

PLAN

LISTE DES ABREVIATIONS	8
I. INTRODUCTION	9
II. Rappel anatomique :	11
A. Anatomie générale du globe oculaire	11
B. Anatomie et embryologie du cristallin.....	15
1. Embryologie	15
a. Cristallin	15
b. Zonula	16
2. Anatomie Descriptive	17
a. Cristallin	17
1. Capsule	18
2. Epithélium	18
3. Fibres	18
b. Zonula	19
3. Anatomie microscopique	19
a. Cristallin	19
1. Capsule	19
2. Epithélium	19
3. Fibres cristalliniennes	20
b. Zonula	21
4. Anatomie fonctionnelle : Rôle du cristallin	21
5. Rapports anatomiques	21
a. Antérieurs	21
b. Postérieurs	22
c. Équatoriaux ou périphériques	22
III. La physiologie du cristallin	24
A. Biophysique	24

1. Transmission de la lumière	24
2. Réfraction	24
3. Transparence	24
4. Accommodation	25
5. Aberrations chromatiques	26
6. Aberrations sphériques	26
B. Biochimie	27
1. Composition chimique du cristallin	27
a. Lipides	27
b. Protéines	27
2. Métabolisme du glucose et production d'énergie	28
3. Dommage oxydative et mécanismes de protection	28
4. Balance d'eau et des électrolytes	30
C. Synthèse des fibres cristalliniennes	32
D. Changements avec l'âge	34
1. Morphologie	34
1. Capsule	34
2. Epithélium	34
3. Fibres cristalliniennes	34
2. Accommodation et presbytie	34
3. Changements biochimiques	35
IV. Physiopathologie de la cataracte	36
V. Techniques chirurgicales de la cataracte	38
A. La phacoémulsification	38
B. L'extraction extra-capsulaire	51
C. L'extraction intracapsulaire	52
D. Chirurgie de la cataracte assistée par laser femtoseconde	52

VI. Simulation en médecine	55
A. Définition	55
B. Historique de la simulation en santé	56
C. Techniques de simulation	58
1. Patient standardisé ou patient simulé	58
2. Simulation procédurale ou simulateur basse-fidélité	59
3. Simulation hybride	60
4. Les simulateurs haute-fidélité dits « pleine échelle »	61
5. Les simulateurs tactiles et laparoscopie chirurgicale	62
6. Réalité virtuelle basée sur des interfaces écran	62
7. Environnement en 3D	63
D. Transfert à la pratique clinique	64
E. Intérêts et limites de la simulation en santé	64
1. Intérêts	64
2. Limites de la simulation.....	66
VII. Simulation en ophtalmologie	68
A. Simulateurs d'examen ophtalmologique	68
1. Eyesi Slit Lamp	68
2. Simulateurs d'ophtalmoscopie directe	69
a. Le simulateur d'examen EYE (Eye Exam Simulator)	70
b. Eyesi Direct	71
c. OPHTOSIM	72
3. Simulateurs d'ophtalmoscopie indirecte	73
a. VRmagic simulator	73
b. Modèle de globe oculaire	76
c. Plastic Canister model : Modèle d'œil en boîte de plastique	77
B. La Simulation de la chirurgie ophtalmologique	79

1. Simulation de la chirurgie de cataracte par réalité virtuelle	79
a. EyeSI : Ophthalmic Surgical Simulator	79
b. PhacoVision	84
c. MicroVisTouch	85
2. Progrès dans la formation de la chirurgie de la cataracte par simulateur.....	86
3. Simulation de la chirurgie de cataracte par Wet-lab	88
4. La simulation de la chirurgie de cataracte par les kits « Kitaro »	90
5. Yeux simulés pour chirurgie oculaire 'Simulated ocular surgery eyes'	93
C. Autres simulateurs en ophtalmologie	99
1. Simulation de la capsulotomie postérieure au laser YAG	99
2. Simulateurs d'anesthésie locorégionale en ophtalmologie Ophthalmic Anesthesia Simulation System : OASiS)	102
VIII. Matériels et méthodes	104
A. Le cadre de l'étude	104
B. L'objectif de l'étude	104
C. Population étudiée	105
D. La collecte et la saisie des données	105
E. L'analyse statistique	107
IX. RESULTATS	108
A. Les caractéristiques de notre échantillon	108
B. Simulation en médecine et en ophtalmologie	113
C. Apprentissage de la chirurgie de cataracte	115
D. Le degré d'utilisation et d'expérience sur le simulateur "EyeSI"	122
E. La courbe d'apprentissage dans la chirurgie par phacoémulsification	128
1. Nombre de phacoémulsification réalisées avant la diminution du stress et augmentation de la confiance	128
2. Nombre de phacoémulsification nécessaire pour acquérir une bonne	

manipulation du microscope	130
3. Nombre de phacoémulsification nécessaire pour acquérir une meilleure navigation dans le segment antérieure	132
4. Nombre de phacoémulsifications nécessaire pour gérer le problème de tremblement.....	134
5. Après combien de phacoémulsification avez-vous acquis une bonne coordination des 2 mains	136
6. Après combien de phacoémulsification avez-vous acquis une bonne coordination des 2 mains et des 2 pieds	138
7. Après combien de phacoémulsification avez-vous pu réaliser un Capsulorhégis circulaire de 5-6mm et bien centré	140
8. Après combien de phacoémulsification votre temps de chirurgie a diminué.....	142
9. Après combien de phacoémulsification votre utilisation des ultrasons a diminué	144
10. Après combien de phacoémulsification avez-vous accélérer votre courbe d'apprentissage.....	146
F. Les complications.....	148
G. Appréciation concernant le simulateur	153
X. DISCUSSION.....	155
A. Validité du simulateur EyeSi	156
1. Validité de construction du simulateur EyeSI	156
2. Validité concourante du simulateur EyeSI	159
3. Validité prédictive du simulateur EyeSI	163
B. Impact du simulateur dans la diminution des Complications	163
1. Études qui ont montré une diminution des complications	165
2. Études qui n'ont pas montré une diminution des complications	168

C. Intérêt du simulateur Eyesi dans l'amélioration de la courbe d'apprentissage et diminution du temps opératoire.....	170
D. Corrélation entre la performance au niveau du simulateur Eyesi et celle en vraie vie.	173
E. Développement d'un programme de formation à partir des modules qui ont approuvé une validité de construction	176
F. Simulateur et COVID 19	183
G. Analyse du coût de l'EyeSI	183
H. Critiques sur le simulateur	185
I. Comparaison de nos résultats avec ceux de la littérature	186
1. Simulation en médecine et en ophtalmologie	186
2. Questions sur la chirurgie de cataracte	188
3. Simulateur EyeSi	190
4. Partie courbe d'apprentissage dans la chirurgie de phacoémulsification	192
5. Les complications	195
6. Les avis des résidents par rapport au simulateur.....	197
XI. CONCLUSION.....	199
XII. RESUME.....	200
XIII. REFERENCES.....	208

LISTE DES ABREVIATIONS

ADN	: Acide désoxyribonucléique
ATP	: Adenosine triphosphate
DVP	: Décollement postérieur du vitré
EEC	: Extraction extracapsulaire
EYE	: Eye Exam Simulator
HAS	: Haute Autorité de Santé
HMS	: Help Me See
IOL	: Implant intraoculaire
MER	: Membrane épirétinienne
MIP	: Major intrinsic protein
MIP26	: Major intrinsic protein 26
MLI	: Membrane limitante interne
MSICS	: Manuel Small Incision Cataract Surgery
NHS	: National Health Service
OASiS	: Ophthalmic Anesthesia Simulation System :
OCP	: Opacification capsulaire postérieure
RCP	: Rupture capsulaire postérieure
UV	: Ultraviolet

I. INTRODUCTION

En 2012, La Haute Autorité de Santé (HAS) a défini la simulation en santé comme étant l'utilisation d'un matériel (comme un mannequin ou un simulateur procédural) de la réalité virtuelle ou d'un patient standardisé pour reproduire des situations ou des environnements de soin, dans le but d'enseigner des procédures diagnostiques et thérapeutiques et de répéter des processus, des concepts médicaux ou des prises de décision par un professionnel de santé ou une équipe de professionnels. [1]

Les différentes techniques de simulation les plus utilisées en pratique dans le domaine de la santé sont : Patient standardisé ou patient simulé, Simulation procédurale ou simulateur basse-fidélité, Simulation hybride, Les simulateurs haute-fidélité dits « pleine échelle », Les simulateurs tactiles et laparoscopie chirurgicale, simulation par réalité virtuelle et Environnement en 3D.

En ophtalmologie aussi, la simulation gagne de plus en plus d'intérêt et plusieurs types de simulateurs sont utilisés pour la formation initiale et continue des étudiants et des résidents en ophtalmologie. Ainsi, on note la présence des simulateurs d'examen ophtalmologique qui reproduisent avec grande fidélité l'examen par ophtalmoscopie direct et indirect. Il y aussi des simulateurs de la chirurgie ophtalmologique de différents types : les Wet labs, les Dry labs, la réalité virtuelle. Cette dernière gagne une grande place dans la formation chirurgicale des résidents avec le simulateur EyeSI comme étant le plus utilisé dans la formation de la chirurgie de cataracte et de la chirurgie vitréorétinienne.

L'objectif de notre thèse est de montrer l'influence du simulateur EyeSI dans l'amélioration des performances chirurgicales des résidents en ophtalmologie et ceci en montrant l'impact de son introduction dans la formation chirurgicale des résidents sur l'amélioration de la courbe d'apprentissage, la réduction du taux de complications, la réduction du temps opératoire et la diminution du stress et l'augmentation de la confiance en soi.

Le globe oculaire est l'organe de la vision. Il est contenu dans l'orbite, au nombre de deux situés de chaque côté de la racine du nez entre les os du crâne et ceux de la face. Il a la forme d'une sphère ou d'un ovoïde avec un axe sagittal = 24 mm, un axe transversal = 23,5 mm et un autre vertical = 23 mm. Son poids est de 7 grammes avec un volume de 6,5 cm³

Le globe oculaire est fait d'une paroi et d'un contenu :

– **La paroi :**

La paroi est constituée de 3 enveloppes concentriques, formées de dehors en dedans par :

- **La sclère ou sclérotique** (tunique périphérique) : elle constitue les 4/5 postérieurs du globe oculaire et se continue en avant par la cornée. La zone de jonction entre les deux est formée par le limbe scléro-cornéen
- **L'uvée** : c'est une membrane musculo-vasculaire intermédiaire, constituée en avant par le corps ciliaire et l'iris et en arrière par la choroïde.
- **La rétine** (tunique profonde) : est une fine membrane tapissant la surface interne du globe. C'est un tissu neurosensoriel. Il est capable de capter les rayons lumineux et de transmettre les informations visuelles au système nerveux central. Elle formée par l'épithélium pigmentaire (couche externe de la rétine) et la rétine neurosensorielle (couche interne de la rétine).

– **Le contenu du globe oculaire :**

– Il formé par les milieux transparents d'avant en arrière :

- **La cornée** : est une structure transparente, avasculaire, richement innervée. Elle est enchâssée comme un verre de montre dans la partie antérieure de la sclérotique. Elle constitue la partie antérieure du globe oculaire. Sa face antérieure est lisse et convexe. Sa face postérieure concave est en contact

avec l'humeur aqueuse et forme la paroi antérieure de la chambre antérieure de l'œil. [6]

En périphérie se trouve le limbe, tissu très vascularisé et représente la zone de jonction entre la périphérie cornéenne transparente et la sclère opaque et qui est un réservoir en cellules à haute capacité proliférative qui constituent la source de régénération de l'épithélium cornéen.

La cornée se compose d'avant en arrière de six couches successives : [6]

- L'épithélium cornéen : indissociable du film lacrymal. Il représente 10 % de l'épaisseur cornéenne totale (30 à 50 μm). C'est un épithélium à renouvellement rapide, pavimenteux stratifié, non kératinisé. Il comprend 5 à 7 assises de cellules dans sa partie centrale et 8 à 10 dans sa partie périphérique. L'épithélium cornéen est composé de 3 types de cellules reposant sur une membrane basale : Cellules superficielles, cellules intermédiaires et cellules basales. Au sein de cet épithélium, on retrouve des lymphocytes, des cellules de Langerhans présentatrices d'antigènes et des mélanocytes. Ces cellules non-épithéliales sont essentiellement présentes à la périphérie de l'épithélium et dans la région limbique.
- Membrane de Bowman : mesure de 8 à 10 μm d'épaisseur et est située entre la membrane basale de l'épithélium cornéen et le stroma. Elle est composée de fibrilles de collagènes.
- Stroma : mesure environ 500 μm . Il constitue à lui seul 90% de l'épaisseur cornéenne et est en grande partie responsable de la stabilité, de la solidité et de la transparence cornéenne. Il est composé de : lamelles de collagène, substance fondamentale : riche en mucopolysaccharides, en eau et fibrocytes cornéens.

- Membrane de Dua : couche découverte en 2013, acellulaire, d'une épaisseur de 15 μm , composée de 5 à 8 lamelles de collagène de type I. elle est caractérisée par une grande solidité. [7]
- Membrane de Descemet : mesure environ 10 μm . Elle sépare le stroma de la monocouche endothéliale. C'est une membrane résistante, amorphe et élastique. Elle est fortement riche en glycoprotéines.
- Endothélium : la couche la plus postérieure de la cornée. Il joue un rôle très important dans la déturgescence de la cornée.
- **L'humeur aqueuse** : C'est un liquide incolore, limpide siégeant dans les chambres antérieure et postérieure. Il s'agit d'un ultrafiltrat plasmatique à partir des vaisseaux de l'iris et des procès ciliaires et sa résorption est faite par le trabéculum puis vers le canal de Schlemm et les veines épisclérales.
- **Le cristallin** : entre l'iris en avant et le vitré en arrière.
- **Le corps vitré** : C'est un gel transparent, entouré d'une fine membrane, la membrane hyaloïde, remplissant les quatre cinquièmes de la cavité oculaire. Il est situé entre le cristallin en avant et la rétine en arrière

L'ensemble de ces structures est habituellement individualisé, tant sur le plan anatomique que clinique, en deux segments :

- **Le segment antérieur** : comportant d'avant en arrière : la cornée, l'humeur aqueuse, l'iris, l'angle irido-cornéen, le corps ciliaire et le cristallin. Il est divisé lui-même en 2 zones :
 - La chambre antérieure : entre la cornée et l'iris.
 - La chambre postérieure : entre l'iris et le cristallin en arrière
- **Le segment postérieur** : formé par la sclérotique, la choroïde, la rétine et le vitré.

B. Anatomie et embryologie du cristallin :

1. Embryologie : [8]

L'œil et les tissus orbitaires se développent à partir de l'ectoderme, mésoderme et les cellules de la crête neurale (grande contribution). Ces cellules contribuent aussi au développement du crâne, de la face et des dents.

a. Cristallin :

Le développement du cristallin se fait en plusieurs stades :

- Invagination de l'ectoderme en regard de la vésicule optique formant *la placode cristallinienne*, qui devient *la fossette cristallinienne*, qui s'approfondit pour former *la vésicule cristallinienne*, puis la fermeture de cette vésicule sous forme d'un corps sphérique creux c'est l'ébauche du cristallin.
- Les cellules antérieures forment l'épithélium antérieur
- Les cellules de la paroi postérieure forment les fibres primaires qui vont combler progressivement la cavité vésiculaire, l'évolution des fibres primaires constituant ainsi le noyau embryonnaire.

Par la suite, Les fibres cristalliniennes secondaires se développent à partir de la région équatoriale et en s'allongeant elles forment le noyau fœtal par apposition. Ainsi, elles donneront au cristallin son organisation en bulbe d'oignon.

- Les cellules externes restantes forment une membrane basale qui s'appelle la capsule cristallinienne (figure 2).
- **Vascularisation** : En période fœtale : Elle se fait à partir de l'artère hyaloïde, qui s'étend du pôle postérieur, et enveloppe le cristallin. L'artère hyaloïde régresse ; par la suite ; laissant une zone centrale claire à travers le corps vitré, appelé le « canal de Cloquet » ou canal hyaloïde avec persistance d'une adhérence capsulo-hyaloïdienne solide.

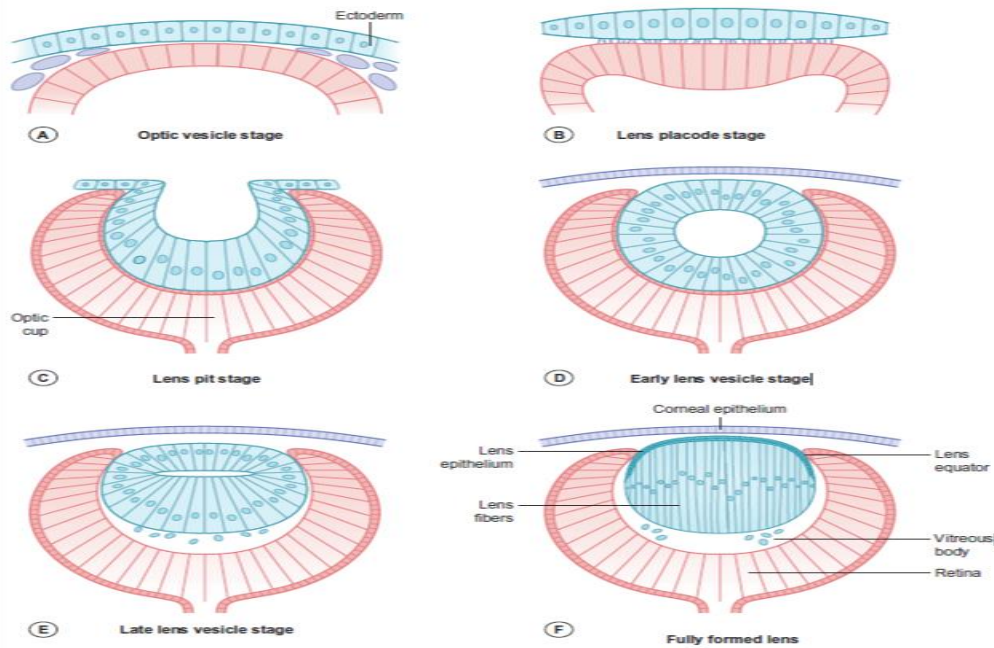


Figure 2 : Les étapes du développement du cristallin [9]

b. Zonula :

La zonule de Zinn apparaît dans la zone annulaire située entre le corps ciliaire et l'équateur du cristallin est appelée zonule vitrénne occupée par du vitré primitif refoulé par le développement du vitré définitif.

- la zonule vitrénne est envahie par des fibrilles produites par l'épithélium ciliaire. Ces fibrilles s'organisent en fibres qui s'attachent sur la capsule cristallinienne pour former la zonule définitive.

2. Anatomie Descriptive :

a. Cristallin :

Le cristallin a la forme d'une lentille biconvexe aplatie en avant, avec deux faces antérieure et postérieure reliées par un équateur, chacune de ces faces est centrée par un pôle antérieur et postérieur.

- Il a la forme d'un sphéroïde oblate asymétrique.
- Le cristallin est constitué d'une capsule périphérique qui l'enveloppe, d'un épithélium sous la capsule au niveau de la face antérieure et des fibres cristalliniennes qui forment sa masse essentielle (figure 3). [8] [9] [10] [11]

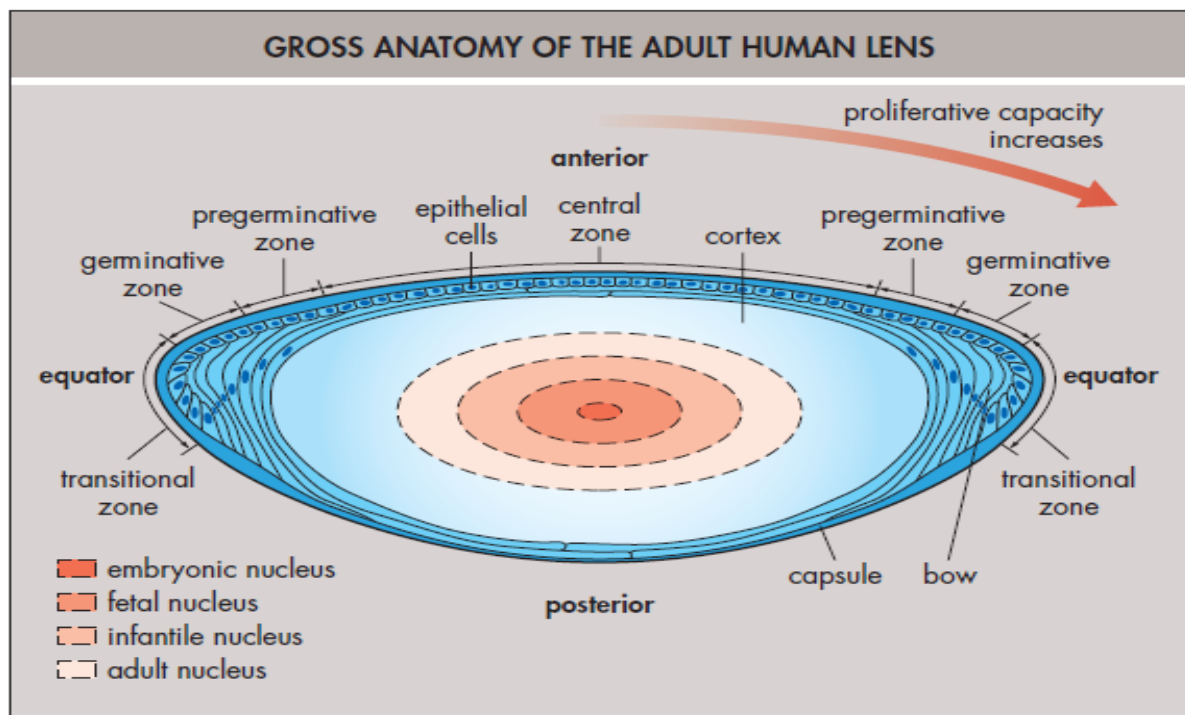


Figure 3 : Anatomie macroscopique du cristallin [12]

1. Capsule :

C'est une lame basale non cellulaire épaisse qui entoure le cristallin, elle est translucide et rétractile. Lieu d'insertion des fibres zonulaires proche de l'équateur. Elle est plus épaisse en avant qu'en arrière, avec un épaississement maximal à l'équateur.

- La capsule antérieure est produite par l'épithélium antérieur, et son épaisseur augmente avec l'âge. L'épaisseur de la capsule postérieure change très peu au cours de la vie. Elle constitue la barrière entre les fibres du cristallin et l'humeur aqueuse ou le vitré. [8] [9] [10] [11]

2. Epithélium

Il est situé uniquement sur la face antérieure du cristallin sous-jacent à la capsule et s'étendant jusqu'à l'équateur.

3. Fibres cristalliniennes :

Se juxtaposent au fur et à mesure de leur formation. Elles ont pour origine les cellules de l'épithélium antérieur, qui vont basculées au niveau de l'équateur. Elles forment le noyau embryonnaire, fœtal, infantile et adulte et le cortex du cristallin (il se forme à partir de l'âge de 20). Elles s'étendent toutes de la face antérieure à la face postérieure du cristallin.

Les Sutures :

- Les fibres les plus anciennes (du noyau embryonnaire) se trouvent dans la région centrale et leur trajet est presque rectiligne (pas de sutures).
- Les fibres les plus jeunes se trouvent en périphérie du cristallin et présentent un trajet incurvé se mouvant sur les noyaux plus anciens. Leurs insertions sur les faces antérieure et postérieure se font sur des lignes de sutures qui se disposent en Y sur la face antérieure et un Y inversée sur la face postérieure.

[8] [9] [10] [11]

b. Zonula :

Ligament suspenseur fixant le cristallin au corps ciliaire qui lui transmet l'action du muscle ciliaire. Il joue un rôle important dans l'accommodation.

Elle constitue un anneau de fibres zonulaires de forme triangulaire à sommet externe qui s'insère sur le corps ciliaire et s'insère sur les faces antérieure et postérieure de l'équateur. Cet agencement des fibres zonulaires ménage un espace, appelé espace de Petit.

Nous décrivons classiquement quatre types de fibres radiées : fibres orbiculo-capsulaires postérieures, fibres orbiculo-capsulaires antérieures, fibres cilio-capsulaires postérieures, fibres cilio-équatoriales. Elles sont renforcées par des fibres zonulaires cilio-ciliaires de diamètre très fin, ces derniers se divisent en fibres orbiculociliaires et fibres interciliaires.

3. Anatomie microscopique : [8] [10] [11]

a. Cristallin :

1. Capsule :

C'est une membrane basale non cellulaire, constituée essentiellement de collagène de type IV 1 et de constituants de la matrice extracellulaire (glycosaminoglycanes, laminine, bronectine...).

La capsule a une composition lamellaire. Cette structure est perméable à l'eau, aux ions, aux petites molécules et protéines. Mais, elle constitue une barrière pour les molécules de taille égale ou supérieure à celle de l'albumine ou de l'hémoglobine.

2. Epithélium :

Il s'agit d'un épithélium unistratifié dont les cellules sont aplaties (cubiques) dans la zone centrale, et allongées (cylindrique) dans la région équatoriale. La densité augmente du centre vers la périphérie.

Les cellules épithéliales ont un grand nombre d'organites et contiennent des corps denses et des particules de glycogène. Elles contiennent aussi trois éléments du cytosquelette : les filaments d'actine, intermédiaires (vimentin) et les microtubules.

L'attachement latéral aux cellules adjacentes se produit à travers les desmosomes et les jonctions serrées.

Selon la densité cellulaire, quatre zones sont distinctes : la zone épithélio-centrale, la zone épithélio-distale, la zone germinative (mitotique) et la zone de transition (protofibres).

Les mitoses sont observées en grand nombre essentiellement dans la région pré-équatoriale, qui prend le nom de zone germinative.

3. Fibres cristalliniennes :

Elles présentent une forme hexagonale aplaties.

Les plus superficielles possèdent un noyau ovalaire et décrivent une ogive qui contourne l'équateur. Elles s'engrènent latéralement avec leurs voisines.

En profondeur, les fibres cristalliniennes ont un aspect plus rectiligne et sont plus courtes, elles perdent leur noyau et les organites sont raréfiés et épars avant de disparaître.

- **Protéines cristalliniennes**

- Cristallines : Au cours de la différenciation des cellules épithéliales en fibres cristalliniennes, des protéines spécifiques ou cristallines (type α ; β , γ) synthétisées s'accumulent dans leur cytoplasme. Elles représentent 90% des protéines cristalliniennes. Elles ont un rôle crucial dans l'augmentation de l'indice de réfraction et de la transparence du cristallin.
- Major intrinsic protein (MIP): Elle se trouve au niveau des membranes plasmiques des fibres cristalliniennes. Les MIP sont des aquaporines qui

permettent de réduire les espaces interfibres pour une bonne transparence des structures.

- Taxon-specific crystallins : Elles sont des oxydoréductases, qui fixent les nucléotides pyridiniques, et leur présence dans le cristallin augmente de manière significative la concentration des nucléotides fixés.

b. Zonula :

Les fibres sont elles-mêmes constituées de microfibrilles, composées de fibrilline. Il est important de noter que les microfibrilles de fibrillines sont constituées de glycoprotéine et s'associent habituellement à l'élastine pour former les fibres élastiques du tissu conjonctif.

4. Anatomie fonctionnelle : Rôle du cristallin

- Les fonctions du cristallin sont :

- Maintenir sa propre transparence
- Réfraction de la lumière
- Assurer l'accommodation en collaboration avec zonule et corps ciliaire.

5. Rapports anatomiques :

a. Antérieurs :

Le cristallin répond à la face postérieure de l'iris avec la pupille, délimitant 3 zones concentriques :

- Région pupillaire en forme d'une calotte centrée en regard de la pupille, son diamètre varie avec celui de la pupille
- Un anneau à la partie moyenne de sa face antérieure, où l'iris est en relation très étroite avec le cristallin
- Une couronne périphérique où le cristallin s'écarte progressivement de l'iris pour former la chambre postérieure, dont les limites externes sont

constituées par l'angle irido-ciliaire et la face antérieure de la zone ciliaire.

Il est séparé de la cornée par l'humeur aqueuse, dont la distance détermine la profondeur de la chambre antérieure aux alentours de 4 à 5 mm (figure 5).

b. Postérieurs :

La face post du cristallin répond au corps vitré avec deux zones concentriques :

- La première est centrée sur le pôle postérieur, et forme une calotte sur laquelle est étroitement appliquée la hyaloïde antérieure. Cette zone, appelée area de Vogt ou fossette patellaire, est circonscrite par une ligne d'adhérence forte et circulaire entre la hyaloïde et le cristallin : ligament de Berger ou ligament hyaloïdo-capsulaire de Berger.
- La seconde forme une couronne en dehors du ligament de Wieger où la hyaloïde s'écarte progressivement créant un espace virtuel rétro-zonulaire qui s'appelle 'canal de Hannover' (figure 5).

c. Équatoriaux ou périphériques :

L'équateur du cristallin répond à la zone ciliaire, ou ligament suspenseur du cristallin, et à l'espace de Petit (figure 5).

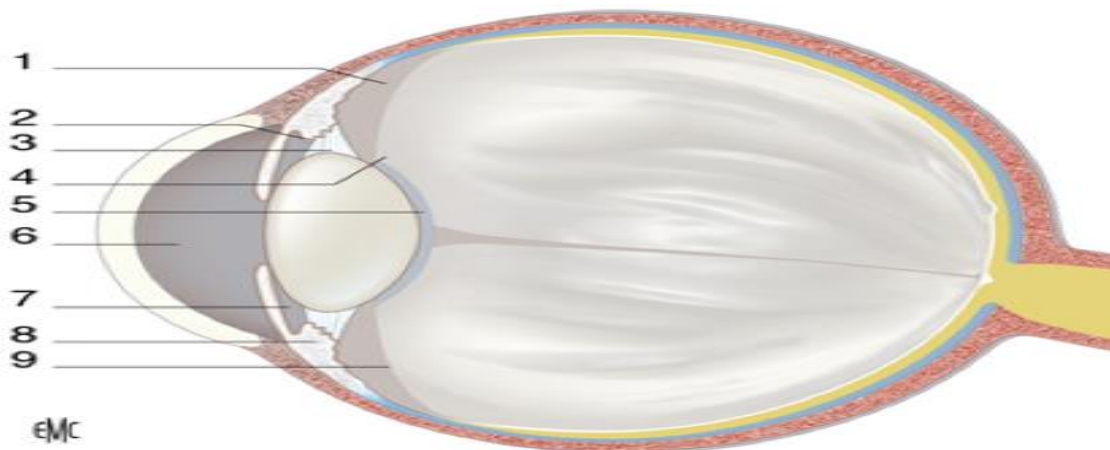


Figure 5 : Coupe sagittale du globe oculaire et rapports du cristallin. 1. Rapport de Hannover ; 2. zonule de Zinn ; 3. espace de Petit ; 4. ligament de Wieger ; 5. fossette patellaire ; 6. chambre antérieure ; 7. chambre postérieure ; 8. corps ciliaire ; 9. hyaloïde antérieure. [8]

III. La physiologie du cristallin : [9] [10] [11] [12] [13] [14]

A. Biophysique :

1. 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. [9] [10] [11] [12] [13] [14]

2. 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 cristallin, n représente l'indice de réfraction moyen du cristallin

3. Transparence:

La transparence du cristallin est due à :

- Structure régulière des fibres cristalliniennes.
- Les espaces extracellulaires entre les fibres cristalliniennes sont uniformes et petits.

- L'absence de noyau et d'organites cellulaires au niveau des fibres cristalliniennes.
- La grande concentration des cristallines dans le cytoplasme des fibres cristalliniennes[9] [10] [11] [12] [13] [14].

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 :

- Accommodation
- Convergence
- Myosis

Changements durant l'accommodation : La contraction du muscle ciliaire entraîne :

- Diminution du diamètre du cristallin
- Augmentation de l'épaisseur du cristallin
- Augmentation de la courbure de la partie centrale de la surface antérieure et avec moindre degré celle de la surface postérieure.
- Surface antérieure devient plus antérieure et surface postérieure devient plus postérieure

Ceci entraîne des changements physiques du cristallin et aussi de l'œil permettant l'augmentation du pouvoir optique (Adolescent 12-16 D) 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 → Modifications minimales dans la clarté de l'image. Cependant lors de l'accommodation, la réfraction augmente ce qui entraîne une augmentation des aberrations chromatiques

6. Aberrations sphériques :

Le cristallin diminue ces aberrations par :

- Index de réfraction qui augmente de la périphérie vers le centre.
- La courbure des deux capsules antérieure et postérieure augmente vers les pôles.
- La courbure de la capsule antérieure est plus importante que celle de la capsule postérieure.

B. Biochimie :

1. Composition chimique du cristallin :

a. 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.

b. 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 7)

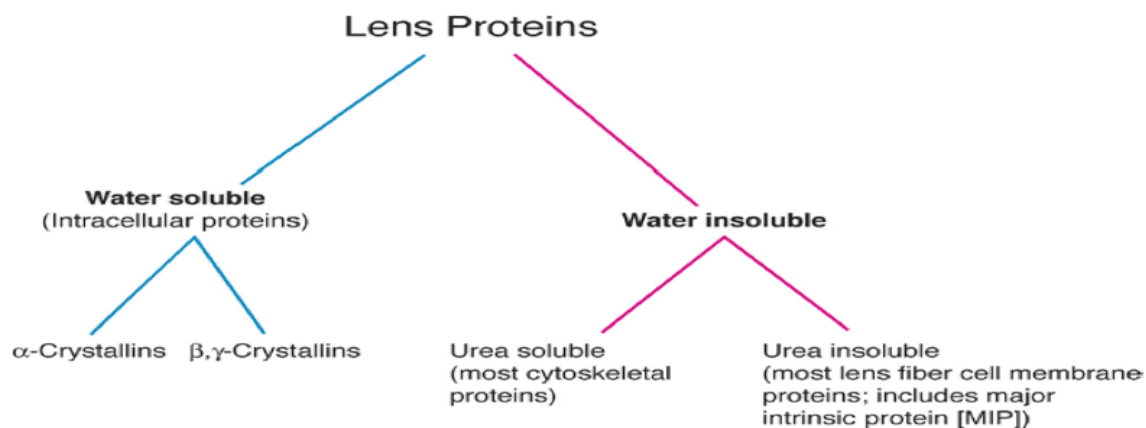


Figure 7 : Les protéines du cristallin [13]

Cristallines :

Les cristallines constituent 90–95% du total des protéines du cristallin, elles sont divisées en 2 groupes :

- Les α -cristallines : La fonction antiagrégative de l' α -cristalline est cruciale pour la maintenance à long terme de la transparence des fibres cristalliniennes.
- Les β et γ -cristalline : les fonctions spécifiques du β,γ -cristallines ne sont pas connues.

Cytosquelette et protéines membranaires :

La majorité des protéines du cristallin sont soluble dans l'eau, cependant certaines protéines structurales importantes ne peuvent pas être solubilisé, nous distinguons :

- Les éléments du cytosquelette : représentés majoritairement par les filaments d'actine, les filaments intermédiaires (vimentin) et les microtubules.
- Protéines membranaires : une protéine quantitativement dominante : MIP 5.

2. Métabolisme du glucose et production d'énergie :

La production énergétique dans le cristallin dépend essentiellement du métabolisme glycolytique anaérobie (2/3 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 nécessaire provient de l'humeur aqueuse (par diffusion facilitée et simple).

3. Dommages oxydatifs et mécanismes de protection :

Le stress oxydatif et photo-oxydatif (induits par les ultraviolets A et B) conduisent 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 par :

- L'induction des dommages dans les bases de l'ADN et la diminution de l'efficacité de la réparation de l'ADN.
- La polymérisation et la réticulation des lipides et des protéines entraîne une agrégation des cristallines et l'inactivation des enzymes anti-oxydantes, entraînant ainsi l'augmentation du contenu du cristallin en protéines insolubles dans l'eau.
- L'attaque des protéines et des lipides membranaires au niveau du cortex du cristallin

L'ensemble de ces changements aboutit à une perte de la transparence du cristallin.

4. Balance d'eau et des électrolytes :

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 du 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 outre de cela, les cellules épithéliales et les fibres cristalliniennes contiennent des canaux, des pompes et des transporteurs qui permettent les 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.

Épithélium du cristallin : site du transport actif :

Le cristallin contient une concentration plus importante de potassium et d'acides aminés que l'humeur aqueuse et le corps vitré qui l'entourent.

Au contraire, il contient une concentration moins importante en sodium (Na⁺), en chlore (Cl⁻) et en eau que l'environnement qui l'entoure.

La balance des cations entre l'intérieur et l'extérieur de cristallin est la résultante de : **Théorie Pump-leak (figure 8) :**

- Les propriétés de perméabilité des membranes cellulaires du cristallin.
- L'activité de la pompe sodium-potassium qui refoule Na⁺ vers l'extérieur et fait rentrer le K⁺ vers l'intérieur

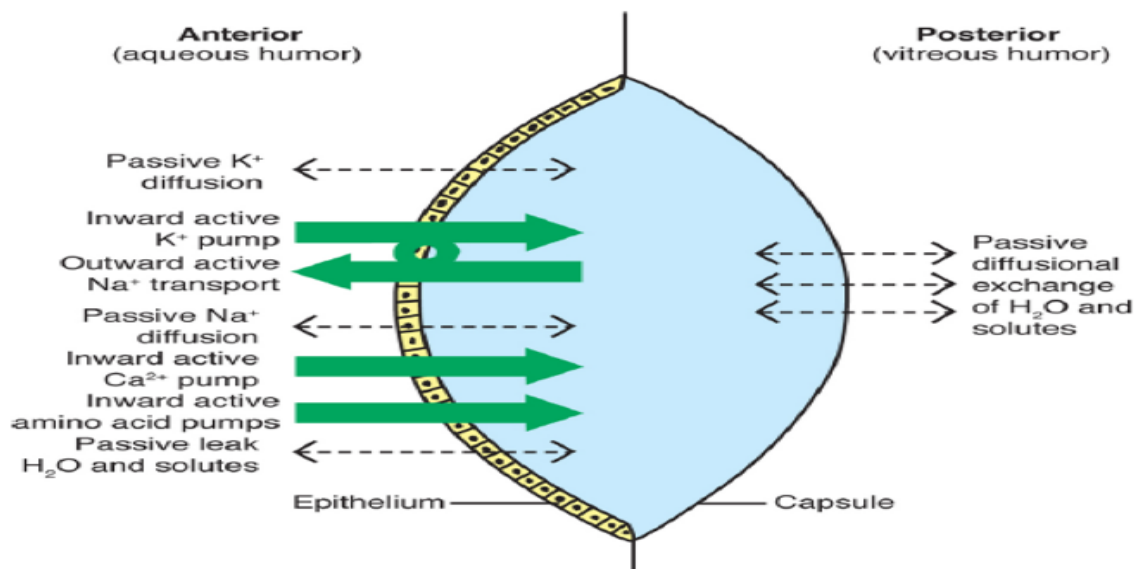


Figure 8 : Théorie Pump-leak [11]

Il existe aussi un gradient de pH qui augmente du noyau du cristallin vers la périphérie.

- Les fibres cristalliniennes doivent "éliminer" de façon continue les protons intracellulaires qui s'accumulent secondairement par mouvement vers l'intérieur des ions positifs depuis le milieu extracellulaire, suite à l'accumulation l'acide lactique provenant de la glycolyse anaérobie (pour maintenir un pH à 7)

Rôle des jonctions Gap :

La communication des fibres cristalliniennes du centre du cristallin avec les cellules superficielles et l'environnement extérieur se fait par les jonctions communicantes Gap, qui facilitent l'échange des petites molécules (< 1 kDa) entre les cellules.

Cet échange est très important pour le fonctionnement du cristallin, car la majorité des fibres cristalliniennes sont loin des nutriments provenant de l'humeur aqueuse et du corps vitré.

C. Synthèse des fibres cristalliniennes

Durant leur différenciation, les fibres cristalliniennes connaissent plusieurs modifications (Figure 9) :

- Premièrement, les fibres cellulaires "se retirent" du cycle cellulaire des cellules épithéliales proches de l'équateur du cristallin.
- S'allongent progressivement
- Des protéines spécifiques ou cristallines sont synthétisées et s'accumulent dans le cytoplasme.
- Acquisition des spécialisations au niveau des membranes plasmiques.
- Dégradation du noyau et des organites cellulaires (via autophagie).

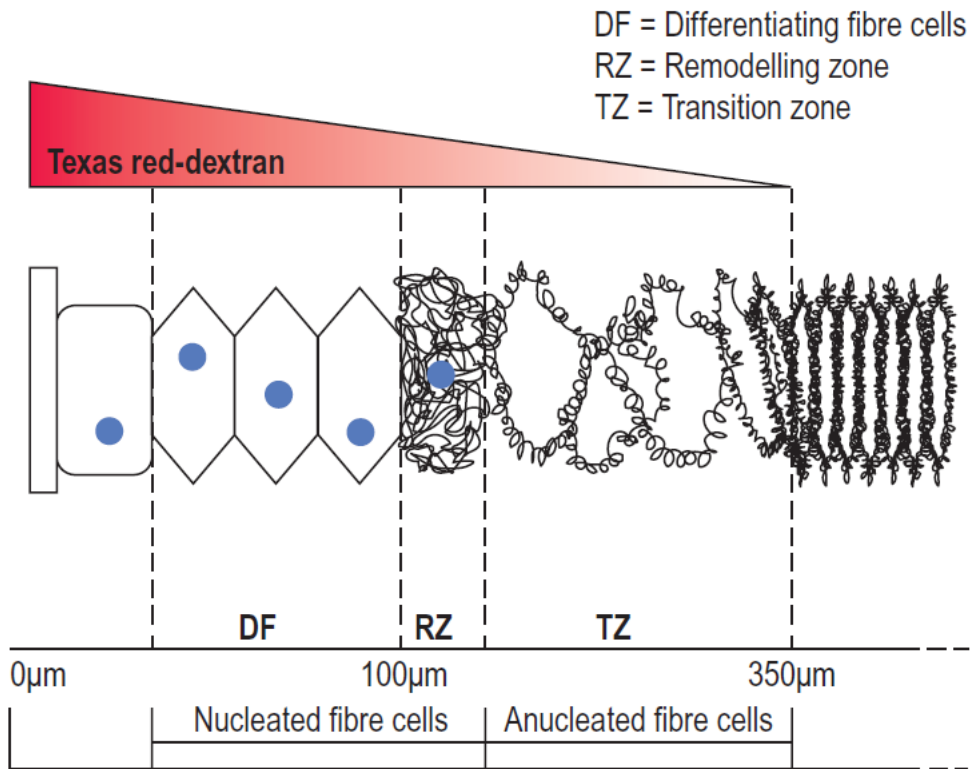


Figure 9 : Différenciation des fibres cristalliniennes depuis l'épithélium cristallinien

[13]

D. Changements avec l'âge :

1. Morphologie :

1. Capsule :

La capsule du cristallin s'épaissit tout au long de la vie. Elle augmente aussi en surface à la suite de la croissance du cristallin.

2. Epithélium

Avec le vieillissement du cristallin, les cellules épithéliales deviennent plus plates et le noyau s'aplatit.

La surface basale des cellules épithéliales augmente avec une diminution de la capacité proliférative : la densité des cellules épithéliales diminue avec l'âge.

3. Fibres cristalliniennes :

Avec l'âge les fibres cristalliniennes présentent une dégradation totale ou partielle d'un certain nombre de protéines membranaires et cytosquelettiques :

- MIP26 (Major intrinsic protein 26) : sa dégradation est la plus significative.
- Protéines cytosquelettiques : dégradées avec le vieillissement des fibres cristalliniennes puis intériorisées.
- Le ratio cholestérol/phospholipide des membranes plasmiques augmente tout au long de la vie, ce qui entraîne une diminution de la fluidité membranaire → augmentation de la sclérose nucléaire (durcissement).

2. Accommodation et presbytie :

L'amplitude de l'accommodation diminue avec l'âge, depuis 14 D à l'âge de 10 ans jusqu'à 6 D à l'âge de 40 ans et arrive à presque 0 vers l'âge de 60 ans.

Le changement du pouvoir accommodatif est secondaire à plusieurs facteurs :

- La diminution de l'élasticité de la capsule.

- L'augmentation de la rigidité de la substance cristallinienne, le cristallin devient ainsi moins déformable.
- Diminution de l'effet de l'arrondi du noyau du cristallin sur la courbure de la surface antérieure durant l'accommodation.
- La distance entre la surface antérieure du cristallin et la cornée diminue
- Le sommet du corps ciliaire non accommodatif se dirige progressivement à l'intérieur vers l'axe de l'œil. Ainsi, la zonule ne met plus le cristallin dans une tension aussi importante dans l'état non accommodatif.

L'augmentation de la courbure et de l'épaisseur du cristallin suggère que la puissance réfractive du cristallin augmente avec l'âge entraînant une myopie. Cependant, cela n'arrive pas du fait que ses changements s'accompagnent de petites altérations du gradient d'indice de réfraction, et donc le pouvoir réfractif de l'œil diminue.

3. Changements biochimiques :

La diminution de l'activité métabolique globale du cristallin avec l'âge est partiellement due à la diminution de l'activité enzymatique au niveau du noyau et du cortex.

Même si son activité métabolique globale diminue, le cristallin maintient toujours la capacité de synthèse de protéines, d'acides gras et du cholestérol à des taux substantiels.

Avec l'âge, il y a aussi une diminution de l'activité et/ou du niveau de plusieurs antioxydants qui survient surtout au niveau du noyau. Ainsi, les fibres cristalliniennes au niveau noyau sont plus susceptibles aux dommages oxydatifs et à la peroxydation lipidique.

