practice. *Eye* **38**, 2504–2515 (2024).

143. Yannuzzi, N. A. & Smiddy, W. E. Cost-effectiveness of Voretigene Neparovec-rzyl Therapy. *JAMA Ophthalmology* **137**, 1123–1124 (2019).

144. Selvander, M. & Åsman, P. Virtual reality cataract surgery training: learning curves and concurrent validity. *Acta Ophthalmologica* **90**, 412–417 (2012).
145. Spiteri, A. V. et al. Development of a virtual reality training curriculum for phacoemulsification surgery. *Eye (Lond)* **28**, 78–84 (2014).
146. Adnane, I., Chahbi, M. & Elbelhadji, M. Simulation virtuelle pour l'apprentissage de la chirurgie de cataracte. *Journal Français d'Ophtalmologie* **43**, 334–340 (2020).
147. OMARI, B. INFLUENCE DE LA SIMULATION DE LA PHACOÉMULSIFICATION EN RÉALITÉ VIRTUELLE SUR LES PERFORMANCES CHIRURGICALES DES RÉSIDENTS EN OPHTALMOLOGIE.
148. Hamdaoui, A. La validité du simulateur EyeSi pour l'initiation à la chirurgie de cataracte.
149. Feudner, E. M. et al. Virtual reality training improves wet-lab performance of capsulorhexis: results of a randomized, controlled study. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol* **247**, 955–963 (2009).
150. Nathoo, N., Ng, M., Ramstead, C. L. & Johnson, M. C. Comparing performance of junior and senior ophthalmology residents on an intraocular surgical simulator. *Can J Ophthalmol* **46**, 87–88 (2011).
151. Selvander, M. & Åsman, P. Cataract surgeons outperform medical students in Eyesi virtual reality cataract surgery: evidence for construct validity. *Acta Ophthalmologica* **91**, 469–474 (2013).
152. Daly, M. K., Gonzalez, E., Siracuse-Lee, D. & Legutko, P. A. Efficacy of surgical simulator training versus traditional wet-lab training on operating room performance of ophthalmology residents during the capsulorhexis in

cataract surgery. *J Cataract Refract Surg* **39**, 1734–1741 (2013).

153. Pokroy, R. et al. Impact of simulator training on resident cataract surgery. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol* **251**, 777–781 (2013).

154. Baxter, J. M., Lee, R., Sharp, J. a. H., Foss, A. J. E., & Intensive Cataract Training Study Group. Intensive cataract training: a novel approach. *Eye (Lond)* **27**, 742–746 (2013).

155. Thomsen, A. S. S., Kiilgaard, J. F., Kjaerbo, H., la Cour, M. & Konge, L. Simulation-based certification for cataract surgery. *Acta Ophthalmol* **93**, 416–421 (2015).

156. Roohipoor, R. et al. Early Performance on an Eye Surgery Simulator Predicts Subsequent Resident Surgical Performance. *Journal of Surgical Education* **74**, 1105–1115 (2017).

157. Bozkurt Oflaz, A., Ekinci Köktekir, B. & Okudan, S. Does Cataract Surgery Simulation Correlate with Real-life Experience? *Turk J Ophthalmol* **48**, 122–126 (2018).

158. Le, T. D. B., Adatia, F. A. & Lam, W.-C. Virtual reality ophthalmic surgical simulation as a feasible training and assessment tool: results of a multicentre study. *Canadian Journal of Ophthalmology* **46**, 56–60 (2011).

159. Yaïci, R. et al. Validity evidence of a new virtual reality simulator for phacoemulsification training in cataract surgery. *Sci Rep* **14**, 1–12 (2024).

160. Ahmed, T. M., Hussain, B. & Siddiqui, M. A. R. Can simulators be applied to improve cataract surgery training: a systematic review. *BMJ Open Ophthalmol* **5**, e000488 (2020).

161. Nayer, Z. H., Murdock, B., Dharia, I. P. & Belyea, D. A. Predictive and construct validity of virtual reality cataract surgery simulators. *J Cataract*

Refract Surg **46**, 907–912 (2020).

162. Saleh, G. M. et al. Objective Structured Assessment of Cataract Surgical Skill. *Archives of Ophthalmology* **125**, 363–366 (2007).

163. Shoaib, K. K. & Moin, M. RELIABILITY OF “OBJECTIVE STRUCTURED ASSESSMENT OF CATARACT SURGICAL SKILL (OSACSS)”: Objective Structured Assessment of Cataract Surgical Skill. *Pakistan Armed Forces Medical Journal* **67**, 847–52 (2017).

164. Wood, T. C., Maqsood, S., Nanavaty, M. A. & Rajak, S. Validity of scoring systems for the assessment of technical and non-technical skills in ophthalmic surgery—a systematic review. *Eye (Lond)* **35**, 1833–1849 (2021).

165. Jacobsen, M. F. et al. Correlation of virtual reality performance with real-life cataract surgery performance. *Journal of Cataract & Refractive Surgery* **45**, 1246–1251 (2019).

166. Selvander, M. & Åsman, P. Ready for OR or not? Human reader supplements Eyesi scoring in cataract surgical skills assessment. *Clin Ophthalmol* **7**, 1973–1977 (2013).

167. Cremers, S. L., Lora, A. N. & Ferrufino-Ponce, Z. K. Global Rating Assessment of Skills in Intraocular Surgery (GRASIS). *Ophthalmology* **112**, 1655–1660 (2005).

168. Thomsen, A. S. S. et al. Operating Room Performance Improves after Proficiency-Based Virtual Reality Cataract Surgery Training. *Ophthalmology* **124**, 524–531 (2017).

