



**HAL**  
open science

# Place de l'apprentissage de la chirurgie arthroscopique utilisant la simulation en réalité virtuelle à propos d'un geste : la méniscectomie

Alexandre Tronchot

## ► To cite this version:

Alexandre Tronchot. Place de l'apprentissage de la chirurgie arthroscopique utilisant la simulation en réalité virtuelle à propos d'un geste : la méniscectomie. Médecine humaine et pathologie. Université de Rennes, 2024. Français. NNT : 2024URENB026 . tel-04953736

**HAL Id: tel-04953736**

**<https://theses.hal.science/tel-04953736v1>**

Submitted on 18 Feb 2025

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# THESE DE DOCTORAT DE

L'UNIVERSITE DE RENNES

ECOLE DOCTORALE N° 637

*Sciences de la Vie et de la Santé*

Spécialité : *Analyse et Traitement de l'Information et des Images Médicales*

Par

**Alexandre TRONCHOT**

**Place de l'apprentissage de la chirurgie arthroscopique utilisant la simulation en réalité virtuelle à propos d'un geste : la méniscectomie**

Thèse présentée et soutenue à Rennes, le 18 octobre 2024

Unité de recherche : UMR 1099 LTSI Inserm

## Rapporteurs avant soutenance :

Elvire SERVIEN

Marc-Olivier GAUCI

Professeur d'Université MD PhD HDR, Chirurgie Orthopédique et Traumatologique, CHU de Lyon

Praticien hospitalier MD PhD HDR, Chirurgie Orthopédique et Traumatologique, CHU de Nice

## Composition du Jury :

Président : Corinne LEJUS-BOURDEAU

Professeur d'Université MD PhD HDR, Anesthésie et Réanimation, CHU de Nantes

Examineurs : Elvire SERVIEN

Sandrine VOROS  
Marc-Olivier GAUCI

Professeur d'Université MD PhD HDR, Chirurgie Orthopédique et Traumatologique, CHU de Lyon

CR INSERM, TIMC-IMAG, UGA, Grenoble, Encadrante  
Praticien hospitalier MD PhD HDR, Chirurgie Orthopédique et Traumatologique, CHU de Nice

Dir. de thèse : Pierre JANNIN

Co-dir. de thèse : Hervé THOMAZEAU

DR INSERM, LTSI, Université de Rennes, Rennes

Professeur émérite, LTSI, Université de Rennes, Chirurgie Orthopédique et Traumatologique, CHU de Rennes

## **REMERCIEMENTS**

Je remercie la Professeure Elvire SERVIEN et le Docteur Marc-Olivier GAUCI d'avoir accepté d'être rapporteurs de ce travail.

Je remercie la Professeure Corinne LEJUS-BOURDEAU et Mme Sandrine VOROS d'avoir accepté de juger ce travail.

Je remercie le Professeur Hervé Thomazeau et Mr Pierre Jannin pour leur accompagnement tout au long de ce travail de thèse.

Je remercie Mr Arnaud Huaultmé, Mme Tiphaine Casy ainsi que l'ensemble de l'équipe MediCIS pour leur aide, les nombreux et riches échanges, leur soutien et tous les bons moments passés ensemble.

A ma famille, ma belle-famille

A Anaïs, mon épouse

A Jeanne et Gabriel, mes enfants

# TABLE DES MATIERES

<b>RESUME/ABSTRACT.....</b>	<b>2</b>
<b>PREAMBULE.....</b>	<b>7</b>
<b>CHAPITRE 1. REVUE DE LITTERATURE : SIMULATION ET FORMATION</b>	
<b>A L'ARTHROSCOPIE.....</b>	<b>11</b>
<b>1. EXIGENCE DE L'ARTHROSCOPIE.....</b>	<b>12</b>
<i>1.a. Rappel historique.....</i>	<i>12</i>
<i>1.b. Spécificités techniques de l'arthroscopie.....</i>	<i>12</i>
<i>1.c. Apprentissage actuel de l'arthroscopie.....</i>	<i>13</i>
<b>2. COMPETENCES TECHNIQUES ET NON TECHNIQUES.....</b>	<b>15</b>
<b>2.a. Compétences techniques (CT) .....</b>	<b>15</b>
<i>2.a. i. Définition générique.....</i>	<i>15</i>
<i>2.a.ii. Compétences techniques pour l'arthroscopie.....</i>	<i>15</i>
<b>2.b. Compétences non techniques (CNT) .....</b>	<b>16</b>
<i>2.b. i. Définition générique.....</i>	<i>16</i>
<i>2.b. ii. Compétences non techniques en chirurgie orthopédique.....</i>	<i>17</i>
<b>3. LES OUTILS DE SIMULATIONS POUR L'ARTHROSCOPIE.....</b>	<b>18</b>
<b>3.a. Sujet anatomique issu du Don de corps (décret 2022-719) .....</b>	<b>19</b>
<b>3.b. Modèles animaux.....</b>	<b>19</b>
<b>3.c. Simulateurs synthétiques.....</b>	<b>20</b>
<b>3.d. Simulateurs numériques utilisant la réalité virtuelle (VR).....</b>	<b>21</b>
<i>3.d. i. Simulateurs numériques avec retour haptique (simulateurs hybrides).....</i>	<i>22</i>
<i>3.d. ii. Simulateur Immersive VR.....</i>	<i>24</i>
<b>3.e. Simulateur « mental » .....</b>	<b>25</b>
<i>3.e. i. Analyse Cognitive des Tâches (ACT) .....</i>	<i>25</i>
<i>3.e. ii. Briefing/Debriefing.....</i>	<i>25</i>
<b>4. VALIDATION PEDAGOGIQUE D'UN OUTIL DE SIMULATION.....</b>	<b>26</b>
<b>4.a. Face &amp; Construct Validity.....</b>	<b>26</b>
<b>4.b. Transfer Validity.....</b>	<b>27</b>
<b>4.c. Concurrent &amp; Economic Validity.....</b>	<b>28</b>

4.d. Vers de nouveaux outils d'efficience pédagogique.....	29
5. EVALUATION PEDAGOGIQUE.....	31
5.a. Global Rating Scale (GRS) .....	31
5.b. Métriques quantitatives.....	32
5.c. Analyse des trajectoires.....	34
5.d. Analyse des compétences non techniques.....	34
6. OBJECTIFS DE LA THESE.....	34
7. REFERENCES.....	35
CHAPITRE 2. ETUDE PRELIMINAIRE.....	46
<b>Validation de la pertinence d'un simulateur d'arthroscopie en réalité virtuelle pour caractériser les chirurgiens expérimentés</b>	
CHAPITRE 3. DEROULE DE L'ETUDE.....	63
CHAPITRE 4. ETUDE 1.....	66
<b>Progression des compétences techniques sur simulateur d'arthroscopie en Réalité Virtuelle : analyse numérique</b>	
CHAPITRE 5. ETUDE 2.....	81
<b>Virtual Reality Simulation is valuable for arthroscopic diagnosis and meniscectomy: a transfer validity study of 36 residents</b>	
CHAPITRE 6. ETUDE 3.....	100
<b>Intérêt de la simulation VR sur la gestion de la fréquence cardiaque des internes lors d'une évaluation des compétences techniques arthroscopiques : étude prospective observationnelle appariée</b>	
CHAPITRE 7. CONCLUSION ET PERSPECTIVES D'ETUDES.....	119
LISTE DES ARTICLES CONNEXES ISSUS DE LA BASE DE DONNEES.....	124
LISTE DES COMMUNICATIONS ISSUS DE LA BASE DE DONNEES.....	125
LISTE DES POSTERS ISSUS DE LA BASE DE DONNEES.....	127
ANNEXES.....	128

*« Ce n'est rien de feuilleter les livres, de gazouiller, de caqueter en chambre de la chirurgie, si la main ne met en usage ce que la raison ordonne »*

*Ambroise Paré, 1529, dans ses cours de « chirurgie » à l'Hôtel Dieu*

## **PREAMBULE**

## *Défis pour la formation chirurgicale*

La pratique chirurgicale a cette particularité, d'être une activité dont la reconnaissance sociale et professionnelle repose majoritairement sur la composante technique. Mais pour autant, le chirurgien également docteur en médecine, repose une grande partie de son savoir sur des connaissances théoriques [1]. C'est à travers cette dichotomie que se trouve le métier de chirurgien. Dès l'antiquité, une distinction importante a été faite entre l'enseignement général (en majorité théorique) et la formation professionnelle (en majorité pratique), qui nécessite l'acquisition d'un haut niveau de compétence [2]. Quel que soit le pays, les étudiants en chirurgie ont besoin d'une formation générale universitaire médicale avant de pouvoir être admis à étudier la pratique chirurgicale durant leur internat. A l'issue d'un certains nombres d'années de formation, ils pourront prétendre au titre de docteur en chirurgie. Nous parlons ici d'une **évaluation sommative** des compétences chirurgicales (*nombre d'années requises pour être chirurgien*). A côté de cette formation essentiellement théorique universitaire, la formation du chirurgien a reposé pendant des siècles sur le compagnonnage et l'acquisition progressive, très contrôlée par le maître, d'une expertise. Nous parlons alors d'une **évaluation formative** des compétences chirurgicales (*validation des compétences par un maître de stage se portant garant pour l'apprenant*). A l'issue de cette formation pratique, l'interne peut acquérir le statut de docteur en chirurgie. La formation théorique médico-chirurgicale a pu profiter pleinement des avancées technologiques et sociétales pour proposer une offre de formation exhaustive de qualité, avec une évaluation continue, progressive et bien standardisée des acquis de l'interne. A l'inverse de la formation pratique chirurgicale qui est restée au stade d'une validation souvent consensuelle des acquis par les pairs. Cela paraît anachronique à l'époque des nombreuses certifications et autres normes de qualités imposées au monde du soin... L'**évaluation certificative** des compétences chirurgicales n'est donc pas encore au point alors qu'elle est pleinement inscrite et exigée dans la réforme des études médicales du troisième cycle depuis 2017 [3]. D'autant qu'il est reconnu depuis les années 1980 que l'expertise n'est pas uniquement basée sur les connaissances accumulées, l'expérience professionnelle étendue et les nominations par les pairs [4]. Il paraît donc impératif de trouver un moyen d'évaluer efficacement les capacités techniques des internes avant leur mise en responsabilité.