IV. Physiopathologie de la cataracte :

La pathophysiologie de la cataracte sénile est complexe et reste encore à comprendre. Elle implique des interactions complexes entre divers processus physiologiques modulés par des facteurs environnementaux, génétiques, nutritionnels et systémiques. Le développement de la cataracte est multifactoriel et comprend les facteurs suivants : [15]

- La compression et le durcissement du noyau central (sclérose nucléaire) au fur et à mesure de l'agencement de nouvelles couches du cortex cristallinien.
- L'épithélium du cristallin subit des modifications liées à l'âge, notamment une diminution de la densité des cellules épithéliales et une différenciation aberrante des fibres du cristallin
- Avec le vieillissement du cristallin, il se produit une réduction de la vitesse à laquelle des métabolites hydrosolubles de faible poids moléculaire peuvent pénétrer dans les cellules du noyau du cristallin via l'épithélium et le cortex, avec une diminution ultérieure de la vitesse de transport d'eau, des nutriments et des antioxydants. En conséquence, le cristallin subit un dommage oxydatif progressif avec le vieillissement, ce qui entraîne le développement d'une cataracte sénile.
- La conversion de protéines cytoplasmiques solubles de faible poids moléculaire en agrégats solubles de haut poids moléculaire et en protéines membranaires insolubles. Les changements des protéines qui en résultent provoquent des fluctuations brutales de l'indice de réfraction du cristallin, dispersent les rayons lumineux et réduisent la transparence.

Il existe trois types de cataractes séniles [15] :

- 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.

V. Techniques chirurgicales de la cataracte :

A. La phacoémulsification :

La phacoémulsification est actuellement la **technique de référence** pour la chirurgie de la cataracte [16].

La phacoémulsification décrite par Kelman en 1967 [17] est une technique mécanisée d'extraction extracapsulaire basée sur la fragmentation du noyau cristallinien à travers une petite incision limbique ou cornéenne dont la largeur est comprise entre 1.8 mm (micro incision), 2 mm (mini-incision) et 3.2 mm (petite incision), alors que le diamètre équatorial du cristallin est proche de 12 mm en moyenne. Cette technique présente de nombreux avantages par rapport aux anciennes techniques opératoires, telles que les extractions intracapsulaires ou extracapsulaires manuelle, et marque un réel tournant dans l'histoire de chirurgie de la cataracte. Plus précisément, les avantages d'une incision étroite permettent : un meilleur contrôle des fluides et de la stabilité, une prophylaxie des fuites donc de l'endophtalmie, une meilleure cicatrisation et une meilleure prédictibilité de l'astigmatisme induit [18].

La phacoémulsification présente plusieurs étapes : [19]

L'incision : L'incision cornéenne transfixiante « voie d'abord » est la première étape de la chirurgie conventionnelle de la cataracte, conditionnent la qualité du geste chirurgical, mais aussi le résultat réfractif final. En pratique, les incisions en cornée claire ont progressivement remplacé les incisions sclérales (figure 10). Aujourd'hui, ces dernières sont indiquées uniquement en cas d'altérations importantes de la cornée périphérique soit primitives soit post-chirurgicales. La largeur des incisions a progressivement diminué, pour s'établir actuellement entre 1,8 mm et 2,75 mm en chirurgie coaxiale. L'incision principale peut être directe en un seul plan ou bien construite en deux ou trois plans. Incision de service est une incision cornéenne de 1

mm de large, oblique dans le plan cornéen située à 80° environ sur la gauche ou la droite de l'incision principale de phacoémulsification selon la latéralisation de l'opérateur. Elle permet le passage du micromanipulateur dans la technique bimanuelle.

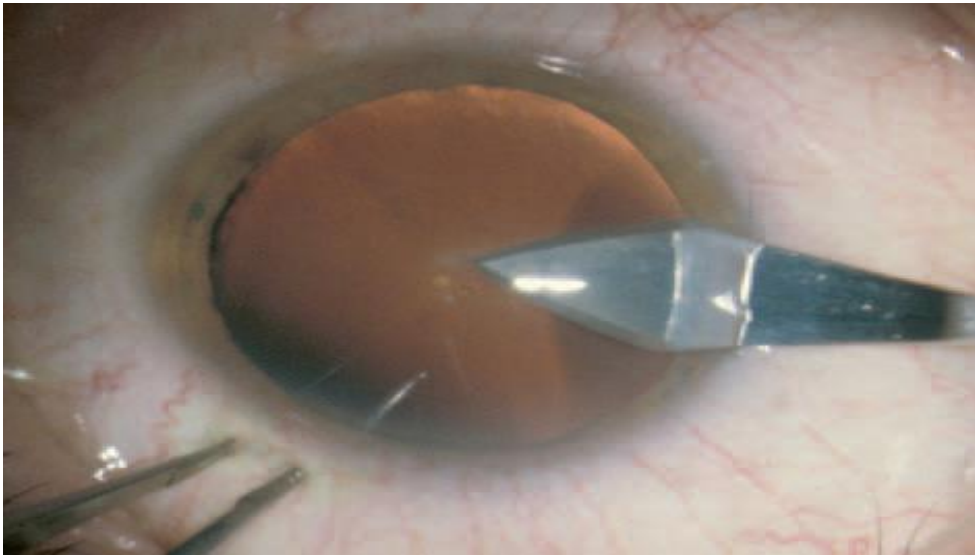


Figure 10 : Incision cornéenne pour la phacoémulsification. [18]

Les substances viscoélastiques :

Après l'incision de cornée, on injecte une substance viscoélastique (Figure 11) pour maintenir la profondeur de la chambre antérieure, protéger les structures intraoculaires, réaliser le Capsulorhéxis et enfin faciliter l'implantation du cristallin artificiel. Globalement, les produits viscoélastiques (PVE) se classent en deux catégories :

- Cohésifs : de haut poids moléculaire qui servent à approfondir et maintenir l'espace de la chambre antérieure ou le sac capsulaire.
- Dispersif : plutôt 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.

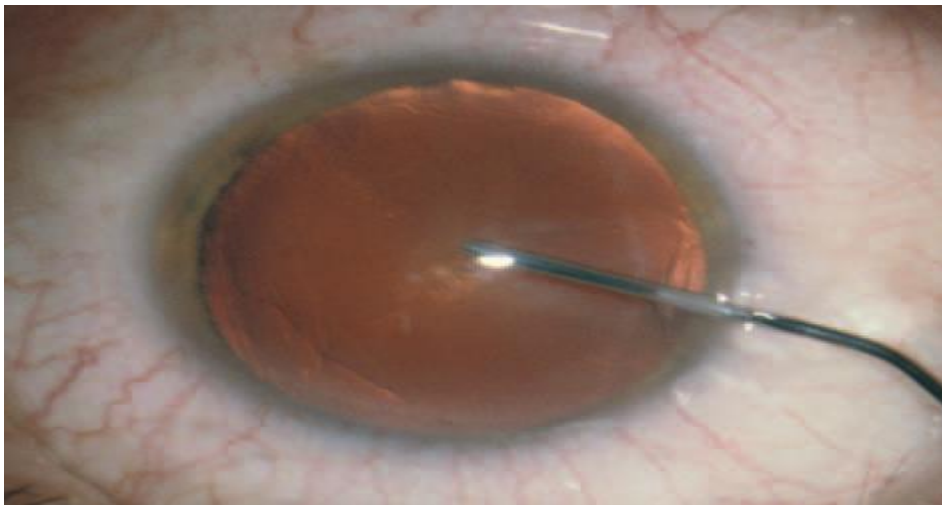


Figure 11 : Injection d'un viscoélastique dispersif.[18]

Le capsulorhéxis :

Le Capsulorhéxis constitue une étape essentielle de la phacoémulsification qui est une découpe capsulaire décrite par Gimbel et Neuhann en 1984. [20]

Il consiste à la découpe de la capsule antérieure : la capsule est « ouverte » au centre, puis cette ouverture est guidée par une pince à capsulorhéxis de manière à réaliser une ouverture circulaire centrée dont le diamètre est proche de 5.5 mm. Pendant le capsulorhéxis, le chirurgien utilise habituellement deux grands types de forces : les forces tangentielles et les forces centripètes afin d'obtenir un capsulorhéxis rond et d'en conserver le contrôle[19] (figure 12).

Le capsulorhéxis présente de nombreux avantages dont la sécurité opératoire, la gestion des complications, la limitation de l'opacification de la capsule postérieure, la précision du positionnement des implants [19].

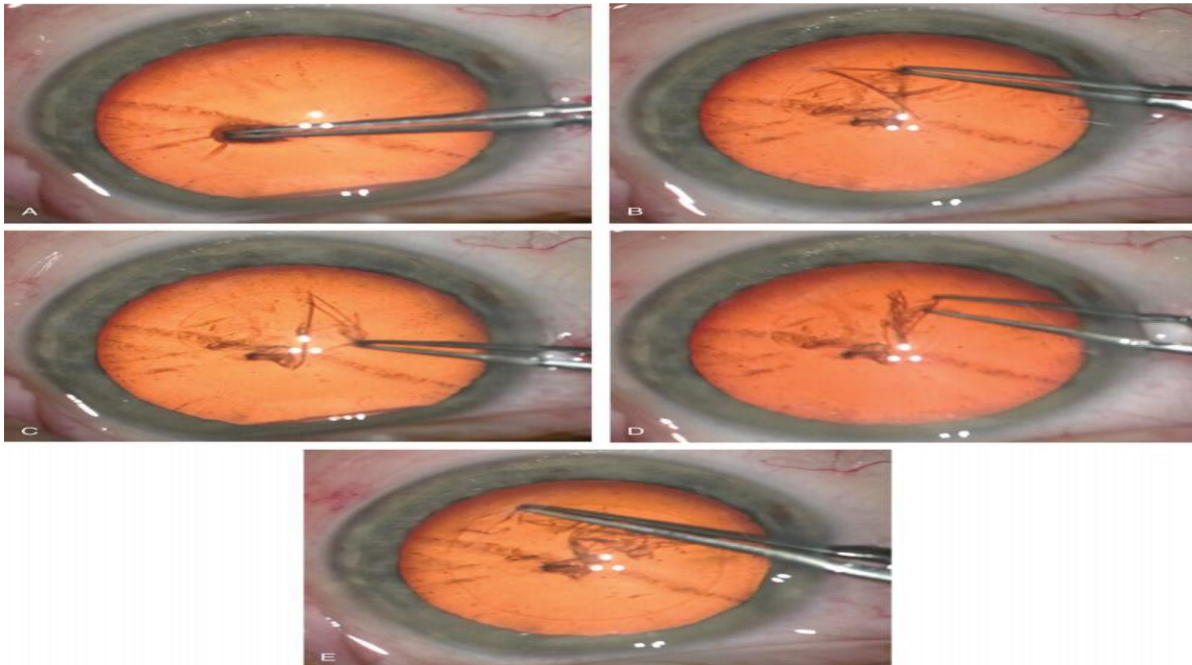


Figure 12 : Capsulorhéxis à la pince.[19]

- A. Amorçe à la pince sur un méridien légèrement décalé de celui de l'incision.
- B. Premier temps : traction tangentielle.
- C. Deuxième temps : traction centripète.
- D. Troisième temps : remise en position du lambeau et reprise à la pince.
- E. Finition au-delà du point d'amorçe pour un capsulorhexis rond.

L'hydrodissection :

L'hydrodissection consiste à séparer le cortex du noyau et de l'épinoyau afin de permettre sa mobilisation pendant la phacoémulsification (figure 13). Cette mobilisation est indispensable quelle que soit la technique de fragmentation du noyau. Elle facilite par ailleurs l'aspiration du cortex et limite l'opacification de la capsule postérieure [19].

Technique de réalisation : La canule à hydrodissection est introduite sous le capsulorhéxis vers l'équateur et un petit volume de soluté " balanced salt solution BSS"est lentement injecté jusqu'à ce qu'il passe sous l'épinoyau postérieur.

Il faut distinguer l'hydrodissection de l'hydrodélinéation, qui consiste à séparer le noyau de l'épinoyau, surtout utile pour les noyaux mous et les suspensions de brèche postérieure [19].

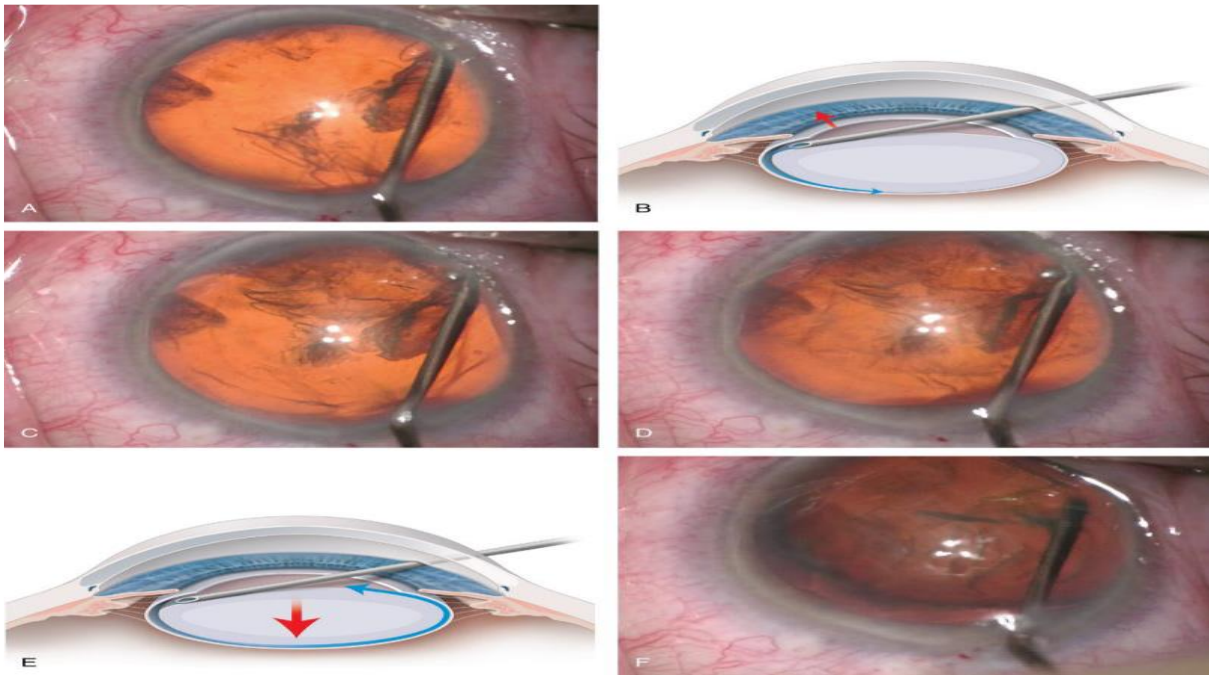


Figure 13 : Hydrodissection. A. La canule plate est introduite sous le capsulorhécis à l'opposé de l'incision vers l'équateur. B. Une petite quantité de soluté est injectée de manière continue et lente sous la capsule antérieure. C. Une petite quantité de soluté est injectée, la vague passe derrière l'épinoyau. D. La vague revient vers l'avant dans le secteur opposé. E. Une pression antéropostérieure est exercée sur le noyau pour finaliser le passage du liquide et éviter que le noyau ne se luxe dans la chambre antérieure. F. Rotation du noyau à l'aide de la canule à hydrodissection. [19]

Le traitement du noyau :

Il existe de nombreuses techniques de phacoémulsification qui se divisent globalement en techniques avec ou sans nucléofracture. Les techniques sans nucléofracture dérivées des techniques originelles affaiblissent le noyau sans le casser [19]. Les techniques avec nucléofractures sont les plus répandues, car elles permettent de mieux préserver aussi bien le capsulorhégis que la capsule postérieure d'autant que le noyau est dur. Elles peuvent être divisées en deux groupes :

- **Les techniques de sculpture avec nucléofractures** : elles incluent le "divide and conquer" et qui crée des sillons et les séparent avant d'émulsifier le noyau.
- **Les techniques de phaco chop** utilisant un second instrument (le chopper) qui fracture le noyau avant de l'émulsifier.

Techniques coaxiales :

- Les techniques coaxiales (par opposition aux techniques biaxiales) sont aujourd'hui les techniques les plus couramment pratiquées par les chirurgiens. Elles permettent des tailles d'incision allant jusqu'à 1,8 mm et parfois moins, favorisant la réduction de l'astigmatisme cornéen chirurgicalement induit et faisant de la phacoémulsification une chirurgie réfractive de la cataracte.

Divide and conquer :

- La technique divide and conquer, décrite par Shepherd et Gimbel [21] [22], est la plus simple et la plus répandue. Elle permet de traiter tous types de noyaux avec un important degré de sécurité. Cette technique peut être utilisée avec tous types de machines, quel que soit le type de pompe, Venturi ou péristaltique. Les différents réglages peuvent être mémorisés dans les machines. La délivrance des ultrasons (US) peut se faire en mode continu ou discontinue, en mode longitudinal ou torsionnel.

- Le but de cette technique est de créer des sillons (Figure 14) dans le noyau du cristallin dans un premier temps, puis de retirer le noyau en quatre quartiers dans un second temps par émulsification après réalisation du cracking (Figure 15) qui consiste à séparer les quatre quartiers perpendiculaires créés par la sculpture par le micromanipulateur et la pièce à main de phacoémulsification.

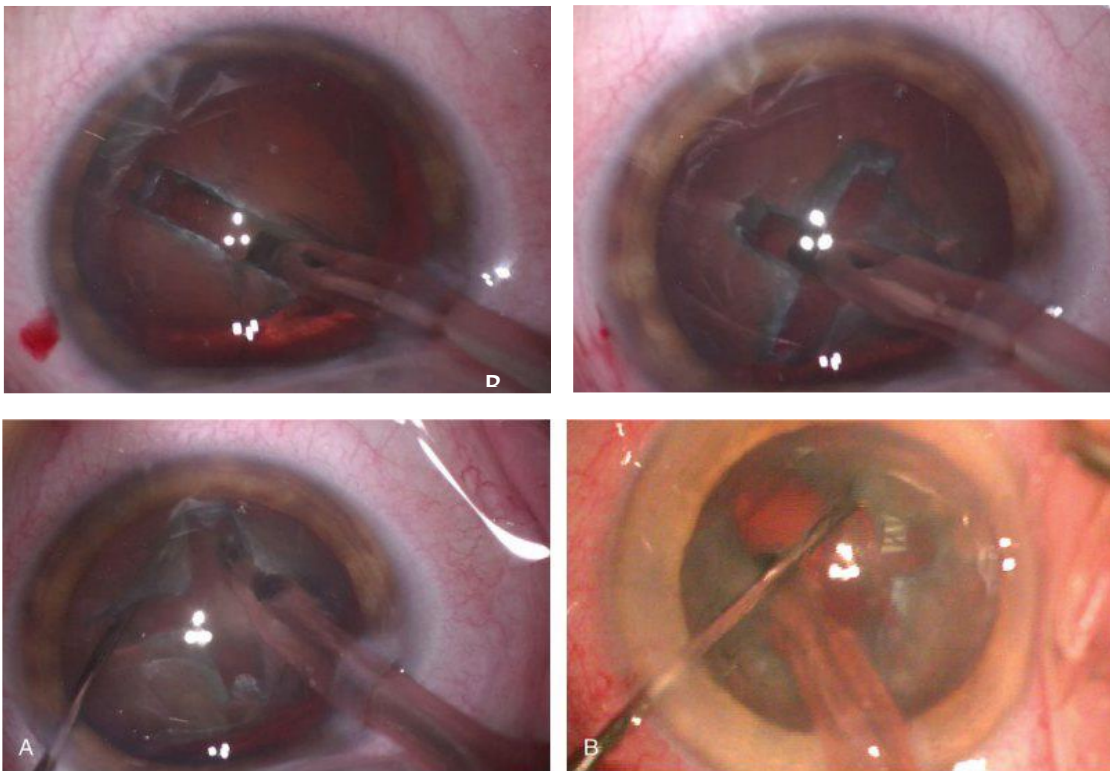


Figure 14 : (A) Sculpture du premier sillon [19] (B) Sculpture du second sillon dans l'axe de la sonde [19]

Figure 15 : *Cracking*, instruments parallèles (A) et instruments croisés (B), au fond du sillon. [19]

Phaco chop :

- Les techniques de phaco chop sont destinées à réduire le temps d’ultrasons et ménager la zonule [19].
- Elles sont particulièrement adaptées aux noyaux de dureté moyenne ou importante et utilisent un second instrument coudé (manipulateur muni d’une extrémité spécifique) : le chopper.

1. Phaco chop horizontal :

- La technique de phaco chop horizontal a été décrite par Nagahara en 1993 et revisitée par Koch et Katzen en 1994. Il s’agit d’une technique coaxiale bimanuelle. Elle est plutôt adaptée à des noyaux durs (grade III à V). La technique consiste à créer une fracture à l’aide de la pointe à ultrasons et d’un chopper (Figure 16). Elle est qualifiée d’horizontale (par opposition au phaco chop vertical), car elle est réalisée de l’équateur vers le centre dans le plan horizontal [19].

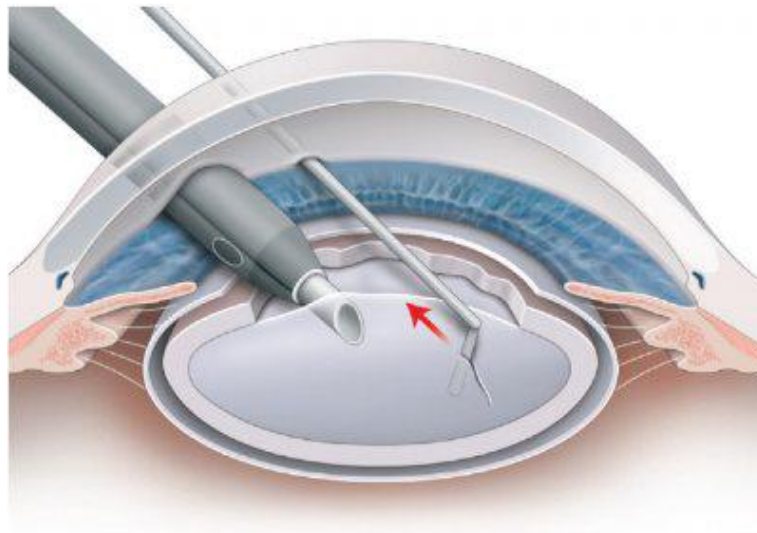


Figure 16. *Chop* horizontal. [19]

2. Phaco chop vertical

Introduite par Pfeifer, cette technique de chop est réalisée au centre du noyau dans un plan vertical. Le *chopper* effectue un mouvement postérieur simultané à un mouvement antérieur de la pointe de phacoémulsification (figure 17). Puis les deux outils se séparent afin de compléter la fracture. La manœuvre est répétée à plusieurs reprises avant de débiter la phacoémulsification [19].



Figure 17 : Phaco chop vertical : le *chopper* effectue un mouvement postérieur simultané à un mouvement antérieur de la pointe US.

3. Stop and chop :

- Décrite par Koch, cette technique est une combinaison de *divide and conquer* et de chop. Le chop ne démarre qu'après réalisation et cracking d'un premier sillon. Elle est particulièrement utile pour les noyaux durs. Ce sillon sera un peu plus large et profond (surtout au centre) que pour une cataracte standard. Après cracking du sillon et rotation de 90°, le chop divise l'hémi-noyau en deux fragments ou plus. Puis le second hémi-noyau est choppé de la même façon.

4. Retro-chop :

- Cette technique est plus particulièrement destinée aux noyaux très durs. Elle consiste à chopper la face postérieure du noyau en le comprimant sur la pointe US pour le sectionner

5. Pré-chop :

Cette technique a été décrite par Akahoshi et utilise un instrument dénommé pré-chopper destiné à diviser le noyau en plusieurs quartiers avant de débiter la phacoémulsification. Après hydrodissection et réinjection d'une substance viscoélastique dispersive le pré-chopper en position fermée empale le noyau. Puis il est ouvert lentement, séparant deux héli-noyaux. Le noyau est ensuite tourné de 90° et une manœuvre similaire est réalisée. Il existe plusieurs modèles de pré-chopper. Dans certains cas, une contre-pression est nécessaire. La phacoémulsification peut ensuite être réalisée.

Autres techniques de phacoémulsification :

- **Technique supracapsulaire** : La technique supracapsulaire proposée par Maloney [23] consiste à fragmenter le noyau hors du sac capsulaire à travers un capsulorhexis intact.
- **Technique chip and flip** : bien adaptée aux noyaux mous et aux cataractes des jeunes patients. Elle comporte plusieurs phases : hydrodélinéation, hydrodissection ; émulsification du noyau en mode ultrasons (US) ou irrigation-aspiration (I/A) en fonction de la dureté du noyau, aspiration de l'épinoyau en mode I/A à l'aide la sonde US ou I/A .
- **-Phaco windmill** : Proche de la technique précédente, cette technique consiste à aspirer l'épinoyau avant le noyau.

- **Technique du colimaçon** : Après hydrodissection, le noyau est émulsifié en périphérie de manière circulaire avec de hauts niveaux de vide et de débit d'aspiration. Le noyau tourne dans le sac du fait de l'aspiration ou à l'aide du manipulateur. Le noyau central est ensuite émulsifié au centre.

Techniques biaxiales:

La chirurgie de la cataracte par micro-incision (microincision cataract surgery ou MICS) a été développée au cours des dernières décennies à partir de la chirurgie par phacoémulsification classique.

Les premières tentatives pour réduire la taille de l'incision ont été faites en utilisant des dispositifs tels que le « Dodick neodymium » : système de photolyse yttrium-aluminium-grenat et technologie au laser erbium. Puis d'autres modulateurs de puissance tels que l'énergie acoustique et la cavitation ont été utilisés alternativement. Malgré ces progrès, la technologie de phacoémulsification ultrasonore est restée la technologie la plus efficace et la plus couramment utilisée en raison des limitations de certaines des autres technologies notamment dans la prise en charge des cataractes très denses. L'utilisation moderne de la phacoémulsification par ultrasons à travers des micro-incisions a été discutée par de nombreux auteurs et a reçu de nombreux noms, tels que phakonit, phacoémulsification biaxiale, phaco froide et microphaco. Toutes ces techniques reposent sur la séparation des systèmes d'irrigation et d'aspiration. Mais, c'est l'équipe d'Alio qui a introduit l'acronyme MICS pour microincision cataract surgery définissant la procédure de chirurgie de la cataracte avec implantation de lentille intraoculaire par des incisions de moins de 2 mm. Par extension, la diminution de la taille des incisions coaxiales de 3,0 mm dans la phacoémulsification traditionnelle à 1,8 mm voire 1,6 mm a également été appelée

micro-incision coaxiale et on parle donc de C-MICS pour cette dernière et de B-MICS pour la technique biaxiale [19].

Au début de l'apparition de la technique, la B-MICS n'a pas suscité l'engouement car il n'y existait pas d'implants intraoculaires pliables, susceptibles d'être implantés à travers des incisions de moins de 2 mm. La nécessité d'élargir l'incision principale à environ 3 mm pour implanter la lentille intraoculaire limitait donc l'intérêt de la technique. Actuellement, les implants et les systèmes d'injections compatibles avec des incisions de moins de 2 mm sont beaucoup plus répandus et la MICS a pris un nouvel essor. Cependant la majorité de ces implants nécessite tout de même une incision cornéenne supérieure 1,5 mm, donc l'étape de l'implantation de la lentille intraoculaire représente toujours la limite de la B-MICS et seules des améliorations techniques des implants et des systèmes d'injections permettront de poursuivre la diminution de la taille des incisions.

B. L'extraction extra-capsulaire :

L'extraction extracapsulaire manuelle : L'extraction extracapsulaire a été lancée par KELMAN dans les années 60. Elle consiste à une ablation du contenu du cristallin par une large incision de 8 mm et expulsion totale du noyau entier à travers une ouverture de la capsule antérieure et conservation de la capsule postérieure du cristallin. Elle nécessite plusieurs points de suture [24].

L'indication de l'extraction extracapsulaire manuelle est réservée aux formes de cataracte pour lesquelles la phacoémulsification n'est pas utilisable (notamment les cataractes à noyau très dur et les cataractes hypermûres) ou aux complications de la phacoémulsification nécessitant une conversion.

Son avantage est d'être adapté à toute forme de cataracte et de n'exiger qu'un matériel très réduit.

Son inconvénient est de nécessiter une incision cornéo-scléral longue, de 6 à 7mm, pour la fermeture de laquelle la mise en place de plusieurs points de suture est nécessaire ; il peut en résulter un astigmatisme postopératoire important.

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 [25].

D. Chirurgie de la cataracte assistée par laser femtoseconde [26]

La chirurgie de la cataracte assistée au laser femtoseconde (femtocataracte) est une évolution récente et une aide à la phacoémulsification permettant de répondre à ces attentes supplémentaires. Cette innovation technique fournit des découpes parfaitement standardisées des incisions cornéennes et de la capsule antérieure, ainsi qu'une pré-fragmentation du cristallin. La sécurité en est donc accrue, même si certaines contraintes techniques, financières et logistiques ne permettent pas encore d'affirmer s'il s'agit d'une simple évolution technologique ou d'une véritable révolution.

Le laser femtoseconde :

Le laser femtoseconde est utilisé depuis 2001 en chirurgie réfractive pour la réalisation des capots cornéens dans la technique du LASIK (laser-assisted in situ keratomileusis). Ce laser délivre des impulsions ultra-brèves de l'ordre de la femtoseconde (10^{-15} seconde), lui permettant de ne pas être absorbé par les tissus transparents et donc d'atteindre son tissu cible, tel que la cornée profonde, sans affecter les structures oculaires adjacentes. L'énergie du laser, en étant délivrée très précisément au niveau de sa cible, va provoquer la formation de plasma, induisant en

son sein des bulles de cavitation. Les bulles créées vont séparer les tissus par effet de dissection mécanique. Une photodisruption est donc réalisée par la vaporisation de ces tissus en convertissant l'énergie du laser en dissection mécanique.

Avantages de la chirurgie au laser femtoseconde :

Comme dans le LASIK, l'apport du laser femtoseconde améliore significativement la reproductibilité, la précision et la sécurité des découpes par son procédé automatisé.

Une illustration de cette précision est particulièrement démonstrative pour la capsulotomie. En effet, le capsulorhéxis manuel est un geste d'une reproductibilité perfectible. La capsulotomie réalisée au laser est toujours plus précise, plus prédictible qu'un capsulorhéxis manuel, d'une régularité et d'un centrage parfaits. Plusieurs études ont montré que les capsulotomies réalisées au laser femtoseconde étaient continuées, régulières et centrées, et pourraient donner des résultats réfractifs plus stables, moins de bascule, de tilt ou de décentrement de l'implant qu'un capsulorhéxis manuel. Cependant, des études multicentriques portant sur un large échantillon de population sont encore nécessaires pour confirmer ou non ces éventuels bénéfices à moyen et longtermes. Les incisions cornéennes découpées au laser femtoseconde sont également très reproductibles, stables et d'une grande précision. Il paraît évident que cela améliore la reproductibilité de cette étape, contrôle l'astigmatisme cornéen induit, et sécurise encore plus l'étanchéité cornéenne per- et postopératoire. Les incisions arciformes sont aussi probablement une solution d'avenir pour traiter dans le même temps que la chirurgie de la cataracte un astigmatisme cornéen modéré n'étant pas dans le champ d'action d'un implant torique. L'autre avantage principal de la chirurgie assistée au laser résiderait dans la diminution d'ultrasons délivrés lors de la phacoémulsification, grâce à la préfragmentation du cristallin réalisée au laser. La puissance totale d'ultrasons nécessaire serait donc moindre et le temps de

phacoémulsification effective après femtoseconde est diminué. Conrad–Hengerer et al. [27] ont retrouvé une diminution significative de perte de cellules endothéliales dans le groupe laser par rapport au groupe témoin en rapport avec une diminution du temps effectif de phacoémulsification dans le groupe laser par rapport au groupe témoin. Ce bénéfice sur la perte de cellules endothéliales semble mince mais suggère que l'assistance au laser pourrait présenter un avantage en cas de cornea guttata. Enfin, cette technologie a montré ses capacités à pouvoir opérer des cataractes difficiles (blanches, avec myosis, syndrome de Marfan, cataractes pédiatriques en toute sécurité. Tous ces avantages sont donc conséquents et démontrent les bénéfices présents et futurs de cette technologie.

D'autres études ont montré que les résultats de la femtocataracte avec la phacoémulsification manuelle sont pratiquement semblables.

Devant son coût élevé, la femtocataracte reste avantageuse en matière de :

- Cataracte totale blanche
- La cataracte congénitale pour faire le rhéxis antérieur et postérieur sans difficulté

Les perspectives de la femtocataracte sont probablement :

- Le traitement des phimosés antérieurs mieux que le laser-YAG.
- Les nouveaux implants
- La chirurgie robotisée et intelligence artificielle

VI. Simulation en médecine :

La pratique de la simulation en santé est devenue une méthode pédagogique incontournable. Elle est remarquable par le fait que lors de la formation, elle s'intéresse avant tout à l'apprenant mais, en même temps, son objectif prioritaire est avant tout éthique vis-à-vis du patient « *Jamais la première fois sur le patient* » [1].

A. Définition :

En 2012, La Haute Autorité de Santé (HAS) a défini la simulation en santé comme étant l'utilisation d'un matériel (comme un mannequin ou un simulateur procédural) de la réalité virtuelle ou d'un patient standardisé pour reproduire des situations ou des environnements de soin, dans le but d'enseigner des procédures diagnostiques et thérapeutiques et de répéter des processus, des concepts médicaux ou des prises de décision par un professionnel de santé ou une équipe de professionnels.

Les différentes approches de la simulation peuvent être résumées par le schéma ci-dessous (d'après G.Chiniara [28]) (figure 18), Dans ce schéma, la zone grisée correspond aux méthodes de simulation les plus fréquemment utilisées aujourd'hui :

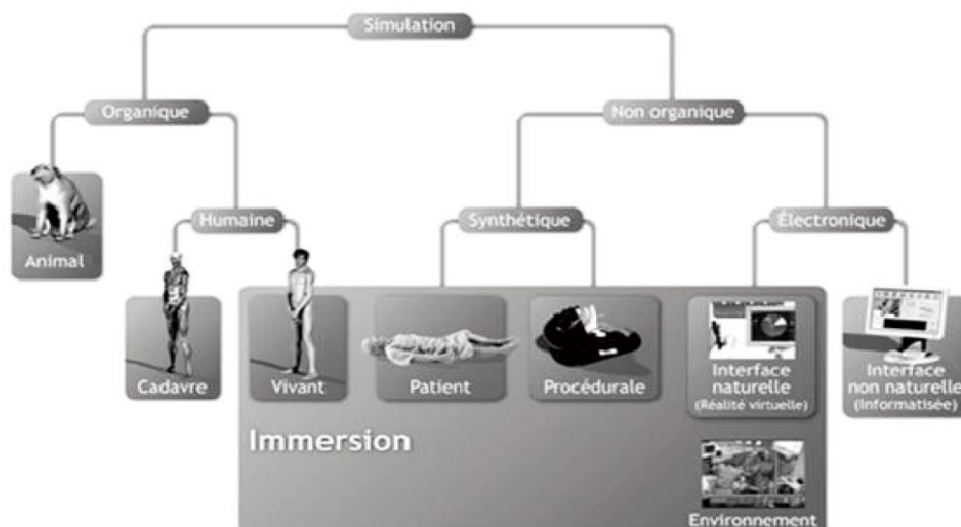


Figure 18 : Les différentes approches de la simulation [28]

B. Historique de la simulation en santé [29]

Au XVIII^{ème} siècle ; une sage-femme ; Madame Du Coudray [30], décide d'enseigner aux matrones des campagnes « l'art des accouchements». Une partie de cet enseignement reposait sur l'utilisation d'une panoplie de mannequins (figure 19) qui permettaient de recréer des manœuvres obstétricales. Elle a parcouru ainsi la France pendant vingt-cinq ans et elle a formé plus de 5 000 femmes grâce à la simulation. La mortalité infantile a montré ensuite une nette diminution.



Figure 19 : Simulateur d'obstétrique de Madame Du Coudray [31]

À partir de 1910 et jusqu'au milieu des années 70, un mannequin de bois, surnommé Madame Chases (du nom de sa conceptrice, fabricante de jouet) a été utilisé par les élèves infirmières, du Hartford Hospital Training School of Nurses, pour la pratique des soins de nursing de base. Ce modèle a été perfectionné et a été utilisé par l'armée américaine durant la seconde guerre mondiale.

Durant les années 50, le Pr Peter Safar, du Baltimore City Hospital, a tenté de perfectionner les manœuvres de réanimation cardiorespiratoire. À cette époque, il devait encore mettre à contribution les membres de son équipe pour simuler les patients. Les volontaires ont été alors endormis et intubés. Devant le manque évident de modèle de simulation, il s'est associé avec le médecin norvégien Bjorn Lind, pour tenter de développer un modèle adapté à la réanimation cardio-respiratoire. Le fabricant de jouet Asmund Laerdal, qui a déjà fabriqué des patients factices pour l'armée, a développé avec les deux médecins le fameux mannequin **Resusci Anne** au début des années 60 (figure 20). À la même époque, les docteurs Stephen Abrahamson et Judson Denson ont mis au point le premier mannequin contrôlé par ordinateur, le Sim One [32]. Il était le modèle qui a inspiré, par ses capacités et son réalisme, les mannequins haute-fidélité actuels.



Figure 20 : Asmund Laerdal avec Resusci Anne [33]

C. Techniques de simulation : [1]

Les différentes techniques de simulation les plus utilisées en pratique dans le domaine de la santé sont :

1. Patient standardisé ou patient simulé :

Il s'agit le plus souvent de consultations simulées. Des patients ou des acteurs sont sollicités sur la base d'un scénario préétabli et d'une description détaillée de leur « rôle » [34]. (Figure 21)

Ce type de technique s'adresse à des étudiants en médecine ou paramédicaux, des professionnels de santé seniors.

Ces méthodes servent à développer les compétences en matière de communication avec le patient lorsqu'il existe un enjeu fort (annonce de mauvaise nouvelle par exemple) ou lorsqu'il convient de donner une information complexe à un patient (information bénéfique/risque)



Figure 21 : Patient simulé [35]

2. Simulation procédurale ou simulateur basse-fidélité :

Ces méthodes permettent un apprentissage par la répétition de gestes dans une procédure, le plus souvent technique, et cela sans risque pour le patient.

Ce type de simulateur couvre un large éventail de techniques : appareil dit « basse-fidélité » comme des peaux synthétiques pour les sutures, des bras pour perfusion, des interventions mineures. (Figure 22)

-Certains simulateurs sont plus sophistiqués et permettent de reproduire des situations interventionnelles de haute technicité comme des simulateurs de coronarographies, de cholécystectomie, de bronchoscopie, d'angiographie. [36] [37]



Figure 22 : Simulateur procédurale [1]

3. Simulation hybride :

- Il s'agit là de la combinaison d'un patient simulé et d'une partie de mannequin (bassin d'accouchement, « peau « simulée » pour perfusion). Contextualisées, ces associations permettent d'obtenir les impressions du patient et de donner des sensations proche de la réalité au stagiaire ; dans ce cas, ces méthodes seront qualifiées de haute-fidélité. (Figure 23)



Figure 23 : Simulateur hybride [1]

4. Les simulateurs haute-fidélité dits « pleine échelle » :

- Les mannequins grandeur nature (adulte, enfant, nourrisson) sont souvent extrêmement réalistes. Plus ou moins sophistiqués, ils peuvent être pilotés par ordinateur et ont la possibilité de respirer, parler, et répondre à des stimuli lors d'interventions. Le mannequin obéit à un scénario préétabli ; le formateur peut faire varier les constantes vitales et l'état clinique du mannequin. Contextualisées dans une salle d'opération ou de réanimation, les situations cliniques vécues le plus souvent en équipe sont extrêmement proches de la réalité [38]. (Figure 24)



Figure 24 : Simulateur de haute-fidélité [1]

5. Les simulateurs tactiles et laparoscopie chirurgicale :

- Les plus sophistiqués sont le plus souvent des simulateurs chirurgicaux. Ils procurent une sensation de retour de force ou de résistance au manipulateur. L'opérateur se trouve dans une situation très proche de la réalité. Ils permettent une maîtrise du contrôle œil/main. La progression de l'apprentissage est ici très rapide et permet l'autoévaluation de la performance et de la dextérité. Les exemples les plus courants sont retrouvés en endoscopie et cœlioscopie. Ces simulateurs sont utilisables à la fois pour les étudiants, mais aussi pour les praticiens confirmés qui veulent développer ou diversifier leurs compétences.

6. Réalité virtuelle basée sur des interfaces écran :

- Ce type de simulation permet d'appréhender des situations complexes, ou d'étudier des concepts illustrés de manière plus concrète par des modèles informatiques. (Figure 25)
- Ces applications sont interactives et permettent par exemple de :
 - Modéliser l'extension d'une épidémie de grippe dans une population
 - Comprendre comment un équipement peut être utilisé
 - S'entraîner à prendre des décisions cliniques pour un patient virtuel



Figure 25 : Réalité virtuelle basée sur des interfaces écran [1]

7. Environnement en 3D :

- Ce type de simulation est très utile pour l'apprentissage à distance et se prête bien au e-learning. Il se rapproche par son réalisme des environnements de jeux vidéo les plus performants, même si le coût de création des environnements réalistes virtuels est très élevé. Ces techniques ne présentent pas en théorie de limite dans la diversité des situations qu'il est possible de créer, et permettent une immersion totale dans la situation mise en scène.

(Figure 26)



Figure 26 : Environnement en 3D [1]

D. Transfert à la pratique clinique :

Les travaux permettant de confirmer l'intérêt direct de la simulation ; pour la pratique clinique ; sont de réalisation difficile.

Plusieurs études sont cependant convaincantes : Wayne et col. [37] ont montré que des internes en médecine formés par la simulation sont plus performants pour la prise en charge d'arrêts cardiaques intra hospitaliers. Une autre étude démontre également que des internes, formés par simulation à la mise en place de cathéters veineux centraux, ont moins de complications (ponctions artérielles) que ceux qui n'ont pas été formés par cette méthode [39]. De même, les infections liées aux cathéters seraient moins fréquentes quand ces derniers ont été mis en place par des personnels formés par simulation [40]. En chirurgie, il a été montré que la formation par simulation (réalité virtuelle) améliore notablement la performance des opérateurs [41]. Il en est de même en obstétrique lors d'accouchements compliqués de dystocie des épaules. Les praticiens formés par simulation obtiennent de meilleurs résultats [42]. Des travaux complémentaires de méthodologie très rigoureuse sont à entreprendre pour confirmer ces résultats d'importance.

E. Intérêts et limites de la simulation en santé : [1]

1. Intérêts

- La mise en place de la formation par simulation a plusieurs intérêts, que ce soit sur le plan :
 - **Pédagogique** : puisque la simulation offre à un apprenant ; quel que soit son niveau ; la possibilité d'apprendre des compétences techniques et non techniques, par l'erreur et la répétition du geste, sans danger pour le patient.

- **Éthique** : en effet la simulation répond parfaitement au principe « jamais la première fois sur le patient » c'est à dire qu'un novice ne doit plus pratiquer un geste la première fois sur un patient.
- **Docimologique** : puisque dans les pays développés, la simulation est utilisée pour
 - ❖ Certification et rectification des professionnels de santé
 - ❖ L'évaluation du personnel, lors du premier recrutement dans un établissement
 - ❖ L'accréditation des centres.
- **Économique** : Malgré que la mise en place d'un projet de simulation nécessite un investissement très important (locaux, équipement, ressources humaines), le retour sur investissement est palpable et se fait en période plus ou moins courte, grâce à la réduction du coût lié :
 - ❖ Gaspillage du matériel médical et du fongible
 - ❖ Aux incidents et accidents liés aux soins
 - ❖ Indemnisation des victimes pour les erreurs médicales
- **Écologique** : par une meilleure maîtrise de la gestion des déchets médicaux.
- **En recherche** : puisque la simulation est devenue un domaine vaste pour la recherche médicale

2. Limites de la simulation

- Si la simulation présente de nombreuses qualités pour la formation, elle souffre cependant de quelques inconvénients et limites [1].
- La principale limite est le coût important pour la mise en place d'un programme de simulation. Celui-ci va se répartir sur les locaux, le matériel, mais surtout sur le personnel. Bien que l'utilisation du simulateur sur les lieux même de l'exercice soit préférable, des locaux dédiés sont le plus souvent nécessaires, pour pouvoir organiser de façon régulière des séances au sein d'un cadre pédagogique convenable se disposant ; notamment ; d'une infrastructure audio-visuelle.

Enfin, parmi les limites importantes de la simulation c'est le manque et l'insuffisance de réalisme. Ainsi, malgré les progrès croissants de la robotique, le matériel actuellement commercialisé n'arrive pas encore à recréer le réalisme d'un patient de chair et d'os. Toute la sémiologie cutanée (marbrure, éruption cutanée, cyanose, etc.) et la motricité, couramment utilisée pour évaluer le score de Glasgow, sont quasi inexistantes sur les mannequins actuels. L'avenir de la simulation passera alors probablement par la réalité virtuelle ou augmentée, déjà utilisée en chirurgie, pour s'amender de ses limites et proposer une simulation encore plus immersive aux participants [35]. La recherche actuelle en simulation comporte encore de nombreuses insuffisances (travaux monocentriques, faibles échantillons, manque de rigueur statistique, etc.). Quelques travaux récents insistent sur l'importance d'une méthodologie rigoureuse pour la réalisation de projets multicentriques [1].