169. McCannel, C. A., Reed, D. C. & Goldman, D. R. Ophthalmic Surgery Simulator Training Improves Resident Performance of Capsulorhexis in the Operating Room. *Ophthalmology* **120**, 2456–2461 (2013).

170. Park, J. et al. Safety of nondominant-hand ophthalmic surgery. *Journal of Cataract and Refractive Surgery* **38**, 2112–2116 (2012).
171. Kageyama, T. et al. Visual results and complications of temporal incision phacoemulsification performed with the non-dominant left hand by junior ophthalmologists. *Br J Ophthalmol* **86**, 1222–1224 (2002).
172. Saleh, G. M. et al. The international forum of ophthalmic simulation: developing a virtual reality training curriculum for ophthalmology. *Br J Ophthalmol* **97**, 789–792 (2013).
173. Gonzalez-Gonzalez, L. A., Payal, A. R., Gonzalez-Monroy, J. E. & Daly, M. K. Ophthalmic Surgical Simulation in Training Dexterity in Dominant and Nondominant Hands: Results From a Pilot Study. *Journal of Surgical Education* **73**, 699–708 (2016).
174. Gupta, S., Haripriya, A., Ravindran, R. D. & Ravilla, T. Differences Between Male and Female Residents in Case Volumes and Learning in Cataract Surgery. *Journal of Surgical Education* **78**, 1366–1375 (2021).
175. Thorson, C. M., Kelly, J. P., Forse, R. A. & Turaga, K. K. Can We Continue to Ignore Gender Differences in Performance on Simulation Trainers? *Journal of Laparoendoscopic & Advanced Surgical Techniques* **21**, 329–333 (2011).
176. Ali, A., Subhi, Y., Ringsted, C. & Konge, L. Gender differences in the acquisition of surgical skills: a systematic review. *Surg Endosc* **29**, 3065–3073 (2015).
177. Fischer, P. et al. The racing-game effect: why do video racing games increase risk-taking inclinations? *Pers Soc Psychol Bull* **35**, 1395–1409 (2009).
178. Strasburger, V. C., Jordan, A. B. & Donnerstein, E. Health effects of media on children and adolescents. *Pediatrics* **125**, 756–767 (2010).

179. Mayo, M. J. Video games: a route to large-scale STEM education? *Science* **323**, 79–82 (2009).

180. Przybylski, A. K. & Mishkin, A. F. How the quantity and quality of electronic gaming relates to adolescents' academic engagement and psychosocial adjustment. *Psychology of Popular Media Culture* **5**, 145–156 (2016).

181. Peters, J. H. et al. Development and validation of a comprehensive program of education and assessment of the basic fundamentals of laparoscopic surgery. *Surgery* **135**, 21–27 (2004).

182. Adams, B. J., Margaron, F. & Kaplan, B. J. Comparing video games and laparoscopic simulators in the development of laparoscopic skills in surgical residents. *J Surg Educ* **69**, 714–717 (2012).

183. Jalink, M. B., Goris, J., Heineman, E., Pierie, J.-P. E. N. & ten Cate Hoedemaker, H. O. The effects of video games on laparoscopic simulator skills. *Am J Surg* **208**, 151–156 (2014).

184. Harbin, A. C. et al. Prior video game utilization is associated with improved performance on a robotic skills simulator. *J Robotic Surg* **11**, 317–324 (2017).

185. Chung, A. T. et al. Effect of fine-motor-skill activities on surgical simulator performance. *Journal of Cataract & Refractive Surgery* **43**, 915 (2017).

186. Dryden, S. et al. The effect of video game play on ophthalmic microsurgical simulator performance: a randomized controlled trial. *J Surg Simul* **72–76** (2021) doi:10.1102/2051-7726.2021.0009.

187. Khimani, K. et al. Video Game Warm-Up May Suggest Improvement in

Ophthalmic Surgical Simulator Performance in Surgically Naïve Students. *OPHTH Volume 16*, 2561–2568 (2022).

188. Young, B. K. & Greenberg, P. B. Is virtual reality training for resident cataract surgeons cost effective? *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol* **251**, 2295–2296 (2013).

189. Lowry, E. A., Porco, T. C. & Naseri, A. Cost analysis of virtual–reality phacoemulsification simulation in ophthalmology training programs. *J Cataract Refract Surg* **39**, 1616–1617 (2013).



أطروحة رقم 25/006

سنة 2025

## الفعالية التعليمية لجهاز المحاكاة EyeSi في جراحة داء المياه البيضاء

### الأطروحة

قدمت و نوقشت علانية يوم 2025/01/03

### من طرف

السيد العمود إسماعيل

المزداد في 01 نونبر 1998 بمكناس

لنيل شهادة الدكتوراه في الطب

الكلمات المفتاحية

محاكاة – جراحة – طب وجراحة العيون – تدريب – داء المياه البيضاء

### اللجنة

السيد صقلي حسيني طارق..... الرئيس

أستاذ في أمراض الكلي

السيد ابن عطية الأندلسي ادريس..... المشرف

أستاذ في طب وجراحة العيون

السيد بوكطة ابراهيم.....

أستاذ في التخدير والإنعاش

السيدة عبدلاوي مريم.....

أستاذة في طب وجراحة العيون

السيد الشرايبي فؤاد.....

أستاذ في طب وجراحة العيون

السيد بنيس أحمد.....

أستاذ في طب وجراحة العيون

السيد مطيع حسن..... عضو مشارك

أستاذ مساعد في طب وجراحة العيون