A cette problématique d'évaluation des compétences s'ajoutent des problèmes organisationnels. Les chirurgiens en formation disposent aujourd'hui de moins de temps opératoire que leurs prédécesseurs [5,6] et doivent donc atteindre le même niveau de compétence au cours d'une période de formation globale plus courte [7]. Cette situation s'inscrit dans un

contexte de volonté d'améliorer la sécurité des patients, la qualité de vie au travail des chirurgiens [8], mais aussi des augmentations des procédures judiciaires amenant à des indemnisations médico-légales [9]. A cela s'ajoutent d'autres pressions financières, la formation chirurgicale initiale par compagnonnage au bloc opératoire coûterait 53 millions de dollars par an aux États-Unis [10]. Les chirurgiens font l'objet d'une surveillance accrue par l'évaluation des résultats, couplée aux attentes croissantes des patients et, par conséquent, les chirurgiens seniors sont plus réticents à laisser les internes acquérir de l'expérience sur des cas difficiles. Avec moins d'opérations disponibles pour les apprenants, il est donc impératif de trouver des méthodes de formation chirurgicale plus efficaces, plus rapides et plus sûres pour le patient et le chirurgien.

### *Le rôle de la simulation dans la formation chirurgicale*

La Haute Autorité de Santé (HAS) soutient le rôle de la simulation depuis plus d'une décennie, affirmant que la simulation devrait être une partie importante de la formation et de l'accréditation des chirurgiens [11]. De même, le rôle de la formation basée sur la simulation a été souligné aux États-Unis par l'Agence américaine de la santé publique. La formation sur simulateur est bien établie dans les industries à haut risque comme l'aviation et le sport automobile, où une variété de variables et des scénarios peuvent être représentés avec précision. La simulation a été évaluée et incorporée à la formation dans diverses spécialités chirurgicales comme moyen de formation efficace dans un environnement contrôlé sans compromettre la sécurité des patients. De nombreux travaux ont été réalisés sur l'utilisation de la simulation en chirurgie laparoscopique, où il a été démontré que les compétences acquises à l'aide de simulateurs ont été transférées dans la salle d'opération pour améliorer les performances [12]. La simulation en réalité virtuelle (VR) a également permis de raccourcir la courbe d'apprentissage des procédures laparoscopiques réelles et de réduire de manière significative les erreurs lors d'interventions chirurgicales réelles [13,14]. Cet avantage « croisé » de la simulation a été prouvé à plusieurs reprises dans le domaine de la laparoscopie, où il a été démontré qu'elle améliorerait les résultats pour les patients [15,16]. Par conséquent, l'American Board of Surgery exige désormais que les candidats aient suivi avec succès l'American Gastrointestinal and Endoscopic Surgeons Fundamentals of Laparoscopic Surgery afin d'être certifiés en chirurgie générale [17].

### *La simulation en chirurgie orthopédique*

La communauté orthopédique s'entraîne depuis des décennies à l'aide d'os et articulations synthétiques [18] ou bien de sujets anatomiques [19]. Les simulateurs VR sont disponibles

depuis peu [20]. Les procédures arthroscopiques et fluoroscopiques se prêtent bien à la simulation, la conversion de 3 dimensions en un écran à 2 dimensions étant plus facile à reproduire. Avec le développement rapide de la puissance de traitement informatique, la qualité graphique a facilité les représentations réalistes de ces procédures, bien que ces simulateurs puissent être coûteux.

### *Travail de thèse*

L'équipe INSERM MediCIS - UMR U1099 LTSI de l'Université de Rennes 1 (Rennes, France), cherche à travers ses travaux à évaluer les moyens de formations pratiques chirurgicales ainsi qu'à mieux définir les différences compétences chirurgicales nécessaires selon les spécialités. Les objectifs sont de proposer un meilleur enseignement de celles-ci, un raccourcissement des courbes d'apprentissage et la proposition d'une assistance informatique pour le chirurgien dans son quotidien. Le travail de cette thèse s'est intéressé à analyser en détail l'apprentissage d'une procédure technique arthroscopique du genou : la ménisectomie partielle. La première partie de ce travail (*Chapitre 1*) fait un état des lieux de la littérature sur la simulation pour la formation à la chirurgie arthroscopique. Après différentes définitions sur les notions de compétences et de validations pédagogiques, nous avons fait une revue des différents moyens de simulation et d'évaluation objective des compétences sur simulateur. La deuxième partie (*Chapitre 2*) fait état d'une étude préliminaire sur des données cinématiques du simulateur permettant une analyse fine des compétences techniques par métriques exhaustives et classification hiérarchique ascendante des trajectoires. La troisième partie de ce travail (*Chapitres 3, 4, 5*) s'intéresse à la validation du simulateur pour l'apprentissage des compétences techniques. Pour ce faire, nous présentons une première étude de suivi de progression des internes sur simulateur VR en les comparant à des internes de même niveau sans formation standardisée sur simulateur et à des chirurgiens expérimentés. La seconde étude s'intéresse au transfert de compétences techniques acquises sur simulateur VR vers les simulateurs synthétiques et les sujets anatomiques. La troisième partie (*Chapitre 6*) propose une approche différente de l'évaluation des compétences chirurgicales en s'intéressant aux compétences non techniques de gestion du stress via l'analyse de la variabilité de fréquence cardiaque lors d'une évaluation des compétences avec ou sans formation sur simulateur au préalable. Enfin nous discutons à la fin de ce manuscrit (*Chapitre 7*) les limites de notre travail, les perspectives de futures études et les enjeux pédagogiques, d'assistance chirurgicale et d'amélioration continue de la qualité et de la sécurité des soins en chirurgie.

**CHAPITRE 1. REVUE DE LITTERATURE :**  
**SIMULATION ET FORMATION A L'ARTHROSCOPIE**

## 1. EXIGENCE DE L'ARTHROSCOPIE

### *1.a. Rappel historique*

L'arthroscopie est une entité à part entière de l'orthopédie qui s'est continuellement perfectionnée depuis ses pionniers du début du vingtième siècle [21], puis sa démocratisation par le Pr Watanabe dans les années 1950 [22], jusqu'à son expansion mondiale à partir des années 1980 [23]. Dépendante des avancées technologiques, elle tend aujourd'hui vers une arthroscopie mini-invasive diagnostique dite « nano » lors de consultation [24], vers un meilleur rendu visuel de l'articulation explorée grâce aux puissances informatiques des cartes graphiques et enfin vers des chirurgies complexes devenues endo-articulaires mini invasives quasi-exclusives (butée coracoïdienne sous arthroscopie pour instabilité d'épaule [25], neurolyse du nerf suprascapulaire à l'épaule [26], réparation des ligaments collatéraux au genou [27], arthroplasties du genou [28],...).

### *1.b. Spécificités techniques de l'arthroscopie*

La chirurgie arthroscopique exige l'acquisition de compétences motrices délicates et précises. Pour cela, le chirurgien doit combiner dextérité, perception spatiale et force musculaire afin d'obtenir un bon contrôle des instruments et des tissus manipulés [29]. Plusieurs aspects de la chirurgie arthroscopique rendent donc son apprentissage et sa maîtrise difficiles.

Premièrement, la chirurgie arthroscopique diffère de la chirurgie à ciel ouvert par le fait que l'opérateur n'opère pas en regardant ses mains mais en visualisant sa gestuelle à travers un écran. Il s'agit donc d'un geste technique à part entière où il faut appréhender ses mouvements dans l'espace en trois dimensions à travers un écran qui n'est qu'en deux dimensions, et dans cet espace en trois dimensions par ailleurs volumétriquement très restreint [29]. En effet, la vue de l'arthroscope est bidimensionnelle et apparaît agrandie sur l'écran d'affichage, le coefficient d'agrandissement étant en début de pratique inconnu du chirurgien inexpérimenté. Cela conduit souvent le novice à sous-estimer le mouvement de la pointe de l'instrument et à étendre exagérément ses mouvements [30].