Malgré des difficultés, d'ordre essentiellement économique, la simulation est une méthode d'intérêt pédagogique. Elle est très largement acceptée et souhaitée, tant par les étudiants que les enseignants. Ainsi, la simulation haute-fidélité constitue un outil de formation complet pouvant réduire le fossé entre une faible exposition aux situations critiques et une pratique répétée nécessaire à une prise en charge efficace. Certes, elle a déjà fait ses preuves dans différents domaines. Cependant, Elle demande encore à être développée, dans l'objectif prioritaire d'une amélioration des pratiques et de la gestion optimale des risques.

VII. Simulation en ophtalmologie :

A. Simulateurs d'examen ophtalmologique :

1. Eyesi Slit Lamp :

- C'est un simulateur de réalité virtuelle pour l'examen à la lampe à fente. Sa technologie de réalité virtuelle est intégrée au matériel d'origine du modèle de lampe à fente BQ 900 de "Haag-Streit" et offre toutes les fonctions d'une vraie lampe à fente. Les résidents peuvent examiner des patients virtuels avec le biomicroscope, les lentilles de fond d'œil et de la gonioscopie (Figure 27).
- Il présente des scénarios de difficulté croissante, certains pour les débutants pour apprendre indépendamment les techniques de manipulation et d'illumination de la lampe à fente, d'autres avec un niveau avancé présentent un large éventail d'images cliniques, des systèmes de notation standardisés y sont inclus. Cela favorise une base solide de compétences diagnostiques, ce qui est difficile à réaliser en fonction de la disponibilité des superviseurs ou des patients [43].



Figure 27 : Simulateur de la lampe à fente Eyesi Slit Lamp [43]

2. Simulateurs d'ophtalmoscopie directe :

L'ophtalmoscopie directe est parmi les méthodes de l'examen du fond d'œil mais ne donne qu'un champ d'observation réduit et ne permet pas une vision du relief. C'est un examen qui est simple, cependant, il est peu maîtrisé par la communauté médicale à cause de plusieurs facteurs, notamment le peu de temps d'entraînement avec une formation insuffisante, son utilisation réduite... [44]

Plusieurs simulateurs d'ophtalmoscopie directe ont été développés, nous citons les 3 les plus connus.

a. Le simulateur d'examen EYE (Eye Exam Simulator) :

Le simulateur d'examen EYE est un formateur innovant pour l'examen du fond d'œil réalisé par la société Koyoto Kagaku, conçu pour permettre l'examen des yeux avec l'ophtalmoscope directe propre du médecin (figure 28). Divers cas peuvent être mis en place pour l'apprenant à l'aide de combinaisons de choix de diapositives (figure 29) et de changement du diamètre de la pupille (Figure 30). Le matériel du mannequin est doux et souple permettant une simulation plus réaliste par contact avec les mains (le relèvement de la paupière par exemple) (figure 28) [45] .



Figure 28 : Eye Exam Simulator [45]



Figure 29 : Combinaisons de choix de diapositives [45]

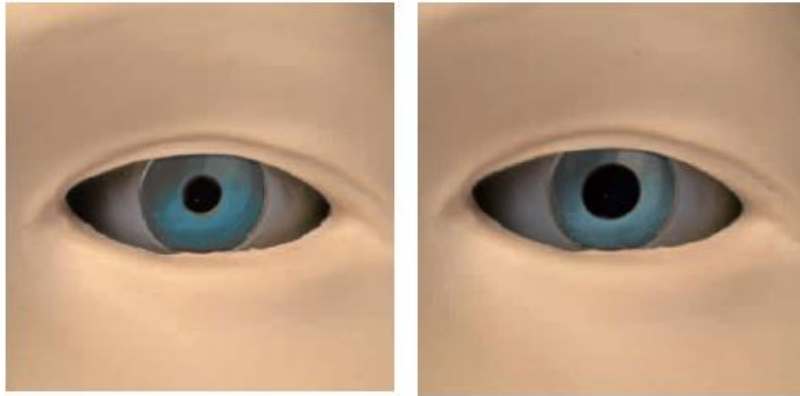


Figure 30 : Changement du diamètre de la pupille [45]

b. Eyesi Direct :

Le simulateur d'ophtalmoscopie direct "Eyesi Direct" développé par la société VRmagic est un appareil très spécifique qui se compose d'un ordinateur à écran tactile attaché à un visage humain simulé en taille réelle, permettant à l'examineur d'évaluer le fond d'œil normal et pathologique par ophtalmoscope direct (Figure 31) avec une grande fidélité liée surtout aux pupilles photoréactives et aux pulsations vasculaires spontanées [46].

Par rapport aux autres simulateurs, ce modèle possède des avantages multiples dont le plus important est la possibilité de "débriefer" c'est-à-dire une évaluation après l'examen montrant à l'examineur ses qualités et ses erreurs, ainsi que des informations sur les images pathologiques.



Figure 31 : Simulateur d'ophtalmoscopie direct 'Eyesi Direct' [46]

c. OPHTOSIM : [47]

- Moyen sophistiqué et réaliste de simulation de l'ophtalmoscopie directe qui détecte les mouvements et l'orientation réalisés par l'apprenant. OphthoSim reproduit fidèlement le grossissement du cristallin ainsi que de nombreuses pathologies.
- Ce modèle de simulation est accompagné d'un logiciel caractérisé par :
 - Contenu pédagogique : Inclut de nombreux modules de formation et d'évaluation aux techniques d'ophtalmoscopie.
 - Fonction d'annotation : Permet à l'instructeur de mettre en évidence les spécificités de la pathologie observée par l'apprenant.
 - Base de données exclusive : Images accompagnées de descriptions détaillées et d'annotations facilitant l'apprentissage des différentes pathologies.

- OPHTOSIM est composé d'un modèle oculaire avec un ophtalmoscope adapté à la simulation et un logiciel pour traitement des données. (Figure 32)

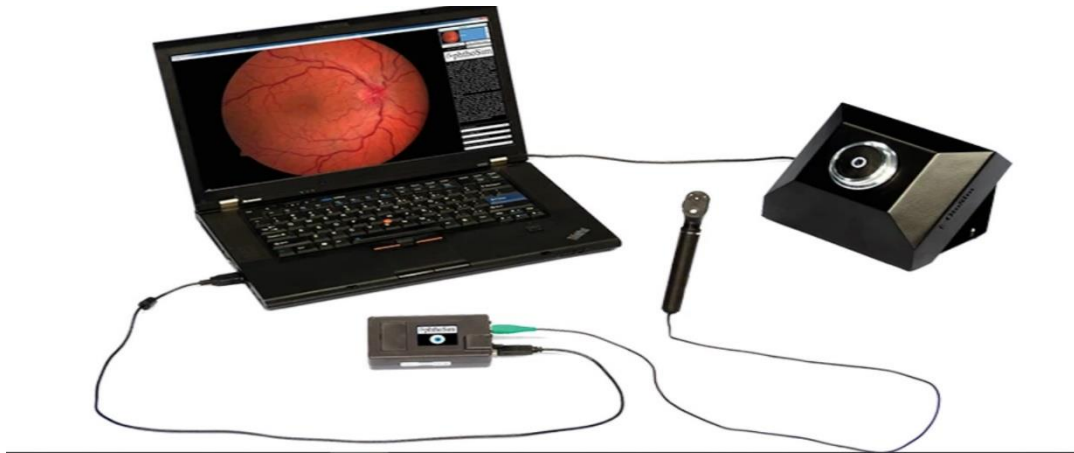


Figure 32 : Ophthosim [47]

3. Simulateurs d'ophtalmoscopie indirecte :

Nous répertorions trois modèles de simulation d'ophtalmoscopie indirecte : le simulateur de VRmagic, le modèle de globe oculaire et le Plastic Canister Model. Aucun modèle de ces simulateurs n'a présenté de preuves réelles ou des études concernant son efficacité.

a. VRmagic simulator :

Ce modèle comporte un ordinateur spécifique permettant le contrôle général de la procédure avec un visage humain moulé. L'examen s'effectue avec un casque qui dirige un faisceau de lumière vers une lentille mobile, qui devait être correctement positionné devant l'œil du visage simulé. L'image de la rétine examinée est alors visualisée à travers le casque et s'affiche sur l'ordinateur, où nous pouvons manipuler et modifier plusieurs paramètres : filtres, intensité de la lumière, la puissance de la lentille, le diamètre du cône lumineux [48] (Figure 33 et 34)

Ce simulateur contient des cas cliniques basés sur des événements réels avec une démonstration pour guider la lumière et la position de la lentille d'examen. Il présente également plusieurs images normales et pathologiques du fond d'œil avec un débriefing pour les bonnes ou les mauvaises performances et tous les aspects qui doivent être changés [48] (Figure 35).



Figure 33 : Simulateur d'ophtalmoscope indirect avec tête de modèle patient, lentilles, ophtalmoscope indirect et ordinateur. [48]



Figure 34 : L'examineur voit un patient virtuel tridimensionnel à travers le casque du simulateur d'ophtalmoscopie indirect [48].

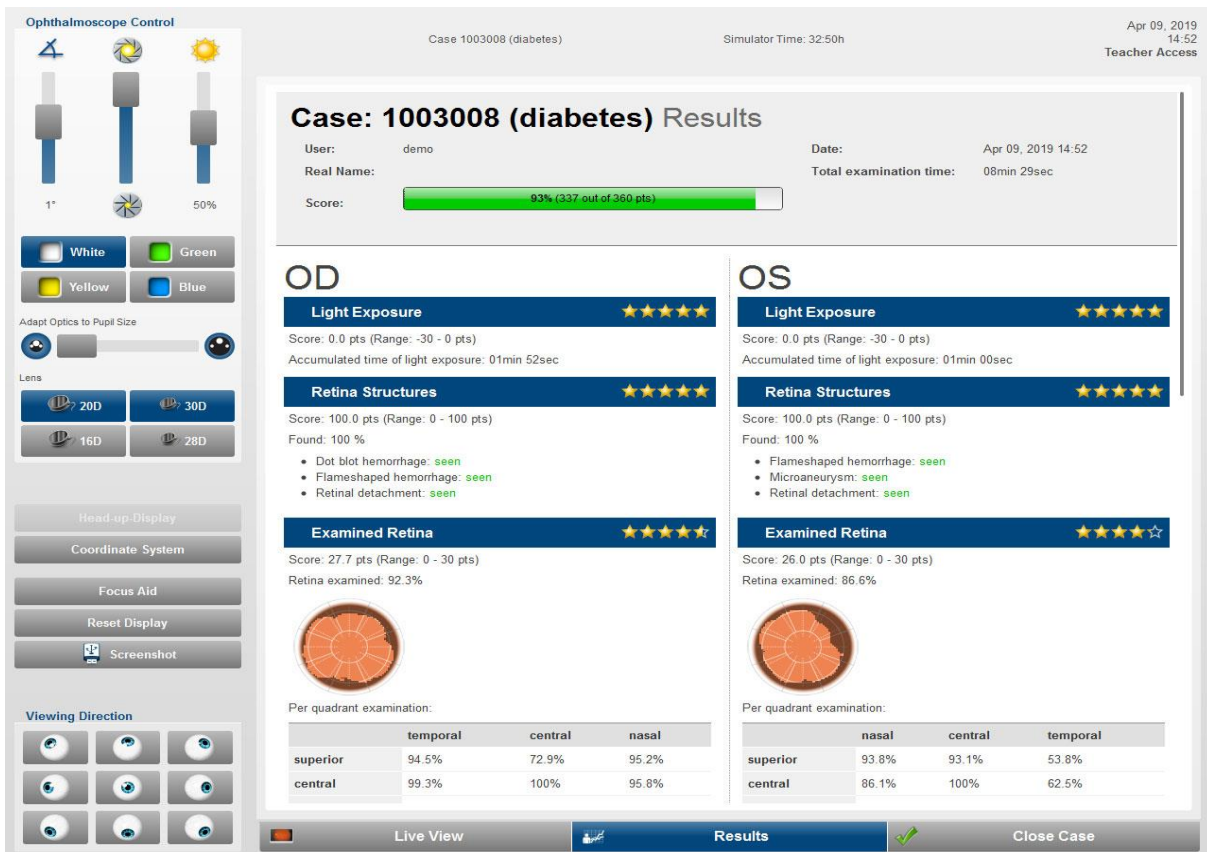


Figure 35 : Le débriefing élaboré par le logiciel après la procédure d’ophtalmoscopie indirecte. Après l’examen, différents aspects sont évalués et présentés à l’examineur [48]

b. Modèle de globe oculaire :

En 2006, Lewallen [49] a présenté un modèle d'ophtalmoscopie indirect simple et peu coûteux. Il a été construit avec une sphère de verre ronde placée dans une surface qui garde son immobilité. Entre le verre et la surface, un papier avec de petites lettres est positionné de manière à ce que la sphère soit à moitié couverte. Enfin, un trou est formé dans un morceau de papier reproduisant l'aspect d'une pupille. Ce modèle vise à enseigner le placement correct de la lentille convergente et la lumière, afin que l'examineur puisse commencer à comprendre les principes de base de l'ophtalmoscopie indirecte. Pas d'études ni d'évaluation comparative des méthodes ont été appliqués à ce modèle. (Figure 36).

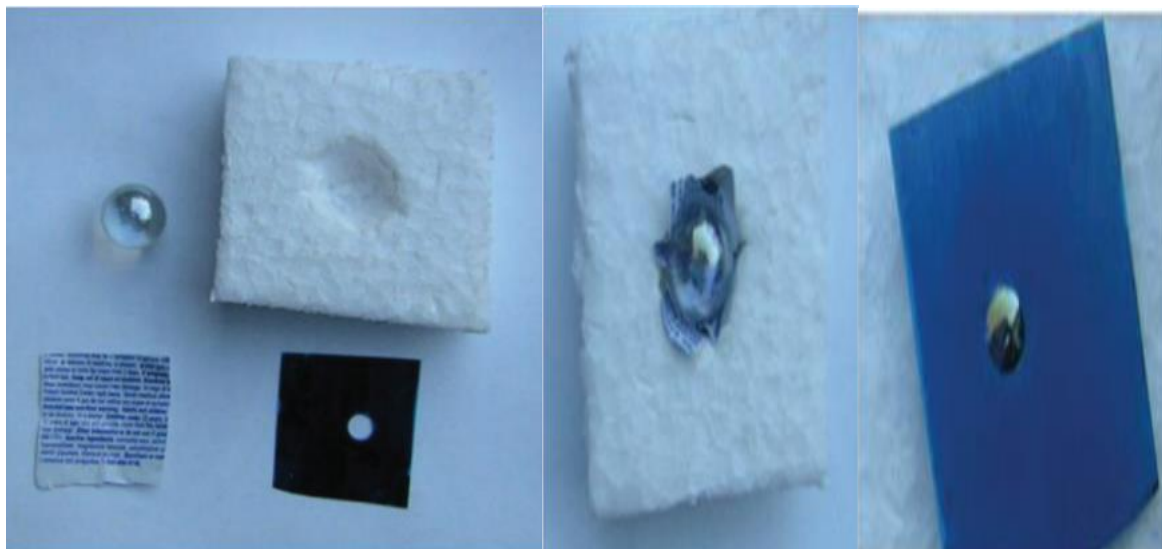


Figure 36 : Modèle du Globe oculaire présenté par Lewallen pour pratiquer l'ophtalmoscopie indirect [49]

c. Plastic Canister model : Modèle d'œil en boîte de plastique :

Comme le modèle créé par Chung et Watzke, Lantz [50] a utilisé le même principe de simulation pour créer une méthode pour l'examen d'ophtalmoscopie indirect en 2009. Ce modèle a été fabriqué au début pour entraîner les résidents de médecine légale à la maîtrise de la technique de la réalisation de l'ophtalmoscopie indirect pour pouvoir bien analyser le fond d'œil des autopsies.

Une pupille artificielle créée dans le couvercle (figure 37) et une image du fond de l'œil en couleur amovible (Figure 38, 39) placée au fond du récipient opaque permettent au pathologiste en formation de pratiquer la technique de l'ophtalmoscopie indirecte monoculaire et d'identifier, de localiser et de décrire correctement les anomalies du fond de l'œil telles que les hémorragies rétiniennes.

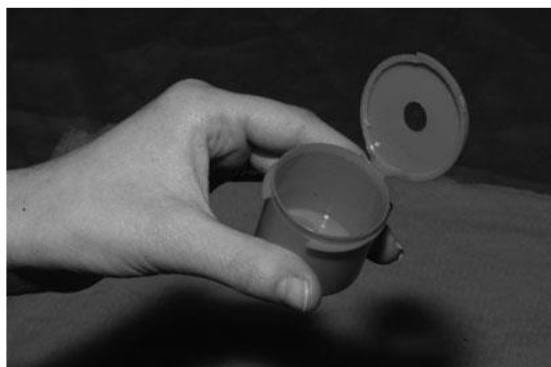


Figure 37 : Modèle d'œil en boîte de plastique : simulation de la pupille par un trou de 9mm au niveau du couvercle. [50]



Figure 38 : Images de fond d'œil utilisées dans le modèle d'œil en boîte de plastique

[50]



Figure 39 : Avec une lampe frontale et une lentille de condensation asphérique, le résident voit le modèle d'œil en boîte de plastique [50]

B. La Simulation de la chirurgie ophtalmologique :

1. Simulation de la chirurgie de cataracte par réalité virtuelle :

- La réalité virtuelle est un environnement simulé sur ordinateur dans lequel les utilisateurs interagissent avec un système informatique à haute performance, des graphiques, des logiciels spécialisés et des dispositifs fournissant une rétroaction visuelle, tactile et auditive, simulant ainsi un environnement réel [51].

À l'heure actuelle, trois simulateurs de chirurgie de la cataracte ont été étudiés. Les résultats de ces études et les données relatives à leurs performances ont été publiées dans la littérature après évaluation par un comité d'experts indépendants [52].

- The Eyesi (VRmagic Holding AG, Mannheim, Germany)
- PhacoVision (Melerit Medical, Linköping, Sweden)
- MicrovisTouch (ImmersiveTouch, Chicago, Illinois)

a. EyeSI : Ophthalmic Surgical Simulator: [53]

Le simulateur « EyeSi Ophthalmic Surgical Simulator » est un simulateur de réalité virtuelle équipé d'une interface de chirurgie de cataracte et vitréo-rétinienne.

- Ce simulateur comprend : (Figure 40 et 41)
 - Une tête en plastique avec un modèle d'œil qui peut pivoter et tourner lorsqu'on le manipule
 - Un microscope binoculaire qui permet d'offrir une vision stéréoscopique de la simulation chirurgicale. Le focus et le zoom sont réglés par la pédale du microscope
 - L'ensemble des instruments (de taille et poids réels) nécessaires à la chirurgie de la cataracte peuvent être sélectionnés au niveau de l'écran tactile : pièce à main pour phacoémulsification, sonde à irrigation-

aspiration, un micromanipulateur, un cystitome, une pince à capsulorhexis ,
une canule d'injection de viscoélastique ...

- Deux pédales : une commandant la pièce à main et la deuxième commandant le microscope.
- Un logiciel générant et analysant la simulation. Celui-ci crée une image virtuelle stéréoscopique à travers les oculaires du microscope quand les instruments sont insérés dans l'œil. Un système « eye tracker » capture les mouvements des instruments dans l'œil ainsi que les réactions biomécaniques des tissus.
- Régulation possible des paramètres de la machine de phacoémulsification à travers l'écran tactile.

Ce simulateur propose différents modules de formation allant de l'entraînement sur des modèles des compétences basiques 'basic skills' vers l'entraînement sur des compétences procédurales 'surgical procedures ' et la gestion des complications. Chaque module comporte des exercices de difficulté croissante (figure 42). Pour chaque module le simulateur est doté d'une étape de Briefing et de Débriefing, pour que la séquence de simulation puisse se dérouler d'une manière très pédagogique :

- Avant chaque exercice une étape de briefing permettra de clarifier le processus de la séquence de simulation (figure 43).
- A la fin de chaque exercice une étape de débriefing (figure 44) est intégrée permettant d'évaluer les qualités et les erreurs de l'apprenant au cours de la séquence de simulation afin de générer un feedback constructif rendant ce processus le plus instructif possible. Quatre paramètres sont pris en compte afin d'établir un score de performance final :
 - × La tâche achevée : réalisation de l'exercice avec succès et dans sa totalité

- × L'efficacité : qui repose sur le temps nécessaire pour réaliser l'exercice et que la quantité d'ultrasons utilisé.
- × L'utilisation et la manipulation des instruments : fermeture, horizontalisation des instruments lors de leur introduction ou leur retrait, temps de chirurgie sans irrigation active
- × Le traitement des tissus (capacité à ne faire aucune lésion cornéenne, irienne ou capsulaire).

Le simulateur attribue des points positifs pour chaque tâche réalisée avec succès et des points négatifs pour toutes les erreurs permettant ainsi d'obtenir un score final allant de 0 à 100.

Le simulateur de chirurgie Eyesi® permet également de simuler la chirurgie vitréo-rétinienne abinterno et en particulier du pelage de la membrane épirétinienne (MER), de la membrane limitante interne (MLI) et du décollement postérieur du vitré (DVP). IL s'agit d'étapes techniques difficiles à acquérir par les jeunes chirurgiens en cours d'apprentissage.



Figure 40: Simulateur EyeSi [54]



Figure 41 : Simulateur EyeSi (photo réelle)

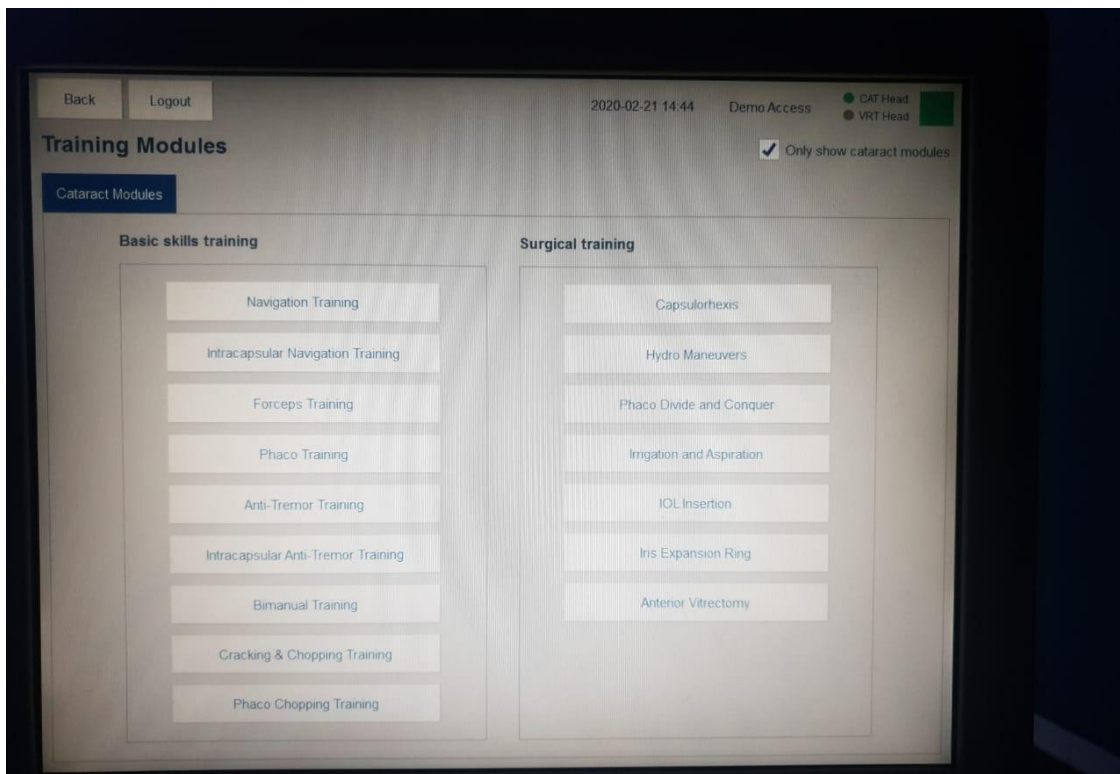


Figure 42 : Les Modules d'entraînement sur simulateur EyeSI (photo réelle)

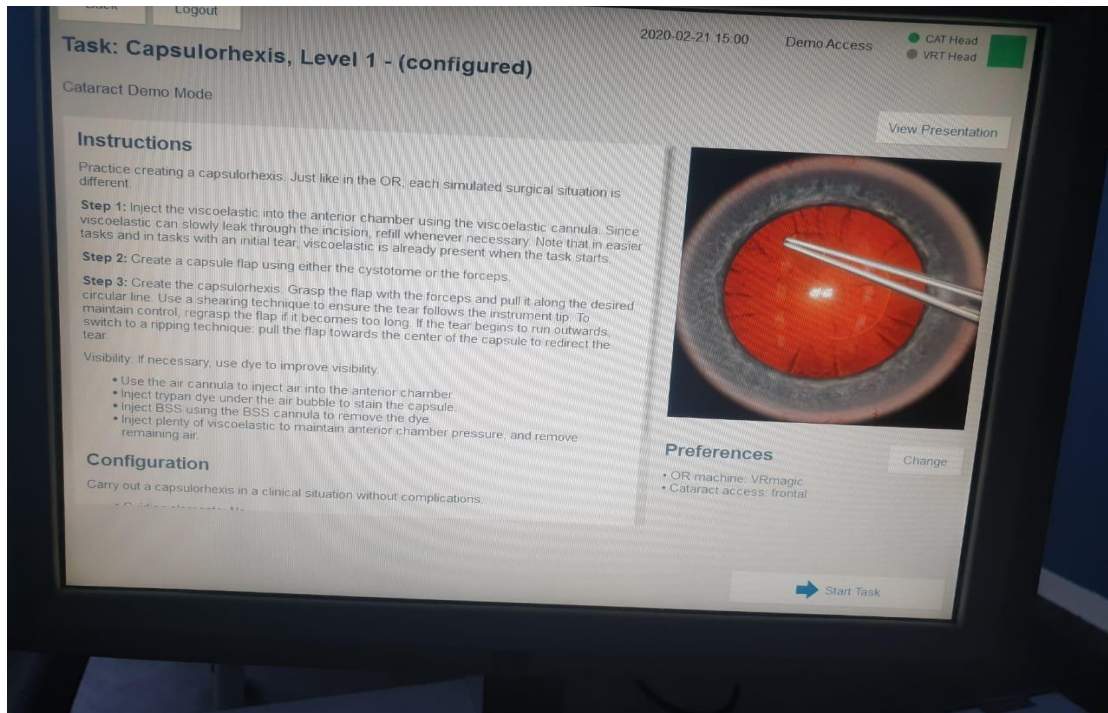


Figure 43 : Étapes de réalisation du capsulorhécis « Briefing » (Photo réelle)

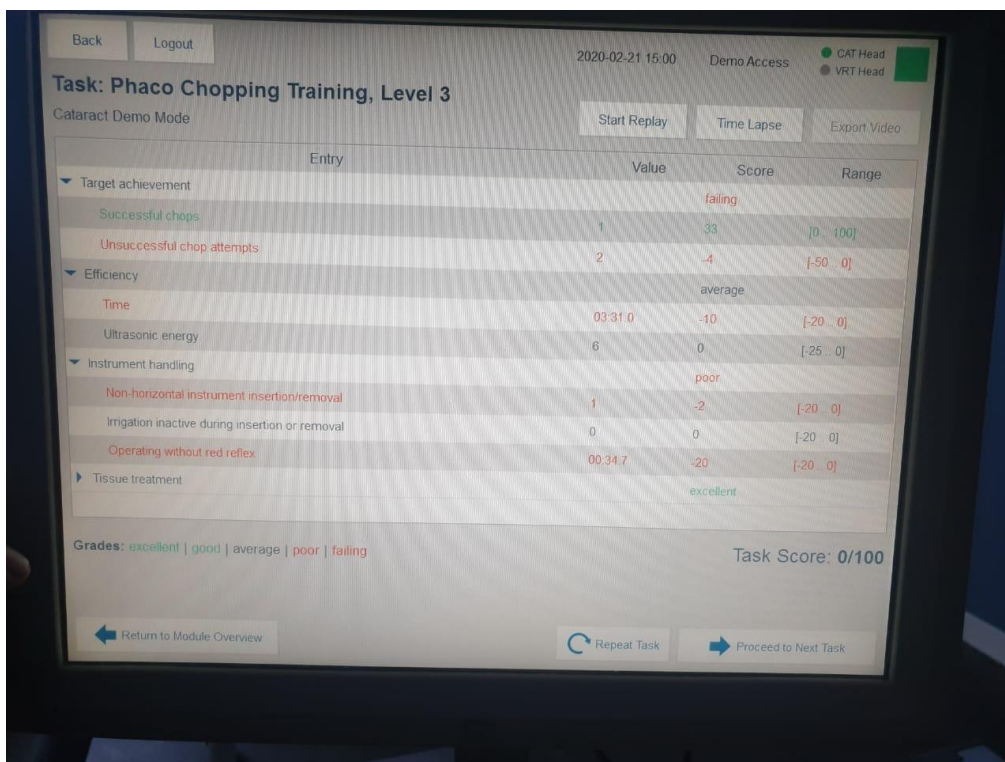


Figure 44 : Critères d'évaluation de la performance sur le module de Phaco Chop (Photo réelle)

b. PhacoVision :

- Le système se compose d'un ordinateur personnel, d'une interface visuelle tridimensionnelle, d'une pièce à main de phacoémulsification, un manipulateur de noyaux et des pédales pour le contrôle de la procédure de phacoémulsification et pour le réglage du microscope.
- Un modèle d'œil comprenant le cristallin, l'iris et la cornée est mis à jour en fonction des données fournies par l'utilisateur. Le modèle contient des informations sur le volume et la pression ainsi que sur la géométrie du globe oculaire simulée. Grâce à l'interface de l'administrateur, les propriétés du modèle oculaire peuvent être réglées pour créer des cas virtuels de patients présentant diverses difficultés (Figure 45).
- La qualité des performances peut être évaluée à partir des données enregistrées selon un index de performances, ce qui permet d'établir des statistiques courantes sur les progrès des apprenants. [55] [56] [57]



Figure 45 : Le simulateur Phacovision (51)

c. MicroVisTouch :

C'est un simulateur de réalité virtuelle qui peut simuler différentes étapes de la chirurgie de la cataracte : incision de la cornée, capsulorhéxis et la phacoémulsification proprement dite. Le MicroVisTouch est équipé d'une pièce à main à bout arrondi fixée à un bras robotisé (figure 46). La plateforme de réalité virtuelle transforme la pièce à main 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 (Figure 47). (53)

Une différence essentielle entre le MicrovisTouch et l'Eyesi est que la tête modèle du MicroVistouch sert seulement pour que le résident s'exerce à placer correctement les mains sur le front et les joues du patient dans le cadre de la posture réelle du chirurgien. (53)

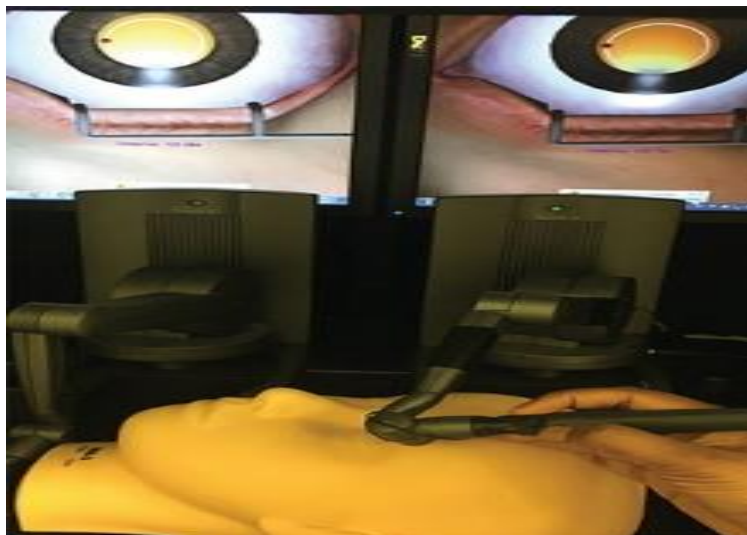


Figure 46 : Bras robotisé du MicroVisTouch (53)



Figure 47 : Le simulateur de chirurgie de la cataracte MicroVisTouch est équipé de pédales qui permettent aux résidents de s'entraîner à l'étape de la phacoémulsification (53)

2. Progrès dans la formation de la chirurgie de la cataracte par simulateur

Le simulateur idéal en chirurgie ophtalmique donnerait aux résidents un monde virtuel de l'œil, indissociable de l'œil vivant, tant par l'aspect que par le toucher, et un programme d'études standardisé et complet pour le soutenir. Les paramètres de formation reflèteraient avec précision les performances des résidents et permettraient de prédire leurs performances chirurgicales sur des patients vivants. L'effet de la formation en immersion totale pourrait être étudié avec plus de précision si les variables étaient contrôlées à l'aide d'un programme d'études standardisé et complet. Actuellement, un tel simulateur et un tel programme n'existent pas. Cependant, des progrès significatifs sont réalisés dans le développement du réalisme haptique (tactile), de l'interaction des tissus et dans l'élaboration d'un nouveau programme pour le soutenir.

En collaboration avec des équipes d'ingénieurs de Moog Inc (New York, New York), InSimo (Strasbourg, France) et SenseGraphics (Kista, Suède), Help Me See (HMS) a construit un système de simulateur de formation conçu pour fournir un réalisme à la fois haptique et graphique dans les performances de la technique Manuel Small Incision Cataract Surgery (MSICS) (60).

Le simulateur HMS MSICS est conçu autour de 5 éléments majeurs : (Figure 48)

- Il s'agit d'un modèle de segment antérieur généré par ordinateur.
- Il est doté d'un générateur d'images visuelles binoculaires stéréoscopiques hautes définition (HD).
- Le simulateur produit un retour haptique bimanuel avec des instruments chirurgicaux dans 3 degrés de liberté.
- Le simulateur est conçu pour la simulation en immersion totale, y compris la configuration réaliste de la salle d'opération, l'interaction virtuelle avec le patient et les complications du patient.
- La plate-forme de simulation est dotée d'un poste de travail pour l'instructeur et d'un système de gestion de l'apprentissage pour faciliter la progression basée sur les compétences à travers plusieurs niveaux de simulation.



Figure 48 : Le prototype du simulateur HMS MSICS (62)

3. Simulation de la chirurgie de cataracte par Wet-lab :

Les Wet-labs utilisent généralement des yeux de cadavres humains, de porcs ou des yeux artificiels. Les yeux de cadavre humain avec une cataracte bien développée et une cornée claire sont difficiles à trouver. Bien que les yeux de porcs soient facilement accessibles, ils diffèrent sensiblement des yeux humains. Ils se caractérisent par leurs grandes chambres antérieures, leurs capsules antérieures épaisses et plus élastiques et leurs grands cristallins souples (63). Les yeux fabriqués à partir de divers matériaux peuvent simuler certaines parties de la procédure, telles que l'ablation du noyau, mais ne sont pas aussi utiles pour pratiquer d'autres étapes, telles que la création du capsulorhéxis (63). (Figure 49)



Figure 49 : Exemple d'un wet-lab avec œil de porc. L'œil est positionné dans les orbites de la tête de perruque et stabilisé par des épingles (63)

Les Wet Labs couvrent principalement la chirurgie de la cataracte par phacoémulsification, destinée surtout aux résidents au début de leur formation qui ont besoin d'une expérience pratique dans la chirurgie de la cataracte par phacoémulsification. Des Wet Labs de phacoémulsification avancés sont également disponibles pour les résidents plus expérimentés permettront de pratiquer diverses techniques telles que l'insertion de crochets d'iris, anneaux de Malyugin, etc. Des wet Labs sur les techniques de suture sont également disponibles.

4. La simulation de la chirurgie de cataracte par les kits « Kitaro » :

« KITARO » est un système d'entraînement aux opérations chirurgicales ophtalmiques dont le développement a fait appel à de nombreuses technologies novatrices pour l'enseignement et l'entraînement à la phacoémulsification et autres opérations chirurgicales ophtalmiques (65) (Figure 50).



Figure 50 : Kitaro Wet Lab (65)

- Le système d'entraînement chirurgical KITARO est composé de trois kits d'entraînement :
 - KITARO DryLab (Un kit pour débutants) : Permet de s'initier aux techniques de base de la phacoémulsification comme le capsulorhéxis ou la segmentation du noyau sur un bureau, dans un cabinet médical ou à domicile.
 - KITARO WetLab (Kit de simulation réaliste remplaçant l'œil de porc) : est un outil conçu pour simuler la phacoémulsification sous microscope, en salle d'opération, comme sur un véritable œil humain

- KITARO MultiLab (Kit multi performances pour chirurgiens généraux) : a été développé pour permettre aux chirurgiens généraux d'améliorer leurs techniques dans les cas difficiles de chirurgie de la cataracte (petites pupilles, zonules fragiles ou rupture zonulaire) et aussi pour la réalisation de l'extraction extra capsulaire et l'implantation intraoculaire. Il permet aussi de s'entraîner sur les opérations chirurgicales des glaucomes (trabéculotomie, trabéculectomie) et la kératoplastie (transfixiante ou lamellaire et notamment endothéliale).
- Le KITARO WetLab fournit des avantages non négligeables par rapport à un « wet lab » porcin en termes de :
 - Préparation simple (installation du cristallin artificiel uniquement)
 - Environnement hygiénique (libre de toute infection virale et de germe)
 - Haute qualité (utile pour l'entraînement au capsulorhéxis et au cracking du noyau (de réalisation difficile sur les yeux de porc))
 - Rentabilité (une préparation simple entraîne une économie sur les coûts de main d'œuvre et fait gagner du temps)
 - Gestion des déchets (fastidieuse avec les yeux de porc).
- Le KITARO WetLab est un kit de simulation complet qui intègre : (figure 51)
 - Une partie « globe oculaire » mobile sous l'action des instruments.
 - Un masque équipé de paupières aussi souples que celles d'un être humain
 - Des instruments de simulation (crochets/pinces)
 - Un système d'irrigation et de drainage












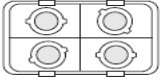
Partie globe oculaire	① Partie cornée-iris pour le WetLab (Fixée à la partie sclère dans le kit) 	② Partie sclère 
Plaque de base et masque	③ Plaque de base (avec billes en fer et éponges) 	④ Masque 
Instruments de simulation	⑤ Cystotome avec seringue  ⑥ Crochets pour manipulation du noyau (2 types)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

Figure 51 : composants du kit de simulation du KITARO WetLab (65)

5. Yeux simulés pour chirurgie oculaire 'Simulated ocular surgery eyes' : (66)

Ses modèles de simulation de chirurgie ont été perfectionnés par Craig Phillips (Phillips Studios) en utilisant une variété de matériaux qui reproduisent avec précision l'apparence et, plus important encore, la sensation des vrais tissus oculaires. Ils sont dotés d'une conjonctive, d'une capsule de Tenon, de muscles oculomoteurs y compris les obliques supérieur et inférieur et d'une sclérotique qui se manipule comme sur un œil humain (figure 52). De plus, les têtes des modèles ont des nez et des sourcils qui gêneront les manœuvres chirurgicales comme dans la vie réelle (Figure 53).

Il y a 2 types des modèles de simulation de chirurgie de cataracte :

1. **Modèle basique** (Figure 54) : a une forme hémisphérique. La cornée a une sensation similaire à une vraie cornée, ce qui permet aux résidents de s'exercer à la construction d'incisions cornéennes et de réaliser des sutures de la cornée. Le cristallin a une capsule antérieure, qui a des propriétés très similaires à la capsule humaine et permet aux résidents de pratiquer leurs techniques de capsulorhéxis (figure 55). Le cristallin lui-même est fabriqué à partir d'un matériau de type gel de consistance variable, pour mimer les différents types de cataractes. Il se comporte de la même manière que le cristallin humain lors de la chirurgie de phacoémulsification, ce qui permet aux résidents de pratiquer les techniques de sculpture, de cracking et de phacoémulsification du noyau cristallinien (figure 56). Il n'est pas possible de réaliser sur ses modèles la technique d'aspiration du cortex vu qu'il n'existe pas de cortex du cristallin. Une fois le cristallin retiré, une lentille intraoculaire (LIO) peut être insérée.

2. **Modèle avancé** : a une forme sphérique et possède une chambre antérieure et une chambre postérieure. Le cristallin est enfermé dans une capsule et se présente sous différentes densités, afin de simuler différents types de cataracte. La chambre postérieure peut être remplie de blanc d'œuf comme substitut vitreux. Ces yeux peuvent être utilisés pour simuler une chirurgie de cataracte de routine ou compliquée telle que la rupture capsulaire postérieure avec issue du vitré (figure 57), une chute du noyau dans le segment postérieur, une désinsertion du sac +/- issue du vitré (insertion d'un anneau de tension capsulaire) et même une hémorragie expulsive.

Les modèles de rétine peuvent être utilisés pour effectuer des vitrectomies, traiter des décollements de rétine (Figure 58) et réaliser un pelage des membranes. Il y a aussi des modèles pour simuler la chirurgie de strabisme et du glaucome.

Ces modèles de yeux peuvent être emmenés dans les salles d'opération, afin qu'ils puissent exercer en utilisant le microscope, les instruments et le matériel de phaco / vitrectomie qu'ils connaissent bien.



Figure 52 : modèle d'un œil simulé avec sclère, tendon et conjonctive (66)



Figure 53 : La tête des modèles des yeux simulés (66)



Figure 54 : Modèle de simulation de cataracte basique (66)



Figure 55 : Réalisation du capsulorhéxis sur un œil simulé pour chirurgie de cataracte
(66)

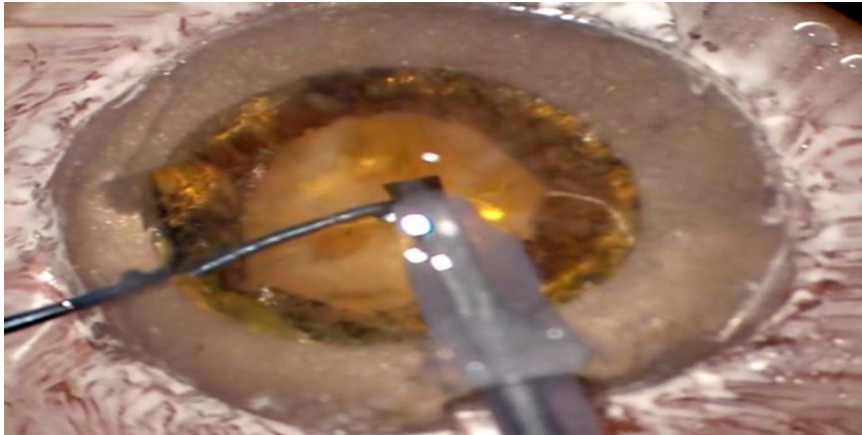


Figure 56: Réalisation de la sculpture, le cracking et la phacoémulsification du noyau sur un œil simulé pour chirurgie de cataracte (66)

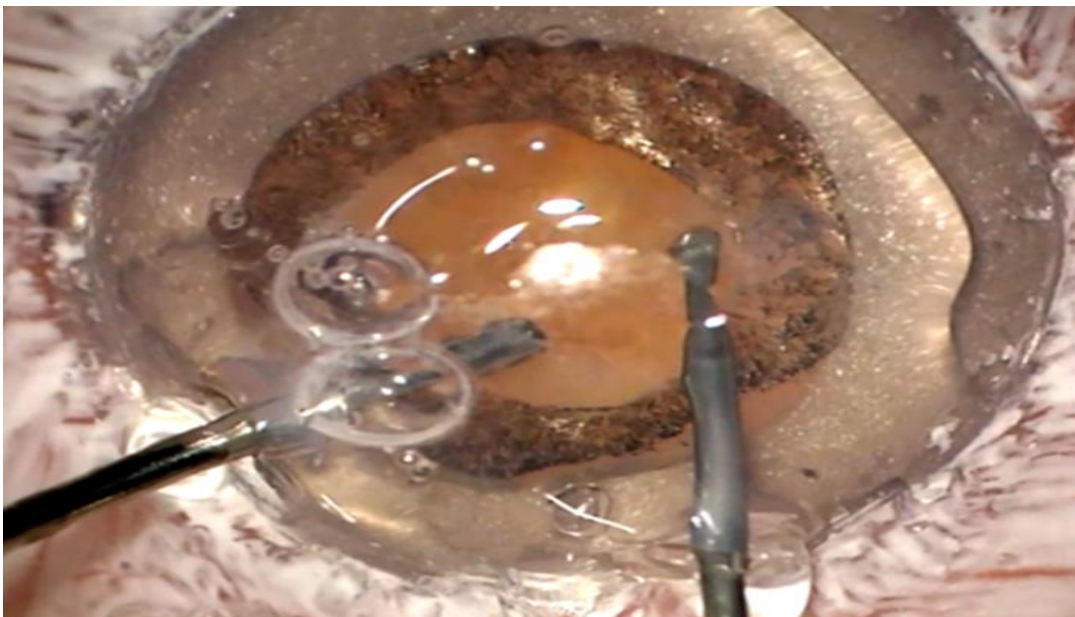


Figure 57: Modèle avancé de simulation de chirurgie de cataracte : Forme compliquée avec rupture capsulaire postérieure et issu du vitré (66)



Figure 58 : Modèle d'œil simulé pour la chirurgie vitréo-rétinienne (66)

C. Autres simulateurs en ophtalmologie :

1. Simulation de la capsulotomie postérieure au laser YAG :

Cette technique fournit une simulation de l'opacification capsulaire postérieure (OCP) qui peut être utilisé par les ophtalmologistes en formation pour effectuer une capsulotomie postérieure au laser YAG. Le modèle comprend plusieurs composantes : un implant intraoculaire (IOL) avec une OCP artificielle (figure 59), un modèle de chambre antérieure qui contient l'IOL (figure 66) et un dispositif mécanique réglable qui permet de monter la chambre antérieure artificielle sur la lampe à fente laser (Figure 60) (61).