Deuxièmement, l'arthroscope utilise un fore-oblique, *ie* un angle de vision décalé par rapport à l'axe longitudinale de l'instrument optique (le plus souvent 30 degrés par rapport à l'axe longitudinal) comme si l'opérateur regardait de 30° "de côté". Ce décalage a été imaginé pour augmenter le champ de vision en pivotant l'axe optique sur 360 degrés comme lorsque l'on regarde à l'intérieur d'un meuble en tournant la tête de tout côté. L'axe visuel n'est donc plus aligné avec l'axe de l'instrument "optique" mais décalé de 30° par rapport à lui, ce qui complique la coordination des mouvements d'autant que l'horizon du champ opératoire n'est plus celui

intangibles de la salle d'opérateur mais celui produit par la caméra, elle-même mobile à 360° sur l'instrument optique. La vision de l'opérateur résulte donc en permanence de la combinaison de ces 2 mouvements, rotation de l'instrument optique et rotation de la caméra sur l'instrument optique.

Troisièmement, comme les instruments sont manipulés à travers un portail étroit, il y a un effet de fulcrum [31], où les mains du sujet se déplacent dans la direction opposée au mouvement désiré à l'extrémité de l'instrument [32].

Enfin, comme les instruments longs et minces sont saisis à l'extérieur de l'articulation, les forces de frottement provenant du point d'entrée articulaire ou par contact avec les tissus traversés peuvent fausser les forces ressenties, ce qui entraîne une confusion dans les sensations de retour haptique [29].

Tout cela fait partie des particularités de la triangulation arthroscopique, à savoir se retrouver sans se voir ainsi qu'aller dans la zone d'intérêt par combinaison des mouvements des 2 mains "scope" et "instrumentale".

### *1.c. Apprentissage actuel de l'arthroscopie*

Traditionnellement, l'apprentissage de l'arthroscopie se fait par compagnonnage au bloc opératoire selon le principe du « See one, do one, teach one », standardisé par le Dr. Halsted au Johns Hopkins Hospital (Baltimore, USA) à la fin du vingtième siècle [33]. Cependant, cet apprentissage est loin d'être idéal pour les novices [34]. La sécurité du patient étant en jeu [10], les formés ne sont pas autorisés à faire des erreurs, ce qui peut être un élément important dans l'apprentissage des compétences psychomotrices.

Pour pallier cela, plusieurs initiatives ont été entreprises durant les dix dernières années marquant ainsi un changement dans la philosophie de formation. Outre atlantique, l'American Board of Orthopaedic Surgery (ABOS) impose l'apprentissage sur simulateur pour la formation des internes depuis 2013 [35]. Un programme d'enseignement des compétences de base, connu sous le nom de " Fundamentals of Arthroscopic Surgery Training " (FAST), a été créé par l'American Academy of Orthopaedic Surgeons en collaboration avec l'Arthroscopy Association of North America et l'ABOS. Le programme FAST détermine les compétences motrices de base nécessaires à la chirurgie arthroscopique et développe des modules de formation visant à améliorer les compétences motrices identifiées [35,36].

Pour l'Europe, l'European Society for Sport Surgery, Knee. & Arthroscopy (ESSKA) est à l'initiative depuis 2013 d'un cours d'arthroscopie de base en Turquie [29]. Ce cours utilise un genou bovin, un genou et une épaule de sujet anatomique, ainsi que des maquettes synthétiques

de genou et d'épaule avec ou sans réalité virtuelle pour affiner les compétences motrices et enseigner des procédures simples. Mais l'objectif de l'ESSKA est dorénavant de créer des formations certifiantes spécifiques (Réparation méniscale, Reconstruction du LCA, Ostéotomies autour du genou, ...) combinant cours théoriques, formation pratique sur simulateurs synthétiques, VR et sujets anatomiques [37,38]. Depuis 2023, un cours européen uniquement sur simulateurs VR a même été introduit en partenariat avec l'Association Germanophone d'Arthroscopie (AGA) et basé au Luxembourg [38].

Pour la France, la réforme du troisième cycle en 2017 a inscrit la simulation comme moyen de formation avec l'objectif d'harmoniser l'apprentissage académique au niveau national sous la forme d'une maquette de formation aux compétences techniques dont 4 des 19 modules sont concernés à l'apprentissage de l'arthroscopie par niveaux de complexité technique croissante [39,40], (**Figure 1**). Il n'y a pas encore de validation pratique des acquis sur simulateur à la différence de la Suisse où la fin de l'internat est marquée par deux épreuves de validation : une théorique et une autre manuelle (sujet anatomique ou simulateur).

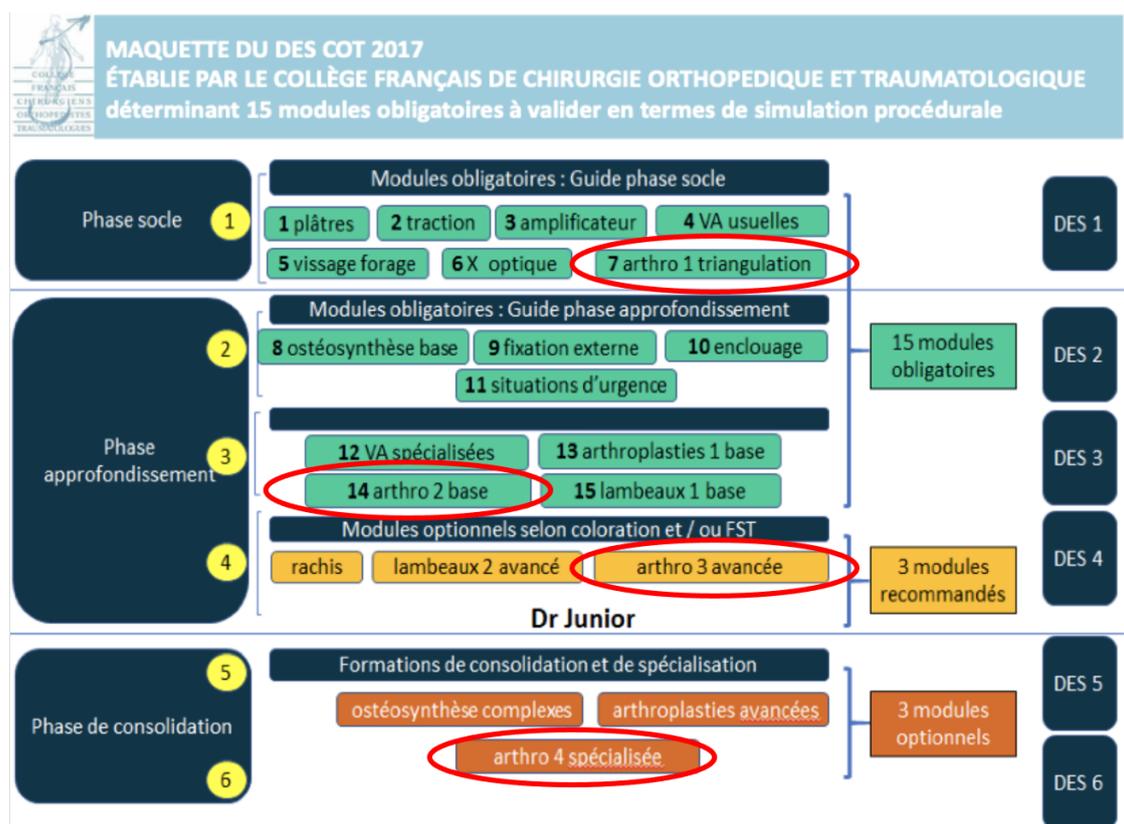


Figure 1. Maquette des modules de formation pratiques du Collège Français de chirurgie orthopédique CFCOT (sont entourées en rouge les 4 modules de formation à l'arthroscopie)

Aujourd'hui, l'arthroscopie est enseignée en tant que composante à part entière dans la majorité des programmes de formation initiale en orthopédie dans le monde. Cette formation s'organise

sous l'égide des sociétés savantes, à travers certains cours obligatoires pour l'apprentissage de base, puis via des sessions pratiques annuelles sur cadavres ou simulateurs (VR) pour la formation avancée.

## **2. COMPETENCES TECHNIQUES ET NON TECHNIQUES**

Les objectifs d'apprentissage permettent d'identifier les compétences à acquérir ainsi que le niveau de compétence à atteindre. Il existe différentes compétences pour être chirurgien, les plus évidentes se focalisent sur la maîtrise du geste (compétences techniques) mais d'autres plus subtiles s'intéressent à l'environnement dans lequel se déroule ce geste (compétences non techniques). L'ensemble des interactions entre ces différentes compétences permettent de définir la maîtrise chirurgicale.

### **2.a. Compétences techniques (CT)**

#### *2.a. i. Définition générique [11]*

Un geste technique chirurgical se définit comme une action manuelle invasive agissant sur les tissus organiques en les modifiant de façon immédiatement irréversible (section, dissection, ligature-coagulation, sutures, implantations de dispositifs médicaux...). Peuvent se définir ensuite :

- Le geste de base : action technique simple, parfois générique pour tous les tissus telle que la coagulation, ou au contraire plus spécifique d'un type de tissu au sein d'une spécialité, par exemple la suture tendineuse ou le vissage osseux pour la chirurgie orthopédique.
- L'intervention (chirurgicale) : enchaînement séquentiel et complexe de plusieurs gestes techniques de base dont la réalisation et la succession logique doivent être maîtrisées. La capacité d'enchaînement de ces séquences gestuelles, chacune préparant la suivante, représente en soi une action dont chaque étape doit être évaluée lors de l'action de simulation. L'intervention est souvent complexe, soit par la nature et la variabilité des gestes enchaînés, soit par sa durée, soit encore par l'utilisation d'ancillaires ou de dispositifs implantables spécifiques propres à chaque intervention et à chaque spécialité.