Figure 59 : Vue agrandie d'un IOL rigide avec une OCP simulée adhérente à la surface postérieure (67)

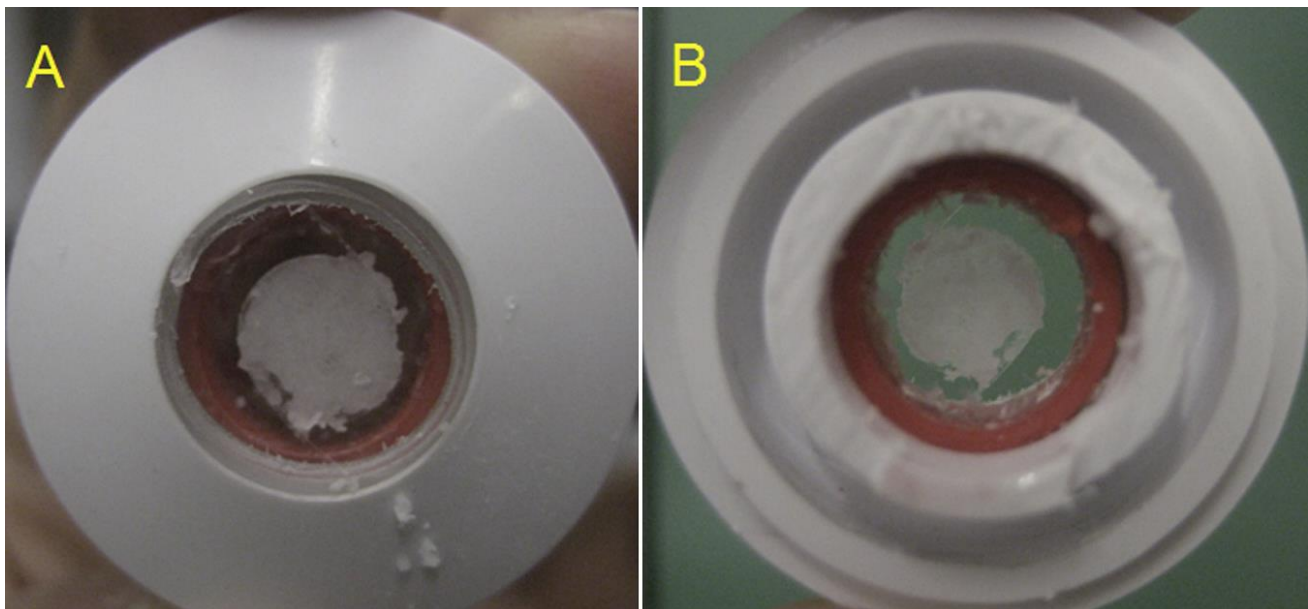


Figure 60 : L'IOL avec une OCP simulée située à l'intérieur de la chambre antérieure en plastique. (A) : Vue antérieure, la cornée en plastique a été enlevée. (B) : Vue postérieure. L'arrière a été scié et le contenu simulant la lentille a été retiré (67).

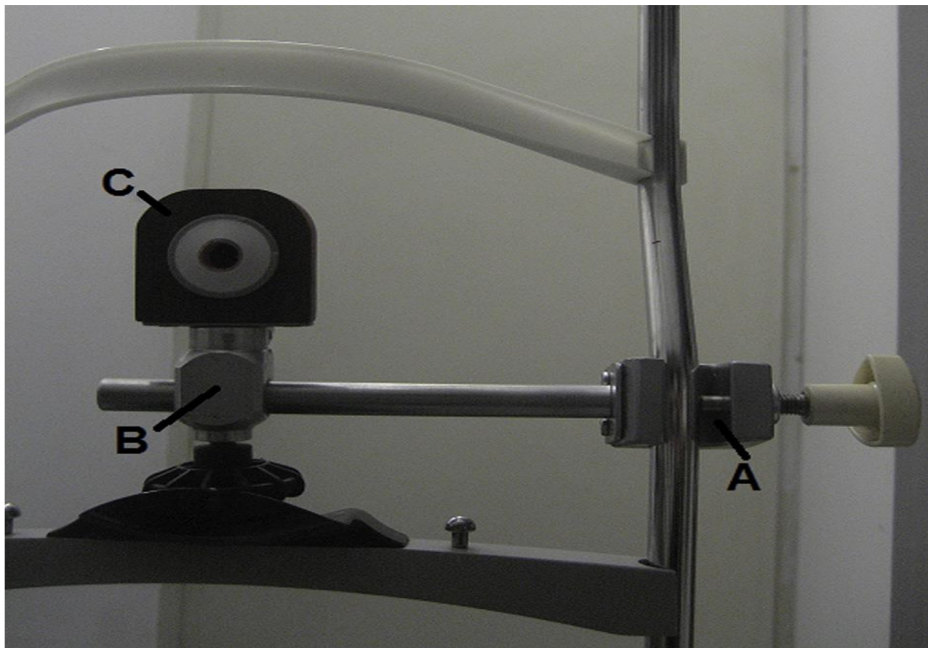


Figure 61 : Un bras mécanique est ajusté pour placer le modèle à l'endroit approprié pour effectuer la capsulotomie. A : Connecteur réglable qui se fixe à l'appui-tête de la lampe à fente et contrôle l'emplacement vertical du modèle. B : Connecteur ajustable qui contrôle la position horizontale du modèle. C : Plaque en bois qui maintient l'œil du modèle. (67)

2. Simulateurs d'anesthésie locorégionale en ophtalmologie Ophthalmic

Anesthesia Simulation System : OASiS) (68) :

Mukherjee et ses coll partagent leur expérience d'un système de simulation de l'anesthésie locorégionale en ophtalmologie qu'ils ont développé et testé dans le cadre d'une étude prospective (68). L'appareil consiste en une tête de mannequin avec des structures orbitaires et oculaires anatomiquement précises et un système de détection intégré capable de fournir un retour d'information quantitatif et qualitatif sur l'emplacement de l'aiguille, et donc sur l'évitement, ou le manque d'évitement, des structures oculaires et orbitaires critiques pendant la procédure d'injection. (Figure 62)

Le système est conçu pour suivre les étapes cruciales de l'administration de l'anesthésie régionale autour de l'œil, y compris l'identification de l'œil à bloquer, l'identification du bon site d'entrée de l'aiguille, l'évaluation du contrôle de l'aiguille dans l'espace intra-orbitaire, l'évitement des dommages aux muscles extra-oculaires ou au globe, l'aspiration de la seringue avant l'injection de l'anesthésique et l'évaluation du volume d'anesthésique locale administré. En outre, le système est configurable de manière à pouvoir atteindre différents objectifs pédagogiques ; par exemple, la nécessité d'une injection supplémentaire d'anesthésique supéronasal. Ainsi, le système est bien conçu pour permettre de répondre aux attentes d'une série d'objectifs d'apprentissage pour l'anesthésie régionale.

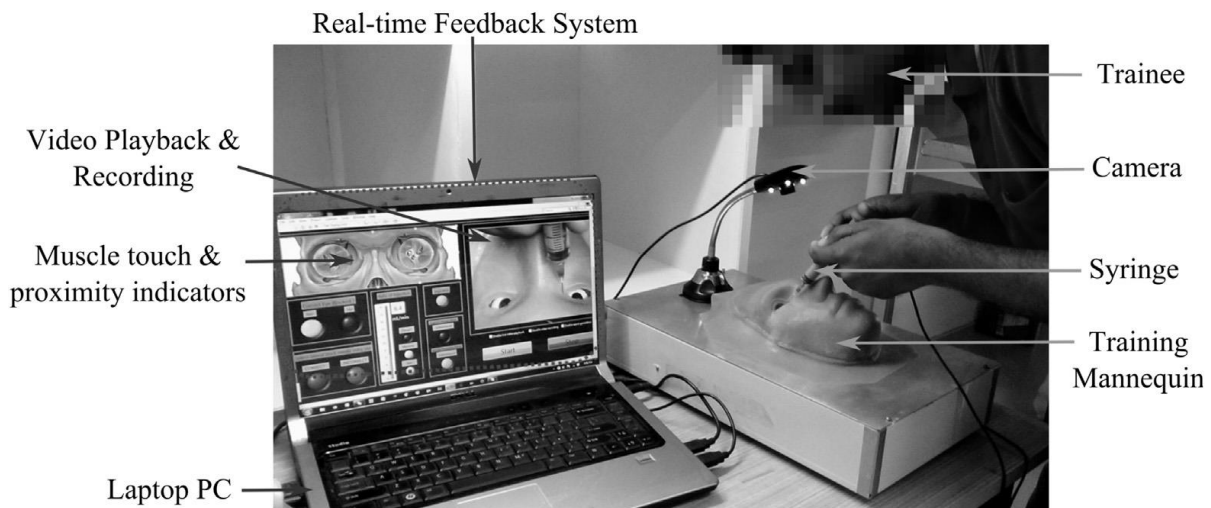


Figure 62 : Le dispositif de formation montrant le résident en train d'insérer la seringue dans le mannequin du système de simulation d'anesthésie ophtalmique (OASiS). Le mannequin a une structure orbitaire et oculaire anatomiquement précise avec une peau en silicone superposée pour plus de réalisme. Le système de retour d'information en temps réel indique la position actuelle de la seringue et enregistre divers paramètres qui peuvent également être rejoués sur un système de débriefing (68).

VIII. Matériels et méthodes :

A. Le cadre de l'étude :

Il s'agit d'une étude transversale, basée sur un questionnaire envoyé ; par courriel et par les différents réseaux sociaux ; à l'ensemble des résidents d'ophtalmologie au Maroc qui ont fait la chirurgie de cataracte par phacoémulsification associée ou non à la simulation sur le simulateur en réalité virtuelle EyeSi . L'enquête en ligne a été menée pendant 7 mois d'Aout 2020 au février 2021

B. L'objectif de l'étude :

Cette étude vise principalement à évaluer l'impact du simulateur de phacoémulsification en réalité virtuelle sur l'amélioration des performances chirurgicales des résidents d'ophtalmologie, et secondairement à déterminer le degré de fidélité et de réalisme du simulateur, à rechercher une éventuelle concordance entre les résultats sur simulateur et le niveau réel des chirurgiens qui l'utilisent et aussi à montrer si l'amélioration des performances chirurgicales avec l'utilisation du simulateur se voit durant les premières phacoémulsifications.

C. Population étudiée :

1. **Critères d'inclusion :** les résidents d'ophtalmologie ou les jeunes ophtalmologistes qui ont fait la chirurgie de cataracte par phacoémulsification associée ou non à la simulation sur le simulateur en réalité virtuelle EyeSi.

2. Critères d'exclusion :

- Les réponses incomplètes ou sans consentement
- Les résidents qui n'ont fait ni chirurgie de cataracte par phacoémulsification ni simulation par simulateur de réalité virtuelle EyeSi.
- Les résidents qui ont fait juste la simulation sans chirurgie de cataracte par phacoémulsification.
- Les résidents qui ont fait la simulation et la chirurgie de cataracte par extraction extracapsulaire (EEC).

D. La collecte et la saisie des données

- Le questionnaire a été rédigé sur Google Forms ; par conséquent, les réponses ont été automatiquement recueillies sur une feuille de réponses Excel. Les réponses incomplètes ou sans consentement ont été exclues.

- Le questionnaire : Le questionnaire utilisé contenait 58 questions divisées en 6 parties :

1. **Informations générales :** le but de ce chapitre est de connaître les caractéristiques de notre échantillon : sexe, âge, année de résidanat, ville et CHU.

2. **La simulation en médecine :** le but de ce chapitre est de savoir si les résidents ont déjà eu une initiation à la simulation durant leur cursus de médecine générale.

3. **La simulation en ophtalmologie** : le but de ce chapitre est de savoir la place de la simulation en ophtalmologie ainsi que les simulateurs les plus utilisés chez les résidents de l'échantillon.
4. **Apprentissage de la chirurgie de cataracte** : le but de ce chapitre est de savoir les différentes méthodes de chirurgie de cataracte utilisées par les chirurgiens dans notre échantillon ainsi que le degré d'expérience dans chaque méthode.
5. **Le degré d'utilisation et d'expérience sur le simulateur EyeSI** : le but de ce chapitre est de connaître le degré d'incorporation du simulateur en réalité virtuelle 'EyeSI' dans le programme de formation chirurgicale des résidents.
6. **Courbe d'apprentissage dans la chirurgie de cataracte par phacoémulsification** : Le but des questions de ce chapitre est de savoir si les résidents qui ont fait un apprentissage sur simulateur en premier ont une courbe d'apprentissage plus rapide. Nous signifions par courbe d'apprentissage, le nombre de de phacoémulsifications nécessaire pour acquérir une compétence donnée, à savoir :
 - La manipulation du microscope
 - La facilité de navigation dans le segment antérieur
 - La coordination entre les 2 mains et les 2 pieds
 - L'utilisation de moins d'ultrasons avec diminution du temps chirurgical.
7. **Les complications chirurgicales avant et après introduction du simulateur EyeSI** : Le but de savoir la fréquence des complications est de répondre à la question suivante "est ce que les résidents qui ont fait la simulation, avec surtout un niveau intermédiaire à avancé en simulation font moins de complications que les résidents qui n'ont pas fait de simulation auparavant ?"

8. L'appréciation générale du simulateur EyeSI : Le but de chapitre est de connaître l'appréciation des résidents sur le simulateur ainsi de donner leur avis sur son intérêt dans la formation chirurgicale des résidents.

E. L'analyse statistique :

Les données ont été collectées et traitées à l'aide d'un fichier Excel® (Microsoft Excel 2013). Les caractéristiques des patients sont présentées avec les méthodes classiques de la statistique descriptive.

Le calcul des différents taux et scores a été réalisé grâce au logiciel SPSS version 21.

Déclaration des liens d'intérêt :

Nous déclarons ne pas avoir de liens d'intérêt en rapport avec cette étude. Nous nous sommes basé sur le simulateur "EyeSI" parce qu'il est le seul simulateur en réalité virtuelle de phacoémulsification disponible au Maroc.

IX. RESULTATS

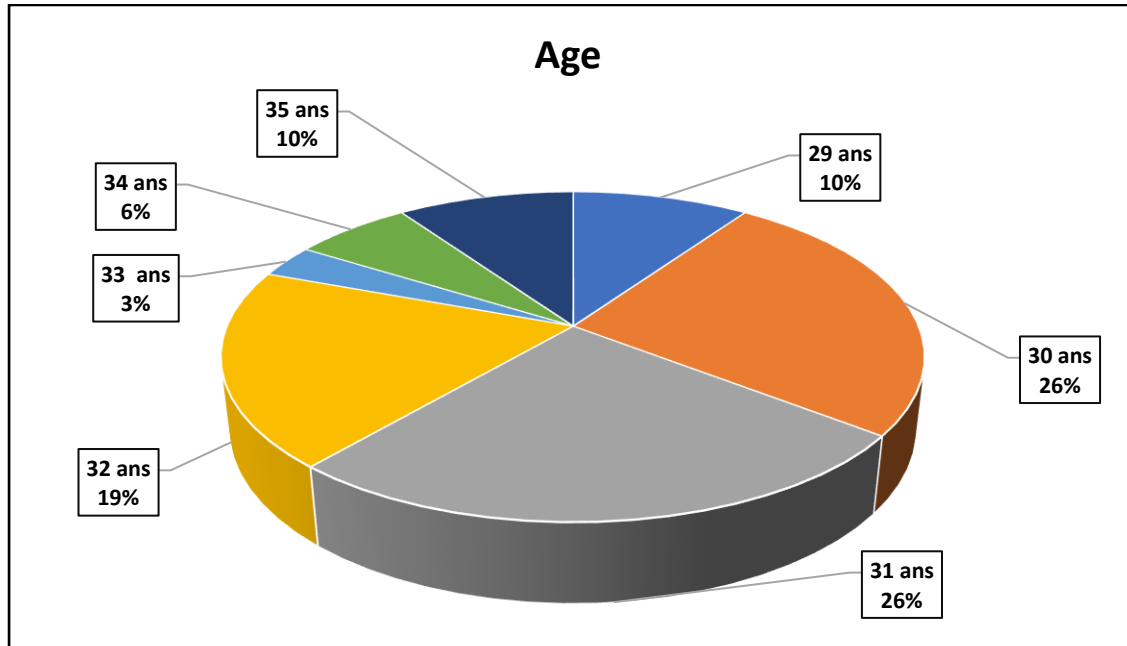
A. Les caractéristiques de notre échantillon :

Au total 55 résidents ont répondu à notre questionnaire. 21 résidents ont été exclu de l'étude vu qu'ils ne répondent pas aux critères d'inclusion (*10 résidents n'ont pas fait de chirurgie de cataracte ni de simulation, 8 ont fait juste la simulation sans chirurgie de cataracte et 3 ont fait la simulation et la chirurgie de cataracte par EEC mais n'ont jamais fait de phacoémulsification*). Finalement, 34 résidents et jeunes ophtalmologistes ont été inclus dans l'étude et ont été divisé en 2 groupes :

- **Groupe 1 : est constitué de 25 résidents qui ont fait à la fois la chirurgie de cataracte par phacoémulsification et la simulation sur l'EyeSI.**
- **Groupe 2 : est constitué de 9 résidents et jeunes ophtalmologistes qui ont fait la chirurgie de cataracte par phacoémulsification mais sans expérience préalable de simulation sur l'EyeSI.**

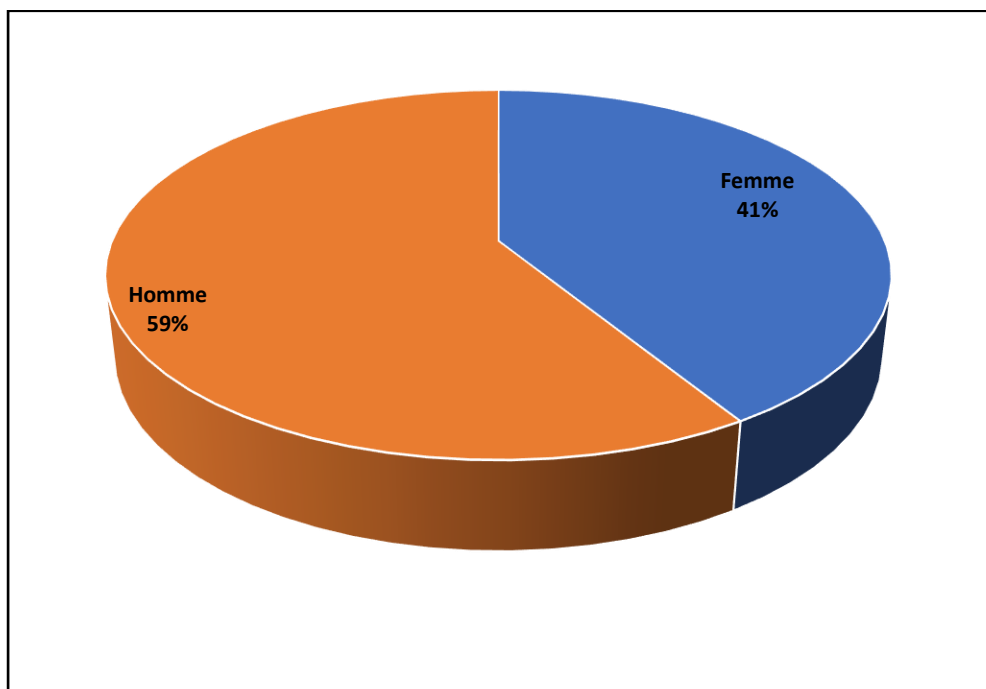
La moyenne d'âge du groupe 1 était de 31,08 ans alors que celle du groupe 2 était de 32,77.

La répartition selon les tranches d'âges (graphique 1) a montré une représentativité élevée des résidents âgés de 30 ans et 31 ans (chacune de ces tranches d'âge représente 26 % de l'ensemble des résidents) avec une prédominance de la tranche d'âge entre 29 et 31 ans (62% des répondeurs).



Graphique 1 : Répartition des résidents selon l'âge

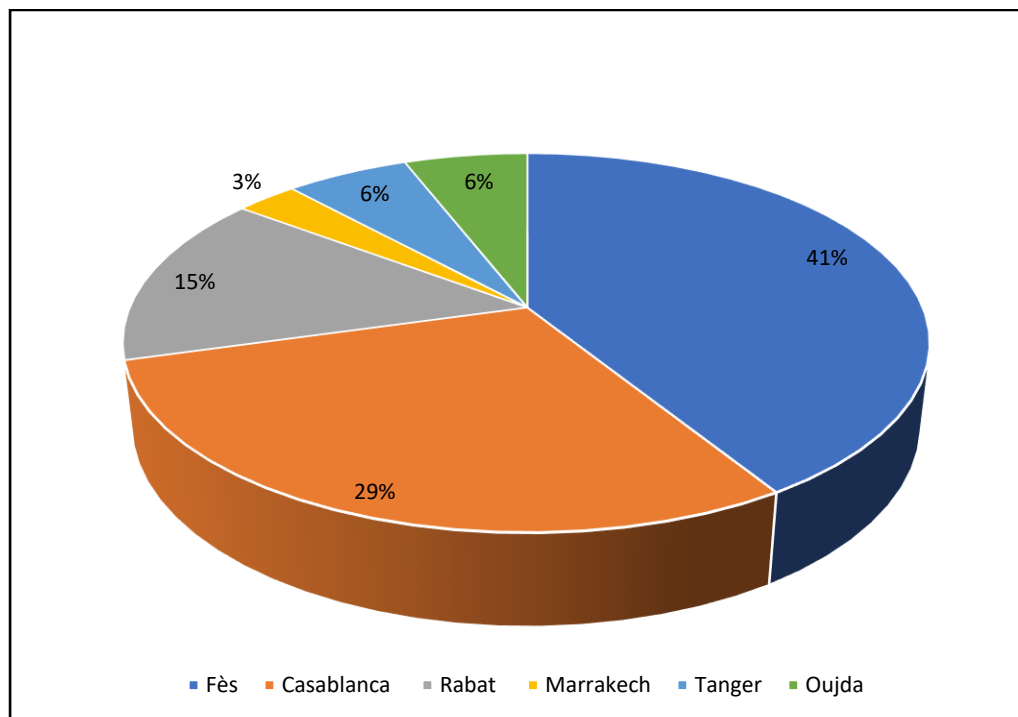
Plus de la moitié (53.2%) des résidents qui ont répondu au questionnaire était des femmes (n=25), avec un ratio hommes/femmes de 0,84 (graphique 2).



Graphique 2 : Sex-Ratio de notre population d'étude.

Pour la répartition selon l'année de résidanat, nous avons noté que presque tous les participants à l'étude sont des résidents des 2 dernières années de spécialité ou des jeunes ophtalmologistes.

Concernant la répartition selon les villes, la plupart des réponses émanaient des résidents du CHU Hassan II de Fès avec un taux de réponse de 41% suivi du CHU Ibn Rochd de Casablanca avec un taux de réponse de 29 % puis le CHU Avicenne de Rabat avec 15 % de réponses puis CHU d'Oujda, de Marrakech et quelques jeunes spécialistes de Tanger. (Graphique 3)



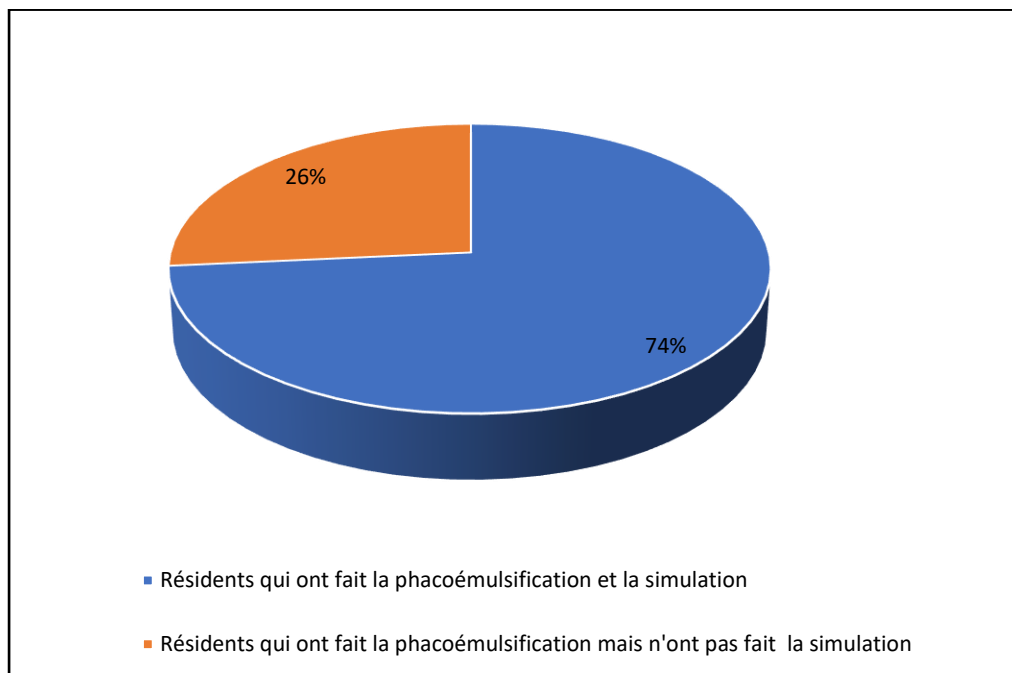
Graphique 3 : Répartition des résidents selon la ville et le CHU où ils ont eu leur formation.

Nous avons réparti les résidents ayant participé à notre étude en 2 groupes, selon leurs réponses sur les questions en rapport avec l'utilisation du simulateur et la pratique de chirurgie de cataracte : (Graphique 4) :

- **Groupe 1** : est constitué de 25 résidents qui ont fait à la fois la chirurgie de cataracte par phacoémulsification et la simulation sur l'EyeSI et qui représente 74% de l'échantillon.
 - ✓ Sous-groupe A : les résidents qui ont fait la simulation avant la chirurgie de cataracte : 28%
 - ✓ Sous-groupe B : les résidents qui ont fait la simulation après le début la chirurgie de cataracte : 72%
- **Groupe 2** : est constitué de 9 résidents et jeunes ophtalmologistes qui ont fait la chirurgie de cataracte par phacoémulsification mais sans simulation sur EyeSI et qui représente 26% de l'échantillon.

Pour l'analyse comparative des résultats, nous avons opté également pour un échantillonnage supplémentaire.

- Le sous-groupe des résidents qui ont commencé leur apprentissage de phacoémulsification sur simulateur.
- Le sous-groupe des résidents qui ont commencé par faire des chirurgies de cataracte par EEC
- Le sous-groupe des résidents qui ont commencé directement la phacoémulsification sans passer par la simulation ni la chirurgie de cataracte par EEC

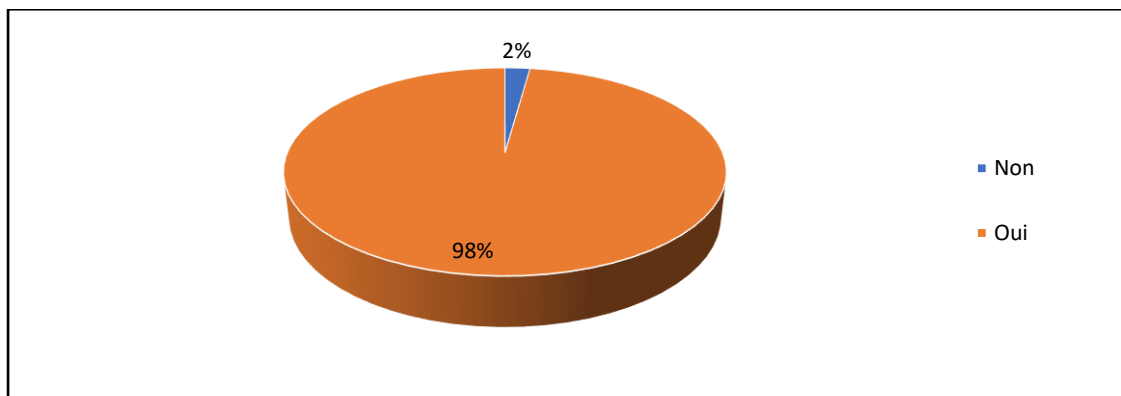


Graphique 4 : Répartition des résidents inclus dans notre étude selon l'exposition au simulateur EyeSI et à la phacoémulsification.

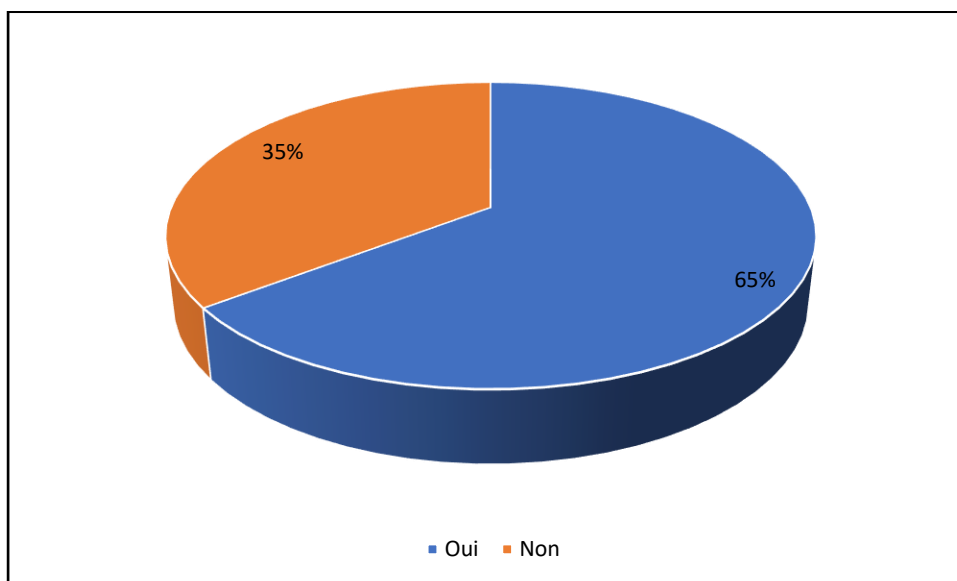
B. Simulation en médecine et en ophtalmologie :

L'analyse du groupe a montré que presque tous les résidents avaient une idée sur la simulation en médecine et 65% d'entre eux ont déjà eu une formation par simulation durant leur cursus de médecine générale (Graphique 5 et 6).

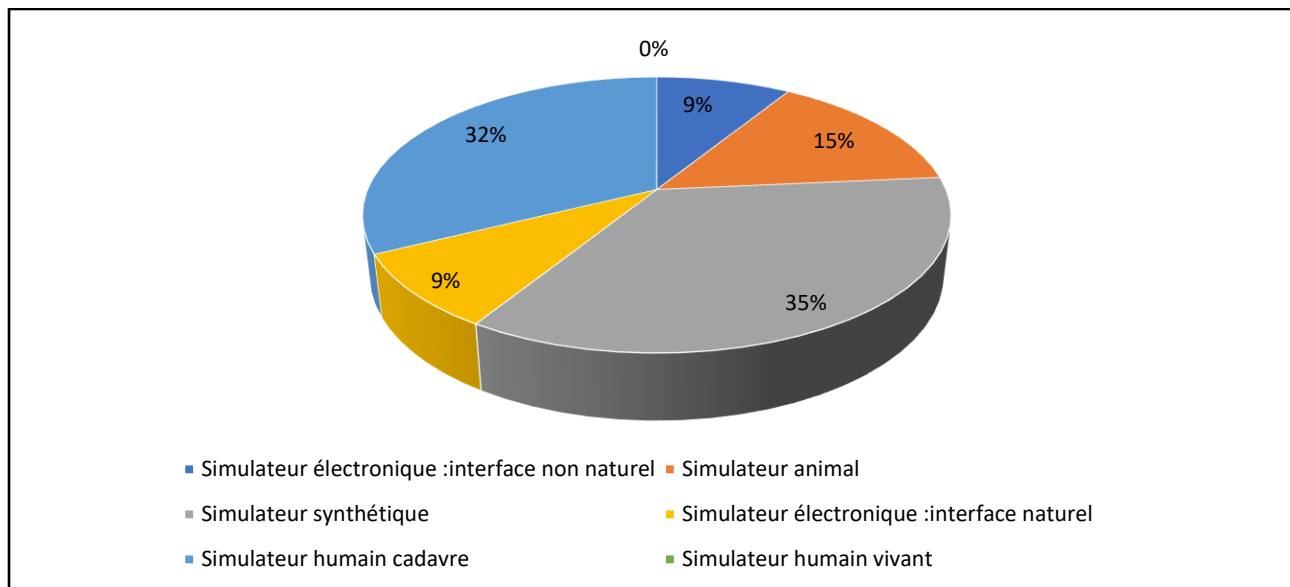
Cette notion de formation par simulation lors du cursus médecine générale met en valeur notre échantillon. Ainsi, parmi les simulateurs les plus utilisés lors de leur formation de généraliste nous avons noté que le simulateur synthétique et le simulateur humain cadavérique représentent 67% de l'ensemble des simulateurs utilisés. (Graphique 7)



Graphique 5 : Une idée sur la simulation en médecine

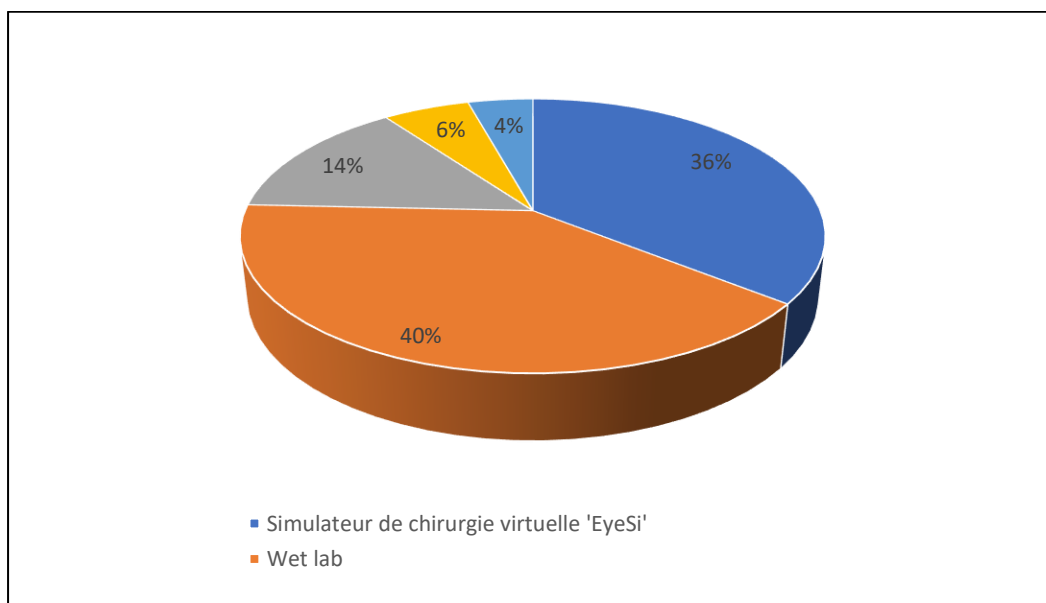


Graphique 6 : Formation sur un simulateur durant le cursus de médecine générale



Graphique 7 : Types de simulateurs utilisés lors de la formation de médecine généraliste des résidents.

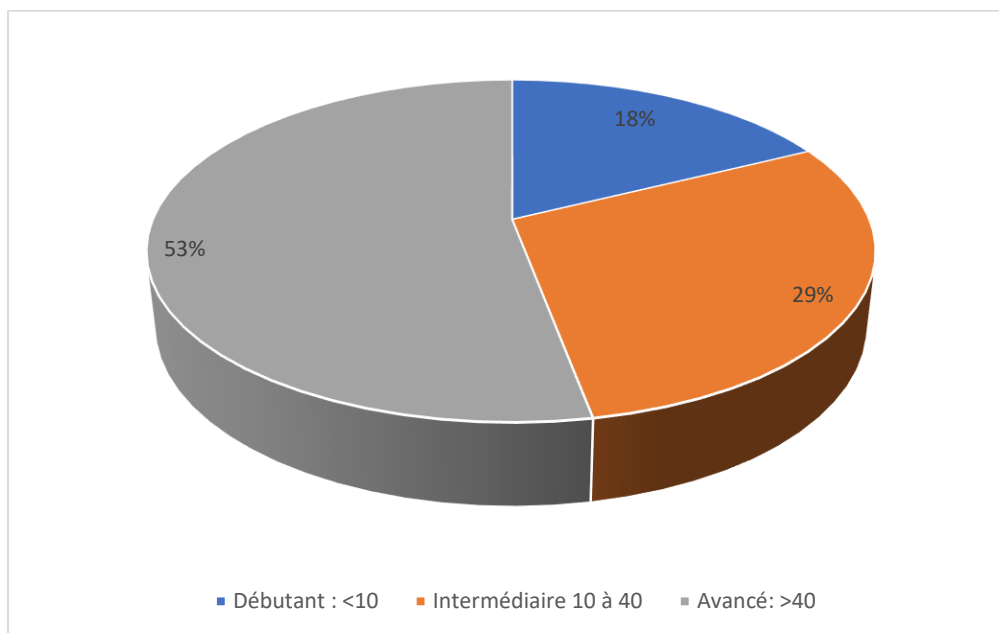
L'analyse de l'échantillon a montré également que tous les résidents avaient déjà une idée sur la simulation en ophtalmologie. Les méthodes de simulation les plus utilisés par les résidents de notre étude étaient les Wet lab avec un taux de 40 % et le simulateur en réalité virtuelle de phacoémulsification 'EyeSi' avec un taux de 36 %. (Graphique 8).



Graphique 8 : Méthodes de simulation utilisées par les résidents en ophtalmologie dans notre étude.

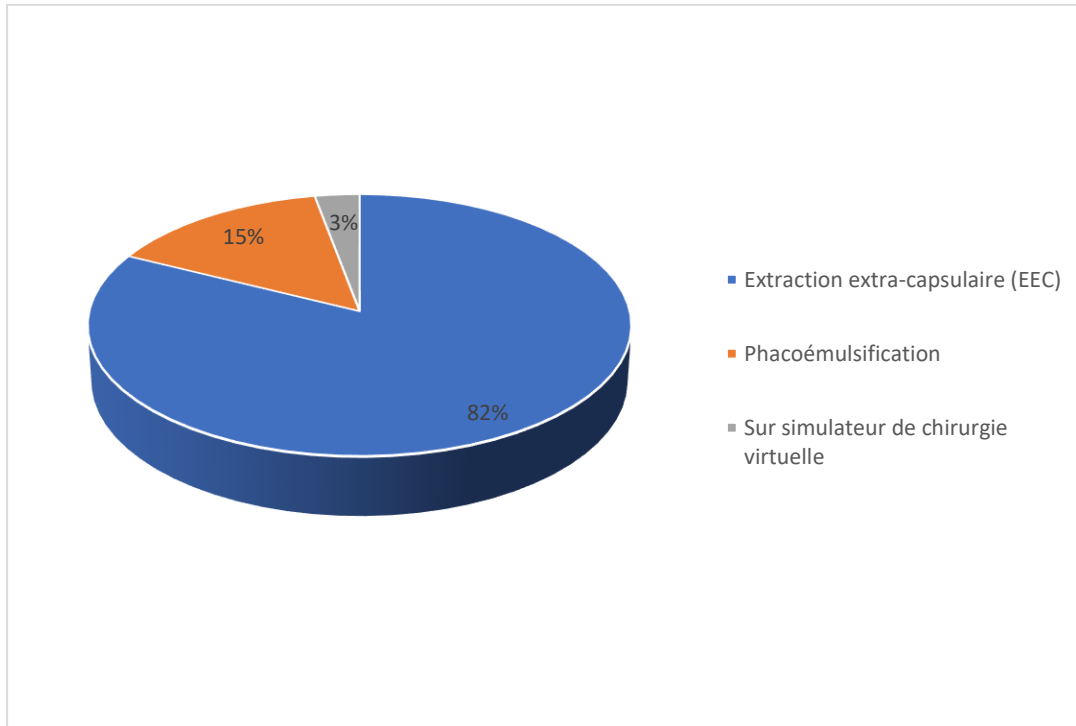
C. Apprentissage de la chirurgie de cataracte :

La répartition de notre échantillon selon le degré d'expérience en chirurgie de cataracte s'est basée sur le nombre de phacoémulsification complètes réalisées en tant que premier opérateur. Nous notons une prédominance dans notre échantillon des résidents qui ont une expérience avancée de chirurgie de cataracte (plus de 40 chirurgies de cataracte) qui représentent 53% de l'ensemble de l'échantillon (graphique 9).



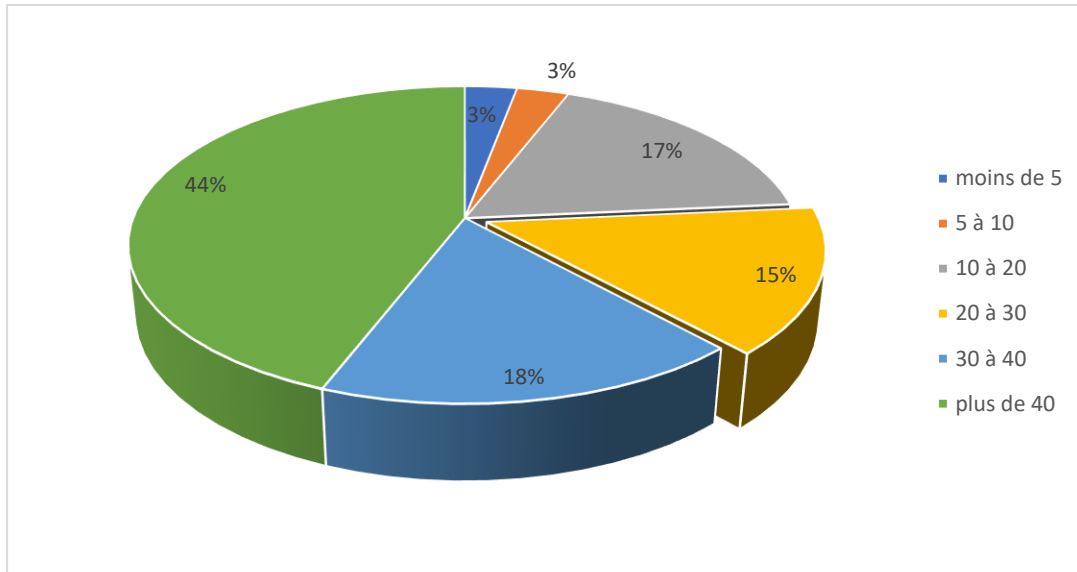
Graphique 9 : Répartition selon degré d'expérience en chirurgie de cataracte

L'analyse des questions relatives à la chirurgie de cataracte, nous a révélé aussi que la plupart (82%) des résidents ont commencé leur apprentissage de chirurgie de cataracte par la réalisation des EEC, cependant 15 % d'entre eux ont commencé directement par la phacoémulsification. Seulement 3% des résidents ont commencé leur apprentissage sur simulateur (graphique 10).