#### *1.2.a.ii. Compétences techniques pour l'arthroscopie*

Des recherches ont été menées sur les compétences techniques de base à acquérir pour l'arthroscopie. Plusieurs enquêtes auprès de chirurgiens de différents niveaux ont été conduites à travers le monde. Une revue de littérature de ces études associée à une enquête auprès de chirurgiens européens [29] a conclu que les compétences importantes de base pour la formation à

l'arthroscopie étaient celles requises pour accéder à une articulation puis s'y déplacer visuellement et y déplacer un instrument.

Pour atteindre ces objectifs, le niveau de fidélité (ou réalisme) de l'outil de simulation adapté aux apprenants novices est encore débattu. Les simulateurs de basse fidélité sont habituellement considérés comme moins efficaces pour la formation aux compétences de base en chirurgie parce qu'ils manquent de réalisme anatomique simple [29]. Pourtant, l'apprentissage de certaines compétences technique de base pour l'arthroscopie et notamment la coordination des instruments dans l'espace ou triangulation peuvent se faire efficacement à l'aide de box trainer à moindre coût [41–43]. Norman et al., affirme même que l'utilisation d'un simulateur à très haute-fidélité peut entraîner des coûts inutiles plus élevés et une surcharge cognitive où les informations sensorielles supplémentaires peuvent submerger les novices et les détourner de l'apprentissage des compétences de base [44]. L'étude indique que pour les compétences motrices, la sensation des instruments et des tissus est importante, tandis que la couleur et la forme le sont moins. Elle remet également en question l'importance du contexte dans la formation. On parle de pratique contextualisée lorsque le simulateur et l'environnement reproduisent plus fidèlement l'environnement opérationnel.

## **2.b. Compétences non techniques (CNT)**

### *2.b. i. Définition générique*

Elles représentent la seconde composante de la compétence d'un chirurgien. Yule a proposé en 2006 de différencier les composantes non techniques interpersonnelles ou sociales des composantes personnelles cognitives [45]. Les composantes interpersonnelles dans le domaine de la santé concernent les relations et la communication avec les patients et les équipes soignantes tout au long du parcours de soins (phases pré et postopératoires). La pionnière dans ce domaine a été l'industrie aéronautique où il a en effet été constaté que 70 % des erreurs étaient dues à des facteurs humains tels que des défaillances dans la communication, le leadership et la prise de décision [46]. Cette constatation a conduit au développement de formations au Crew Resource Management (CRM) afin de permettre aux individus de gérer les limites des performances humaines et d'améliorer la sécurité. Cette formation a ensuite été adoptée dans les industries manufacturières, militaires et nucléaires [47]. En ce qui concerne les compétences non techniques interpersonnelles, l'anesthésiologie [48] a largement contribué à l'essor du CRM en médecine interventionnelle avec le développement de *l'Anaesthetic Crisis Resource Management* [49]. Cette méthode permet aux participants de mettre en pratique leurs compétences en matière de formation d'équipe dans un environnement simulé et de recevoir un retour d'information sur

leurs performances. Le personnel de salle d'opération [50], la chirurgie générale [51], les soins infirmiers [52] reconnaissent tous de plus en plus l'importance des CNT. L'instrument de référence pour mesurer les compétences non techniques au bloc opératoire au niveau individuel est l'échelle NOTSS (*Non-Technical Skills for Surgeons System*), qui se décompose en 5 catégories principales : conscience de la situation, prise de décision, tâches de management, leadership, communication et esprit d'équipe. A l'intérieur de chaque catégorie il existe 2 ou 3 éléments de CNT dépendant de la spécialité chirurgicale conduisant à un score sur 14 éléments de compétences séparés [45].

Les composantes cognitives regroupent différentes compétences telles la préparation mentale [45], l'évaluation des risques [53] afin d'anticiper les problèmes éventuels, permettant une certaine flexibilité lors de l'intervention. La prise de décision [54,55] est une compétence cognitive particulièrement développée chez les chirurgiens dans différentes facettes de leur exercice.

Enfin, à la frontière entre composantes cognitives et interpersonnelles se trouvent la gestion du stress ou de la fatigue, pouvant être exacerbées dans certaines situations (interventions programmées compliquées à haut risque, interventions plus simples se déroulant dans un environnement bruyant, intervention en urgence, intervention la nuit, survenue d'une complication peropératoire, matériel ou anatomique...) [56,57]. La gestion du stress fait partie des compétences non techniques analysées à travers la variabilité de fréquence cardiaque. Elle a été évaluée par Awad et al., en comparant des internes et chirurgiens cardiothoraciques séniors lors d'interventions chirurgicales suggérant un plus haut niveau de stress dans la population des novices [58].

D'autres aspects des compétences non techniques ont été analysées plus récemment comme l'ergonomie du poste de travail et les troubles musculosquelettiques inhérents à la pratique chirurgicale. La littérature reste succincte comme en témoigne la méta-analyse de 2024 par O'Reily et al., où seulement 9 études ont été recensées sur la question des troubles musculosquelettiques cervicaux parmi la communauté chirurgicale. Comme souvent, la chirurgie laparoscopique a été pionnière dans les études sur l'ergonomie chirurgicale[59–61].

#### *2.b. ii. Compétences non techniques en chirurgie orthopédique*

La littérature à propos des compétences non techniques en chirurgie orthopédique reste succincte voire même inexistante pour l'arthroscopie. Une étude publiée en 2016 par Heaton et al., se focalisait sur la communication en équipe dans le cas d'une situation de crise [62]. Une étude plus récente publiée en 2021 s'intéressait à l'impact du turnover dans la pratique

chirurgicale journalière en arthroplasties de hanche et de genou [63], tandis que d'autres équipes se sont intéressées à l'impact de la formation sur la prise de décision [64].

Quelques études se sont intéressées aux variations de fréquence cardiaque lors de procédures chirurgicales orthopédiques [65,66] mettant en lien la pratique chirurgicale avec une activité physique et stressante. McQuivey et al, se sont intéressées quant à eux à l'impact de l'ergonomie au bloc opératoire sur les troubles musculosquelettiques [67,68]. Une étude récente de 2024 par Lurie et al., ont rapporté les difficultés des internes en chirurgie orthopédique ayant des petites mains pour l'apprentissage pratique avec les instruments standards orthopédiques au bloc opératoire [69].

### **3. LES OUTILS DE SIMULATIONS POUR L'ARTHROSCOPIE**

Dès ses débuts, l'industrie aéronautique a intégré la simulation comme moyen de formation pratique standardisée aux principes du pilotage sans risque pour l'apprenant [70]. D'autres secteurs professionnels à risque telles que l'armée et l'énergie nucléaire ont ensuite également adopté les simulateurs pour former leur personnel. Bien que l'apprentissage de la chirurgie sur sujet anatomique existe depuis des siècles, les simulateurs synthétiques tels que nous les connaissons aujourd'hui ont été introduits pour la formation des chirurgiens à la fin des années 1980, la neurochirurgie et la chirurgie vasculaire ayant été les premières à les adopter [70]. La chirurgie orthopédique a été lente à adopter la simulation comme méthode de formation [71]. La chirurgie arthroscopique repose sur les sens du toucher et de la vision, mais tous deux déformés par rapport à la vision historique directe d'un site opératoire dit à "ciel ouvert" remplacée par une vision indirecte car transmise par un écran. Un simulateur efficace doit donc offrir une sensation haptique réaliste et un retour visuel 2D de haute qualité. Voici les différents types de simulation utilisée pour l'apprentissage de l'arthroscopie : organique, synthétique et numérique (**Figure 2**).

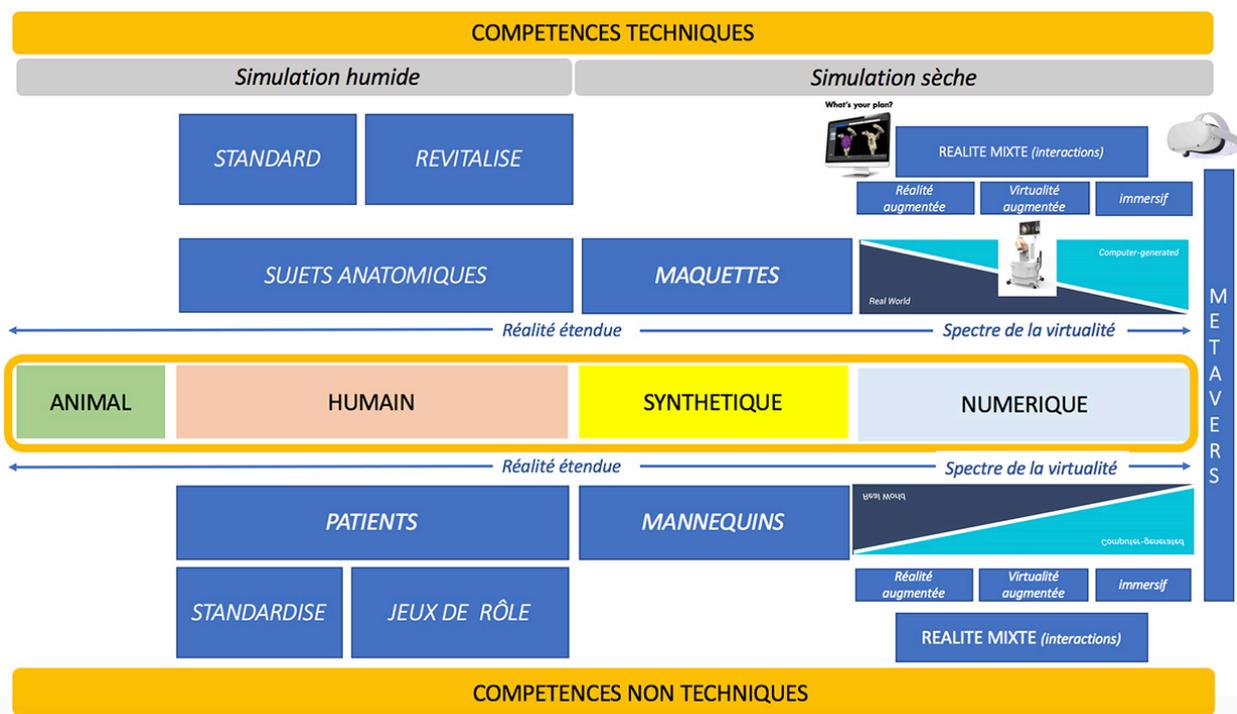


Figure 2. Différents types de simulation pour l'apprentissage de l'arthroscopie (avec l'aimable courtoisie de Pr Thomazeau)