Graphique 10 : Répartition de la première chirurgie de cataracte :

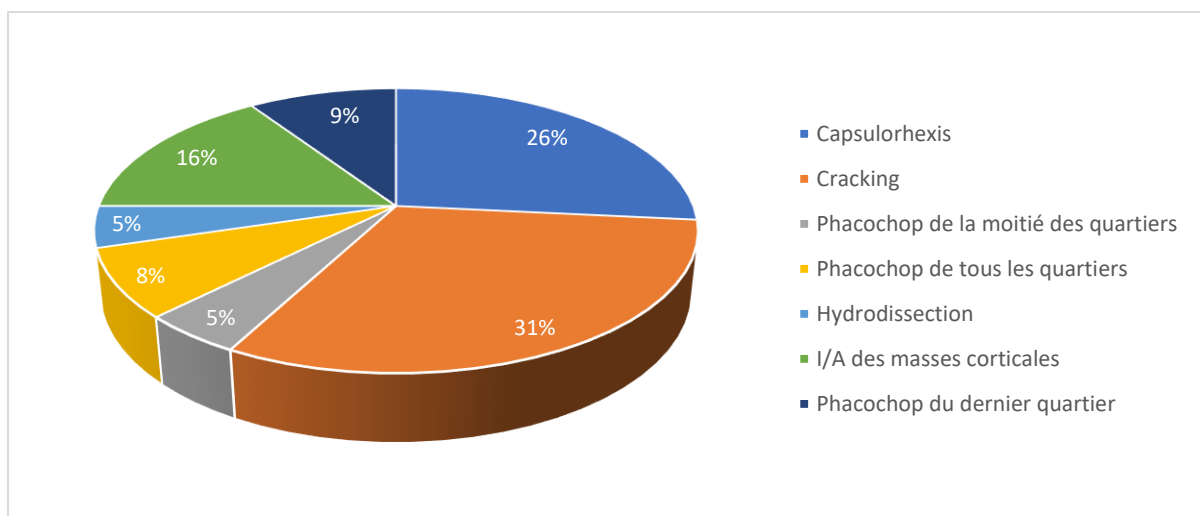
Puisque tous les résidents de l'échantillon ont déjà réalisé au moins une chirurgie de cataracte par EEC et que la majorité d'entre eux ont commencé leur apprentissage de chirurgie de cataracte par EEC, nous avons évalué leur degré d'expérience par rapport à cette technique. Ainsi 62 % d'entre eux ont estimé avoir un niveau assez bon (réalisation de plus de 30 chirurgies d'EEC) (Graphique 11)



Graphique 11 : Degré d'expérience en EEC :

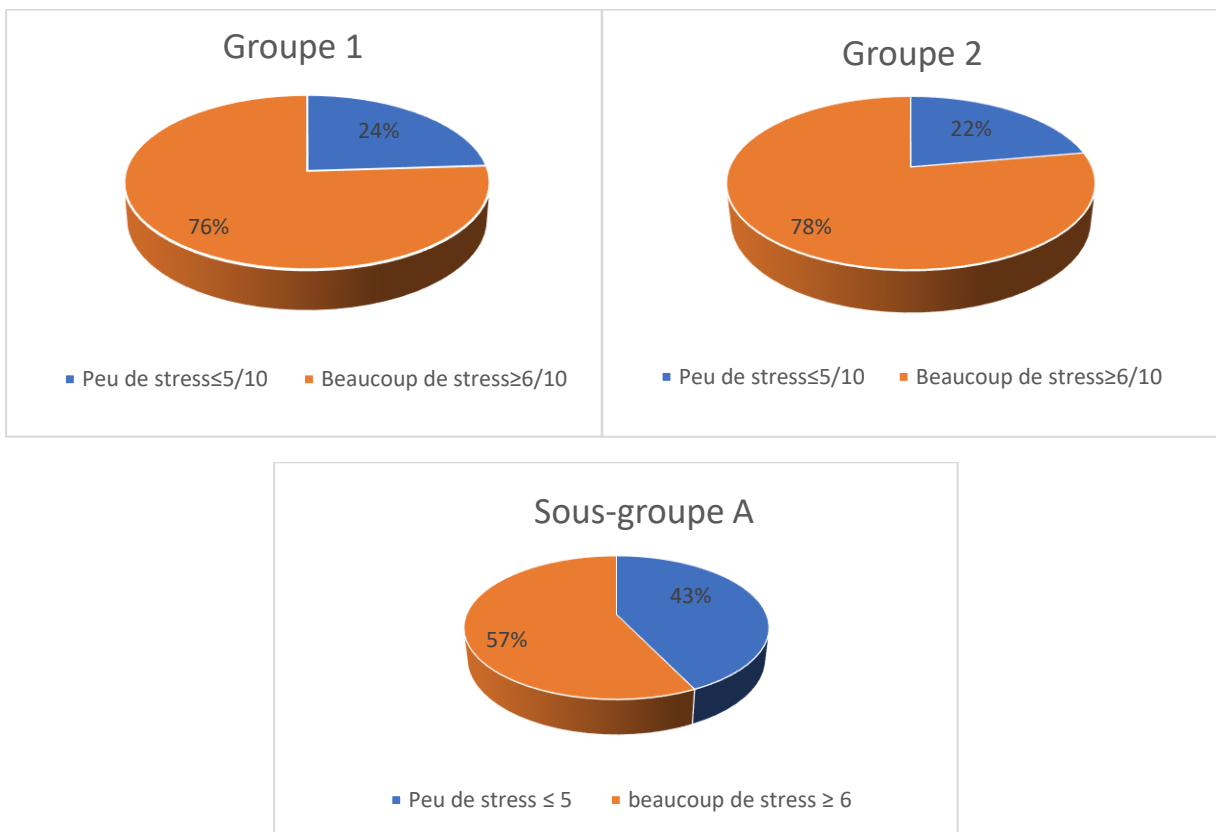
D'autres questions ont été posées aux participants à l'étude concernant la chirurgie de cataracte :

- + Quelles étapes de la phacoémulsification vous a pris une longue période d'apprentissage pour les maîtriser ?
- La majorité des résidents ont considéré que les étapes de la phacoémulsification les plus difficiles à maîtriser sont Capsulorhèxis et Cracking (Graphique 12).



Graphique 12 : Étapes de la phacoémulsification qui ont nécessité une longue période d'apprentissage pour les maîtriser

- + Sur une échelle de 0-10 pouvez-vous évaluer votre stress durant la première phacoémulsification en chirurgie réelle :
- La chirurgie de cataracte reste très difficile à apprendre pour les résidents débutants ce qu'a montré le fait que : (Graphique 13)
 - ❖ Dans le groupe 1 : 76% des résidents de l'échantillon ont eu un stress élevé durant leur première phacoémulsification en chirurgie réelle.
 - ❖ Dans le sous-groupe A : 57% des résidents de l'échantillon ont eu un stress élevé durant leur première phacoémulsification en chirurgie réelle.
 - ❖ Dans le groupe 2 : 78% des résidents de l'échantillon ont eu un stress élevé durant leur première phacoémulsification en chirurgie réelle.
- En comparant le sous-groupe A (qui a fait la simulation avant la phacoémulsification) et le groupe 2, nous avons noté que les résidents du premier groupe ont été moins stressés durant leur première phacoémulsification (57% par rapport à 78%). Nous pouvons conclure que ; pour notre population d'étude ; la simulation avant la chirurgie en vraie vie permet de réduire le stress avant et durant l'opération.

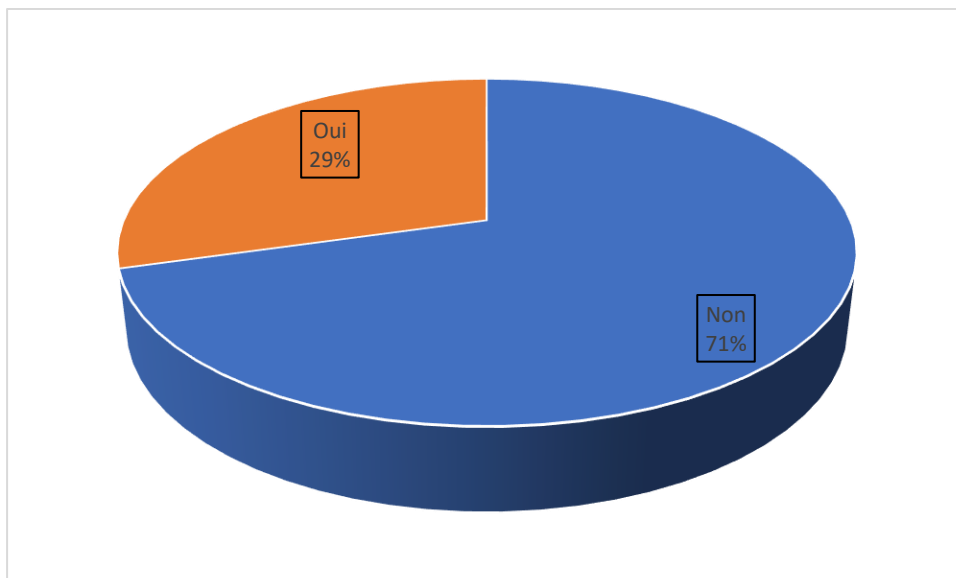


Graphique 13 : Évaluation du stress durant la première phacoémulsifications en chirurgie réelle Sur une échelle de 0–10.

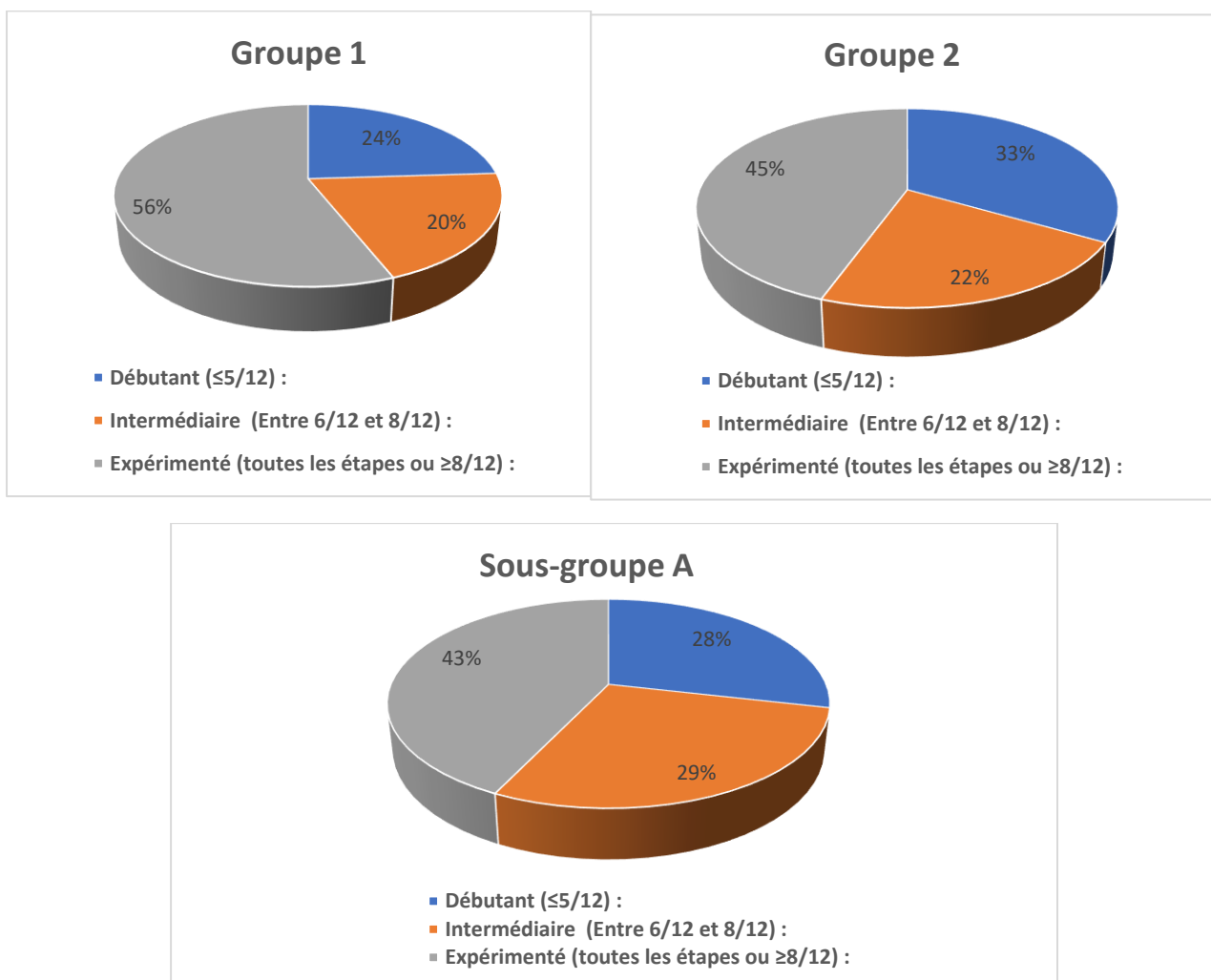
+Quel est le nombre des étapes réalisées durant la première phacoémulsification :

- La comparaison entre le sous-groupe A et le groupe 2 ne montre pas une grande différence concernant le nombre des étapes de la phacoémulsification réalisées durant la première chirurgie de cataracte. On peut dire que dans notre échantillon la simulation avant la phacoémulsification ne permet pas la réalisation de plus d'étapes durant la première phacoémulsification.

(Graphique 14 et 15)



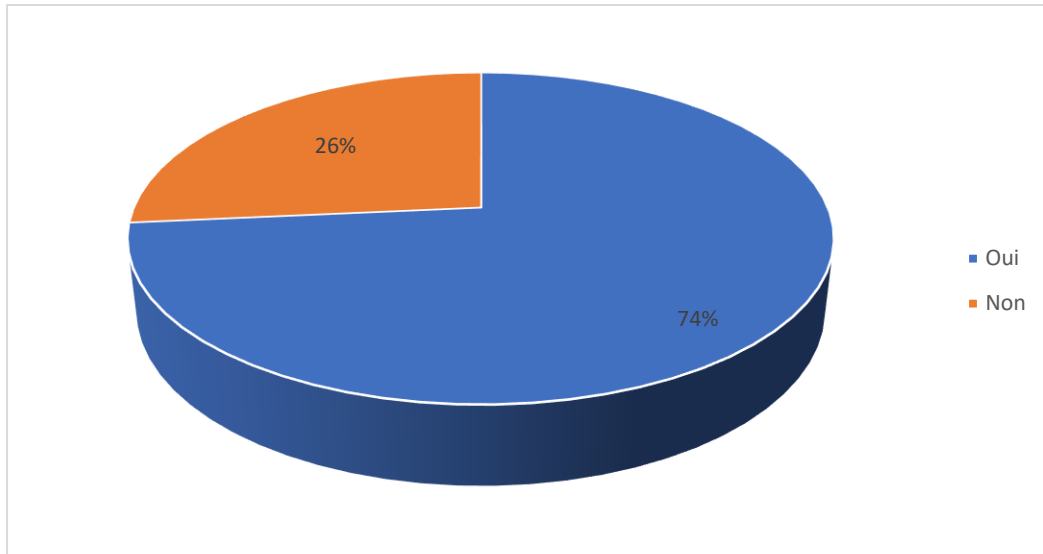
Graphique 14 : Votre première phacoémulsification était de A à Z :



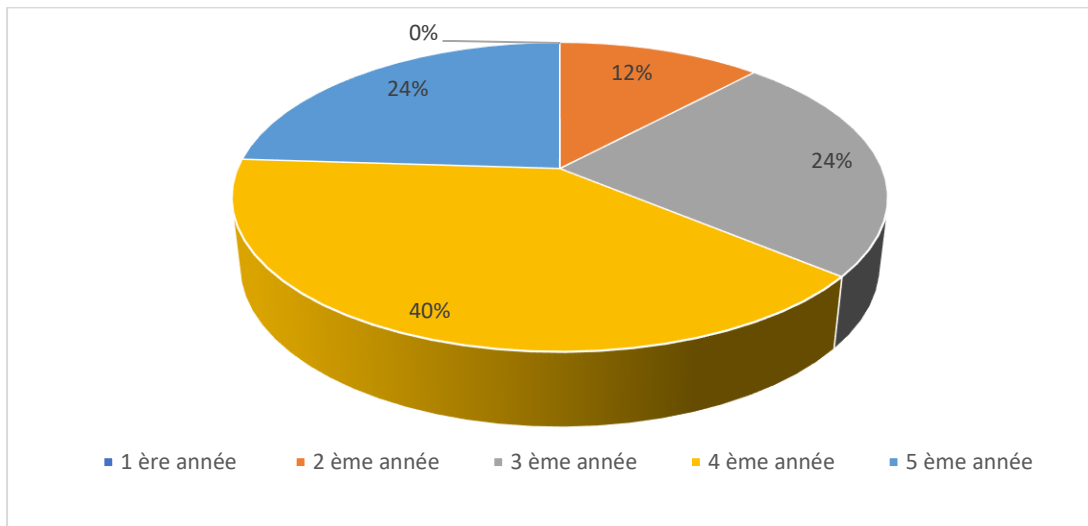
Graphique 15 : Degré d'expérience des résidents selon les étapes réalisées durant la première phacoémulsification :

D. Le degré d'utilisation et d'expérience sur le simulateur "EyeSI"

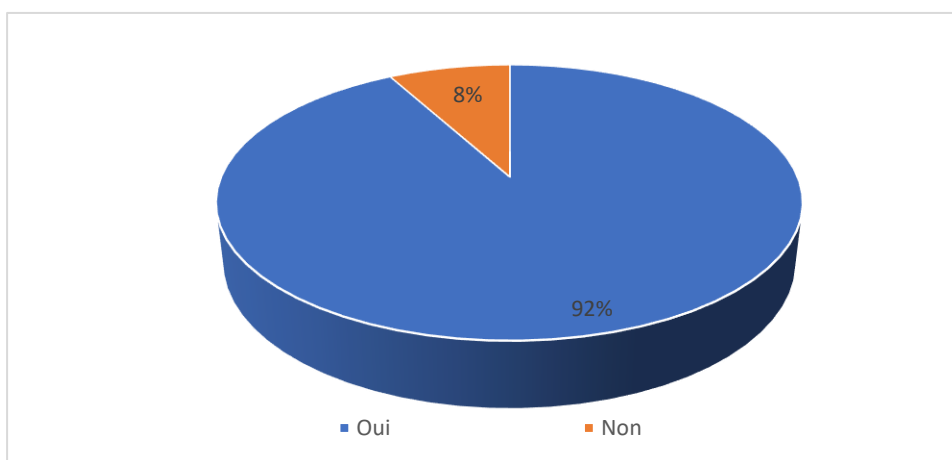
- Les questions relatives au simulateur EyeSI ont montré que :
 - 74% des résidents ont déjà utilisé le simulateur EyeSI . Ceci nous permet de conclure la place qu'il gagne de plus en plus dans la formation des résidents. (Graphique 16)
 - 64% ont utilisé le simulateur EyeSI durant leurs 2 dernières années. (Graphique 17)
 - Seulement 8% des résidents de l'échantillon ont réalisé une formation payante sur le simulateur EyeSI. Cependant, d'autres résidents ont exprimé leur volonté de faire une formation sur le simulateur EyeSI même si elle est payante. Ceci renforce l'intérêt du simulateur dans le cursus de résidanat. (Graphique 18)
 - Seulement 16% des résidents ont l'EyeSI incorporé dans leur programme de formation de résidanat. La majorité a utilisé le simulateur lors d'un congrès ou d'une journée scientifique (64%). (Graphique 19 et 20)
 - 28% des résidents de l'échantillon ont utilisé le simulateur avant de commencer la chirurgie de cataracte en réalité (Graphique 21).



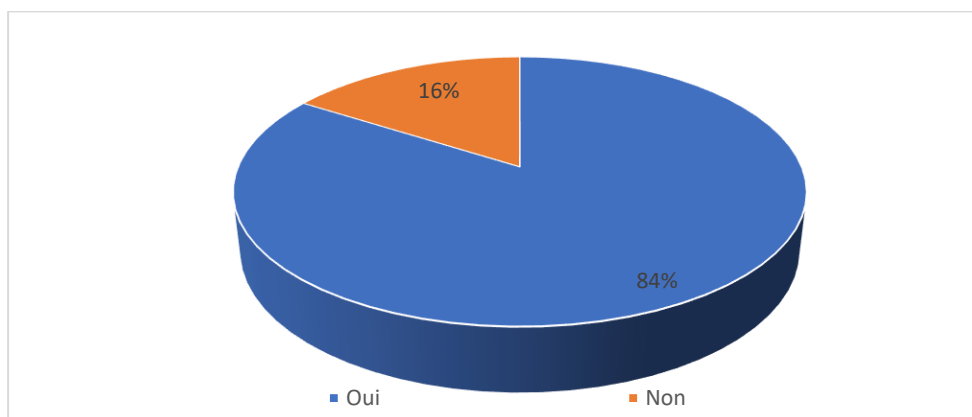
Graphique 16 : Utilisation du simulateur EyeSI :



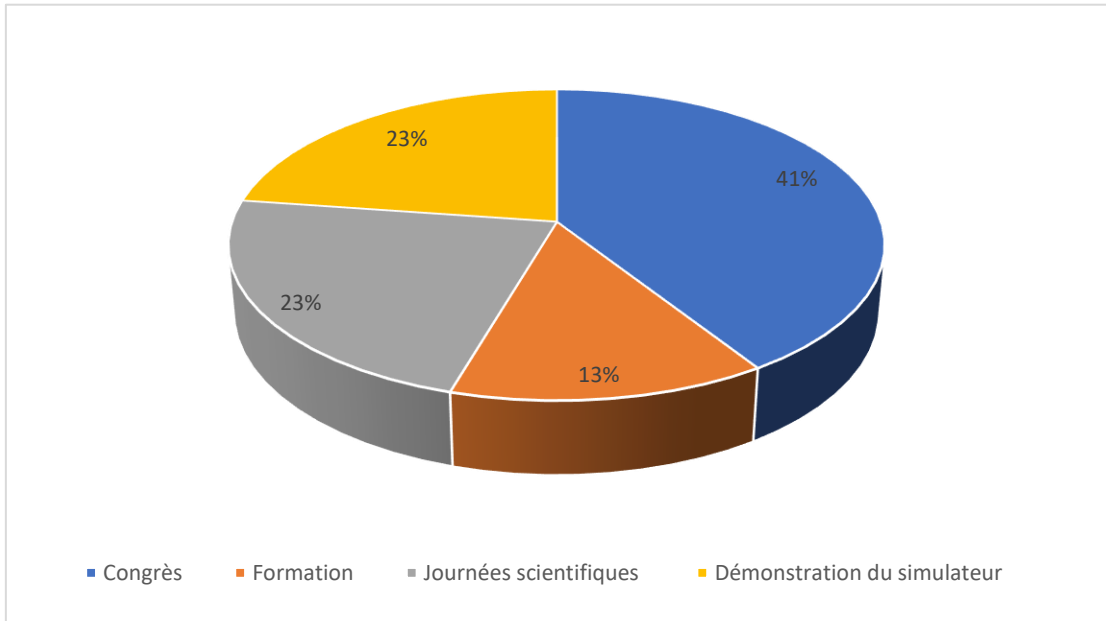
Graphique 17 : Année de résidanat de début de l'utilisation du simulateur



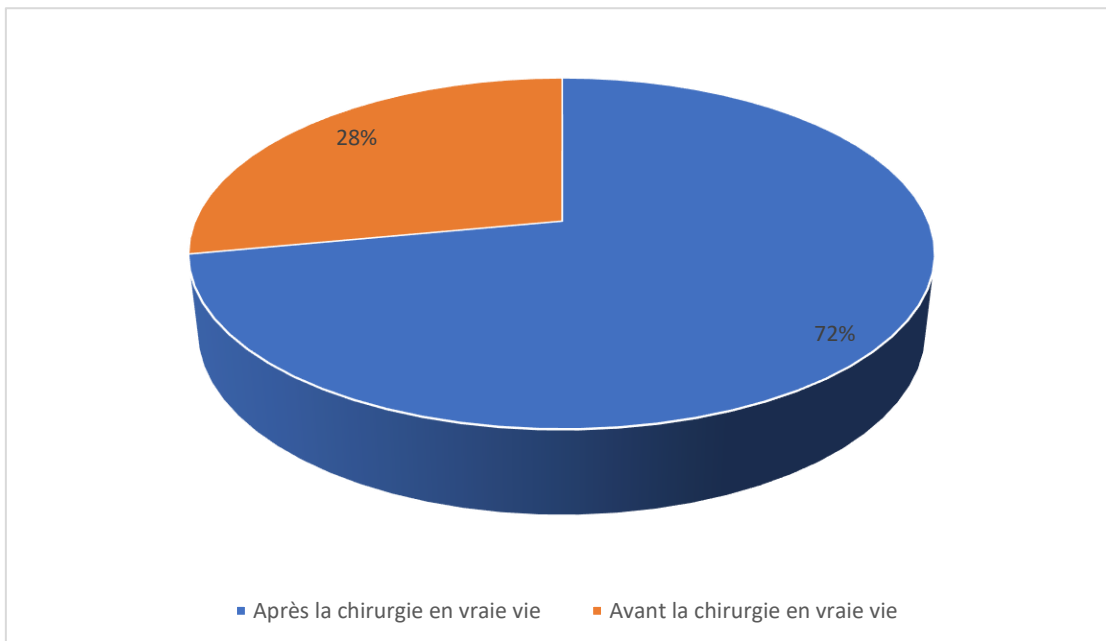
Graphique 18 : Formation payante sur EyeSI



Graphique 19 : Programme de formation sur simulateur incorporé dans le cursus de résidanat



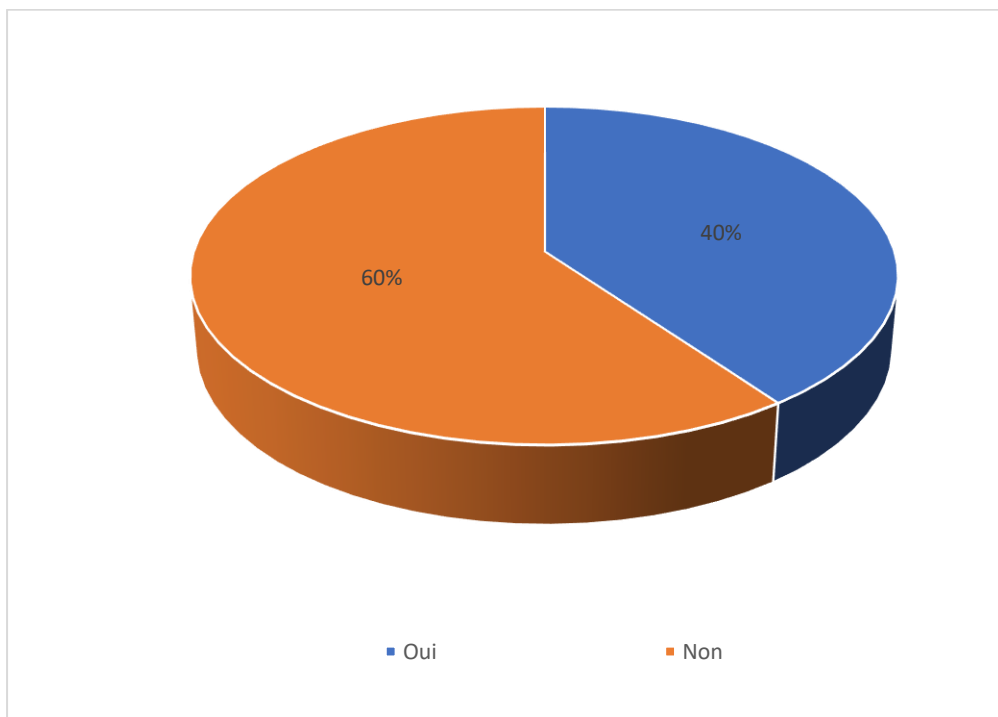
Graphique 20 : Contexte d'utilisation du simulateur



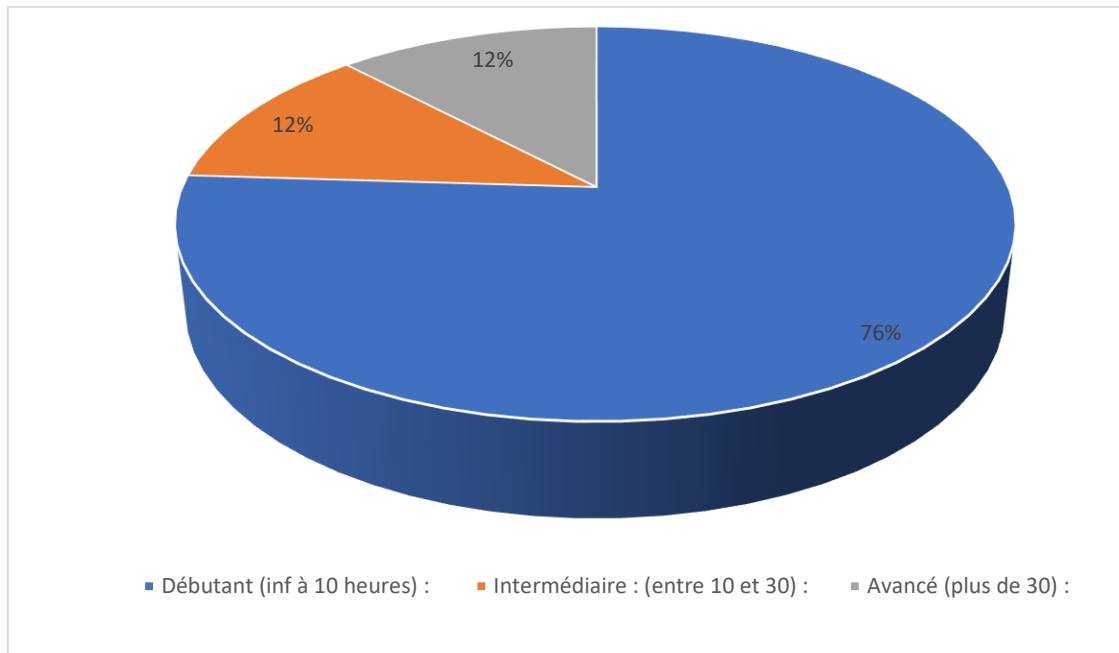
Graphique 21 : Début d'utilisation du simulateur

L'analyse des résultats a montré que seulement 40% des résidents ont terminé tous les modules de la simulation (**Graphique 22**). De plus, La majorité des résidents (76%) ont passé moins de 10 heures sur le simulateur (**Graphique 23**). Ceci permet de conclure que malgré la place que commence à gagner le simulateur dans la formation résidanat, son accessibilité reste toujours limitée.

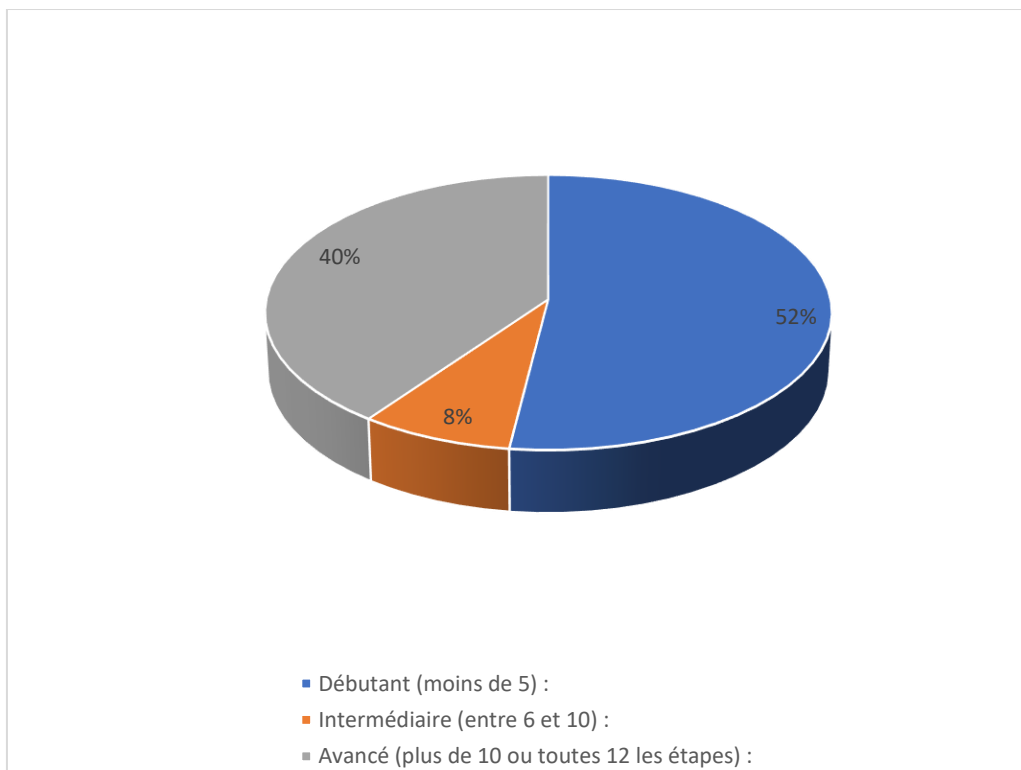
- Le fait que la majorité des résidents (intermédiaire et avancé) ont presque terminé la majorité des modules de la simulation dans peu du temps, signifie que l'avancement dans les modules seulement ne témoigne pas systématiquement d'une bonne maîtrise de la phacoémulsification sur le simulateur. (**Graphique 24**)



Graphique 22: Accomplissement des modules d'apprentissage sur le simulateur EyeSI



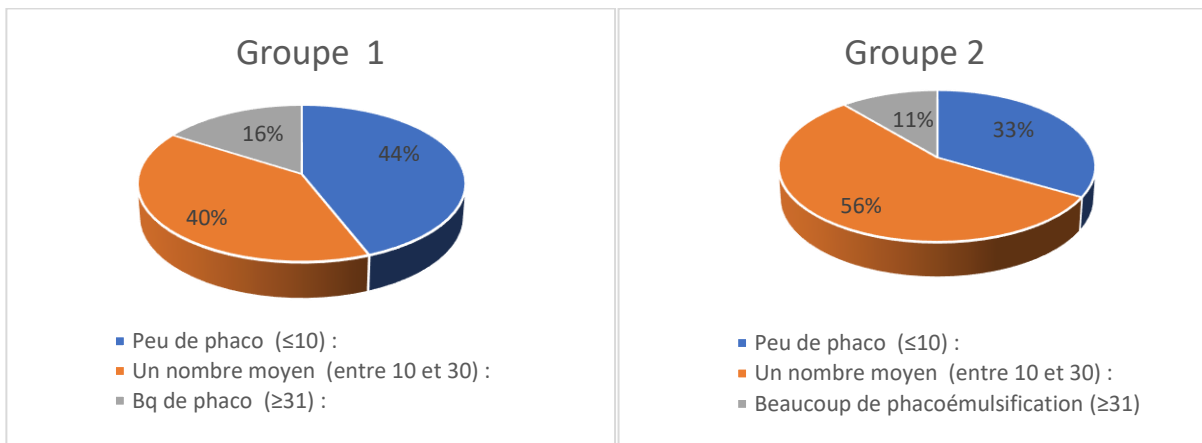
Graphique 23 : Degré d'expérience en simulation en réalité virtuelle selon le nombre d'heure passé sur simulateur



Graphique 24 : Degré d'expérience en simulateur selon l'état d'avancement dans les modules de simulation de la phacoémulsification.

E. La courbe d'apprentissage dans la chirurgie par phacoémulsification

1. Nombre de phacoémulsification réalisées avant la diminution du stress et augmentation de la confiance : (Graphique 25)



Graphique 25 : Nombre de phacoémulsification réalisées avant la diminution du stress et augmentation de la confiance

- L'analyse montre que le groupe qui a fait la simulation nécessite moins de nombre de phacoémulsification pour diminuer le stress et augmenter la confiance par rapport au groupe qui n'a pas fait la simulation.

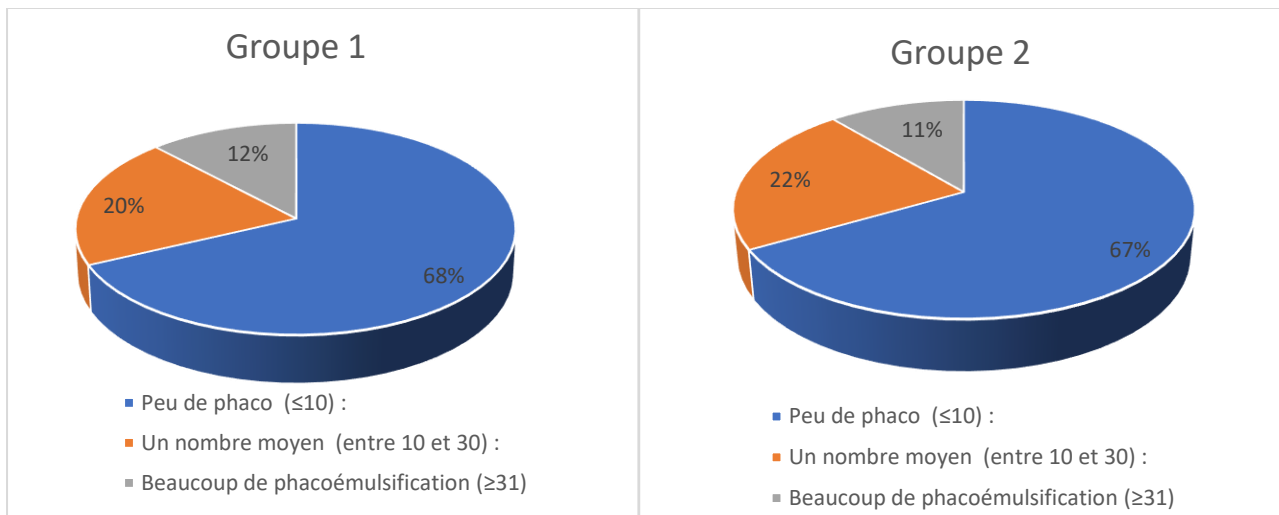
Tableau 1 : Nombre de phacoémulsification réalisées avant la diminution du stress et augmentation de la confiance selon le type de la première chirurgie de cataracte réalisé

	% résidents qui ont fait le simulateur avant la phacoémulsification	% des résidents qui ont fait l'EEC avant la phacoémulsification	% des résidents qui ont commencé directement la phacoémulsification
Petit nombre de phacoémulsification (≤ 10)	71,42%	41,37	20%
Un nombre moyen de Phacoémulsification [10 à 30]	28,57	44,82%	60%
Un grand nombre de phacoémulsification (≥ 31)		13,79%	20%

- Ce tableau montre que les résidents qui ont commencé leur apprentissage de chirurgie sur le simulateur ont nécessité moins de nombre de phacoémulsification pour diminuer le stress et augmenter la confiance par rapport aux résidents qui ont commencé leur apprentissage par EEC et aussi ceux qui ont commencé directement la phacoémulsification. (Tableau 1)

- Nous constatons aussi que les résidents qui ont commencé la chirurgie de cataracte par EEC avant de passer à la phacoémulsification ont nécessité moins de nombre de phacoémulsification pour diminuer le stress et augmenter la confiance par rapport aux résidents qui ont commencé directement par la phacoémulsification. Ceci renforce l'intérêt de commencer la chirurgie de cataracte par l'EEC avant de passer à la phacoémulsification.

2. Nombre de phacoémulsification nécessaire pour acquérir une bonne manipulation du microscope : (Graphique 26)



Graphique 26 : Nombre de phacoémulsification nécessaire pour acquérir une bonne manipulation du microscope :

- L'analyse montre qu'il n'y a pas de différence entre le groupe 1 et le groupe 2 par rapport au nombre de phacoémulsification nécessaire pour acquérir une bonne manipulation du microscope.

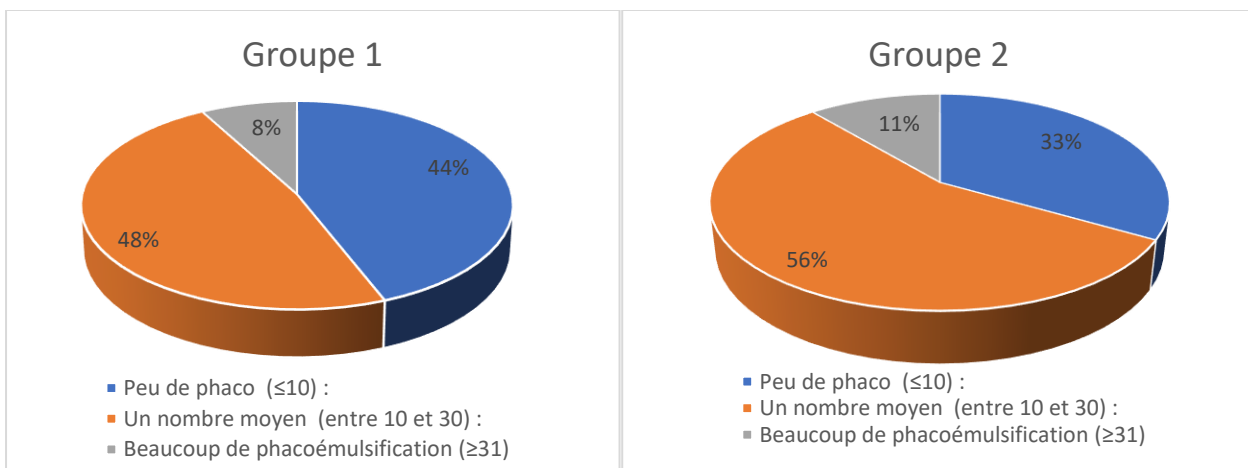
Tableau 2 : Nombre de phacoémulsification réalisées pour acquérir une bonne manipulation du microscope selon le type de la première chirurgie de cataracte réalisée

	% résidents qui ont fait le simulateur avant la phacoémulsification	% des résidents qui ont fait l'EEC avant la phacoémulsification	% des résidents qui ont commencé directement la phacoémulsification
Petit nombre de phacoémulsification (≤ 10)	71,42%	68,96%	40%
Un nombre moyen de Phacoémulsification [10 à 30]	14,28%	17,24 %	40%
Un grand nombre de phacoémulsification (≥ 31)	14,28%	13,79%	20%

Ce tableau montre que les résidents qui ont commencé leur apprentissage de chirurgie sur le simulateur ont nécessité moins de nombre de phacoémulsification pour acquérir une bonne manipulation du microscope par rapport aux résidents qui ont commencé leur apprentissage par EEC et aussi ceux qui ont commencé directement la phacoémulsification. (Tableau 2)

- L'analyse objective également que les résidents qui ont commencé la chirurgie de cataracte par EEC avant de passer à la phacoémulsification ont nécessité moins de nombre de phacoémulsification pour pouvoir manipuler avec aisance le microscope opératoire par rapport aux résidents qui ont commencé directement par la phacoémulsification. Ceci renforce l'intérêt de commencer la chirurgie de cataracte par l'EEC avant de passer à la phacoémulsification.

3. Nombre de phacoémulsification nécessaire pour acquérir une meilleure navigation dans le segment antérieure : Graphique 27 :



Graphique 27 : Nombre de phacoémulsification nécessaire pour acquérir une meilleure navigation dans le segment antérieure

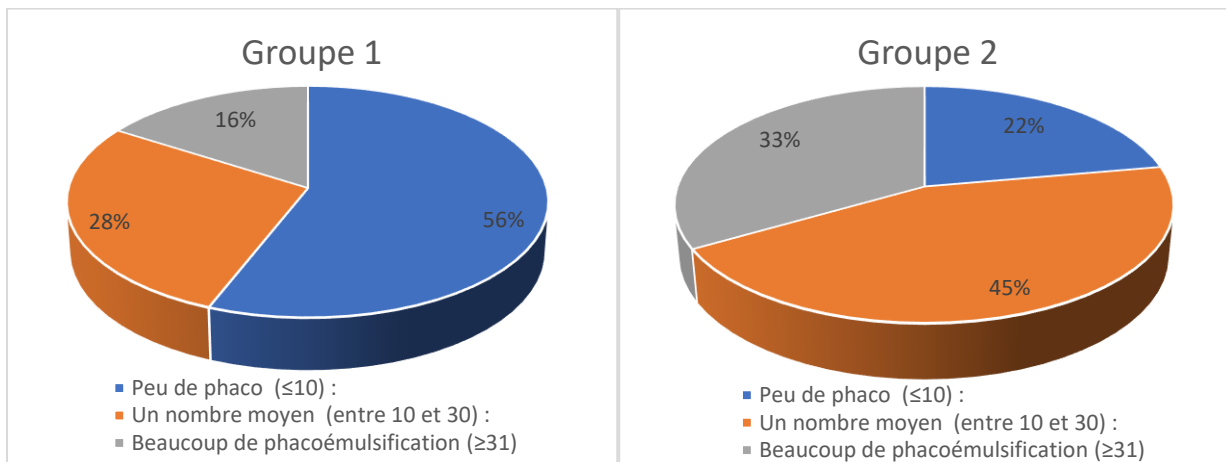
- L'analyse montre que le groupe qui a fait la simulation nécessite moins de nombre de phacoémulsification pour acquérir une meilleure navigation dans le segment antérieure. Concernant le groupe qui a fait la simulation 44 % des résidents ont nécessité moins de 10 phaco pour acquérir une meilleure navigation dans le segment antérieure, cependant dans le groupe qui n'a jamais fait de simulation seulement 33% ont nécessité moins de 10 phaco pour acquérir une meilleure navigation dans le segment antérieure.

Tableau 3 : Nombre de phacoémulsifications réalisées pour acquérir une meilleure navigation dans le segment antérieure selon le type de la première chirurgie de cataracte réalisée :

	% résidents qui ont fait le simulateur avant la phacoémulsification	% des résidents qui ont fait l'EEC avant la phacoémulsification	% des résidents qui ont commencé directement la phacoémulsification
Petit nombre de phacoémulsification (≤ 10)	57,14%	34,48%	60%
Un nombre moyen de Phacoémulsification [10 à 30]	42,85%	55,17%	20%
Un grand nombre de phacoémulsification (≥ 31)		10,34%	20%

- Ce tableau ne montre pas une grande différence entre les résidents qui ont fait la simulation avant la phacoémulsification et ceux qui ont passé directement à la phacoémulsification par rapport au nombre de phacoémulsifications nécessaires pour acquérir une meilleure navigation dans le segment antérieure. Cependant on note que les résidents qui ont fait l'EEC avant la phacoémulsification ont nécessité plus de phacoémulsifications par rapport aux 2 groupes précédents pour acquérir une bonne navigation au niveau du segment antérieur. Ceci peut être expliqué par le fait que les chirurgies de cataracte par EEC nécessitent moins de maîtrise de la stabilité de la chambre antérieure pour l'extraction du cristallin cataracté différemment à la phacoémulsification

4. Nombre de phacoémulsifications nécessaire pour gérer le problème de tremblement : (Graphique 28)



Graphique 28 : Nombre de phacoémulsifications nécessaire pour gérer le problème de tremblement

- L'analyse a montré que le groupe qui a fait la simulation nécessite moins de nombre de phacoémulsification pour gérer le problème de tremblement. Chez le groupe qui a fait la simulation 56 % des résidents ont nécessité moins de 10 phaco pour gérer le tremblement des mains, alors que dans le groupe des chirurgiens qui n'ont jamais fait de simulation seulement 22% ont nécessité moins de 10 phaco pour le gérer.

Tableau 4 : Nombre de phacoémulsifications réalisées pour gérer le problème de tremblement selon le type de la première chirurgie de cataracte réalisée :

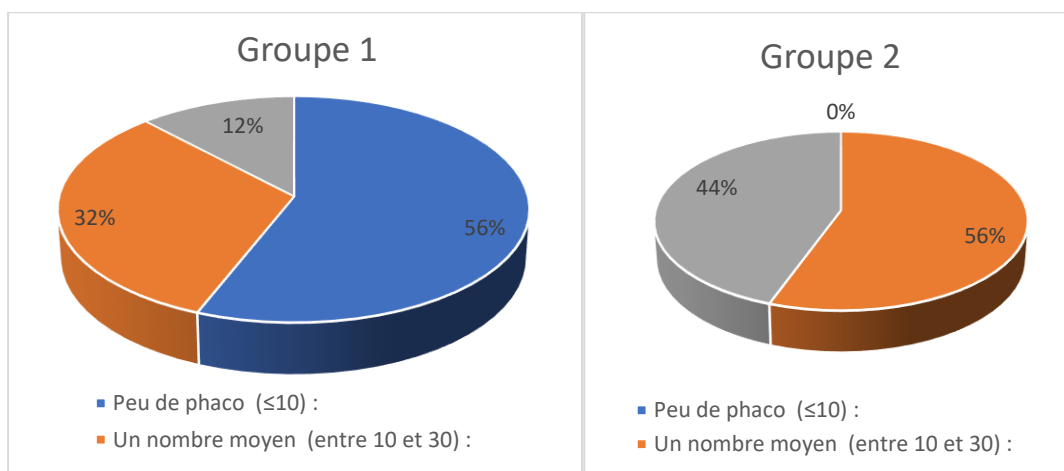
	% résidents qui ont fait le simulateur avant la phacoémulsification	% des résidents qui ont fait l'EEC avant la phacoémulsification	% des résidents qui ont commencé directement la phacoémulsification
Petit nombre de phacoémulsification (≤ 10)	71,42%	48,27%	40%
Un nombre moyen de Phacoémulsification [10 à 30]	28,57%	34,48%	20%
Un grand nombre de phacoémulsification (≥ 31)		17,24%	40%

- Ce tableau montre que les résidents qui ont utilisé le simulateur dans leur apprentissage de phacoémulsification ont nécessité moins de nombre de phacoémulsification pour gérer le problème de tremblement par rapport aux résidents qui ont commencé leur apprentissage par EEC et aussi ceux qui ont commencé directement la phacoémulsification.

- Nous pouvons ainsi constater que les chirurgiens qui ont commencé la chirurgie de cataracte par EEC avant de passer à la phacoémulsification ont nécessité moins de nombre de phacoémulsification pour gérer le problème de tremblement par rapport aux résidents qui ont commencé directement par la phacoémulsification. Nous pouvons conclure que les chirurgiens qui s'entraînent à la chirurgie au microscope (EEC) avant de passer à la phacoméulsification acquièrent des compétences leur permettant de gérer le problème des tremblements

5. Après combien de phacoémulsification avez-vous acquis une bonne coordination des 2 mains : (Graphique 29)

L'analyse a objectivé que le groupe qui a fait la simulation a nécessité moins de nombre de phacoémulsification pour acquérir une bonne coordination des 2 mains (Graphique 29) . Tous les résidents qui se sont entraînés sur simulateur avant la chirurgie en vrais vie ont nécessité moins de 10 phacoémulsification pour acquérir une bonne coordination des 2 mains, cependant dans le groupe des chirurgiens qui ont commencé directement par phacoémulsification 60% n'ont pas pu acquérir une bonne coordination des 2 mains après moins de 10 phacoémulsification. (Tableau 5)

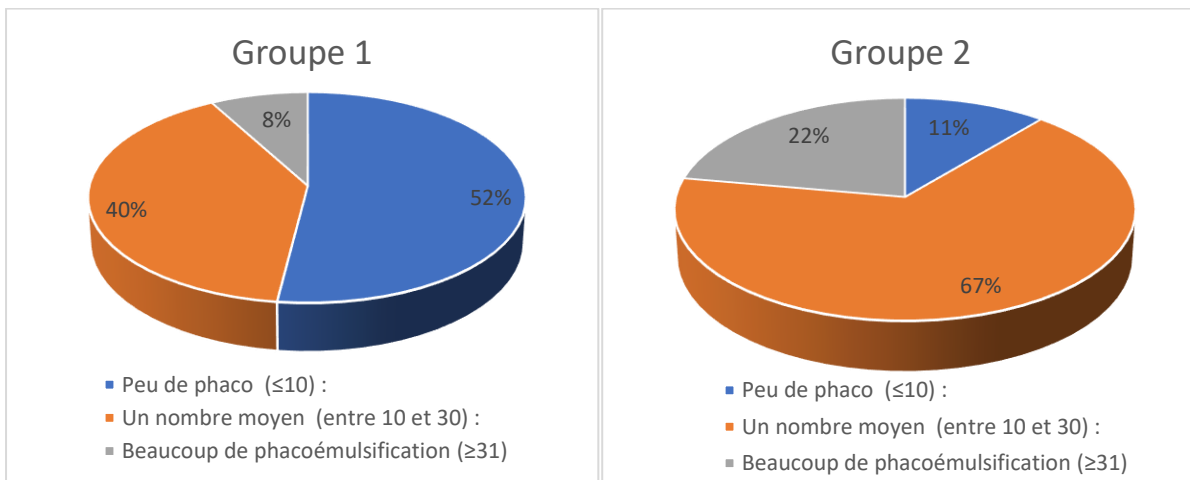


Graphique 29 : Nombre de phacoémulsification nécessaire pour acquérir une bonne coordination des 2 mains :

Tableau 5: Nombre de phacoémulsifications réalisées pour acquérir une bonne coordination des 2 mains selon le type de la première chirurgie de cataracte réalisée :

	% résidents qui ont fait le simulateur avant la phacoémulsification	% des résidents qui ont fait l'EEC avant la phacoémulsification	% des résidents qui ont commencé directement la phacoémulsification
Petit nombre de phacoémulsification (≤ 10)	100%	34,48%	60%
Un nombre moyen de Phacoémulsification [10 à 30]		41,37%	20%
Un grand nombre de phacoémulsification (≥ 31)		24,13%	20%

6. Après combien de phacoémulsification avez-vous acquis une bonne coordination des 2 mains et des 2 pieds : (Graphique 30)



Graphique 30 : Nombre de phacoémulsification avant d'acquérir une bonne coordination des 2 mains et des 2 pieds :

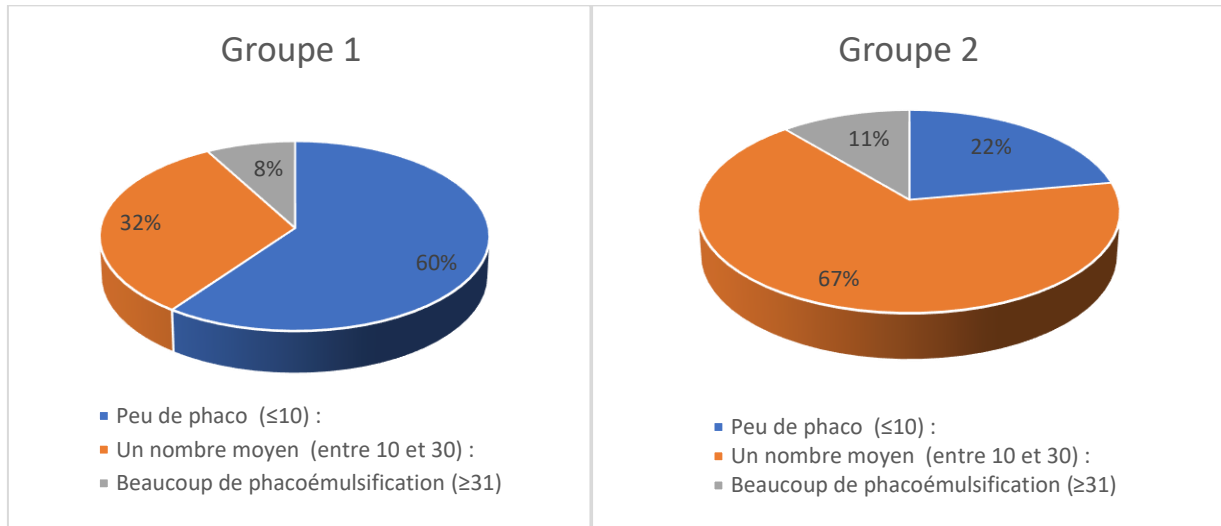
- L'analyse révèle que le groupe qui a fait la simulation a nécessité moins de nombre de phacoémulsification pour acquérir une bonne coordination des 2 mains et des 2 pieds. Chez le groupe qui a fait la simulation 52% des résidents ont nécessité moins de 10 phaco pour acquérir une bonne coordination des 2 mains et des 2 pieds, cependant dans le groupe qui n'a jamais fait de simulation seulement 11% qui ont nécessité moins de 10 phaco pour acquérir une bonne coordination des 2 mains et des 2 pieds.

Tableau 6: Nombre de phacoémulsifications pour acquérir une bonne coordination des 2 mains et des 2 pieds selon le type de la première chirurgie de cataracte réalisée :

	% résidents qui ont fait le simulateur avant la phacoémulsification	% des résidents qui ont fait l'EEC avant la phacoémulsification	% des résidents qui ont commencé directement la phacoémulsification
Petit nombre de phacoémulsification (≤ 10)	85,71%	37,93%	40%
Un nombre moyen de Phacoémulsification [10 à 30]	14,28%	51,72%	20%
Un grand nombre de phacoémulsification (≥ 31)		10,34%	40%

- Les résultats présentés ci-dessus montrent que le nombre de phacoémulsification nécessaire pour acquérir une bonne coordination entre les 2 mains et les 2 pieds était moindre chez les chirurgiens qui se sont entraînés sur simulateur par rapport à ceux qui ont fait leur apprentissage directement sur patient que ça soit par EEC ou par phacoémulsification.

7. Après combien de phacoémulsification avez-vous pu réaliser un Capsulorhéxis circulaire de 5–6mm et bien centré : (Graphique 31)



Graphique 31 : Après combien de phacoémulsification avez-vous pu réaliser un Capsulorhéxis circulaire de 5–6mm et bien centré :

- L'analyse montre que le groupe qui a fait la simulation nécessite moins de nombre de phacoémulsification pour réaliser un capsulorhéxis circulaire de 5–6mm et bien centré. Chez le groupe qui a fait la simulation 60% des résidents ont nécessité moins de 10 phaco pour réaliser un capsulorhéxis circulaire de 5–6mm et bien centré par rapport à 22% dans le 2ème groupe que ne s'est pas entrainer sur simulateur.

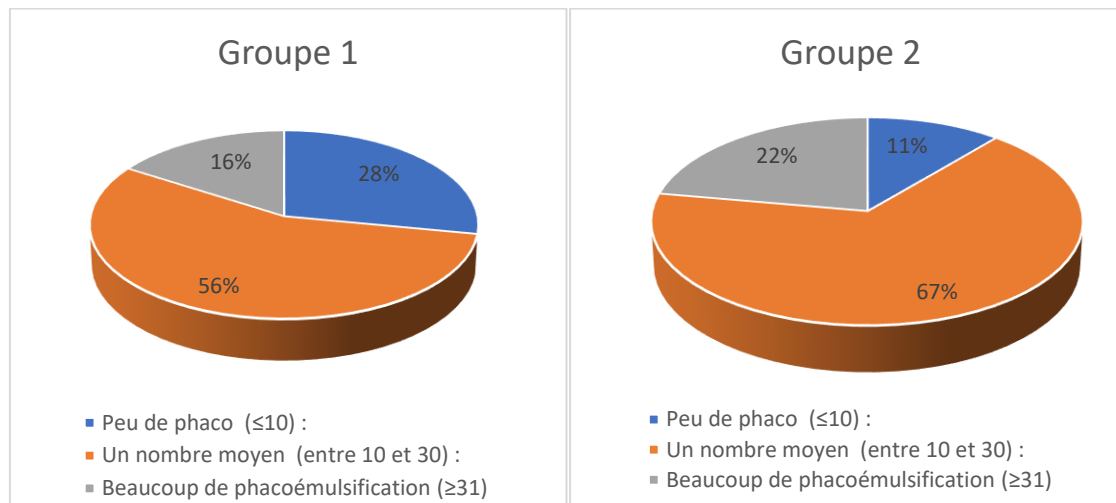
Tableau 7 : Nombre de phacoémulsifications pour réaliser un Capsulorhéxis circulaire de 5–6mm et bien centré selon le type de la première chirurgie de cataracte réalisée

	% résidents qui ont fait le simulateur avant la phacoémulsification	% des résidents qui ont fait l'EEC avant la phacoémulsification	% des résidents qui ont commencé directement la phacoémulsification
Petit nombre de phacoémulsification (≤ 10)	85,71%	37,93%	40%
Un nombre moyen de Phacoémulsification [10 à 30]	14,28%	51,72%	20%
Un grand nombre de phacoémulsification (≥ 31)		10,34%	40%

- L'analyse comparative entre les différents sous-groupes a objectivé encore une fois que l'entraînement sur simulateur permet aux chirurgiens novices en phacoémulsification de réaliser un capsulorhéxis circulaire de 5–6 mm et bien centré après un petit nombre de phacoémulsification, en comparaison avec les chirurgiens novices qui ne sont pas entraînés sur simulateur.

8. Après combien de phacoémulsification votre temps de chirurgie a diminué :

Graphique 32



Graphique 32 : Nombre de phacoémulsification nécessaire pour diminuer le temps de chirurgie.

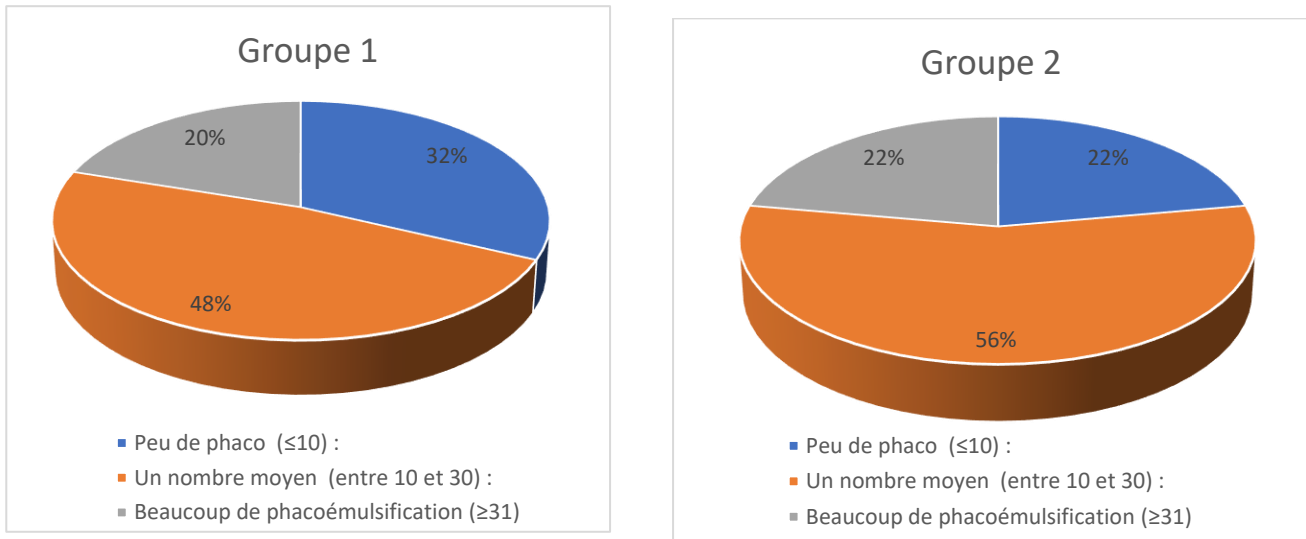
- L'analyse montre que le groupe qui a fait la simulation nécessite moins de nombre de phacoémulsification pour diminuer le temps nécessaire pour la chirurgie. Chez le groupe qui a fait la simulation 28% des résidents ont nécessité moins de 10 phaco pour diminuer le temps nécessaire pour la chirurgie cependant dans le groupe qui n'a jamais fait de simulation 11% ont nécessité moins de 10 phaco pour diminuer le temps nécessaire pour la chirurgie.

**Tableau 8: Nombre de phacoémulsifications pour diminuer le temps de chirurgie
selon le type de la première chirurgie de cataracte réalisée**

	% résidents qui ont fait le simulateur avant la phacoémulsification	% des résidents qui ont fait l'EEC avant la phacoémulsification	% des résidents qui ont commencé directement la phacoémulsification
Petit nombre de phacoémulsification (≤ 10)	57,14%	24,13%	0
Un nombre moyen de Phacoémulsification [10 à 30]	42,85%	55,17%	100%
Un grand nombre de phacoémulsification (≥ 31)		20,68%	

- Pour pouvoir diminuer son temps chirurgical, les résidents ayant fait un apprentissage sur simulateur avaient besoin de moins de nombre de phacoémulsification en vrais vie par rapport à ceux n'ayant pas fait des séances d'entraînement sur simulateur en réalité virtuelle (Tableau 8)

9. Après combien de phacoémulsification votre utilisation des ultrasons a diminué : Graphique 33 :



Graphique 33 : Nombre de phacoémulsification nécessaire pour diminuer le pourcentage d’ultrasons utilisées lors de la phacoémulsification.

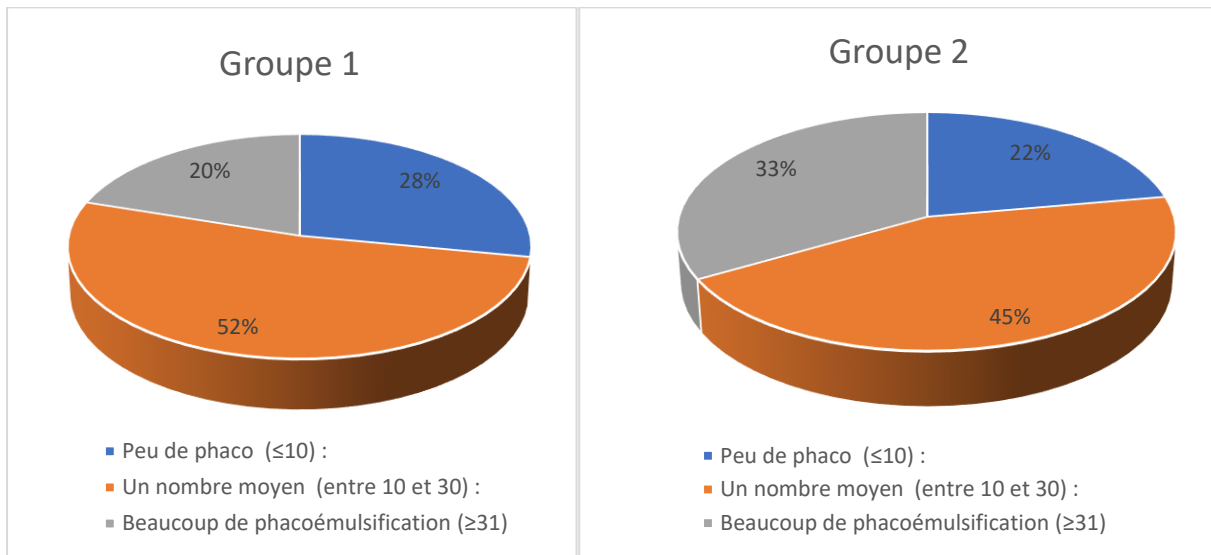
- Dans le premier groupe 32 % des chirurgiens novices avaient besoins de moins de 10 phaco pour diminuer le pourcentage d'ultrasons utilisés lors de la phacoémulsification, par rapport à 22 % dans le deuxième groupe. Cependant et de façon générale les 2 groupes ont amélioré leur pourcentage d'utilisation des ultrasons lors de la phacoémulsification après nombre moyen de phacoémulsifications en vraie vie.

Tableau 9 : Nombre de phacoémulsifications nécessaire pour diminuer le pourcentage d'ultrasons utilisés selon le type de la première chirurgie de cataracte réalisée

	% résidents qui ont fait le simulateur avant la phacoémulsification	% des résidents qui ont fait l'EEC avant la phacoémulsification	% des résidents qui ont commencé directement la phacoémulsification
Petit nombre de phacoémulsification (≤ 10)	57,14%	24,13%	0
Un nombre moyen de Phacoémulsification [10 à 30]	42,85%	55,17%	100%
Un grand nombre de phacoémulsification (≥ 31)		20,68%	

- En se basant sur les résultats de l'analyse comparative, nous pouvons constater une tendance à la diminution de l'utilisation des ultrasons après un nombre moyens de phacoémulsification (entre 10 à 30 phaco) pour les 3 sous-groupes ; malgré que dans le premier sous-groupe des chirurgiens novices ayant fait la simulation presque 43% des chirurgiens estiment que leur pourcentage d'ultrasons utilisés a diminuée après la réalisation de 10 phacoémulsifications en vraie vie (Tableau 9)

10. Après combien de phacoémulsification avez-vous accélérer votre courbe d'apprentissage (Graphique 34) :



Graphique 34 : Nombre de phacoémulsification nécessaire pour accélérer sa courbe d'apprentissage en phacoémulsification

Tableau 10 : Nombre de phacoémulsifications nécessaire pour accélérer sa courbe d'apprentissage en phacoémulsification selon le type de la première chirurgie de cataracte réalisée :

	% résidents qui ont fait le simulateur avant la phacoémulsification	% des résidents qui ont fait l'EEC avant la phacoémulsification	% des résidents qui ont commencé directement la phacoémulsification
Petit nombre de phacoémulsification (≤ 10)	57,14%	24,13%	0
Un nombre moyen de Phacoémulsification [10 à 30]	42,85%	55,17%	100%
Un grand nombre de phacoémulsification (≥ 31)		20,68%	

- A travers ce tableau, nous remarquons que ; respectivement ; les résidents qui ont commencé leur apprentissage de chirurgie sur simulateur et par EEC ont nécessité moins de nombre de phacoémulsification pour accélérer leur courbe d'apprentissage, en comparaison avec les résidents qui ont commencé leur apprentissage directement la phacoémulsification en vrais vie (Tableau 10)
- Nous pouvons souligner, ainsi, l'effet bénéfique de commencer l'apprentissage de chirurgie de cataracte par EEC.

F. Les complications:

Dans le même sens de montrer l'intérêt de la simulation en réalité virtuelle sur les performances chirurgicales, on a évalué dans notre étude la fréquence de trois complications : Brûlures au niveau de l'incision, Lésions descemetiques et ruptures capsulaire postérieurs, durant les 10 premières phacoémulsifications et après plus de 10 phacoémulsifications. Les résultats de l'étude ont ainsi trouvé :

- *Durant les 10 premiers phacoémulsifications :*

1. Brûlures au niveau de l'incision : Graphique 35

- Nous avons noté qu'il n'y a pas une grande différence entre le groupe qui a fait la simulation et le groupe qui n'a jamais fait de simulation. Ceci peut être expliqué par le fait que le premier groupe contient aussi bien les résidents qui ont fait la simulation avant la phacoémulsification et ceux qui l'ont fait après la phacoémulsification, ce qui rend l'interprétation des résultats non concluante.

2. Lésions descemetiques : Graphique 36

- Nous avons noté que la fréquence des lésions descémétiques est plus basse chez le groupe qui a fait la simulation avant la phacoémulsification par rapport au groupe qui n'a jamais fait de simulation.
- Nous avons noté aussi que la fréquence des lésions descémétiques est plus basse chez le groupe qui a fait la simulation par rapport au groupe qui n'a jamais fait de simulation.

3. Ruptures capsulaire postérieurs : Graphique 37

- Nous avons noté que la fréquence des ruptures capsulaires postérieures est plus basse chez le groupe qui a fait la simulation avant la phacoémulsification par rapport au groupe qui n'a jamais fait de simulation.
- Nous avons noté aussi que la fréquence des ruptures capsulaire postérieurs est plus basse chez le groupe a fait la simulation par rapport au groupe qui n'a jamais fait de simulation.

– *Après plus de 10 phacoémulsiftion :*

1. Brûlures au niveau de l'incision : Graphique 35

- Nous avons noté que la courbe d'apprentissage chez le groupe qui a fait la simulation avant la phacoémulsifition est plus rapide que celui qui n'a jamais fait de simulation vu qu'après 10 phacoémulsifications le sous-groupe A n'a jamais fait de brulures au niveau de l'incision différemment au groupe 2

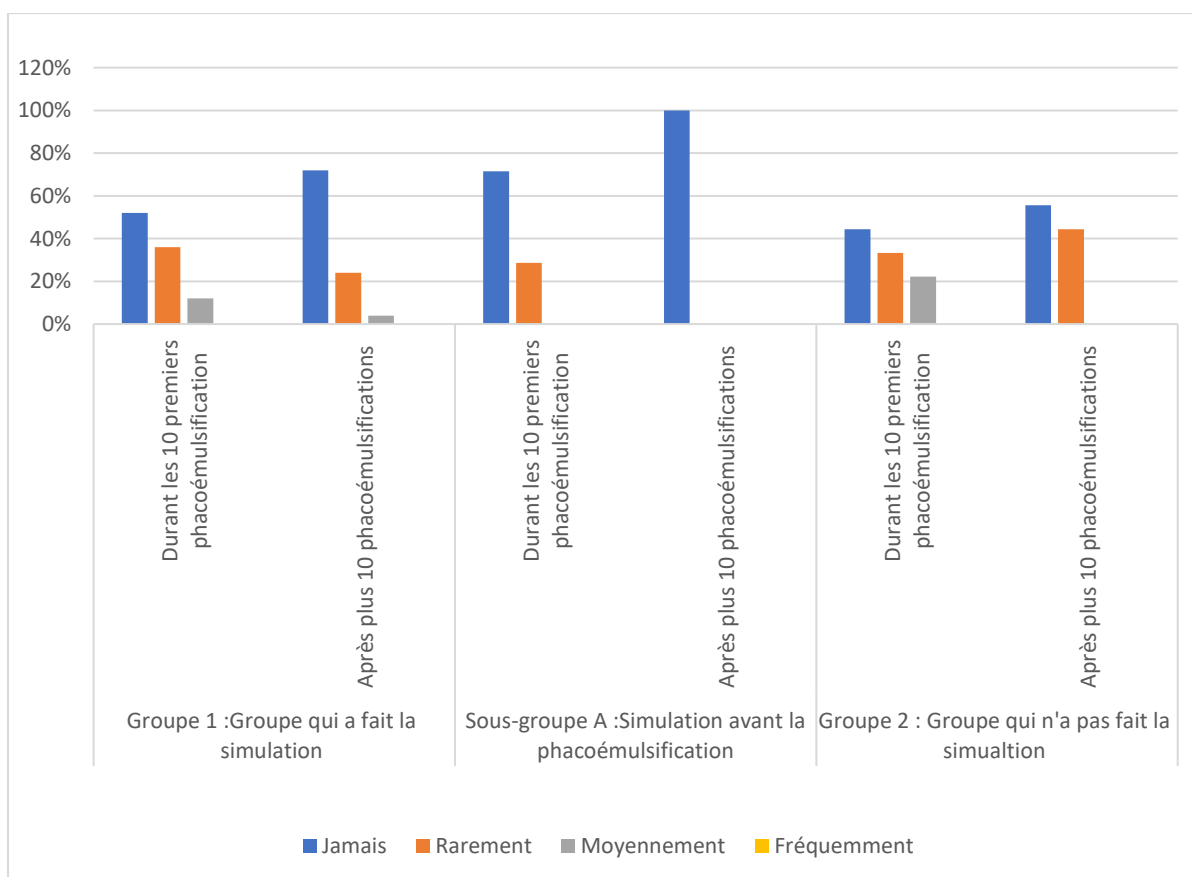
2. Lésions descemetiques : Graphique 36

- Nous avons noté que la courbe d'apprentissage chez le groupe 1 (groupe qui a fait la simulation) et le sous-groupe A (simulation avant phacoémulsification) est plus rapide que par rapport au groupe 2 (qui n'a

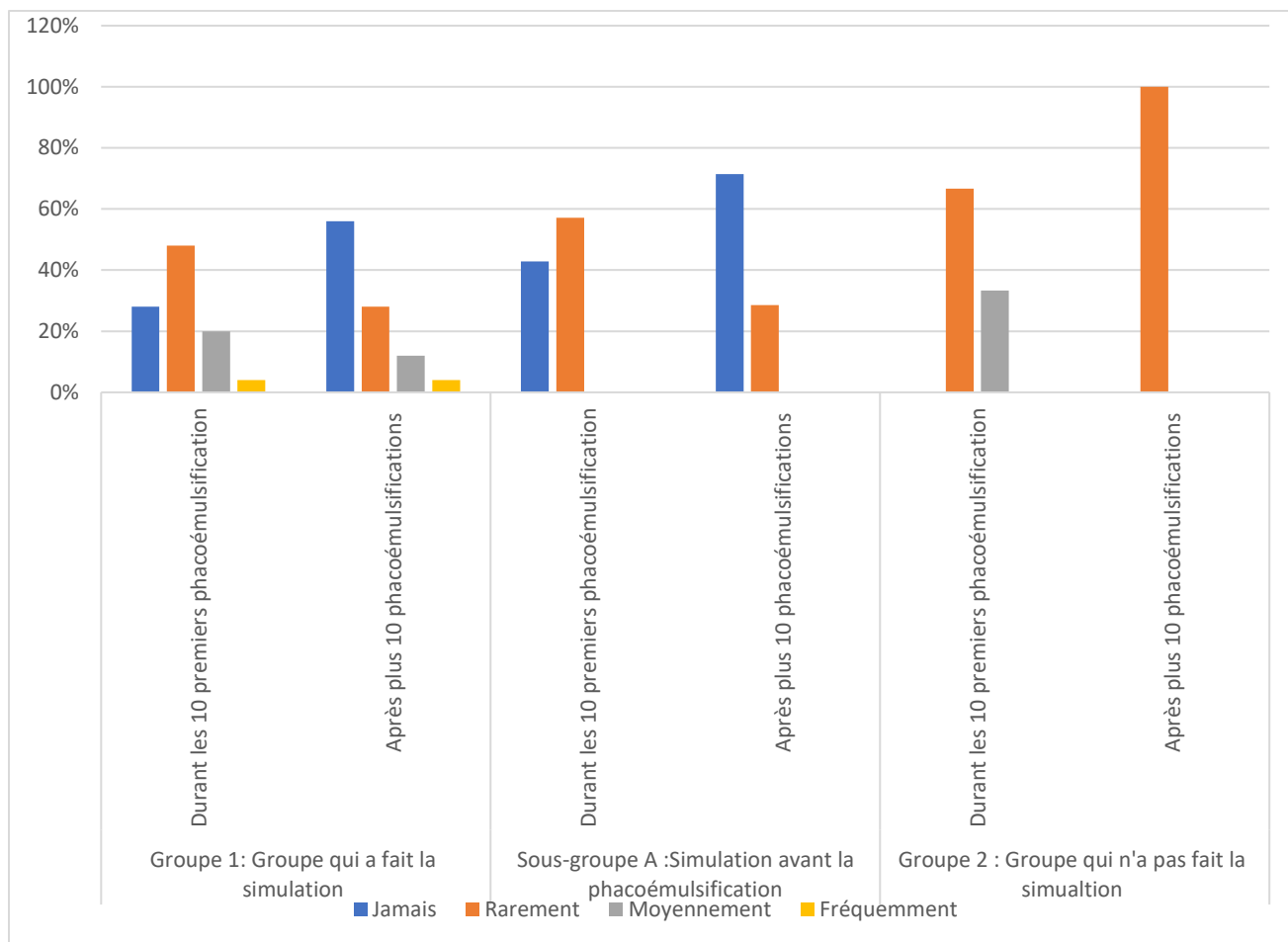
jamais fait de simulation) par rapport à la fréquence des lésions descemetiques.

3. Ruptures capsulaire postérieures : Graphique 37

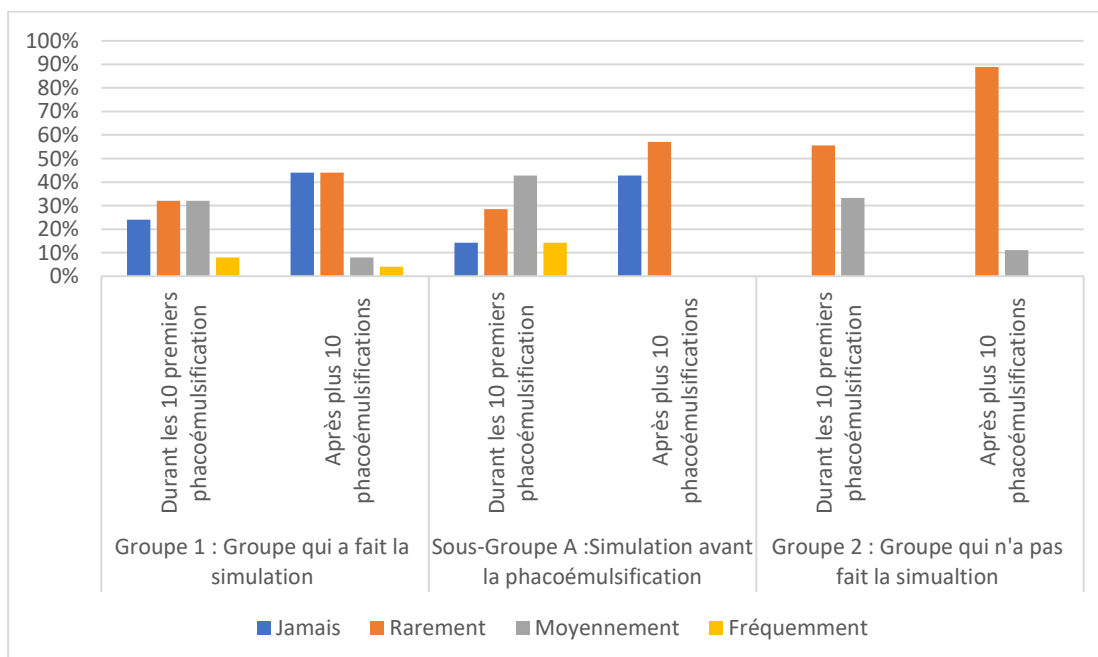
- Nous avons noté aussi que la courbe d'apprentissage chez le groupe 1 (groupe qui a fait la simulation) et le sous-groupe A (simulation avant phacoémulsification) est plus rapide que par rapport au groupe 2 (qui n'a jamais fait de simulation) par rapport à la fréquence des ruptures capsulaires postérieures.



Graphique 35 : Fréquence des brûlures au niveau de l'incision

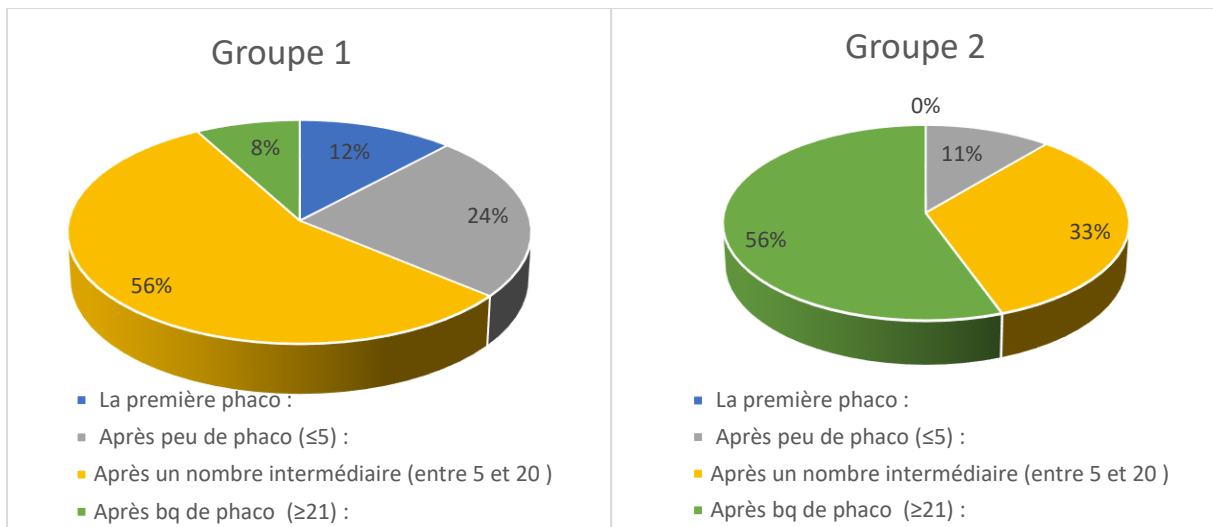


Graphique 36 : Fréquence des lésions descemetiques



Graphique 37 : Fréquence des ruptures capsulaire postérieurs

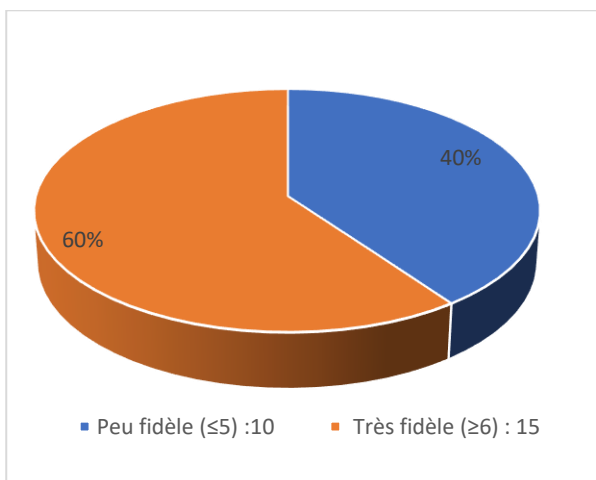
- De plus, nous avons noté aussi que les résidents qui ont fait la simulation arrivent à gérer leur complication après peu de nombre de phacoémulsifications. (Graphique 38)



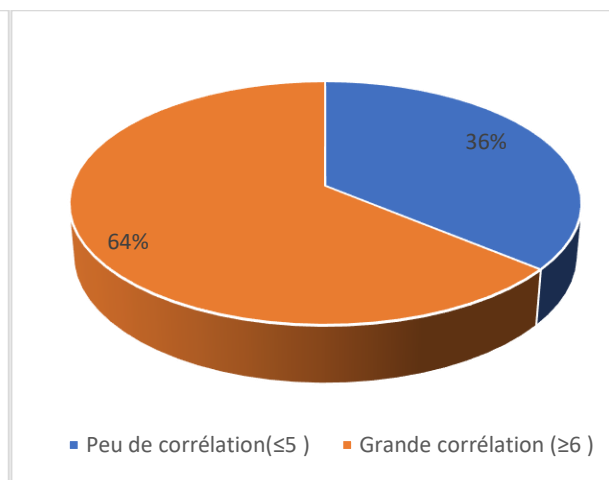
Graphique 38 : Pourcentage des résidents pouvant gérer leur complications par rapport au nombre de phacoémulsifications réalisées

G. Appréciation concernant le simulateur :

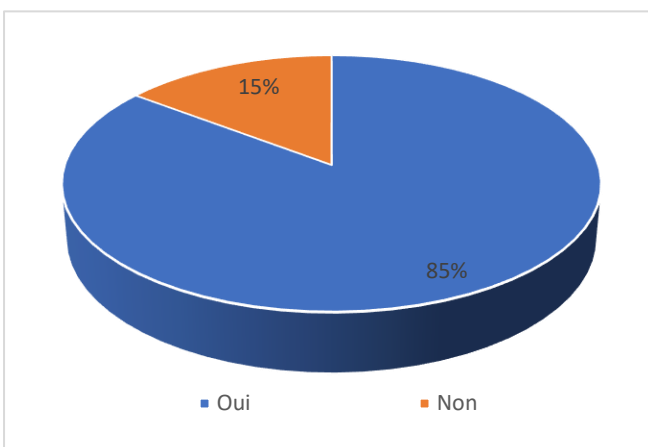
- Les questions relatives aux appréciations concernant le simulateur ont montré :
 - La majorité des résidents (60%) considèrent que le simulateur est très fidèle et réaliste (graphique 39)
 - La majorité des résidents considèrent qu'il y a une grande corrélation entre le simulateur EyeSI et le niveau en chirurgie en vraie vie (Graphique 40)
 - La grande majorité des résidents pensent qu'il faut introduire de façon obligatoire le simulateur dans le programme de formation de résidanat (Graphique 41)
 - Nous avons noté que la majorité des résidents pensent que le simulateur permet une bonne autoévaluation de la chirurgie de phacoémulsification (Graphique 42)



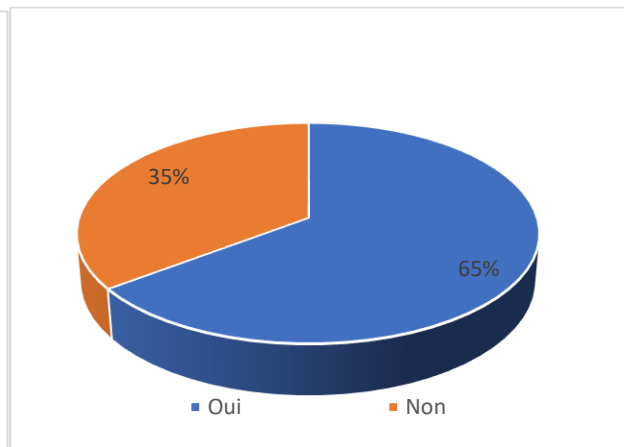
Graphique 39 : Degré de fidélité et de réalisme



Graphique 40 : Degré de corrélation entre le simulateur EyeSI et la chirurgie en vraie vie



Graphique 41 : Est-ce que vous jugez utile l'introduction obligatoire du simulateur dans le programme de formation du résidanat



Graphique 42 : Est-ce que vous pensez que le simulateur permet une bonne autoévaluation de la chirurgie

X. DISCUSSION

La chirurgie de la cataracte est l'une des techniques chirurgicales les plus importantes à enseigner lors de résidanat en ophtalmologie. La formation chirurgicale est basée classiquement sur le modèle traditionnel de Halsted [66] où le novice acquiert des connaissances chirurgicales en lisant, en observant et en opérant un patient tout en étant supervisé par un chirurgien sénior. Cet apprentissage est long, difficile et non dénué de risques pour le patient. Une étude réalisée ; sur des résidents n'ayant pas reçu une formation par simulation en réalité virtuelle ou par Wet lab ; a montré que la courbe d'apprentissage de la phacoémulsification nécessitait plus de 80 cas de cataracte pour atteindre un plateau [58]. Jusqu'à 25 % des résidents effectuent moins de 80 phacoémulsifications pendant leur résidanat, et la plupart des résidents font entre 80 et 140 [59].

Pour accélérer la courbe d'apprentissage de la phacoémulsification, réduire les complications chirurgicales et minimiser les risques pour les malades, les méthodes de formation "En dehors de la salle d'opération" ; basées sur la simulation en réalité virtuelle et les Wet lab ; ont acquis actuellement un grand intérêt dans la formation des résidents en phacoémulsification. [58,60-62]

Concernant la simulation en réalité virtuelle, la majorité des études publiées dans la littérature étudiaient le simulateur EyeSI®, qui est l'objet de notre thèse. Ces études ont été intéressées à la validité de construction de ses modules d'entraînement au segment antérieur (anti-tremor et forceps), à son utilité pour l'entraînement au Capsulorhéxis et à la phacoémulsification en général, ainsi que son rôle dans la diminution des fréquences des complications [63-65]. Les résultats de ces études ont motivé plusieurs centres de formation d'ophtalmologie de s'acquérir avec ce simulateur pour améliorer la formation de leur résidents en phacoémulsification.

A. Validité du simulateur EyeSi :

Lors de l'adoption de tout nouvel instrument, sa validité doit être prouvée. Gallagher et al [73] [67] définissent six critères ou aspects pour évaluer cette validité .

Les deux aspects les plus importants dans l'évaluation de la validité d'un simulateur sont la validité de construction et la validité concurrente. Elles sont primordiales pour adoption des simulateurs aux programmes de formation chirurgicale des résidents et pour l'établissement des critères d'évaluation.

1. Validité de construction du simulateur EyeSI :

La validité de construction du simulateur Eyesi signifie que le simulateur peut discriminer entre différentes capacités ou niveaux d'expérience et ainsi différencier les performances chirurgicales entre des groupes ou des individus homogènes. [68]

Plusieurs études ont été réalisées pour prouver sa validité scientifique, avant de le considérer comme moyen pédagogique d'entraînement sans risque pour le malade.

Cette évaluation s'est intéressée aux différents modules d'entraînement de l'EyeSi, groupés grossièrement en compétences basiques (Basic Skills) et en modules d'entraînement chirurgical (Surgical training).

Dans la majorité des cas cette évaluation de la validité de construction s'est basée sur la comparaison des performances des chirurgiens expérimentés et novices qui ont passé les différents modules d'entraînement de ce simulateur.

a. Modules de compétences basiques :

Ce groupe de compétence comporte

- Le module de pinces constitue une tâche difficile pour le chirurgien novice qui doit s'entraîner à naviguer et à effectuer des manipulations dans la chambre antérieure tout en évitant les complications, notamment les lésions accidentelles de la cornée et du cristallin.

- Le module d'anti-tremblement entraîne et mesure la précision du mouvement intraoculaire de manière rigoureuse. Sa conception le rend particulièrement pertinent pour développer la dextérité du chirurgien novice. Il place également le chirurgien dans une situation réaliste où la vitesse peut avoir un impact négatif sur la précision du mouvement et les résultats chirurgicaux.