### 3.a. Sujet anatomique issu du Don de corps (décret 2022-719)

Les sujets anatomiques ont fait preuve de leur efficacité pour l'apprentissage de la chirurgie. Ils sont même souvent la première option des chirurgiens pour l'apprentissage pratique car ils offrent une expérience anatomique très proche du réel les rapprochant encore du "gold standard" en simulation technique [72–75]. Cependant, l'utilisation de sujets dans un programme de formation est limitée par le coût, la disponibilité et les lieux de formation et par la complexification des autorisations éthiques encadrant le Don de corps. La présence d'agents pathogènes peut également poser problème. Pour l'arthroscopie, il faut de plus prendre en compte l'acquisition d'une colonne, de l'ensemble de l'équipement, de poches de sérum ainsi que la nécessité de personnels formés à son utilisation et à sa maintenance ayant elle-même un coût (bris de matériel...) [29].

### 3.b. Modèles animaux

Les modèles animaux ont également été utilisés pour enseigner les compétences chirurgicales et ont été proposés pour enseigner l'arthroscopie [76,77]. Toutefois, leur utilisation pour la formation soulève des questions morales et éthiques, en particulier lorsqu'il existe d'autres solutions. Les modèles animaux peuvent également être coûteux et difficiles à acquérir [78]. De plus, si le genou d'un bovin peut être un modèle représentatif de l'articulation du genou

humain, l'anatomie de l'articulation de l'épaule humaine est très différente de celle des animaux en raison de notre position bipède. Comme pour les sujets anatomiques et l'apprentissage de l'arthroscopie, il faut tenir compte de l'acquisition du matériel et de la formation du personnel [79].

### 3.c. Simulateurs synthétiques

Alors que les modèles biologiques (sujets issus du Don de corps, modèles animaux) n'offrent qu'une possibilité limitée de retour d'information intégré sur les performances, les simulateurs synthétiques offrent la possibilité d'inclure différents capteurs permettant des mesures quantitatives de performances afin que les apprenants puissent suivre leur progression [80]. L'interne peut par ailleurs se former à son rythme, aussi souvent qu'il le souhaite. A l'inverse des modèles biologiques, ces simulateurs permettent en effet facilement la répétition d'un geste standardisé jusqu'à pleinement l'intégrer. Un point capital est aussi que les instruments utilisés sont de vrais outils chirurgicaux donnant un retour tactile tout aussi réaliste que sur les modèles biologiques mais avec l'avantage de les utiliser sur colonne « sèche », c'est-à-dire sans nécessité d'être dans un milieu aqueux, limitant donc le coût d'exploitation (nettoyage, désinfection...). Il existe des box-trainer géométriques (cube), directement inspiré du programme FAST ou bien des maquettes d'articulation. Les box-trainer sont des simulateurs basse-fidélité qui ont l'avantage d'apprendre les compétences techniques de base indépendantes de l'anatomie de l'articulation (tenue et orientation des instruments, convergence de ceux-ci dans l'espace ou triangulation). Les maquettes anatomiques sont voulues comme des représentations plus fidèles de l'articulation humaine modélisée aussi bien d'un point de vue extérieur qu'intérieur permettant d'adapter ces premiers gestes à une contrainte anatomique particulière (espace réduit d'un genou, anatomie particulière d'une épaule...). La gamme de modèles anatomiques la plus emblématique est celle proposée par Sawbones (Vashon Island, Washington, USA) pour le genou et l'épaule (ALEX II® et III Shoulder Professor®, ACL Knee Trainer®), dont les pièces sont remplaçables (**Figure 3**). Certains de ces modèles peuvent être utilisés dans des conditions sèches ou humides. L'ESSKA reconnaît que les simulateurs synthétiques ont l'avantage d'offrir un retour d'information naturel par le biais des sens visuel et proprioceptif de l'utilisateur [29]. Ils ont l'avantage d'être moins chers que les simulateurs VR, les rendant donc plus abordables. Cependant, ils présentent la limite de faire beaucoup de déchets et donc d'avoir à long terme une empreinte écologique plus importante (silicone, plastique...). Dans leur enquête auprès des chirurgiens orthopédiques, Safir et al., ont constaté que la simulation à l'aide d'un

modèle synthétique haute-fidélité était, après la simulation organique, la méthode la plus performante pour préparer un interne au bloc opératoire [30].



*Figure 3. Simulateur synthétique de genou, Sawbones (Vashon Island, Washington, USA)*

### **3.d. Simulateurs numériques utilisant la réalité virtuelle (VR)**

Le terme de réalité virtuelle doit être réservé aux simulateurs remplaçant tout ou partie des afférences sensorielles physiques réelles perçues par l'apprenant par des afférences générées pas un ordinateur et affichées ou transmises par des interfaces variables (smartphone, écran 2D, lunettes, casques...). Il n'y a pas de frontière précise dans la typologie des simulateurs qui peuvent combiner des technologies différentes (**Figure 4**).

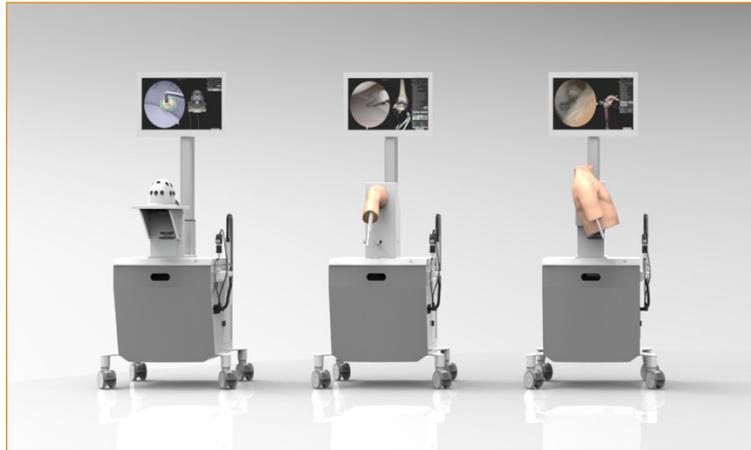


Figure 4. Différents types de simulateurs numériques (avec l'aimable courtoisie de Pr Thomazeau)

### 3.d. i. Simulateurs numériques avec retour haptique (simulateurs hybrides)

Les simulateurs numériques procurent un environnement visuel simulé par l'ordinateur, transmis à l'écran 2D et qui comprend les principales caractéristiques de l'anatomie de l'articulation reconstruites numériquement à chaque instant en fonction des déplacements des instruments. L'utilisation couplée d'instruments réels soit sur maquette synthétique, soit motorisés, autorise un retour de force (ou haptique) réaliste afin de créer une interaction opératoire fidèle avec l'environnement simulé. L'avantage est d'offrir facilement des mesures de performance et des résultats au formé puisque qu'enregistrés dans la machine, alors que ce type de retour d'information a toujours fait défaut dans les simulateurs synthétiques. Les mesures objectives des performances sont rendues possibles pour suivre leurs progrès au cours de la formation. Cette « connaissance des résultats » s'est avérée essentielle au processus d'apprentissage et à l'acquisition de compétences psychomotrices [81]. Les principaux inconvénients des simulateurs VR sont leur coût élevé et la faiblesse du retour d'information haptique reproduit de façon imparfaite soit par des instruments réels sur une maquette synthétique soit par des moteurs électriques, dans les 2 cas couplés à l'ordinateur [29].

Plusieurs simulateurs d'arthroscopie en VR ont fait l'objet de recherches et ont été développés au cours des quinze dernières années. Le système de formation à l'arthroscopie du genou en environnement virtuel (VE-KATS) a été introduit en 2001 et a enregistré le temps de travail et le pourcentage de structures anatomiques visualisées [82]. En 2004, Heng et al., ont décrit le simulateur *PHANToM* pour l'arthroscopie du genou, comportant une maquette synthétique de membre inférieur associée à des capteurs. Ce dispositif permettait un retour visuel avec retour haptique actif par des bras robotiques mais il n'y a pas eu d'évaluation des compétences techniques des formés sur simulateur [83]. Le simulateur d'arthroscopie de l'épaule *Procedicus* de Mentice Corp a été évalué par Srivastava et al., en 2004 [84]. Ce dispositif s'est avéré peu réaliste en taille, rigide et ressemblait finalement peu à une articulation d'épaule humaine. Les auteurs soulignent la nécessité de disposer de mesures standard de la précision et de l'efficacité, ce qui n'est pas le cas. En 2006, le système de formation à l'arthroscopie du genou de Sheffield (SKATS) s'est révélé capable de produire des mesures telles que le temps de travail, la capacité à localiser les pathologies et la longueur du trajet cumulé par les mouvements de l'arthroscope. Le simulateur incluait des modèles anatomiques osseux synthétiques afin de fournir un retour haptique passif. Les auteurs notent qu'il est important que le simulateur soit réaliste et qu'il offre une sensation de résistance physique [85]. Bayona et al., ont collaboré avec GMV (Rome, Italie) pour concevoir le simulateur d'épaule *insightMIST®*, avec un rendu graphique et haptique, afin de fournir un environnement plus réaliste. Un module d'évaluation était disponible pour enregistrer les mesures de performance, mais il n'a pas été validé [86]. Ce groupe a ensuite présenté le développement du simulateur *insightArthroVR®* pour la chirurgie du genou et de l'épaule, qui a été validé. En 2012, la société *Simbionix*, dorénavant *Surgical Science* (Göteborg, Suède) a racheté le simulateur *insightArthroVR®* et l'a rebaptisé *ArthroMENTOR®*. Ce système dispose d'un retour haptique actif fourni par des bras robotisés avec retour de force et peut simuler des procédures diagnostiques et thérapeutiques ainsi que présenter des données statistiques pour l'évaluation des compétences [87]. D'autres simulateurs de VR ont été plus récemment commercialisés. L'*ArthroS®* (*VirtaMed*, Schlieren, Suisse) propose les modules pour différentes articulations (genou, épaule, hanche, cheville) qui associent une maquette synthétique de l'articulation à une interface utilisateur visuelle VR (**Figure 5**). Le simulateur de genou a été évalué par Fucentese et al., en 2014 qui a noté un décalage entre les répliques anatomiques et leurs contreparties virtuelles, pouvant conduire à un retour haptique imprécis [88]. Le simulateur a été amélioré et les différents modules ont été validés en partie dans la littérature par Rahm et al., pour les modules épaule et genou [89,90] puis par Cychosz et al., pour le module d'arthroscopie de hanche [91].



*Figure 5. Simulateur numérique avec retour haptique, ArthroS® (Surgical Science, Göteborg, Suède)*

ToLTech (Aurora, Colorado) a développé le simulateur d'arthroscopie ArthroSim pour le genou et l'épaule en partenariat avec l'AAOS. Ce simulateur utilise des dispositifs haptiques à retour de force actif et est actuellement utilisé exclusivement pour la formation aux procédures de diagnostic. Il a pu être validé en 2020 par Mulligan et al., [92]. Cependant, les dispositifs haptiques existants ne fournissent pas une représentation fidèle des forces existantes. Le manque de réalisme des mouvements des instruments ou la qualité réduite du réalisme de certaines conceptions graphiques peuvent compromettre l'applicabilité des simulateurs VR à la formation à la chirurgie réelle [72].

### *3.d. ii. Simulateur Immersive VR*

Bien que le premier simulateur VR immersif date du début des années 1990 [93], ce n'est que depuis la dernière décennie que les casques de réalité virtuelle (VR) se commercialisent à bas prix. Initialement conçus pour les jeux vidéo, ils ont été rapidement adaptés au domaine de la santé pour traiter certains troubles mentaux [94], pour faciliter la réadaptation après un accident vasculaire cérébral [95], pour diminuer l'anxiété des patients au bloc opératoire [96] ou bien pour préparer les équipes soignantes à l'environnement du bloc opératoire [97]. L'ajout récent de contrôleurs portables à suivi de mouvement a ouvert de nouvelles perspectives pour la formation chirurgicale. Les casques VR peuvent « immerger » l'utilisateur dans un bloc opératoire virtuel. Les contrôleurs permettent à l'utilisateur d'interagir et de mettre en œuvre le large éventail d'instruments généralement utilisés dans les procédures chirurgicales ouvertes. La principale difficulté dans le développement des simulateurs "tout VR" reste d'obtenir un retour kinesthésique et tactile réaliste.

Pour la chirurgie orthopédique, Logishetty et al., ont transposé avec succès son utilisation à la formation chirurgicale de l'arthroplastie totale de hanche [98], Lorhe et al., ont prouvé son efficacité pour l'apprentissage de l'exposition glénoïdienne dans les procédures d'arthroplasties

d'épaule [99] tandis que Edwards et al., ont montré qu'il était possible d'apprendre efficacement un ancillaire complexe de prothèse de révision du genou pour le personnel de bloc opératoire [100].

Enfin, les dernières innovations chirurgicales utilisant les réalité mixte et/ou augmenté offrent de nouvelles perspectives d'immersion virtuelles et de transmission des connaissances pour l'ensemble de la communauté chirurgicale [101–103].

### **3.e. Simulateur « mental »**

#### *3.e. i. Analyse Cognitive des Tâches (ACT)*

L'analyse cognitive des tâches (ACT) analyse et normalise l'enseignement séquentiel d'une procédure. Il s'agit d'une méthode validée par laquelle les éléments d'une tâche complexe peuvent être saisis et analysés pour permettre un transfert efficace des connaissances des experts aux novices afin d'accélérer leurs courbes d'apprentissage à moindre coût [104]. L'ACT peut constituer un complément efficace et abordable aux programmes de formation orthopédique. La première étape consiste en l'observation et des entretiens semi-structurés avec des experts pour déterminer les stratégies, les approches et les étapes de prise de décision essentielles pour chaque séquence d'une procédure. Ces étapes sont complétées par des analyses d'incidents critiques et des conseils d'experts pour identifier les erreurs possibles des novices et les solutions [105,106]. Enfin, une description approfondie des étapes techniques et non techniques impliquées peut être créée pour fournir plus de détails par rapport aux cours ou aux manuels conventionnels, permettant ainsi une meilleure compréhension de la procédure [107]. Les ACT, largement utilisés dans la formation des pilotes et du personnel militaire, ont été adaptées plus récemment à la chirurgie [108]. Des études ont suggéré qu'elles améliorent l'acquisition des techniques et des connaissances des internes pour certaines procédures laparoscopiques [109]. En orthopédie, il existe des preuves démontrant l'efficacité de l'ACT dans la formation des novices à l'arthroscopie du genou [110,111], à l'enclouage intramédullaire fémoral [112], à la réparations des tendons fléchisseurs [113] et à l'arthroplastie totale de la hanche[114].

#### *3.e. ii. Briefing/Debriefing*

Le debriefing est également un moyen de formation dont l'efficacité a pu être montrée récemment en chirurgie orthopédique et traumatologique. Ducournau et al., ont prouvé la supériorité du debriefing post-opératoire vidéo-assisté au compagnonnage traditionnel peropératoire ainsi qu'à la lecture d'article et de vidéos préopératoires [115]. Le briefing préopératoire à l'aide de logiciels de planification permet également de former les internes. Gauci et al., l'ont évalué avec succès pour la formation à l'arthroplastie inversée d'épaule mais le

résultat est plus mitigé pour l'apprentissage de l'arthroplastie totale du genou avec l'utilisation de la robotique où seulement un interne sur deux y trouve un intérêt dans l'étude de Duensing et al.,[116].

#### **4. VALIDATION PEDAGOGIQUE D'UN OUTIL DE SIMULATION**

Un simulateur doit être validé à différents niveaux pour mesurer son intérêt pédagogique définissant son efficacité. Différents types de validation peuvent être effectués. La *Face Validity* (validité apparente) est généralement la première validation effectuée. Il s'agit d'une mesure subjective qui s'appuie sur l'avis d'experts pour déterminer dans quelle mesure le simulateur ressemble à ce qu'il est censé faire, généralement sur des échelles de Likert. La *Construct Validity* (validité de construction) montre la capacité du simulateur à distinguer des niveaux de performance entre apprenants, par exemple entre des experts et des novices. La *Transfert Validity* (validité de transfert) indique que les compétences acquises sur le simulateur peuvent être transférées, sur une maquette synthétique, sur un sujet anatomique et dans l'idéal au bloc opératoire. Enfin, la *Concurrent Validity* (validité de concurrence) et l'*Economic Validity* (validité économique) évaluent l'impact d'un outil de simulation sur les modèles économiques de formation et de soins par rapport aux autres moyens de formation. La littérature contient plusieurs exemples d'études en validation pédagogique des simulateurs numériques d'arthroscopie.