De multiples études ont approuvé la validité constructive de deux modules précédemment définis notamment les études de *Mahr et Coll* [69]] et *Le et Coll* [75] qui ont rapporté que les scores des chirurgiens expérimentés étaient beaucoup plus supérieurs que ceux des chirurgiens débutants, avec moins de temps global de travail et moins de blessures accidentelles de la cornée et du cristallin[63,71-73]

b. Modules d'entraînement chirurgical :

Ils comportent les étapes du Capsulorhéxis, les hydromaneuvres (hydrodissection et hydrodélinéation), le phaco cracking et chopping et l'aspiration des masses corticales.

Tous ces modèles d'entraînement chirurgical dans l'EyeSi ont prouvé leur validité de construction grâce à la réalisation de plusieurs études dont le résultat commun est une corrélation statistiquement significative entre l'expérience du chirurgien et les scores obtenues dans les différents modules d'entraînement [64,74-76]

Tous les écrits s'accordent sur la validité de l'EyeSi et sa capacité de discerner les différents niveaux d'expérience et constitue donc une mesure valide des compétences de base. Cela permet de conclure que l'EyeSi pourrait améliorer les performances des novices pour les amener au niveau des experts.

Ces distinctions entre le niveau de compétence des experts et celui des novices pourraient éventuellement conduire à l'élaboration d'un programme de formation sur le simulateur EyeSi facilitant et protocolant l'apprentissage de la phacoémulsification [77].

Cette possibilité d'entraînement et de répétition du geste selon un programme de formation donné est l'un des avantages majeurs de la simulation en réalité virtuelle par rapport à l'apprentissage traditionnel sur des modèles animaux utilisant souvent les yeux de porc, dans un laboratoire 'Wet-lab'. Bien que cet apprentissage chirurgical sur un modèle animal semble séduisant et se ressemble intimement à la chirurgie réelle, ses principales limites sont la rapidité d'opacification de la cornée animale, les différences d'élasticité entre les capsules antérieures cristalliniennes humaines et porcines lors de la réalisation du capsulorhéxis ; une des compétences de la chirurgie de cataracte les plus difficiles à maîtriser par les chirurgiens débutants [78] ; ainsi que la restriction de la répétition d'une étape chirurgicale donnée à cause de la nécessité d'avoir plusieurs tissus (yeux porcines) dont la préparation elle-même demande beaucoup de temps.

2. Validité concourante du simulateur EyeSI :

Diverses études dans la littérature ont permis de mettre en évidence la validité concourante du simulateur EyeSi en comparant les scores d'évaluation utilisés au niveau de l'EyeSi par rapport aux scores utilisés pour évaluer les performances au niveau d'une chirurgie de cataracte en vraie vie. Ces études ont permis de prouver la validité concourante du simulateur EyeSI par rapport à différents indices, nous traitons ci-dessous les plus importants.

a. The Objective Structured Assessment of Cataract Surgical Skill "OSACSS"

L'échelle de notation OSACSS a été utilisé pour évaluer la performance technique des chirurgiens en se basant sur les enregistrements de leurs chirurgies de cataracte. Il permet d'évaluer la performance à toutes les étapes de la chirurgie de cataracte. Il est considéré par plusieurs auteurs le gold standard d'évaluation de la chirurgie de cataracte. Ainsi , plusieurs études ont suggéré le score OSACSS comme étant un outil d'évaluation valide de la chirurgie de cataracte [81] (figure 63).

Skill	Poorly or Inadequately Performed		Performed with Some Errors or Hesitation		Performed Well with No Prompting or Hesitation	Tick If Not Performed
Incision and paracentesis: formation and technique	1	2	3	4	5	
Viscoelastic: appropriate use and safe insertion	1	2	3	4	5	
Capsulorhexis: commencement of flap	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	

Figure 63 : Score OSACSS [81]

Jacobsen et coll. a mené une étude sur 19 chirurgiens de différents niveaux d'expérience. Au début de l'étude, les participants ont réalisé 3 procédures de phacoémulsification en chirurgie de vraie vie pour lesquels ils ont été évalué selon les critères du score OSACSS. Par la suite, ces participants ont été évalué sur un test (ou score) prévalidé dans le simulateur EyeSI (figure 64). Pour tous les niveaux d'expérience, les résultats ont montré une corrélation statistiquement significative ($p=0.003$) entre le score de performance au niveau de l'EyeSI et le score OSACSS. [82]

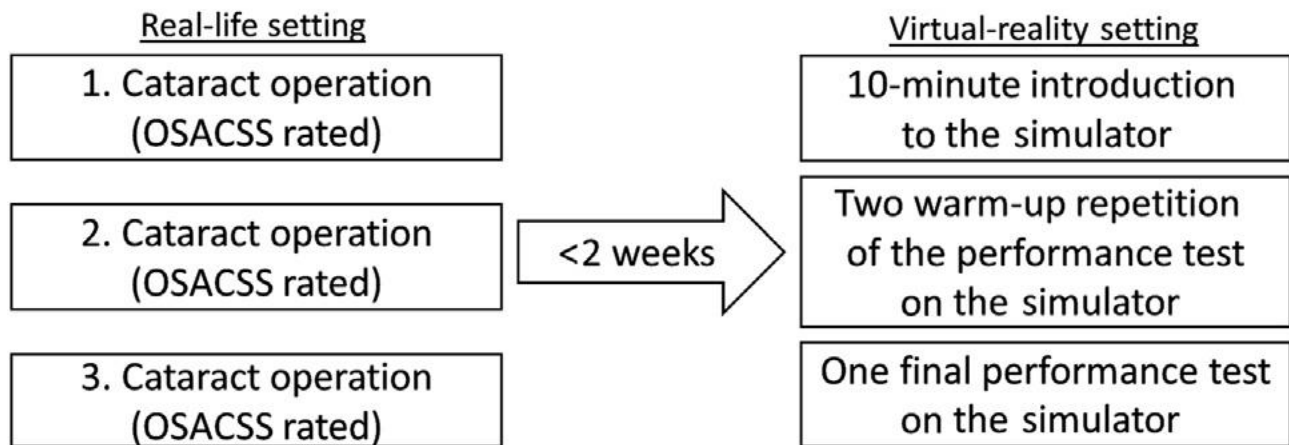


Figure 64: Plan de l'étude (OSACSS = Objective Structured Assessment of Cataract Surgical Skills).

b. The Global Rating Assessment of Skills in Intraocular Surgery “GRASIS”:

Le GRASIS est un score d'évaluation objective des performances chirurgicales lors de la chirurgie de cataracte proposé par Cremers et Coll en 2005 [80]. Il se base sur les items suivants (Figure 65):

- Le traitement des structures intraoculaires.
- L'énergie /mouvement /temps.
- L'utilisation du microscope et la position de l'œil,
- La manipulation des instruments et utilisation de la main non dominante,
- La connaissance des instruments et des équipements de phacoémulsification et de vitrectomie.
- Le déroulement de l'opération,
- La connaissance des nouvelles techniques et procédures,
- L'interaction avec le staff paramédical et l'aide opératoire,
- La gestion des évènements inattendus,
- La performance globale.

Treatment of Intraocular Structures				
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.)
Time, Motion, and Energy				
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
Eye Position and Microscope Use				
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
Instrument Handling and use of Non-dominant hand				
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
Knowledge of Phacoemulsification and Vitrector equipment and instruments				
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
Flow of Operation				
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
Knowledge of Specific or New Procedure or Technique				
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
Interaction with Assistants/ Scrub Nurse/ Surgical Preceptor				
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
Handling of Unexpected Intraocular Events				
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
Overall Performance				
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 65 : Score GRASIS (Global Rating Assessment of Skills in Intraocular Surgery)

[80]

Rohipoor et al [81] a rapporté une corrélation statistiquement significative entre le score GRASIS et les scores du simulateur EyeSI. Cette étude a permis ainsi de prouver la validité concourante du simulateur EyeSI par rapport au score GRASIS.

3. Validité prédictive du simulateur EyeSI :

La validité prédictive est la capacité du simulateur Eyesi à prédire les futures performances chirurgicales des chirurgiens dès leur début d'entraînement.

A ce sujet une étude a été réalisé par **Rohipoor et al** [81] sur 30 résidents avec comparaison de leur performance chirurgicale au début du résidanat sur le Eyesi évaluée par les scores Eyesi par rapport à leur expérience chirurgicale lors de la dernière année du résidanat évaluée par le score GRASIS. Les résultats de l'étude ont montré une corrélation significative entre le score du module 'Capsulorhéxis' sur simulateur et l'expérience chirurgicale à la fin du résidanat.

A partir de cette étude nous pouvons conclure que les scores d'évaluation des modules sur le simulateur Eyesi calculés dans le début du résidanat peuvent prédire la future performance chirurgicale des novices, permettant ainsi de savoir dès le début du cursus de formation, les résidents qui nécessiteront un entraînement supplémentaire en phacoémulsification. Ceci témoigne que le simulateur Eyesi a aussi une validité prédictive.

B. Impact du simulateur dans la diminution des Complications :

La pratique de la phacoémulsification s'accompagne du risque de survenue d'un certain nombre de complications à savoir :

- Complications cornéennes : lésions descémétiques, Œdème de cornée
- Complications iriennes : iridodialyse, hernie irienne.
- Complications capsulaires antérieures.
- Complications capsulaires postérieures : La rupture capsulaire postérieure est l'une des incidents fréquents et graves lors de la phacoémulsification.
- Complications zonulaires.

La diminution de la fréquence de ses complications améliore l'efficacité de la chirurgie et par conséquent le pronostic visuel des malades.

Les techniques d'apprentissage par Wet-lab ou dry-lab ont prouvé leur efficacité dans la réduction de survenue des complications lors de la phacoémulsification en vraie vie. [82]

A l'avènement du simulateur de phacoémulsification en réalité virtuelle "Eyesi", plusieurs études ont été intéressées à l'évaluation de l'impact de ce simulateur sur la fréquence de survenue des complications lors de la pratique réelle de la phacoémulsification par les résidents après une formation bien structurée sur le simulateur Eyesi.

La plupart de ces études s'accordent sur une diminution de la fréquence des complications chez les résidents ayant reçu une formation préalable sur le simulateur Eyesi. [67]

Il faut noter que la majorité des études se sont intéressées à l'évaluation de la fréquence des ruptures capsulaires postérieures, car elle représente la complication dont la survenue est la plus fréquente et qui conditionne également le risque d'évolution vers d'autres complications. [83]

1. Études qui ont montré une diminution des complications :

Plusieurs études dans la littérature ont montré que le simulateur EyeSi permet de réduire le taux de complications lors de la phacoémulsification en vraie vie. Le tableau ci-dessous permet de résumer ses études (Tableau 11) :

Tableau 11 : Principales études montrant l'intérêt de simulateur EyeSI dans la diminution des complications de la phacoémulsification en vraie vie

Etude	Type de l'étude	Participants	Résultats mesurés	Résultats obtenus
Staropoli et coll [83]	Comparaison entre 2 groupes non randomisés	<ul style="list-style-type: none"> -Groupe des résidents qui ont utilisé le simulateur 'EyeSi-trained' : composé de 11 résidents qui ont réalisé 501 chirurgies de cataracte. -Groupe des résidents qui n'ont pas utilisé le simulateur 'EyeSi-naïve' : composé de 11 résidents qui ont réalisé 454 chirurgie de cataracte. <p><i>N.B. Tous les résidents inclus dans l'étude sont de la même année au niveau du même centre de formation</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> -Rupture capsulaire postérieure -Issu du vitré -Persistance des fragments cristalliniens -Rupture Zonulaire -Endophtalmie -Luxation de l'implant -Reprise chirurgicale 	Le taux de complications était de 2,1% chez le groupe 'EyeSi-trained' par rapport à 5,1% chez le groupe 'EyeSi-naïve'
Ferris et coll. [84]	Étude cohorte rétrospective	265 chirurgiens	Taux de ruptures capsulaires postérieures avant et après EyeSI	Réduction de 38% de ruptures capsulaires postérieures après l'implantation du simulateur EyeSI
Lucas et coll [85]	Comparaison entre 2 groupes non randomisés	<ul style="list-style-type: none"> -Groupe de 7 résidents de 2^{ème} année qui n'a pas d'expérience avec le simulateur EyeSI -Groupe de 7 résidents de 2^{ème} année qui a un level intermédiaire 	<ul style="list-style-type: none"> -Rupture capsulaire postérieure. -Aphakie. -Passage de fragments nucléaires dans le vitré. 	Taux de complications était plus bas dans le groupe qui a déjà utilisé le simulateur (27.14% vs 12.86%)

		d'expérience avec le simulateur EyeSI <i>N.B. La comparaison a été faite durant les 10 premières phacoémulsification.</i>	-Conversion en EEC	
McCannel et coll [86]	Un seul group, test pre-post.	Un groupe de 38 résidents qui ont réalisés 1037 chirurgies de cataracte dont 603 ont été réalisé après formation du simulateur EyeSI.	Le taux de capsulorhéxis curviligne continu (CCC) irrégulier.	Réduction de 68% dans le taux de CCC irrégulier après intervention du simulateur EyeSI.
Baxter et coll [87]	Un seul group, test pre-post.	Un groupe de 3 résidents qui a bénéficié d'un programme de formation intensif en chirurgie de cataracte de 2 ans incluant 50 heures de simulation par l'EyeSI.	-Taux de ruptures capsulaires postérieures	Taux de complications après le programme de formation intensif est plus bas que la littérature (0,66 % vs 3.77-7.17%)

2. Études qui n'ont pas montré une diminution des complications

D'autres études n'ont pas montré une réduction des complications lors de la phacoémulsification en vraie vie après une formation sur le simulateur EyeSI. Le tableau ci-dessous permet de résumer ses études (Tableau 12) :

Tableau 12 : Principales études ne montrant pas une diminution de la fréquence des complications après formation sur simulateur EyeSI :

Etude	Type de l'étude	Participants	Résultats mesurés	Résultats obtenus
Belyea et coll.[88]	Étude rétrospective de comparaison de séries de cas	<ul style="list-style-type: none"> -Groupe de 17 résidents qui ont utilisé le simulateur (simulator-group) -Groupe de 25 résidents qui n'ont pas utilisé le simulateur 	<ul style="list-style-type: none"> -Taux et grade des complications (<i>1 à 4 selon la sévérité de la complication</i>). -Temps de la chirurgie. -Pourcentage de puissance d'US utilisés -Temps de phaco ajusté (<i>multiplication du temps avec la puissance</i>), 	<ul style="list-style-type: none"> -Pas de différences significatives ont été trouvé entre les 2 groupes dans le taux et grade des complications -Une amélioration significative du simulator-group uniquement pour : temps de la chirurgie, pourcentage des US utilisés, temps de phaco ajusté
Pokroy al [89]	Comparaison entre 2 groupes non randomisés	<ul style="list-style-type: none"> -Le premier groupe est composé de 10 résidents qui ont été formé avant l'introduction du simulateur EyeSI dans le programme de formation de résidanat -le deuxième est composé de 10 résidents qui ont été formé après l'introduction du simulateur. <p><i>N.B. Chaque groupe a réalisé 500 cas de phacoémulsifications</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> -Taux des ruptures capsulaires postérieures -La durée de l'opération 	<ul style="list-style-type: none"> - Pas de différences significatives ont été trouvé entre les 2 groupes au niveau du taux des ruptures capsulaires postérieures. -Une courbe d'apprentissage plus courte et un temps opératoire plus réduit pour le deuxième groupe par rapport au premier.

C. Intérêt du simulateur Eyesi dans l'amélioration de la courbe d'apprentissage et diminution du temps opératoire:

Une courbe d'apprentissage courte, un temps opératoire réduit, une efficacité de la phacoémulsification avec un pourcentage faible d'énergie et moins de risque de complications étaient également parmi les points intéressants à analyser concernant l'apport du simulateur en réalité virtuelle dans le programme de formation des résidents en ophtalmologie.

La majorité des auteurs s'accordent sur l'impact positif de l'Eyesi sur l'amélioration de la courbe d'apprentissage de la phacoémulsification par les résidents en leur permettant : (Tableau 13)

- L'acquisition de la coordination psychomotrice entre les 2 mains, 2 pieds et le microscope opératoire.
- La répétition des différentes étapes chirurgicales avec un feedback instantané, ainsi les résidents qui trouvent des difficultés au niveau d'une étape peuvent la maîtriser en la répétant plusieurs fois sur simulateur, en plus de la faculté de la réviser mentalement qui peut être acquise à force des répétitions.
- L'augmentation de la confiance du chirurgien. [88] [89] [90]

Tableau 13 : Etudes montrant l'intérêt du simulateur Eyesi dans l'amélioration de la courbe d'apprentissage et diminution du temps opératoire.

Etude	Type de l'étude	Participants	Résultats mesurés	Résultats obtenus
Belyea et coll.[88]	Etude rétrospective de comparaison de séries de cas	<ul style="list-style-type: none"> -Groupe de 17 résidents qui ont utilisé le simulateur (simulator-groupe) -Groupe de 25 résidents qui n'ont pas utilisé le simulateur 	<ul style="list-style-type: none"> -Temps de la chirurgie. -Pourcentage de puissance d'US utilisés -Temps de phaco ajusté (<i>multiplication du temps avec la puissance</i>), -Taux et grade des complications (<i>1 à 4 selon la sévérité de la complication</i>). 	<ul style="list-style-type: none"> -Une amélioration significative du simulator-group uniquement pour : temps de la chirurgie, pourcentage de puissance d'US utilisés, temps de phaco ajusté -Pas de différences significatives ont été trouvées entre les 2 groupes dans le taux et grade des complications
Pokroy al [89]	Comparaison entre 2 groupes non randomisés	<ul style="list-style-type: none"> -Le premier groupe est composé de 10 résidents qui ont été formés avant l'introduction du simulateur EyeSI dans le programme de formation de résidents -le deuxième est composé de 10 résidents qui ont été formés après l'introduction du simulateur. <p><i>N.B. Chaque groupe a réalisé</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> -Taux des ruptures capsulaires postérieures -La durée de l'opération 	<ul style="list-style-type: none"> - Pas de différences significatives ont été trouvées entre les 2 groupes au niveau du taux des ruptures capsulaires postérieures. -Une courbe d'apprentissage plus courte et un temps opératoire plus réduit pour le deuxième groupe par rapport au premier.

		<i>500 cas de phaémulsifications</i>		
Elizabeth et coll. [90]	Etude rétrospective	<p>–Groupe 1 de 10 résidents qui ont été formé avant l’introduction de l’EyeSI dans le programme de formation.</p> <p>–Groupe 2 de 10 résidents qui ont été formé après l’introduction de l’EyeSI .</p> <p><i>N.B. l’étude s’est intéressée aux 50 premières chirurgies de cataracte.</i></p>	<p>–Temps opératoire de la chirurgie</p> <p>–Complications : rupture capsulaire postérieure avec ou sans issu du vitré.</p>	<p>–Réduction significative sur le plan statistique du temps opératoire avec une tendance vers la diminution de complications intraopératoires majeures.</p>
Bisol et coll [91]	Etude rétrospective d’un seul group, test pre–post.	Scores de 37 résidents ont été évalué avant et après formation sur simulateur EyeSI.	–Création du capsulorhexis sur des capsules de haute tension.	–Amélioration des performances des résidents dans la création du capsulorhexis sur des capsules de haute tension après introduction de l’EyeSI.
Feudner et coll [92]	Etude expérimentale randomisée en double aveugle	63 participants contenant 31 étudiants de médecine et 32 ophtalmologistes ont été divisé de facon aléatoire et masquée sur 2 groupes : un groupe a reçu une formation sur simulateur EyeSI et l’autre est un groupe de contrôle.	Réalisation du capsulorrhéxis sur les yeux de porcs.	Amélioration significative des scores de réalisation du capsulorrhéxis chez le groupe qui a bénéficié de l’entraînement sur simulateur par rapport au groupe de contrôle.

D. Corrélation entre la performance au niveau du simulateur Eyesi et celle en vraie vie.

Cette corrélation de la performance entre chirurgie sur simulateur et la chirurgie en vie réelle signifie le transfert des performances acquises depuis le simulateur vers la chirurgie en vraie vie. Dans ce contexte, différentes études ont été faites et dont les résultats étaient très débattus (Tableau 14). Globalement, les auteurs rapportent ; à partir des études incluant des chirurgiens de différents niveaux d'expérience ; que ce transfert de performances chirurgicales n'a pu être démontré que pour les chirurgiens débutants.

Tableau 14 : Etudes montrant s'il existe une corrélation entre la performance au niveau du simulateur EyeSi et celle en vraie vie

Étude	Type de l'étude	Participants	Résultats mesurés	Résultats obtenus
La Cour et Coll [93]	Un seul group, test pré-post.	Les compétences chirurgicales de 19 chirurgiens de cataracte, avec différents niveaux d'expérience, ont été évalué avant et après avoir compléter un programme de formation sur le simulateur EyeSI	Le transfert des performances chirurgicales depuis le simulateur EyeSI vers la chirurgie en vraie vie	+Les résultats ont montré que le transfert des performances chirurgicales depuis le simulateur EyeSI vers la chirurgie en vraie vie n'a pu être démontré que pour les chirurgiens avec faible expérience chirurgicale (mois de 75 cataracte). +L'étude n'a pas pu démontrer le transfert des performances chirurgicales depuis le module de cataracte de l'EyeSI vers le module vitréo-rétinien +Cette étude a montré aussi que le pouvoir discriminative du simulateur EyeSI entre les chirurgiens débutants et les chirurgiens expérimentés n'a pu être démontré que pour les premières sessions d'entraînement
Thomsen et al [94]	Etude transversale	11 chirurgiens de cataracte de différents niveaux d'expérience ont été inclus dans l'étude.	Comparaison entre : -le score du suivi du mouvement (<i>motion-tracking score</i>) mesuré par la	-Corrélation significative entre les 2 scores concluant ainsi que la performance sur le simulateur EyeSI est corrélée de façon significative à la

			<p>multiplication de la longueur du trajet avec la moyenne du nombre des mouvements réalisés au niveau des 3 chirurgies de cataracte réalisées en vraie vie.</p> <p>-Le score de performance sur l'EyeSI</p>	<p>performance chirurgicale en vraie vie.</p>
<p>Jacobsen et Coll. [79]</p>	<p>Etude prospective multicentrique</p>	<p>19 chirurgiens de différents niveaux d'expérience provenant de 9 départements d'ophtalmologie ont été inclus dans l'étude.</p>	<p>Comparaison entre :</p> <p>-la moyenne des 3 scores OSACSS obtenus par évaluation des 3 chirurgies de cataracte réalisées par les chirurgiens en vraie vie.</p> <p>-Le score de performance sur l'EyeSI</p>	<p>+Corrélation significative entre le score de la performance sur le simulateur EyeSI et le score OSACSS de la performance en vraie vie de la chirurgie de cataracte .Ceci pour les différents niveaux d'expérience.</p>

E. Développent d'un programme de formation à partir des modules qui ont approuvé une validité de construction :

Puisque l'intérêt du simulateur de phacoémulsification en réalité virtuelle a été démontrée, et son utilisation dans la formation microchirurgicale des résidents est très défendue et devenue de plus en plus fréquente, il est préférable que son utilisation soit structurée dans le cadre d'un programme standardisé. Celui-ci doit comporter les éléments suivants : un apprentissage basé sur les connaissances, un cheminement progressif des compétences techniques, un retour d'information continu et une progression vers les objectifs de compétence.

En général plusieurs auteurs ont rapporté qu'un programme de formation structuré est garant d'une diminution du risque de complication lors de la pratique de phacoémulsification de vraie vie, ainsi Baxter et col ont rapporté un taux de complication de 0.66% au cours de la première année de chirurgie de cataracte par phacoémulsification, après un entraînement des résidents selon un programme de simulation pendant 2 ans sur Simulateur Eyesi et "Wet Lab" puis un entraînement intensif sur la chirurgie de cataracte. Ce taux parait très bas par rapport à celui rapporté dans la littérature. [87]

Plusieurs écrits ont décrit des programmes de formation de phacoémulsification par simulation et dont les résultats étaient vraiment satisfaisants. Nous rapportons ci-dessous certains exemples :

1. Premier programme :

Ce programme a été décrit par Spiteri et Coll. [95], il était basé exclusivement sur le simulateur Eyesi en utilisant des modules qui ont prouvé leur validité de construction.

Ce programme de formation commence par 2 répétitions de 4 modules des compétences basiques 'Basic Skills' (2 modules d'anti-tremblement et 2 modules d'entraînement aux pinces dans la chambre antérieure). La progression vers les modules d'entraînement chirurgical 'procedural tasks' nécessite l'accomplissement des critères de compétence de référence qui ont été définis sur le système de scoring de l'Eyesi. La même chose pour les modules d'entraînement chirurgical 'procedural tasks' qui ont aussi des critères de compétence de référence à compléter par le résident avant de valider l'accomplissement de la période d'entraînement (figure 66). Il est important de souligner que ce programme adhère au concept d'une formation "distribuée" et étalée sur le temps au lieu d'une formation condensée, avec un maximum de 2 sessions par jour d'une durée d'entraînement d'au moins une heure pour chacune des sessions. Il est important que tous les critères de compétence de référence soient accomplis durant 2 sessions consécutives pour parler d'une vraie acquisition des compétences au lieu d'une amélioration des scores par chance.

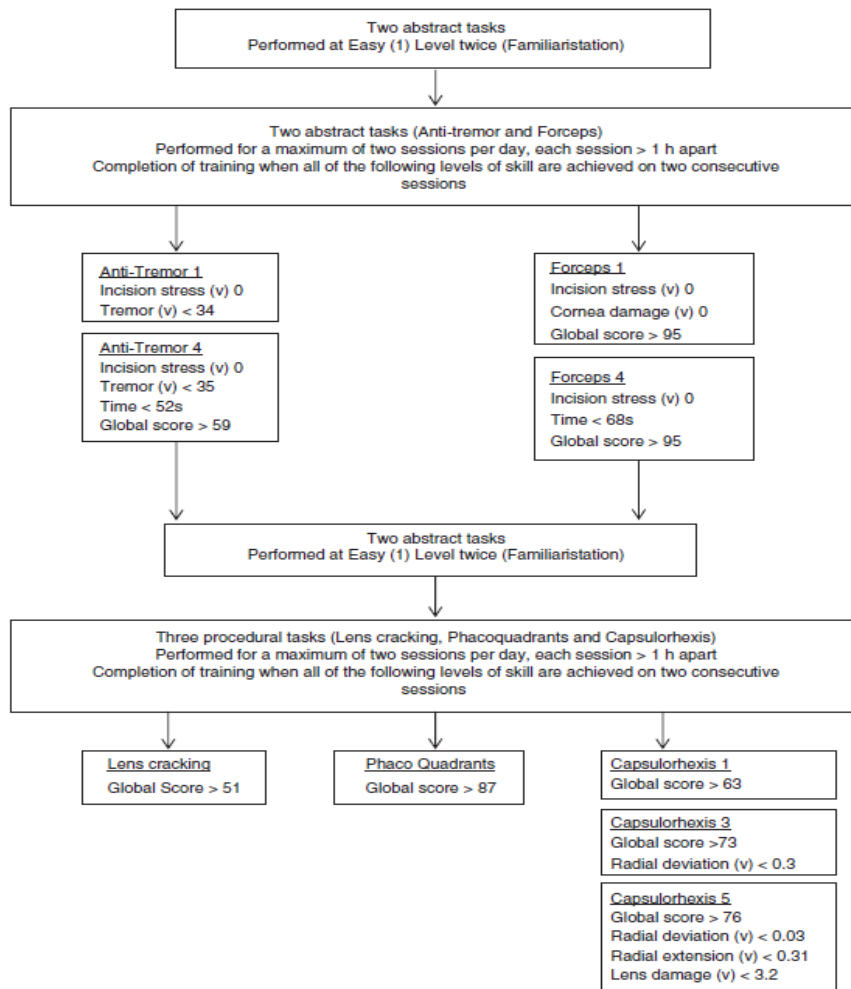


Figure 66 : Programme de formation en phacoémulsification proposé sur le simulateur EyeSI. (v) valeur ; (s) seconde.

2. Deuxième Programme

Un impact positif de ce programme sur l'amélioration des performances chirurgicales des résidents a été rapporté dans un essai clinique prospectif [96]. Le programme de formation est réparti en 2 grandes parties, chacune regroupe 3 étapes : (Figure 67)

a. La formation pré-patient "pre-patient training" (étape 1 à 3) :

Il s'agit d'une formation qui précède la pratique clinique contenant à la fois un enseignement théorique, un enseignement sur "Wet-lab " et puis sur le simulateur en réalité virtuelle Eyesi.

b. La formation de suivi "Follow up training" (étape 4 à 6) :

Elle comporte un entraînement supervisé sur le malade dans un premier temps et puis pour les chirurgiens opérant indépendamment un entraînement sur l'Eyesi et une pratique sur les malades.

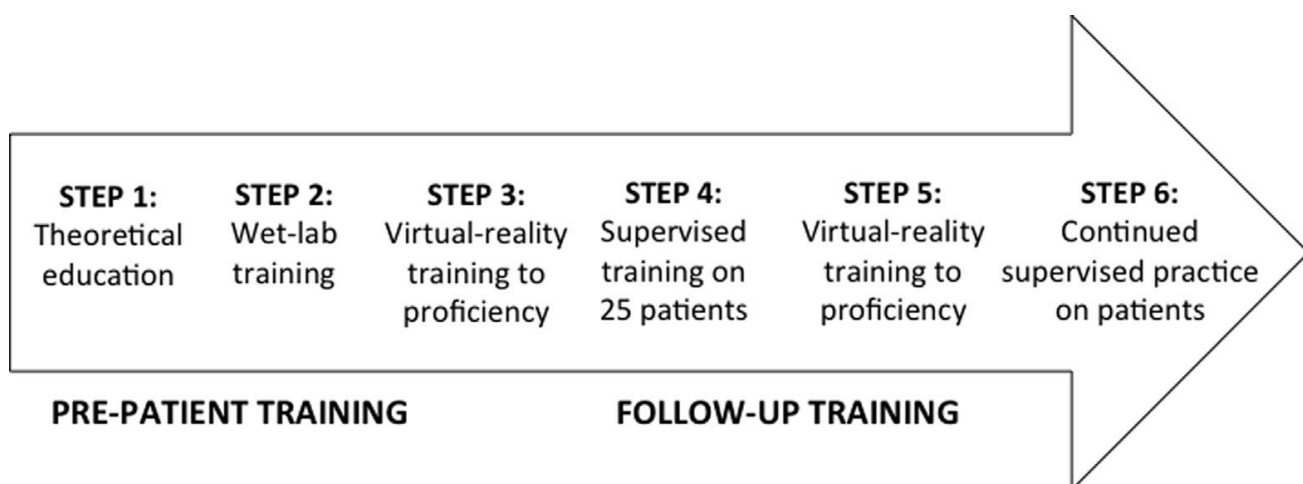


Figure 67: Programme de formation en chirurgie de cataracte compose de 2 parties et 6 étapes [96]

La conclusion tirée de cet essai clinique est que le simulateur en réalité virtuelle doit faire partie intégrante de la formation à la phacoémulsification à côté de l'enseignement théorique et l'entraînement sur Wet-lab avant d'opérer un patient. Ce résultat confirme celui d'une étude publiée par le même auteur en 2015 [97], concluant que la formation en réalité virtuelle ne doit pas être une modalité de formation à part entière dans le programme de formation à la phacoémulsification, mais doit plutôt être complétée par les autres outils d'entraînement également efficaces.

3. Troisième programme :

Bergqvist et coll. dans leur étude (82) ont proposé un programme basé sur des modules validés du simulateur Eyesi exclusivement, comportant 4 modules de compétences basiques 'basic skills' et 4 modules d'entraînement chirurgical 'procedural tasks' (figure 68). La conclusion de cette étude est qu'un entraînement répétitif avec ce programme a permis d'acquérir des compétences plus avancées et des scores plus élevés. Ceci a permis de l'implanter dans le programme de formation en chirurgie de cataracte.

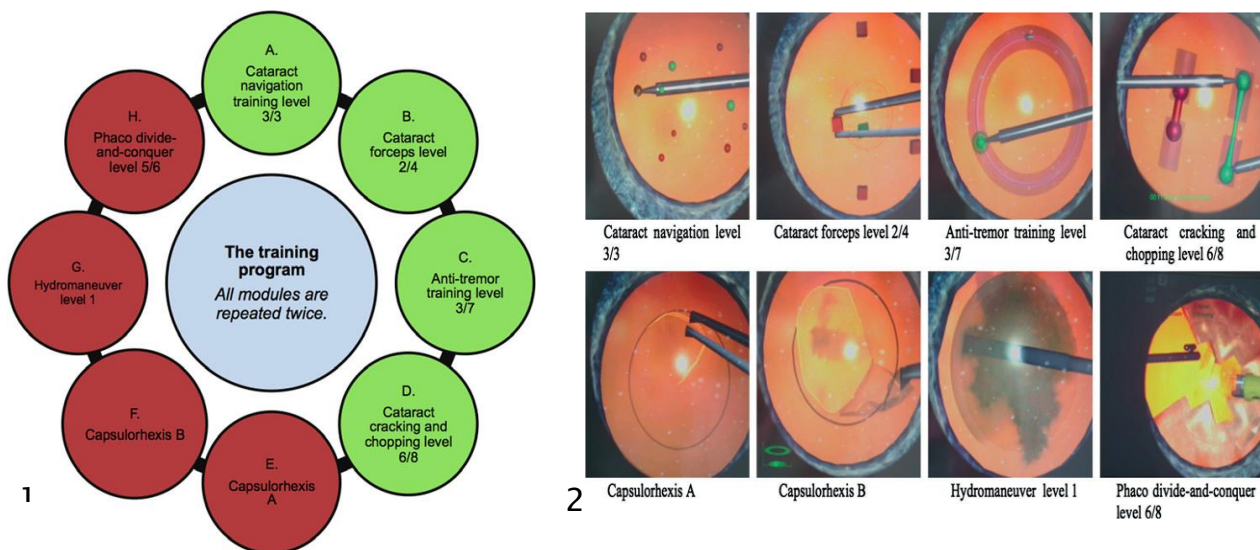


Fig. 68. 1-Programme de formation. Il contient 4 modules de compétences basiques 'basic skills' (vert) et 4 modules d'entraînement chirurgical 'procedural tasks' (rouge)

2-Présentation des différentes étapes à réaliser durant ce programme

4. Quatrième programme :

Ce programme concerne l'entraînement à la réalisation du capsulorhéxis en se basant sur le simulateur Eyesi. Ce programme de formation appelé par Mc Cannel et coll. "Capsulorhexis Intensive Training Curriculum" (CITC) est basé sur le principe d'acquisition des compétences sans prendre en considération le temps nécessaire pour l'acquérir. Ainsi, pour passer à l'étape suivante et progresser dans le programme, le résident doit atteindre un certain niveau de compétence. Le CITC est constitué de 33 modules (figure 69) caractérisés par une augmentation progressive des scores et des répétitions nécessaires pour avancer tout long du programme [86].

Les résultats de l'étude ont objectivé une réduction de 68% du taux des Capsulorhéxis errants, après l'adoption de ce programme d'entraînement.

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

Figure 69. Le programme de formation "Capsulorhexis Intensive Training Curriculum" (CITC) est composé de 33 étapes. Chaque étape contient le score minimal qu'il faut avoir pour passer à l'étape suivante (mentionné après req.) et aussi le nombre de répétition à réaliser (mentionné après x). Avec la progression du programme, les étapes deviennent de plus en plus difficiles.

F. Simulateur et COVID 19:

La pandémie du COVID 19 a considérablement bouleversé le cours normal des cursus de formation médicale et notamment la formation médico-chirurgicale en Ophtalmologie. Un niveau élevé d'anxiété a été signalé par les résidents et même par leurs formateurs concernant l'impact négatif de la pandémie sur la formation surtout clinique en ophtalmologie, à la suite de la suspension de la plupart des activités de soins et de chirurgie, voire le déploiement des équipes dans certains centres pour la prise en charge du COVID 19.

En 2020 les statistiques ont montré une grande tendance à l'entraînement par simulation pour palier à la réduction significative de l'activité de soin ordinaire. En effet, plusieurs études ont montré que l'arrêt des activités éducationnelles durant la période du COVID 19 a permis de montrer l'importance de l'engagement dans l'entraînement par simulation pour maintenir les compétences chirurgicales aussi bien des résidents et des séniors. [98]

G. Analyse du coût de l'EyeSI :

Bien que la validité et l'innocuité du simulateur en réalité virtuelle dans la formation à la phacoémulsification ont été prouvées et malgré que les programmes d'entraînement par simulateur ont été établies et validés, son coût élevé limite son achat par plusieurs centres de formation en ophtalmologie.

Pour justifier son intérêt malgré son coût élevé, plusieurs études ont été réalisées pour analyser l'argent économisé en réduisant le taux de complication et en diminuant le temps opératoire.

Ferris et coll [84] ont étudié le coût supplémentaire d'une rupture capsulaire postérieure (RCP) en termes d'équipement chirurgical et de visites ambulatoires supplémentaires et l'ont comparé au prix du simulateur Eyesi. Selon cette étude, une RCP peut coûter à l'hôpital entre 1650.91 et 2977.12 Dollar [99]. Si le malade se complique d'un décollement de rétine ou endophtalmie, un coût supplémentaire de 7006,07 Dollar s'ajoute.

Un autre facteur à prendre en considération pour calculer le coût réel de la RCP est le coût des réclamations pour négligence médicale. Ali et Little [100] ont analysé 324 réclamations pour faute professionnelle de l'Autorité du contentieux du "National Health Service NHS", liées spécifiquement à la chirurgie de la cataracte entre de 1995 à 2008. Les auteurs ont constaté que les dommages et intérêts moyens payés pour une réclamation pour une complication chirurgicale, telle une RCP ou une luxation postérieure du noyau cristallinien, étaient de 27884.18 Dollar.

En prenant en compte ces facteurs supplémentaires, le coût moyen d'une RCP pour le NHS a été estimé à 2802.43 Dollar. Ferris et coll [84] ont montré que le simulateur Eyesi a permis une réduction de 280 RCP par an sur un total de chirurgie réalisée en Royaume-Uni de 450 000 chirurgies de cataracte. Ainsi on peut déduire que le simulateur Eyesi permet une économisation de 784680.40 Dollar/an. Dans le Royaume-Uni, 20 Eyesi se trouvent dans le pays. À partir du calcul précédent l'achat de ses 20 EyeSI peut être récupéré sur 4 ans.

La diminution du temps opératoire après entraînement par simulateur Eyesi a été proposé également comme un facteur pouvant réduire le coût de la phacoémulsification et donc pouvant justifier l'achat du simulateur. Plusieurs études ont été publiées [101] [102] dont les résultats étaient très débattues, cependant les auteurs s'accordent sur le fait qu'il est impossible de regagner le prix du simulateur juste par la réduction du temps opératoire, néanmoins cette réduction de la durée de la chirurgie permet de faire quand même quelques économies sur le coût global de la phacoémulsification.

H. Critiques sur le simulateur :

Parmi les critiques les plus attribuées au simulateur Eyesi, son intérêt surtout pour les chirurgiens novices. En effet nous avons discuté précédemment que l'amélioration des performances chirurgicales en salle opératoire a été observé essentiellement chez les chirurgiens débutants [93]. Cela pourra limiter le rôle du simulateur dans la formation continue et chez les chirurgiens autonomes en phacoémulsification.

D'autres critiques pour le simulateur Eyesi ont concerné son système de notation, dont un certain nombre de critères sont considérés par certains auteurs comme insuffisamment précis, en les comparant à d'autres scores particulièrement le "OSACSS" qui représente le gold standard en matière de système de notation de la phacoémulsification.

Au cours du module phacoémulsification, une petite erreur qui n'aurait aucun impact si elle se produisait au bloc opératoire, peut conduire au score de zéro. Le simulateur note une seule technique chirurgicale avec une succession des événements bien établie au cours d'une étape donnée de chirurgie. Ainsi, des experts obtiennent parfois de mauvais scores, car ils réalisent l'exercice avec une technique à laquelle le

simulateur n'accorde pas de points. Un système de notation différent prenant en compte le caractère cognitif de cette chirurgie pourrait donc être nécessaire afin de valider et sélectionner d'autres exercices pertinents dans le programme de formation.

De même, les experts obtiennent également des scores inférieurs à ceux imaginés, car le simulateur ne propose pas d'exercice permettant d'enchaîner sans interruption, l'ensemble des étapes de la chirurgie de cataracte et ne garde pas en mémoire les scores des exercices réalisés juste précédemment. Or cela est primordial pour le bon déroulement de cette chirurgie. En effet, si l'étape précédente est mal réalisée, la réussite de l'étape suivante est aléatoire et périlleuse. Le simulateur devrait donc proposer ; à un niveau avancé d'entraînement ; des exercices permettant l'enchaînement de toutes les étapes de la phacoémulsification [53]. Étape nécessaire pour s'approcher plus de la réalité et pour acquérir le maximum de performance avant de réaliser une chirurgie sur un vrai patient.

I. Comparaison de nos résultats avec ceux de la littérature :

1. Simulation en médecine et en ophtalmologie :

L'analyse de notre échantillon a montré que presque tous les résidents ont une idée sur la simulation en médecine avec 65% ont déjà eu une formation en simulation durant la médecine générale

L'état des lieux de la simulation en médecine dans le monde se caractérise par une différence de l'accès à simulation selon les régions. En Amérique du Nord : la simulation est un outil pédagogique à part entière. Elle est utilisée de manière routinière dans l'enseignement initial des professions médicales et paramédicales. La simulation est utilisée pour la certification ou la recertification des professionnels de santé, une accréditation des centres est possible au moyen de référentiels validés.

Cependant en Europe, On y constate un développement plus récent qu'en Amérique du Nord. La simulation est un outil pédagogique bien implanté, mais les inégalités sont importantes [1].

Les méthodes de simulation les plus utilisés par les résidents d'ophtalmologie de notre échantillon étaient les Wet lab (40 %) et le simulateur de chirurgie virtuelle 'EyeSi' (36 %).

Ces résultats concordent parfaitement avec les données de littératures, notamment la revue de littérature réalisée de Lee et coll. [92] et l'étude d'Ahmed et coll. qui était basée sur un questionnaire évaluant les différents moyens de simulations utilisés par plusieurs établissements aux États-Unis pendant 5 ans [112] (Tableau 15)

Tableau 15 : Comparaison de nos résultats avec ceux de la littérature concernant les méthodes de simulation les plus utilisés en Ophtalmologie.

	Wet-lab	EyeSI	Dry-lab	Kitaro
	Le plus utilisé *	Le 2 ^{ème} utilisé	Le 3 ^{ème} utilisé *	
Lee et Coll [92]	Le 2 ^{ème} évalué après EyeSI ×	après Wet-lab * Le 1 ^{er} évalué ×	et le 3 ^{ème} évalué ×	Non évalué
Ahmed et Coll [112]	Non évalué	Le plus utilisé *	Non évalué	Non évalué
Notre étude	Le plus utilisé * (40 %)	Le deuxième utilisé après Wet-lab * (36 %)	Le dernier utilisé* (4%)	Le dernier utilisé* (4%)

*Par rapport à son utilisation dans les programmes de formation de résidanat

×Par rapport à son évaluation dans les études d'évaluation des moyens de formations chirurgicaux

2. Questions sur la chirurgie de cataracte :

Concernant l'analyse des questions relatives à la chirurgie de cataracte, nous avons trouvé que la première chirurgie de cataracte réalisée par les chirurgiens inclus dans notre étude était l'EEC (82% des chirurgiens). Seul 3% des résidents ont commencé leur apprentissage sur simulateur "EyeSI", alors que 15 % ont commencé directement par phacoémulsification.

L'analyse du niveau des chirurgiens ; qui ont commencé leur apprentissage par EEC ; en chirurgie de cataracte par cette technique a révélé que 62% d'entre eux peuvent être considérés comme étant des expérimentés à la technique vu qu'ils ont réalisé plus de 30 chirurgies par EEC.

La chirurgie de cataracte par EEC reste relativement fréquente dans notre contexte en se comparant avec les pays occidentaux, cela est lié essentiellement au retard de consultation de la plupart de nos patients et particulièrement ceux venant de la campagne. En pratique la chirurgie de cataracte par EEC ne demande pas autant de compétence et de dextérité que la phacoémulsification. Cependant, cette technique permet aux chirurgiens novices de se familiariser avec la chirurgie de cataracte, avec le microscope et d'acquérir un certain nombre de compétences avant de passer à la phacoémulsification, élément qui a remplacé en quelque sorte l'apprentissage par simulation sur wet lab ou sur simulateur de réalité virtuelle dans notre contexte.

L'analyse des étapes de la phacoémulsification a montré que les étapes les plus difficiles à apprendre pour les résidents sont : Capsulorhexis et Cracking. Cela concorde avec le résultat de plusieurs études qui ont montré aussi que le capsulorhexis et la phacoémulsification proprement dite sont les 2 étapes les plus difficiles à maîtriser en chirurgie de cataracte par phacoémulsification [88] [111] (Tableau 16) . Ceci a un

impact important lors du développement des programmes de formation des résidents en donnant une grande importance à ses 2 étapes.