##### **4.a. Face & Construct Validity**

Ces deux composantes de validité d'un simulateur sont souvent étudiées ensemble dans les études. Tuijthof et al., ont évalué deux simulateurs VR d'arthroscopie du genou pour les *Face & Construct Validity* en 2011 [117]. Ils ont invité des chirurgiens de différents niveaux (novices sans expérience arthroscopique, intermédiaires avec moins de 60 arthroscopies pratiquées en tant qu'opérateur principal et experts avec plus de 60 arthroscopies pratiquées en tant qu'opérateur principal) à utiliser le simulateur. Pour tester la *Face Validity*, ils ont utilisé un questionnaire type Likert portant sur le réalisme, la perception et la valeur pédagogique. Pour évaluer la *Construct Validity*, le temps nécessaire à l'exécution d'une tâche a été mesuré et comparé entre les participants. Dans une autre étude, Bayona et al., ont évalué les *Face & Construct Validity* du simulateur de genou et d'épaule insightArthro VR® (3D Systems, Rock Hill, USA) [86]. Ils ont recruté des chirurgiens de différents niveaux lors d'un congrès (novices sans expérience arthroscopique, intermédiaires avec moins de 50 arthroscopies pratiquées en tant qu'opérateur principal et experts avec plus de 50 arthroscopies pratiquées en tant qu'opérateur principal) et

leur ont demandé d'effectuer une tâche sur le simulateur et de répondre à un questionnaire. Un autre simulateur d'épaule VR, le ProceDicus® (Mentice, Gothenburg, Suède) a été validé par Srivastava et al.,[84]. L'étude a démontré la validité de construction du simulateur en vérifiant que les chirurgiens expérimentés obtiennent de meilleurs résultats que les novices selon trois tâches : l'identification anatomique, la manipulation au crochet palpeur et la navigation intra-articulaire. Le simulateur de genou PASSPORT V2 a été évalué en 2014 [118]. Une procédure standardisée d'exploration intra-articulaire selon 9 points de repère a été chronométrée et utilisée pour évaluer la validité de construction. Un questionnaire a été utilisé pour déterminer la validité apparente et les participants ont estimé que le retour tactile réaliste était le plus grand atout du simulateur. La corrélation entre les performances sur un simulateur d'épaule VR et le niveau d'expérience chirurgicale a été démontrée par Gomoll et al., en 2007 [119]. Les paramètres comparés étaient le temps de réalisation, la distance parcourue par rapport à une "distance optimale", la vitesse moyenne de la sonde et le nombre de collisions de la sonde avec les tissus. En 2011, Ward et al., ont montré une corrélation entre les performances sur une épaule cadavérique et un simulateur d'épaule VR. Il a été démontré que le temps de réalisation de la procédure sur le simulateur permettait de prédire la performance sur le sujet anatomique [120]. Le simulateur ArthroS de Virtamed® a été analysé à plusieurs reprises lors de la dernière décennie. Les validités apparentes et de constructions ont été évaluées pour les modules genou [88,121], épaule [89,121] et hanche [91]. Le simulateur a été jugé bon en termes de réalisme (noté entre 5 et 6 sur 7 sur l'échelle de Likert) à l'exception du ressenti haptique, avec des experts significativement plus efficaces dans la plupart des gestes techniques analysés à l'exception des métriques évaluant les dégâts cartilagineux induits par les participants et le pourcentage de zones d'intérêts visualisés. Enfin, la plupart des simulateurs hybrides VR actuels n'arrivent pas à différencier finement des groupes d'expertises (différenciation des novices et des experts mais pas des groupes de niveau intermédiaire) [90,122].

#### **4.b. Transfer Validity**

La *Transfer Validity* montre que les compétences acquises lors de la formation sur simulateur peuvent se traduire par de meilleures performances au bloc opératoire, justifiant l'intégration de la simulation arthroscopique dans la formation de base des internes. La validité de transfert dans la formation en laparoscopie a été bien établie par le passé [123,124]. En ce qui concerne l'arthroscopie, Howells et al., ont publié une étude en 2008 sur des internes en chirurgie orthopédique ayant bénéficié d'un entraînement sur simulateur synthétique de genou à raison de trois séances par semaine et de six simulations par séance. Ils ont été comparés à des

internes n'ayant bénéficié d'aucune pratique supplémentaire. Les internes formés ayant utilisé le simulateur ont obtenu de meilleurs résultats au bloc opératoire, démontrant la validité du transfert des compétences arthroscopiques à partir d'un simulateur synthétique de genou [125]. Une autre étude démontrant la validité du transfert au bloc opératoire des compétences arthroscopiques acquises sur simulateur numérique a été publiée en 2014 par Cannon et al., [126]. L'étude a été menée dans sept établissements universitaires, auprès de 48 internes, troisième année en chirurgie orthopédique, répartis au hasard en deux groupes : formation sur simulateur ou sans formation supplémentaire. Les internes formés ont suivi quatre cycles de formation progressive sur simulateur. Les deux groupes ont ensuite effectué une arthroscopie diagnostique du genou sur patient réel. Leurs interventions ont été enregistrées puis évaluées à distance par des chirurgiens extérieurs au groupe d'études. Les internes formés sur simulateur ont fait preuve d'une plus grande habileté au bloc opératoire démontrant ainsi la validité du transfert.

Une étude menée en 2013 par Henn et al., a démontré la validité du transfert du simulateur d'épaule VR vers le sujet anatomique en comparant l'effet de la formation sur 17 internes en première année d'internat de chirurgie orthopédique sans expérience au préalable. Tous les candidats ont effectué une tâche de base sur sujet anatomique. Neuf étudiants ont reçu six séances de formation sur trois mois, tandis que les huit autres n'ont reçu aucune formation. Les étudiants ont ensuite répété la même arthroscopie sur un sujet anatomique [127]. Dans une autre étude réalisée en 2013 par Butler et al., les participants de l'étude ont été formés pour réaliser une arthroscopie diagnostique sur simulateur synthétique de genou avant de s'entraîner à la même procédure sur sujet anatomique. Le groupe témoin n'a reçu aucune formation préalable avant d'effectuer l'arthroscopie diagnostique sur sujet anatomique. Les deux groupes ont été comparés sur la base du nombre moyen d'essais requis avant d'atteindre la compétence requise sur le sujet anatomique. Le nombre moyen s'est avéré être significativement inférieur pour le groupe ayant reçu une formation sur le simulateur, indiquant un transfert de formation [72].

#### **4.c. Concurrent & Economic Validity**

Aux exigences d'efficacité pédagogique s'ajoutent des paramètres d'organisation pour que les formations par la simulation puissent être efficaces et pérennes au sein d'une infrastructure.

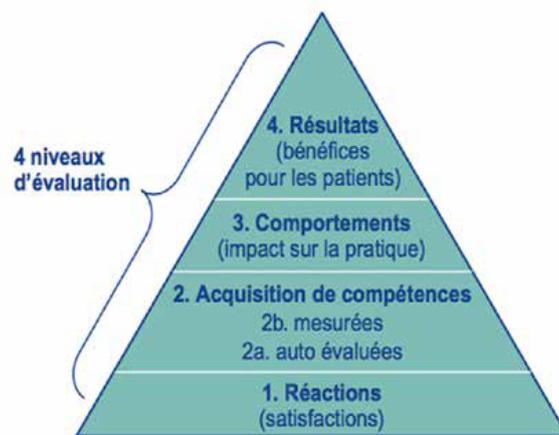
Il faut pouvoir replacer l'utilisation du simulateur dans son contexte de formation. Utiliser par exemple des sujets issus du don de corps humain [128], reperfusés et revascularisés, pour l'apprentissage de gestes techniques interventionnelles de base, sera peu rentable par la

complexité de mise en place du dispositif de simulation et de la faible supériorité pédagogique de ce dispositif par rapport à d'autres moyens moins onéreux. A l'inverse, son utilisation prend sens pour l'apprentissage d'un geste complexe, non proposé par d'autres outils pédagogiques, même si sa mise en œuvre est lourde, sa répétabilité réduite, le nombre d'étudiants faible et l'accompagnement administratif complexe. L'aspect financier d'un simulateur est lié à l'infrastructure, à ses moyens humains, à son intégration dans une organisation mutualisée en termes de programme pédagogique et de moyens financiers. L'achat d'un simulateur numérique onéreux pourrait être rentable s'il est déplaçable, efficace, et touchant une large population d'apprenants. Il le sera encore plus si l'outil numérique est mutualisable entre spécialités et professions. A l'inverse un outil coûteux à l'achat et/ou à l'entretien n'est pas rentable pour une infrastructure s'il ne sert que pour quelques apprenants, pour un seul geste d'une seule spécialité. Ces notions de rendement et de rentabilité (efficience) sont peu abordées dans la littérature et dépendent des environnements nationaux et régionaux. Quelques études démontrent par exemple que l'utilisation de maquettes synthétiques pour la laparoscopie offre un meilleur rendement et une meilleure rentabilité que le compagnonnage au bloc opératoire et la simulation numérique, mais que celui-ci devient rentable si la durée de la formation des apprenants atteint ou dépasse 5 années [129]. Des paramètres mesurables issus de la simulation aéronautique sont publiés et rendus possibles notamment par la simulation numérique. Ainsi est-il possible de calculer l'indice d'efficience de transfert d'un simulateur numérique, c'est-à-dire le temps de formation gagné grâce à lui par rapport aux méthodes conventionnelles pour atteindre la compétence en situation réelle pour un geste simple telle qu'une suture digestive (*transfer-effectiveness-ratio*). Pour l'arthroscopie, une seule étude récente s'est intéressée à l'efficience d'un simulateur numérique immersif pour l'apprentissage de base en arthroscopie de hanche [130]. Rahman et al., ont montré l'équivalence en termes de transfert de compétences techniques de ce simulateur par rapport aux techniques conventionnelles plus onéreuses (simulateur hybride VR).