Tableau 16 : Comparaison de nos résultats avec ceux de la littérature concernant les étapes les plus difficiles à apprendre :

	Phacoémulsification	Capsulorhéxis	Irrigation/ Aspiration	Insertion IOL	Hydrodissection
Dooley, et Coll [88]	Étape la plus difficile	Deuxième étape difficile	Troisième difficile étape	Quatrième étape difficile	Cinquième étape difficile
Danny Siu- Chun Ng et coll [111]	Étape la plus difficile	Deuxième étape difficile	Quatrième étape difficile	Cinquième étape difficile	Troisième difficile étape
Notre étude	Étape la plus difficile (31%)	Deuxième étape difficile (26%)	Troisième difficile étape (16%)	Non évalué	Quatrième étape difficile (5%)

3. Simulateur EyeSi :

Les questions relatives au simulateur EyeSI ont montré que 74% des résidents ont déjà utilisé le simulateur EyeSI avec 64% l'ont utilisé durant leur 3 premières années. Plusieurs études ont montré l'importance d'implanter la formation sur simulateur dès le début du résidanat. Ainsi, Une étude réalisée par Roohipoor R et coll [91] a permis de conclure que les scores d'évaluation des modules sur le simulateur EyeSI calculés dans le début du résidanat peuvent prédire la future performance chirurgicale. Un tel résultat permettra de savoir dès le début du cursus de formation, les résidents qui nécessitent un entraînement supplémentaire avant de passer à la chirurgie en vraie vie et peut être un suivi plus rapproché lors de la phacoémulsification sur patient réel. Une autre étude réalisée par Saleh GM et coll [114] a montré qu'une formation structurée et supervisée en simulateur de réalité virtuelle peut offrir un niveau significatif de transfert de compétences aux résidents débutants .

Dans notre étude seulement 16% des résidents ont l'EyeSI incorporé dans leur programme de formation de résidanat. La majorité a utilisé le simulateur lors d'un congrès ou journées scientifiques (64%). Dans un questionnaire réalisé par Yasir Ahmed et coll [112] mené sur des résidents d'ophtalmologie, 23% des résidents (13/56) ont le simulateur EyeSI incorporé dans leur programme de formation. L'analyse des résultats a montré également que seulement 40% des résidents ont terminé tous les modules de la simulation. De plus, La majorité des résidents (76%) ont passé moins de 10 heures sur le simulateur. Ceci permet de conclure que malgré la place que commence à gagner le simulateur dans la formation en résidanat, son accessibilité reste toujours limitée. Parmi les facteurs qui limitent son accessibilité selon le questionnaire réalisé par Yasir Ahmed et coll [112] : Le coût était le facteur principal selon 98% des résidents (41/42)

suivi par le réalisme insuffisant du simulateur (26% soit 11 /42), et la validité non encore prouvée des simulateurs de réalité virtuelle (21%, 9/42). (Tableau 17)

Tableau 17 : Comparaison de nos résultats avec ceux de la littérature concernant l'accès au simulateur EyeSI :

EyeSI incorporé dans le programme de résidanat	Facteur limitant l'accessibilité du simulateur EyeSI
Ahmed et coll [112] 23% *	Coût : 98%* Le réalisme insuffisant du simulateur : 26% * La validité non encore prouvée des simulateurs de réalité virtuelle : 21%
Notre étude 16% *	Coût : 95%* Le réalisme insuffisant du simulateur : 12% *

*Pourcentage par rapport aux résidents qui ont répondu au questionnaire

4. Partie courbe d'apprentissage dans la chirurgie de phacoémulsification :

Notre étude montre que le groupe qui a fait la simulation nécessite moins de nombre de phacoémulsification pour diminuer le stress et augmenter la confiance. Plusieurs études confirment notre résultat. Ainsi l'étude réalisé par Ng D et coll [111] a montré que les résidents qui avaient suivi la formation de simulation Eyesi étaient plus confiants dans l'exécution des tâches les plus difficiles perçues pendant la phacoémulsification . L'étude réalisée par Pokroy et coll. [97] a montré que le groupe des résidents "simulator-trained" avait une courbe d'apprentissage plus courte durant les 50 premiers cas de cataracte par phacoémulsification, l'augmentation de la confiance du chirurgien était parmi les explications données pour cette meilleure performance du groupe simulation.

Les autres résultats relatifs à l'acquisition de nouvelles compétences et l'accélération de la courbe d'apprentissage des chirurgiens novices sont représentés dans le tableau ci-dessous (tableau 18), ils sont également comparés aux résultats des grandes études traitants cet aspect d'apprentissages.

Dans le programme du simulateur EyeSI, il y a un module d'anti-tremblement qui permet d'entraîner l'apprenant sur la précision du mouvement en intraoculaire et un module des pinces qui permet de l'entraîner à la coordination des 2 mains et des 2 pieds. Ces 2 modules ont montré leur validité de construction dans plusieurs études Mahr [61] Le et Coll [80] Nathoo et Coll. [115] Rohipoor et al. [91], cela vient approuver les résultats obtenus dans notre étude.

Tableau 18 : Comparaison de nos résultats par rapport à ceux de la littérature concernant la courbe d'apprentissage, temps opératoire et le pourcentage d'utilisation d'ultrasons.

Études	Paramètres mesurés	Résultats obtenus
Belyea et coll.[96]	<ul style="list-style-type: none"> -Temps de la chirurgie. -Pourcentage de puissance d'US utilisés -Temps de la phaco ajusté (<i>multiplication du temps avec la puissance</i>), -Taux et grade des complications (<i>1 à 4 selon la sévérité de la complication</i>). 	<ul style="list-style-type: none"> -Une amélioration significative du simulator-groupe uniquement pour : temps de la chirurgie, pourcentage de puissance d'US utilisés, temps de phaco ajusté -Pas de différences significatives ont été trouvées entre les 2 groupes dans le taux et grade des complications.
Pokroy al [97]	<ul style="list-style-type: none"> -La durée de l'opération 	<ul style="list-style-type: none"> -Une courbe d'apprentissage plus courte et un temps opératoire plus réduit pour le deuxième groupe ("simulator-trained") par rapport au premier.
Elizabeth et coll. [98]	<ul style="list-style-type: none"> -Temps opératoire de la chirurgie 	<ul style="list-style-type: none"> -Réduction significative sur le plan statistique du temps opératoire.
Bisol et coll [99]	<ul style="list-style-type: none"> -Création du capsulorhéxis sur des capsules de haute tension. 	<ul style="list-style-type: none"> -Amélioration des performances des résidents dans la création du capsulorhéxis sur des capsules de haute tension après introduction de l'EyeSI.
Feudner et coll [100]	<ul style="list-style-type: none"> -Réalisation du capsulorhéxis sur les yeux de porcs. 	<ul style="list-style-type: none"> Amélioration significative des scores de réalisation du capsulorhéxis chez le groupe qui a bénéficié de l'entraînement sur simulateur par rapport au groupe de contrôle.
Notre étude	<ul style="list-style-type: none"> - Diminuer le temps nécessaire pour la chirurgie 	<ul style="list-style-type: none"> Groupe simulation préalable : 28% des résidents ont nécessité moins de 10 phacoémulsifications par rapport à

	11% dans le groupe qui n'a jamais fait de simulation.
- Diminuer le pourcentage d'ultrasons utilisées	Groupe simulation préalable : 32 % des résidents ont nécessité moins de 10 phacoémulsifications par rapport à 22 % dans le groupe sans simulation préalable
- Accélérer la courbe d'apprentissage	Groupe simulation préalable : 28 % des résidents ont nécessité moins de 10 phacoémulsifications par rapport à 22 % dans le groupe sans simulation préalable
-Réaliser un Capsulorhéxis circulaire de 5-6mm	Groupe simulation préalable : 60% des résidents ont nécessité moins de 10 phacoémulsifications par rapport à 22 % dans le groupe sans simulation préalable.

5. Les complications :

La majorité des études se sont basées sur l'évaluation de la fréquence des ruptures capsulaires postérieures car cette complication est la plus fréquente et elle conditionne aussi le risque d'évolution vers d'autres complications (issu du vitré, décollement de rétine ...). Notre étude a montré une diminution plus importante des nombres de ruptures capsulaires postérieures avant les 10 premières phacoémulsifications et après plus de 10 phacoémulsifications chez le groupe qui a fait la simulation par rapport à celui qui ne l'a jamais fait, témoignant ainsi d'une amélioration de la courbe d'apprentissage (Tableau 19). Nous pouvons dire que la simulation est un outil pédagogique important qui permet de réduire le nombre de phacoémulsifications nécessaires pour minimiser le risque d'une rupture capsulaire postérieure. Ce résultat rejoint les résultats de plusieurs publications qui s'accordent sur l'effet de l'introduction du simulateur EyeSI dans la formation sur la diminution du taux de ruptures capsulaires postérieures.

Concernant les traumatismes iatrogènes, notamment les lésions descémétiques, nous avons noté une fréquence plus basse chez le groupe qui a fait la simulation avant la phacoémulsification par rapport au groupe qui ne l'a jamais fait, Cela d'une part. d'autre part, nous avons remarqué que la courbe d'apprentissage de diminution de ses traumatismes iatrogènes du groupe qui a fait la simulation est plus rapide que celle du groupe qui n'a jamais fait de simulation. A ce sujet, plusieurs études ont rapporté que l'entraînement sur simulateur améliore les performances chirurgicales, réduit la courbe d'apprentissage et diminue les risques de traumatismes iatrogènes [97]. En outre, notre étude a révélé également que les résidents qui ont fait la simulation arrivent à gérer leurs complications après peu de phaco réalisées.

**Tableau 19 : Comparaison de nos résultats par rapport à ceux de la littérature
concernant les complications :**

Études	Résultats mesurés	Résultats obtenus
Staropoli et coll. [90]	<ul style="list-style-type: none"> -Rupture capsulaire postérieure -Issu du vitré -Persistance des fragments cristalliniens -Rupture Zonulaire -Endophtalmie -Luxation de l'implant -Reprise chirurgicale 	Le taux de complications était de 2,1% chez le groupe 'EyeSi-trained' par rapport à 5,1% chez le groupe 'EyeSi-naïve'
Ferris et coll. [67]	Taux de ruptures capsulaires postérieures avant et après EyeSI	Réduction de 38% de ruptures capsulaires postérieures après l'implantation du simulateur EyeSI
Lucas et coll [68]	<ul style="list-style-type: none"> -Rupture capsulaire postérieure. -Aphakie. -Passage de fragments nucléaires dans le vitré. -Conversion en EEC 	Taux de complications était plus bas dans le groupe qui a déjà utilisé le simulateur (27.14% vs 12.86%)
McCannel et coll [93]	Le taux de capsulorhéxis curviligne continu (CCC) irrégulier.	Réduction de 68% dans le taux de CCC irrégulier après intervention du simulateur EyeSI.
Baxter et coll [94]	Taux de ruptures capsulaires postérieures	Taux de complications après le programme de formation intensif est plus bas que la littérature (0,66 % vs 3.77-7.17%)
Notre étude	Taux de ruptures capsulaires postérieures	<p>Groupe simulation préalable : 24% aucune ruptures capsulaires postérieures durant les 10 phacoémulsification et 44% après plus de 10 phacoémulsification.</p> <p>Groupe sans simulation préalable : tous les résidents ont au moins une fois fait une rupture capsulaire durant les 10 phacoémulsifications.</p>

6. Les avis des résidents par rapport au simulateur :

Nous notons que la majorité des résidents considèrent que le simulateur est très fidèle et réaliste. Ceci est concordant avec le questionnaire réalisé par Yasir Ahmed [112] qui a rapporté que seulement 26% de réponse qui jugent que le simulateur EyeSI a un réalisme insuffisant .

Nous remarquons également que la majorité des résidents considèrent qu'il y a une grande corrélation entre la pratique sur simulateur EyeSI et le niveau en chirurgie en vraie vie. Ainsi, Thomsen ASS et coll. [102] ont montré que la performance sur le simulateur EyeSi est significativement et fortement corrélée à la performance chirurgicale dans la vie réelle.

La majorité de nos résidents pensent que le simulateur permet une bonne autoévaluation de la chirurgie de phacoémulsification. Ils pensent également, qu'il faut introduire de façon obligatoire le simulateur dans le programme de formation de résidanat.

Dans l'étude de l'étude de Koch F et coll. [117], La majorité des participants des deux groupes (groupe chirurgiens expérimentés et groupe des chirurgiens débutants) ont accepté et hautement apprécié la simulation de réalité virtuelle pour l'évaluation et la formation ophtalmologique. De même les résidents de l'étude réalisée par Staropoli et coll [90] ont montré une grande importance à l'introduction de la simulation chirurgicale dans la formation de résidanat. (Tableau 20)

**Tableau 20: Comparaison de nos résultats avec ceux de la littérature concernant
l'impression des utilisateurs sur le simulateur de réalité virtuelle le EyeSi :**

	Réalisme et fidélité du simulateur	Corrélation entre l'EyeSI et la chirurgie en vraie vie	Introduire l'EyeSI dans la formation chirurgicale
Ahmed et coll [112]	Très fidèle : 74%*	Non évalué	Non évalué
Thomsen ASS et coll [102]	Non évalué	Grande corrélation	Non évalué
Koch F et coll. [117]	Non évalué	Non évalué	Oui
Staropoli et coll [90]	Non évalué	Non évalué	Oui
Notre étude	Très fidèle	Grande corrélation	Oui

*Pourcentage par rapport aux résidents qui ont répondu au questionnaire

XI. CONCLUSION

La simulation de la phacoémulsification par réalité virtuelle est un moyen pédagogique émergeant important dans la formation chirurgicale des médecins résidents. De plus en plus de centres de formation en ophtalmologie commencent à s'équiper de simulateurs de réalité virtuelle et surtout de l'EyeSI pour accompagner la formation du nombre augmentant des résidents, éviter l'apprentissage direct sur le patient et créer un terrain de formation convenable pour la bonne maîtrise des étapes chirurgicales par la répétition sans risque pour le patient.

Plusieurs études dans la littérature rejoignent nos résultats et montrent l'intérêt de la simulation par réalité virtuelle dans l'amélioration de la courbe d'apprentissage ainsi que dans la réduction du taux de complications, du temps opératoire et d'utilisation d'ultrasons.

Ceci renforce l'intérêt d'introduire le simulateur EyeSI dans la formation chirurgicale des résidents en ophtalmologie comme moyen pédagogique primordial dans l'initiation, la maîtrise et l'évaluation de la chirurgie en ophtalmologie. Cette introduction doit se faire selon des programmes bien établis en EyeSI comportant des modules qui ont montré leur validité de construction et avec des seuils de score bien précis pour passage d'une étape à l'autre.

Nous souhaitons voir, dans un avenir proche, la simulation par réalité virtuelle, devenir un pilier de la formation chirurgicale des résidents en Ophtalmologie du Maroc.

XII. RESUME

Résumé :

Mots clés : Simulation par réalité virtuelle, Phacoémulsification , formation,

Introduction :

La chirurgie de la cataracte est l'une des techniques chirurgicales les plus importantes à enseigner lors du cursus de résidanat en ophtalmologie. Cependant, son apprentissage est long, difficile et non dénué de risques pour le patient. Beaucoup d'études se sont ainsi intéressées à l'intérêt de la simulation par réalité virtuelle par le simulateur EyeSI dans la formation chirurgicale des ophtalmologistes en formation.

Nous avons mené un travail sur l'influence de la simulation de la phacoémulsification en réalité virtuelle sur les performances chirurgicales des résidents d'ophtalmologie au Maroc.

Matériels et méthodes :

Étude transversale basée sur un questionnaire envoyé par courriel et par les différents réseaux aux résidents d'ophtalmologie et jeunes ophtalmologistes du Maroc. Le sondage en ligne était mené pendant 7 mois. Nous avons évalué l'effet de la simulation sur le temps nécessaire pour la chirurgie, le pourcentage d'ultrasons utilisés, la courbe d'apprentissage et les complications.

Résultats :

34 résidents inclus dans l'étude ont été divisés en 2 groupes : le premier ayant fait la phacoémulsification associée à la simulation (groupe simulation, n=25) et le deuxième seulement la phacoémulsification (groupe non-simulation n= 9). La plupart des réponses émanaient des résidents du CHU Hassan II de Fès avec un taux de réponse de 41% , suivi du CHU Ibn Rochd de Casablanca avec un taux de réponse de 29 % , puis

le CHU Avicenne de Rabat avec 15 % de réponses , puis CHU d'Oujda, de Marrakech et enfin quelques jeunes spécialistes de Tanger. Le pourcentage des résidents qui ont diminué le temps nécessaire pour la chirurgie et le pourcentage d'ultrasons utilisées en moins de 10 phacoémulsifications était respectivement 28% et 32% dans le 1^{er} groupe par rapport à 11% et 22 % dans le 2^{ème} groupe. Concernant l'accélération de la courbe d'apprentissage, 28% des chirurgiens novices avaient besoins de moins de 10 phacoémulsifications dans le groupe simulations contre 22 % dans le groupe non-simulation.

De plus, les résidents qui ont fait la simulation ont maîtrisé la manipulation du microscope, la navigation dans le segment antérieur, la coordination entre les 2 mains et les 2 pieds et le tremblement des mains plus précocement par rapport aux résidents qui n'ont pas utilisé le simulateur. Pour les ruptures capsulaires postérieures (RCP) durant les 10 premières phacoémulsification, Dans le groupe simulation 24% n'ont jamais fait de RCP par rapport à 100% dans le groupe non simulation qui ont au moins fait une RCP.

Discussion :

La formation chirurgicale est basée classiquement sur le modèle traditionnel de Halsted où le novice acquiert des connaissances chirurgicales en lisant, en observant et en opérant un patient tout en étant supervisé par un chirurgien sénior. Cependant, ce modèle devient de plus en plus dépassé vu le risque important pour les patients et le nombre augmentant des résidents en formation. Plusieurs études dans la littérature rejoignent nos résultats et montrent l'intérêt de la simulation par réalité virtuelle dans l'amélioration de la courbe d'apprentissage ainsi que dans la réduction du taux de complications, du temps opératoire et d'utilisation d'ultrasons.

Conclusion :

Malgré son caractère descriptif, les résultats de notre études sont concordants avec ceux la littérature et montrent toute la place et l'intérêt d'introduire le simulateur EyeSI dans la formation chirurgicale des résidents en ophtalmologie sous forme de programmes bien établis et précis.

Abstract

Title: Influence of virtual reality phacoemulsification simulation on the surgical performance of ophthalmology residents

Key Words: Virtual reality simulation, Phacoemulsification, Training

Introduction:

Cataract is one of the most important surgery to teach and master in a residency curriculum of ophthalmology. However, its learning is difficult, long and can be even risky for patients during the practice by novice surgeons. Many studies have thus focused on the interest of virtual reality simulation by the EyeSI simulator in the surgical training of ophthalmologists in training.

We conducted a study on the influence of virtual reality phacoemulsification simulation on the surgical performance of ophthalmology residents in Morocco.

Materials and Methods:

Cross-sectional study based on a survey sent by email and through the different social media to ophthalmology residents and young ophthalmologists in Morocco. The online survey was conducted for 7 months. We evaluated the effect of simulation on the time needed for surgery, the percentage of ultrasound used, the learning curve and complications.

Results :

34 residents included in the study were divided into 2 groups: the first having done the phacoemulsification associated with the simulation (simulator group, n=25) and the second only the phacoemulsification (non-simulator group n=9).

Most of the responses came from residents of the Hassan II University Hospital of Fez with a response rate of 41%, followed by the Ibn Rochd University Hospital of Casablanca with a response rate of 29%. In the third place, the Avicenne University Hospital of Rabat with 15% of responses, then the University Hospital of Oujda, Marrakech and finally a few young specialists from Tangier.

Le pourcentage des résidents qui ont diminué le temps nécessaire pour la chirurgie et le pourcentage d'ultrasons utilisées en moins de 10 phacoémulsifications était respectivement 28% et 32% dans le 1^{er} groupe par rapport à 11% et 22 % dans le 2^{ème} groupe. Concernant l'accélération de la courbe d'apprentissage, 28% des chirurgiens novices avaient besoins de moins de 10 phacoémulsifications dans le groupe simulations contre 22 % dans le groupe non-simulation.

The percentage of residents who decreased the time required for surgery and the percentage of ultrasound used in less than 10 phacoemulsifications were 28% and 32% in the first group respectively compared to 11% and 22% in the second group. Regarding the acceleration of the learning curve, 28% of the novice surgeons needed less than 10 phacoemulsifications in the simulator group versus 22% in the non-simulator group.

In addition, residents who did the simulation mastered microscope manipulation, anterior segment navigation, 2-hand and 2-foot coordination, and hand tremor earlier compared with residents who did not use the simulator. For posterior capsular ruptures (PCR) during the first 10 phacoemulsification, in the simulator group 24% never performed PCR compared to 100% in the non-simulator group who performed at least one PCR.

Discussion:

Surgical training is classically based on the traditional Halsted model where the novice acquires surgical knowledge by reading, observing and operating on a patient while being supervised by a senior surgeon. However, this model is becoming increasingly outdated given the significant risk to patients and the increasing number of residents in training. Several studies in the literature agree with our results and show the interest of virtual reality simulation in improving the learning curve as well as in reducing the rate of complications, operating time and use of ultrasound.

Conclusion :

Despite its descriptive character, the results of our study are concordant with those of the literature and show the place and the interest to introduce the EyeSI simulator in the surgical curriculum of the residents in ophthalmology in form of well-established training programs .

ملخص

العنوان: تأثير المحاكاة بالواقع الافتراضي على الأداء الجراحي للمقيمين بطب وجراحة العيون
الكلمات الأساسية: المحاكاة بالواقع الافتراضي، جراحة المياه البيضاء بالموجات فوق الصوتية، التكوين.

مقدمة:

تعتبر جراحة داء المياه البيضاء من الجراحات المهمة في مشوار التعلم لطبيب مقيم بمصلحة طب وجراحة العيون. يواكب هذا التعلم مجموعة من الإكراهات من بينها: صعوبة العملية الجراحية، طول مدة العملية مع عدم الخلو من المخاطر بالنسبة للمريض. مجموعة من الدراسات أجريت من أجل إبراز أهمية المحاكاة بالواقع الافتراضي في تكوين الطبيب المقيم بطب وجراحة العيون. بدورنا أجرينا دراسة لإبراز دور المحاكاة الطبية بالواقع الافتراضي في التأثير في الأداء الجراحي لمقيمي طب وجراحة العيون.

أساليب الدراسة:

اعتمدت هذه الدراسة على استطلاع لمدة 7 شهور أجري للمقيمين والأخصائيين الحديثي التخرج في طب وجراحة العيون. قيما من خلال هاته الدراسة تأثير المحاكاة على مدة الجراحة ونسبة الموجات فوق الصوتية المستخدمة خلال هذه الجراحة والمضاعفات الجراحية والمدة اللازمة للتعلم.

نتائج:

أبرزت النتائج التي خلصت إليها الدراسة أن:

-نسبة المقيمين الذين تمكنوا من تقليل مدة العملية بعد أقل من 10 عمليات جراحية: 28% بالنسبة للفئة التي استعملت المحاكاة مقارنة ب 11% بالنسبة للفئة التي لم تستعمل المحاكاة.

-نسبة المقيمين الذين تمكنوا من تقليل نسبة استعمال الموجات فوق الصوتية بعد أقل من 10 عمليات جراحية: 32% بالنسبة للفئة التي استعملت المحاكاة مقارنة ب 22% للفئة التي لم تستعمل المحاكاة.

- نسبة المقيمين الذين تمكنوا من تسريع التعلم بعد أقل من 10 عمليات جراحية: 28% بالنسبة للفئة التي استعملت المحاكاة مقارنة ب 22 % بالنسبة للفئة التي لم تستعمل المحاكاة.

- كذلك المقيمين الذين استعملوا المحاكاة تمكنوا من اتقان استعمال المجهر الجراحي والتناسق بين اليدين والرجلين والنقص من ارتجاف اليدين مبكرا مقارنة بالمقيمين الذين لم يستعملوا المحاكاة.

بالنسبة للمضاعفات بعد أقل من 10 عمليات جراحية، أثبتت الدراسة أن جميع المقيمين الذين لم يستعملوا المحاكاة قاموا على أقل مرة واحدة يتمزيق الغشاء الخلفي لبلورة العين مقارنة ب 24 % من المقيمين الذين استعملوا المحاكاة الذين لم يقوموا بأي مضاعفة.

خلاصة:

بحثنا يوافق نتائج مجموعة من الدراسات التي أجريت من أجل إبراز أهمية المحاكات بالواقع الافتراضي في تكوين الطبيب المقيم بطب وجراحة العيون والتي توضح أهمية إحداث هذا النوع من المحاكاة في هذا التكوين من خلال برامج محددة مسبقا وضرورية في مسار التعلم.

XIII. REFERENCES

1. Pr Jean-Claude Granry et le Dr Marie-Christine Moll. État de l'art (national et international) en matière de pratiques de simulation dans le domaine de la santé . Janvier 2012 .
2. BOUCHET. A, CUIILLERT. J Anatomie topographique descriptive et fonctionnelle, 2ème édition, Deuxième partie, la face la tête et les organes de sens (1) ,499-540.
3. LAHLAIDI. A. Anatomie topographique trilingue ; volume II.
4. Kamina P. Anatomie: introduction à la clinique .vol 10. Tête et cou .Tome 2 . Nerfs crâniens et organes des sens.paris:Maloine ,1996.190 p.
5. M Santallier , J Péchereau & Péchereau .Anatomie pour les écoles d'orthoptie , v 1.0 .Ed A & J Péchereau .Nantes ,2008: 186 .
6. C. Allouch-Nahmias, P. Goldschmit, V. Borderie, O. Touzeau, T. Gaujoux, L. Laroche, I. Goemaere, J. Rault . Anatomie de la cornée. Elsevier Masson 2011.
7. Harminder S Dua 1, Lana A Faraj, Dalia G Said, Trevor Gray, James Lowe . Human corneal anatomy redefined: a novel pre-Descemet's layer (Dua's layer). 2013 Sep;120(9):1778-85.
8. D. Brémond-Gignac, H. Copin, L. Laroche, S. Milazzo . Cristallin et zonule : anatomie et embryologie. Elsevier Masson 2012.
9. Leonard A. Levin , Siv F. E. Nilsson , James Ver Hoeve , Samuel M. Wu . ADLER'S PHYSIOLOGY OF THE EYE , 11th ed. Section 2 : Physiology of optical media , chapter 5 : The Lens .ISBN:978-0-323-05714-1.
10. Louis B. Cantor, ,Christopher J. Rapuano, , Colin A. McCannel, Basic and Clinical Science Course: 2019/2020 ,section 2 : Fundamentals and principals , Chapter 2 et 10.

11. Louis B. Cantor, Christopher J. Rapuano, Colin A. McCannel, Basic and Clinical Science Course: 2019/2020, section 11 : lens and cataracts, chapter 2 and 3.
12. Myron Yanoff, Jay S. Duker, MD, Ophthalmology, Fifth edition, Part 5 : the lens.
13. John V. Forrester, Andrew D. Dick, Paul G. McMenamin, Fiona Roberts, Eric Pearlman, The Eye: Basic Sciences in Practice, chapter 4: the lens, Fourth edition 2016, Elsevier, ISBN 978-0-7020-5554-6.
14. Louise A. Bye, Neil C. Modi, Miles Stanford: Basic Sciences for Ophthalmology, Oxford university press.
15. Senile Cataract (Age-Related Cataract): Practice Essentials, Background, Pathophysiology [Internet]. [cité 20 févr 2021]. Disponible sur: <https://emedicine.medscape.com/article/1210914-overview#a6>
16. Technique chirurgicale (chirurgie de la cataracte) – Docteur Damien Gatinel [Internet]. [cité 5 févr 2021]. Disponible sur: <https://www.gatinel.com/en/chirurgie-de-la-cataracte/techniques-chirurgicale/>
17. Phaco-emulsification and aspiration. A new technique of cataract removal. A preliminary report – PubMed [Internet]. [cité 5 févr 2021]. Disponible sur: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/6028631/>
18. Phacoémulsification – EM consulte [Internet]. [cité 5 févr 2021]. Disponible sur: <https://www.em-consulte.com/article/1102001/phacoemulsification>
19. Crespeau H, Pantier C. La chirurgie de la cataracte. Vol. 36, Interbloc. 2017. 212-217 p.
20. Neuhann T. Theory and surgical technique of Capsulorhexis. Klin Monatsbl Augenheilkd. 1987;190(6):542-5.

21. Gimbel H V. Divide and conquer nucleofractis phacoemulsification: Development and variations. J Cataract Refract Surg. 1991;17(3):281-91.
22. Shepherd JR. In situ fracture. J Cataract Refract Surg. 1990;16(4):436-40.
23. Maloney WF, Dillman DM, Nichamin LD. Supracapsular phacoemulsification: A capsule-free posterior chamber approach. J Cataract Refract Surg. 1997;23(3):323-8.
24. Extraction extra-capsulaire avec implantation en chambre postérieure – EM consulte [Internet]. [cité 20 févr 2021]. Disponible sur: <https://www.em-consulte.com/article/7739/extraction-extra-capsulaire-avec-implantation-en-c>
25. Extraction intracapsulaire du cristallin – EM consulte [Internet]. [cité 20 févr 2021]. Disponible sur: <https://www.em-consulte.com/article/7737/extraction-intracapsulaire-du-cristallin>
26. Trinh L, Denoyer A, Auclin F, Baudouin C. Chirurgie de la cataracte assistée par laser. J Fr Ophtalmol. sept 2015;38(7):646-55.
27. Conrad-Hengerer I, Al Juburi M, Schultz T, Hengerer FH, Dick BH. Corneal endothelial cell loss and corneal thickness in conventional compared with femtosecond laser-assisted cataract surgery: Three-month follow-up. J Cataract Refract Surg. sept 2013;39(9):1307-13.
28. Chiniara G. Simulation médicale pour acquisition des compétences en anesthésie. In: Société française d'anesthésie et de réanimation, ed. Congrès national d'anesthésie et de réanimation 2007. Conférences d'actualisation. Paris: SFAR; 2007. p. 41–9. In.
29. Rosen KR. The history of medical simulation. J Crit Care 2008;23(2):157–66.

30. Rattner Gelbart N. The king's midwife. A history and mystery of madame du Coudray. Berkeley: University of California Press; 1998. Pages: 358 . ISBN: 9780520221574.
31. Oroma Nwanodi . Simulation in General Obstetrics and Gynecology . January 2017 .Journal of Women's Health, Issues & Care.
32. Hoffman KI, Abrahamson S. The « cost effectiveness » of Sim One. J Med Educ 1975;50(12 Pt1):1127-8.
33. PETER DOCKRILL Disponible sur : <https://www.sciencealert.com/how-dead-girl-paris-ended-up-most-kissed-lips-in-history-l-inconnue-de-la-seine-resuscianne-cpr-annie-death-mask>.
34. Huwendiek S, De leng BA, Zary N, Fischer MR, Ruiz JG, Ellaway R. Towards a typology of virtual patients. Med Teach 2009;31(8):743-8.
35. Guide de la simulation. Centre de simulation et d'innovation en science de la santé . Faculté de médecine et de pharmacie Marrakech
36. Blum MG, Powers TW, Sundaresan S. Bronchoscopy simulator effectively prepares junior residents to competently perform basic clinical bronchoscopy. Ann Thorac Surg 2004;78(1): 287-91.
37. Wayne DB, Butter J, Siddall VJ, Fudala MJ, Linqvist LA, Feinglass J, et al. Simulation-based training of internal medicine residents in advanced cardiac life support protocols: a randomized trial. Teach Learn Med 2005;17(3):210-6.
38. Meller G. A typology of simulators for medical education. J Digit Imaging 1997;10(3 Suppl 1): 194-6.
39. Barsuk JH, McGaghie WC, Cohen ER, O'Leary KJ, Wayne DB. Simulation-based mastery learning reduces complications during central venous catheter insertion in a medical intensive care unit. Crit Care Med 2009; 37 (10):2697-701.

40. Barsuk JH, Cohen ER, Feinglass J, McGaghie WC, Wayne DB. Use of simulation-based education to reduce catheter-related bloodstream infections. *Arch Intern Med* 2009;169(15):1420-3.
41. Seymour NE. VR to OR: a review of the evidence that virtual reality simulation improves operating room performance. *World J Surg* 2008;32(2):182-8.
42. Draycott TJ, Crofts JF, Ash JP, Wilson LV, Yard E, Sibanda T, et al. Improving neonatal outcome through practical shoulder dystocia training. *Obstet Gynecol* 2008;112(1):14-20.
43. VRmagic Co. Eyesi Slit Lamp disponible sur : https://www.vrmagic.com/wp-content/uploads/2019/09/eyesl_slit_lamp_brochure_EN_WEB.pdf.
44. Lucas Holderegger Ricci1, Caroline Amaral Ferraz1 Simulation models applied to practical learning and skill enhancement in direct and indirect ophthalmoscopy: a review . *Arq Bras Oftalmol*. 2014;77(5):334-8.
45. EYE examination Simulator II Disponible sur : https://www.kyotokagaku.com/products_data/manual/m82_manual.pdf.
46. VRmagic Co. Direct Ophthalmoscope Simulator. http://www.vrmagic.com/fileadmin/downloads/simulator_brochures/Eyesi_Direct_Brochure_131029_EN_WEB_DP.pdf.
47. OtoSim Co. disponible sur : <https://www.otosim.com/ophtsim/?creative=409569669116&keyword=ophtalmoscope%20simulator&matchtype=b&network=g&device=c>.
48. VRmagic Co. Indirect Ophthalmoscope Simulator Disponible sur https://www.vrmagic.com/wp-content/uploads/2019/09/Eyesi_Indirect_Brosch%C3%BCre_EN_WEB.pdf.
49. Lewallen S. A simple model for teaching indirect ophthalmoscopy. *Br J Ophthalmol*. Oct 2006;90(10):1328-9.

50. Lantz PE. A simple model for teaching postmortem monocular indirect ophthalmoscopy. *J Forensic Sci*, May 2009, Vol. 54, No. 3.
51. Colt HG, Crawford SW, Galbraith O 3rd. Virtual reality bronchoscopy simulation: a revolution in procedural training. *Chest*. 2001;120:1333-1339.
52. Sikder S, Tuwairqi K, Al-Kahtani E, et al. Surgical simulators in cataract surgery training. *Br J Ophthalmol*. 2014;98:154-158.
53. J. Colné, J.-B. Conart, A. Luc , C. Perrenot , J.-P. Berrod , K. Angioi-Duprez
Simulateur de chirurgie de cataracte EyeSi : validité de construction des modules capsulorhexis, phacoémulsification et aspiration des masses cristalliniennes .
Journal français d'ophtalmologie (2019) 42, 49—56.
54. Eyesi Simulator . VRmagic Co. disponible sur :
<https://www.vrmagic.com/medical-simulators/eyesi-surgical>.
55. Per Soderberg ,Markus Erngrund, Eva Skarman , Leif Nordh , Carl-Gustaf laurel .
VR-simulation cataract surgery in non-experienced trainees , evolution of surgical skill
56. Per G Söderberg^{1§}, Carl-Gustaf Laurell^{2§}, Markus Erngrund², Eva Skarman^{3§}, Leif Nordh^{3§}. Learning motor skills in virtual reality and its evaluation . Course ESCRS: 2011
57. Söderberg et al. – 2008 – Measuring performance in virtual reality phacoemul.pdf.
58. Randleman JB, Wolfe JD, Woodward M, Lynn MJ, Cherwek DH, Srivastava SK (2007)
The resident surgeon phacoemulsification learning curve. *Arch Ophthalmol* 125:1215-1219.
59. Rowden A, Krishna R (2002) Resident cataract surgical training in United States residency programs. *J Cataract Refract Surg* 28:2202- 2205.

60. Rogers GM, Oetting TA, Lee AG, Grignon C, Greenlee E, Johnson AT, Beaver HA, Carter K (2009) Impact of a structured surgical curriculum on ophthalmic resident cataract surgery complication rates. *J Cataract Refract Surg* 35:1956–1960.
61. Ezra DG, Aggarwal R, Michaelides M, Okhravi N, Verma S, Benjamin L, Bloom P, Darzi A, Sullivan P (2009) Skills acquisition and assessment after a microsurgical course for ophthalmology residents. *Ophthalmology* 116:257–262.
62. Gallagher AG, Ritter EM, Satava RM. Fundamental principles of validation, and reliability: rigorous science for the assessment of surgical education and training. *Surg Endosc* 2003;17:1525–9.
63. Mahr et Hodge – 2008 – Construct validity of anterior segment anti-tremor.pdf.
64. Privett et al. – 2010 – Construct validity of a surgical simulator as a va.pdf.
65. Belyea et al. – 2011 – Influence of surgery simulator training on ophthal.pdf.
66. Gallagher AG, Ritter EM, Satava RM. Fundamental principles of validation, and reliability: rigorous science for the assessment of surgical education and training. *Surg Endosc.* 1 oct 2003;17(10):1525-9.
67. Ahmed TM, Hussain B, Siddiqui MAR. Can simulators be applied to improve cataract surgery training: a systematic review. *BMJ Open Ophthalmol.* sept 2020;5(1):e000488.
68. 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 (Copenh).* nov 2014;92(7):629-34.
69. Mahr MA, Hodge DO. Construct validity of anterior segment anti-tremor and forceps surgical simulator training modules: attending versus resident surgeon performance. *J Cataract Refract Surg.* 2008;34:980–985.

70. Le TDB, Adatia FA, Lam W-C. Virtual reality ophthalmic surgical simulation as a feasible training and assessment tool: results of a multicentre study. *Can J Ophthalmol.* févr 2011;46(1):56-60.
71. Nathoo – Comparing performance of junior and senior ophthal.pdf.
72. Roohipoor et al. – 2017 – Early Performance on an Eye Surgery Simulator Pred.pdf.
73. Dooley et O'Brien – 2006 – Subjective difficulty of each stage of phacoemulsi.pdf.
74. Colné et al. – 2019 – Simulateur de chirurgie de cataracte EyeSi valid.pdf.
75. Cheng A, Kessler D, Mackinnon R, Chang TP, Nadkarni VM, Hunt EA, Duval-Arnould J, Lin Y, Cook DA, Pusic M, Hui J, Moher D, Egger M, Auerbach M, for the International Network for Simulation-based Pediatric Innovation, Research, and Education Reporting Guidelines. Reporting guidelines for health care simulation research: Extensions to the CONSORT and STROBE statements. *Adv Simul* 2016; 1:25.
76. Jacobsen et al. – 2019 – Correlation of virtual reality performance with re.pdf.
77. Virtual Reality Simulation in Acquiring and Differentiating Basic Ophthalmic Microsurgical Skills.
78. Dooley IJ, O'Brien PD. Subjective difficulty of each stage of phacoemulsification cataract surgery performed by basic surgical trainees. *J Cataract Refract Surg.* avr 2006;32(4):604-8.
79. Jacobsen MF, Konge L, Bach-Holm D, la Cour M, Holm L, Højgaard-Olsen K, et al. Correlation of virtual reality performance with real-life cataract surgery performance. *J Cataract Refract Surg.* sept 2019;45(9):1246-51.
80. Cremers SL, Lora AN, Ferrufino-Ponce ZK. Global Rating Assessment of Skills in Intraocular Surgery (GRASIS). *Ophthalmology.* oct 2005;112(10):1655-60.

81. Roohipour R, Yaseri M, Teymourpour A, Kloek C, Miller JB, Loewenstein JI. Early Performance on an Eye Surgery Simulator Predicts Subsequent Resident Surgical Performance. *J Surg Educ.* nov 2017;74(6):1105-15.
82. Lee R, Raison N, Lau WY, Aydin A, Dasgupta P, Ahmed K, et al. A systematic review of simulation-based training tools for technical and non-technical skills in ophthalmology. *Eye.* oct 2020;34(10):1737-59.
83. Staropoli PC, Gregori NZ, Junk AK, Galor A, Goldhardt R, Goldhagen BE, et al. Surgical Simulation Training Reduces Intraoperative Cataract Surgery Complications Among Residents. *Simul Healthc J Soc Simul Healthc.* févr 2018;13(1):11-5.
84. Ferris JD, Donachie PH, Johnston RL, Barnes B, Olaitan M, Sparrow JM. Royal College of Ophthalmologists' National Ophthalmology Database study of cataract surgery: report 6. The impact of EyeSi virtual reality training on complications rates of cataract surgery performed by first and second year trainees. *Br J Ophthalmol.* mars 2020;104(3):324-9.
85. Lucas L, Schellini SA, Lottelli AC. Complications in the first 10 phacoemulsification cataract surgeries with and without prior simulator training. *Arq Bras Oftalmol.* août 2019;82(4):289-94.
86. McCannel CA, Reed DC, Goldman DR. Ophthalmic Surgery Simulator Training Improves Resident Performance of Capsulorhexis in the Operating Room. *Ophthalmology.* déc 2013;120(12):2456-61.
87. Intensive Cataract Training Study Group, Baxter JM, Lee R, Sharp JAH, Foss AJE. Intensive cataract training: a novel approach. *Eye.* juin 2013;27(6):742-6.
88. Belyea DA, Brown SE, Rajjoub LZ. Influence of surgery simulator training on ophthalmology resident phacoemulsification performance. *J Cataract Refract Surg.* oct 2011;37(10):1756-61.

89. Pokroy R, Du E, Alzaga A, Khodadadeh S, Steen D, Bachynski B, et al. Impact of simulator training on resident cataract surgery. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol.* mars 2013;251(3):777-81.
90. Elizabeth Du; Ana G. Alzaga Fernandez; Sarah Khodadadeh; Daniel Steen; Russell Pokroy .VR (virtual reality) to OR: Impact of residency training with the Eyesi simulator system on cataract surgery outcomes . Poster presentation at ARVO2011. *Investigative Ophthalmology & Visual Science* April 2011, Vol.52, 6233.
91. Bisol T, Bisol RA de R, Rezende F. Efficacy of Eyesi® surgical simulator training in improving high-tension capsules capsulorhexis performance. *Rev Bras Oftalmol.* 2016;75(5):376-9.
92. Feudner EM, Engel C, Neuhann IM, Petermeier K, Bartz-Schmidt K-U, Szurman P. Virtual reality training improves wet-lab performance of capsulorhexis: results of a randomized, controlled study. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol.* juill 2009;247(7):955-63.
93. la Cour M, Thomsen ASS, 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. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol.* mai 2019;257(5):877-81.
94. Thomsen ASS, Smith P, Subhi Y, Cour M la, Tang L, Saleh GM, et al. High correlation between performance on a virtual-reality simulator and real-life cataract surgery. *Acta Ophthalmol (Copenh).* mai 2017;95(3):307-11.
95. Spiteri AV, Aggarwal R, Kersey TL, Sira M, Benjamin L, Darzi AW, et al. Development of a virtual reality training curriculum for phacoemulsification surgery. *Eye.* janv 2014;28(1):78-84.

96. Thomsen ASS, Bach-Holm D, Kjærbo H, Højgaard-Olsen K, Subhi Y, Saleh GM, et al. Operating Room Performance Improves after Proficiency-Based Virtual Reality Cataract Surgery Training. *Ophthalmology*. avr 2017;124(4):524-31.
97. Thomsen ASS, Subhi Y, Kiilgaard JF, la Cour M, Konge L. Update on Simulation-Based Surgical Training and Assessment in Ophthalmology. *Ophthalmology*. juin 2015;122(6):1111-1130.e1.
98. Campbell S, Hind J, Lockington D. Engagement with ophthalmic simulation training has increased following COVID-19 disruption—the educational culture change required? *Eye*. 11 mars 2021;s41433-021-01494-1.
99. Jamison A, Benjamin L, Lockington D. Quantifying the real-world cost saving from using surgical adjuncts to prevent complications during cataract surgery. *Eye*. sept 2018;32(9):1530-6.
100. Ali N, Little BC. Causes of cataract surgery malpractice claims in England 1995–2008. *Br J Ophthalmol*. 1 avr 2011;95(4):490-2.
101. Lowry EA, Porco TC, Naseri A. Cost analysis of virtual-reality phacoemulsification simulation in ophthalmology training programs. *J Cataract Refract Surg*. oct 2013;39(10):1616-7.
102. young2013 Is virtual reality training for resident cataract surgeons.pdf.
103. Ahmed Y, Scott IU, Greenberg PB. A survey of the role of virtual surgery simulators in ophthalmic graduate medical education. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol*. août 2011;249(8):1263-5.
104. Ng D, Sun Z, Young AL, Ko ST-C, Lok J, Lai T, et al. Impact of virtual reality simulation on learning barriers of phacoemulsification perceived by residents. *Clin Ophthalmol*. mai 2018;Volume 12:885-93.

105. Saleh GM, Lamparter J, Sullivan PM, O'Sullivan F, Hussain B, Athanasiadis I, et al. The international forum of ophthalmic simulation: developing a virtual reality training curriculum for ophthalmology. *Br J Ophthalmol.* juin 2013;97(6):789-92.
106. Nathoo N. Comparing performance of junior and senior ophthalmology residents on an intraocular surgical simulator. :2.
107. Koch F, Koss M, Singh P, Naser H. Virtuelle Realität in der Ophthalmologie. *Klin Monatsblätter Für Augenheilkd.* août 2009;226(08):672-6.

تأثير المحاكاة بالواقع الافتراضي على الأداء الجراحي للمقيمين بطب وجراحة العيون

الأطروحة

قدمت و نوقشت علانية يوم 2021/12/24

من طرف

السيد عمري بلال

المزداد في 22 شتنبر 1995 بفاس

لنيل شهادة الدكتوراه في الطب

الكلمات المفتاحية

المحاكاة بالواقع الافتراضي - جراحة المياه البيضاء بالموجات فوق الصوتية - التكوين

اللجنة

الرئيس والمشرف	السيد إدريس ابن عطية الأندلسي..... أستاذ في طب وجراحة العيون
أعضاء	السيد محمد براحو..... أستاذ في علم الأوبئة السريرية
	السيدة عبدلاوي مريم..... أستاذة مبرزة في طب وجراحة العيون
	السيد فؤاد الشريبي..... أستاذ مبرز في طب وجراحة العيون
عضو مشارك	السيدة مريم البهلول..... أستاذة مساعدة في طب وجراحة العيون