#### **4.d. Vers de nouveaux outils d'efficience pédagogique**

Les programmes de formation en simulation diffèrent enfin par les « retombées » qu'ils ont sur les apprenants : connaissances acquises, modification de leur raisonnement et/ou leur pratique, qualité des soins prodigués et résultats en pratique réelle, économie de soins et bénéfice pour le patient. Messick a remis en question dès 1995 les notions de validité pédagogiques pour la considérer comme une entité unique regroupant l'ensemble des validités précédemment mentionnées [131]. Cette validation est méthodologiquement très exigeante et peu applicable à l'évaluation permanente de nouveaux outils de simulations. Borgersen et al., ont d'ailleurs

montré dans une revue de littérature de 2018 que la plupart des études évaluant les simulateurs chirurgicaux ne respectaient pas les critères de Messick [132]. Les études plus récentes remplacent progressivement les validations classiques, caractérisant surtout l’outil, par d’autres critères caractérisant les retombées. Le modèle de Kirkpatrick tente d’évaluer cela [133] (**Figure 6**) comme décrit dans l'actualisation du guide des bonnes pratiques en Simulation en Santé publié par la Haute Autorité de Santé en 2024 [11]. Bien qu'il ne superpose pas strictement aux différents types de validité des outils, la notion de retombées pour l'apprenant en fait un outil d'échange scientifique sur le sujet.



**Figure 6.** Echelle de Kirkpatrick en 4 niveaux de validation de l'efficacité pédagogique d'un outil de simulation

Le niveau 1 (*Réaction*) correspond à une évaluation de la satisfaction des apprenants et de leurs réactions personnelles. Elle est communément faite au moyen d’auto-questionnaires remplis en fin de formation. Bien qu’il soit important de vérifier que l’apprenant n’ait pas été dérangé par la formation, une évaluation positive ne garantit pas le succès pédagogique d’une formation.

Le niveau 2 (*Apprentissage*) implique une mesure de l’acquisition des compétences du participant des participants. Il s’agit des connaissances, des compétences et/ou des attitudes acquises lors de la formation qui correspondent aux objectifs pédagogiques de la formation. Le gain en termes d’apprentissage est idéalement mesuré par une évaluation comparative pré et post formation. L’utilisation de grilles (checklist) ou d’échelles améliore l’objectivité de l’évaluation.

Le niveau 3 (*Compétence ou Transfert*) évalue le degré de modification du comportement des participants lors de leur pratique professionnelle suite à la formation. En d’autres termes, on analyse l’importance des changements comportementaux pour la pratique réelle qui ont été générés par la formation. Il s’agit d’une évaluation complexe à mettre en place, surtout pour rester objectif et elle doit être répétée dans le temps. Les deux méthodes principales sont les auto-questionnaires et l’évaluation directe par un supérieur/encadrant.

Le niveau 4 (*Résultats*) est le plus complexe à analyser et correspond à une évaluation des retombées de la formation sur la prise en charge des patients en situation réelle. Un certain nombre d'échelles managériales (efficacité, etc...) et d'autres paramètres cliniques comme les taux de complications, peuvent être analysés. De nombreux facteurs externes peuvent impacter les résultats sur ces échelles ce qui nécessite une prudence dans leur interprétation.

## **5. EVALUATION PEDAGOGIQUE**

Fournir aux formés une évaluation objective de leurs performances est une partie importante du processus d'apprentissage. Le retour d'information peut se faire à l'aide d'échelles d'évaluation globales ou de mesures quantitatives, l'objectif étant de fournir une évaluation efficace est fiable, valide et impartiale.

### **5.a. Global Rating Scale (GRS)**

Les échelles d'évaluation globale (GRS) correspondent à des rubriques de notation structurées avec des points d'ancrage bien définis. Elles sont en général utilisées par des chirurgiens experts pour juger objectivement les performances. Des échelles telles que OSATS (*Objective Structured Assessments of Technical Skills*) et GOALS (Global Objective Assessment of Laparoscopic Skills) ont été développées, validées et utilisées pour évaluer les performances en chirurgie laparoscopique [78,134]. En 2009, Insel et al., ont développé le Basic Arthroscopy Knee Skill Scoring System (BAKSSS), qui a montré une forte corrélation entre les scores d'une échelle d'évaluation globale de type Likert en 5 points et l'expérience arthroscopique [135]. L'Arthroscopic Surgical Skill Evaluation Tool (ASSET), décrit en 2013, utilise une échelle GRS de type Likert en 5 points [136]. L'outil ASSET vise à évaluer les compétences techniques arthroscopiques globales d'un interne en utilisant huit domaines pour évaluer une partie particulière de l'acquisition des compétences arthroscopiques. L'outil s'est avéré capable de discriminer entre les niveaux d'expérience des chirurgiens, ainsi que d'avoir une bonne fiabilité inter-évaluateurs [137]. Bayona et al., ont créé l'Imperial Global Arthroscopy Rating Scale (IGARS) en 2014. Cette grille d'évaluation a été testée sur un simulateur d'épaule VR et comprend dix critères évalués sur une échelle de type Likert en 5 points [138]. L'échelle IGARS a permis de distinguer les différents niveaux d'expérience sur le simulateur. On remarque que la plupart des échelles restent similaires, plusieurs compétences arthroscopiques étant évaluées sur une échelle de 5 points. Ces échelles d'évaluation globale peuvent fournir un retour d'information validé et significatif aux formés. Cependant, elles nécessitent en théorie qu'un chirurgien expert évalue la performance, soit pendant la session de formation, soit plus tard par le biais d'une

relecture vidéo. Cette évaluation peut être coûteuse et prendre beaucoup de temps lorsqu'elle est utilisée pour une formation à des compétences très élémentaires. Le GRS peut être mieux justifié pour la formation à des compétences et procédures plus complexes [139,140]. Le Diagnostic Arthroscopy Skill Score (DASS) est le score le plus récent publié et validé dans la littérature. Il résume à la fois le bénéfice de ces scores mais également leurs défauts [141]. En effet, il s'agit d'un score de compétence pour chaque séquence simple issue d'une procédure plus complexe (*exploration cul de sac méniscal au genou, exploration du compartiment fémoro-tibial latéral, ...*), la somme de ces scores résumant la compétence dans la procédure (*exploration arthroscopique du genou*). Il est donc objectif, exhaustif mais aussi lourd à mettre en place pour l'évaluateur [142]. Une des perspectives pour le futur serait de l'automatiser informatiquement.

### **5.b. Métriques quantitatives**

Les alternatives aux GRS sont des mesures quantitatives qui peuvent être contrôlées et évaluées par un ordinateur. L'ESSKA définit une métrique comme "une quantité numérique qui, dans ce contexte, est censée refléter une partie de la performance de l'utilisateur" et est synonyme de mesure ou de paramètre [29]. Les métriques sont enregistrées par des capteurs et les données peuvent être utilisées pour fournir un retour d'information en temps réel ou être traitées a posteriori pour fournir un retour d'information après l'exercice. Les mesures basées sur le temps, la position et la force ont été étudiées précédemment en chirurgie laparoscopique et arthroscopique. Le temps de travail, correspondant au temps écoulé entre le début et la fin de la tâche, est une mesure largement utilisée et facile à mesurer. Il a été utilisé dans de nombreuses études [117,143,144]. Bien qu'il ne soit pas un bon reflet de la qualité de la tâche exécutée, il reflète bien l'économie de mouvement [145]. Tashiro et al., ont intégré un dispositif de suivi des mouvements et un capteur de force à un simulateur synthétique de genou pour collecter des données sur les performances. Des chirurgiens expérimentés ont été comparés à des novices et il s'est avéré qu'ils suivaient une trajectoire plus courte et que la vitesse instrumentale était plus élevée. Il a été également constaté que les novices appliquaient des forces plus importantes sur les structures anatomiques de l'articulation lors des gestes de palpation [146].

De la même manière, les simulateurs numériques hybrides dernières générations ont intégré des capteurs de force et de mouvement dans leur maquette synthétique. Les capteurs de force 3D mesurent les forces appliquées au simulateur au niveau des zones anatomiques d'intérêts et avertissent les utilisateurs lorsqu'une force maximale est dépassée [118,147]. L'analyse des mouvements a été étudiée comme moyen de distinguer les chirurgiens orthopédiques des non chirurgiens par Howells et al., en 2008 [145]. L'étude a utilisé un simulateur d'épaule synthétique

combiné au système de suivi des mouvements Patriot™ (Polhemus, Colchester, USA). Les sujets ont effectué des tâches de palpation et de saisie. Il a été constaté que les chirurgiens expérimentés parcouraient des trajets plus courts et effectuaient moins de mouvements de la main que les non-chirurgiens. Il a également été démontré que la distance instrumentale et les mouvements de la main étaient en corrélation avec les courbes d'apprentissage dans deux tâches arthroscopiques (une épaule et un genou) dans une étude réalisée par Alvand et al. en 2011 [148].

Le jerk ou secousse correspondant à la dérivée de l'accélération mesure les changements d'accélération et reflète les mouvements saccadés de l'instrument. Le jerk fait partie des métriques mesurant la fluidité de mouvement. La fluidité de mouvement est un paramètre plus complexe correspondant à au changement total d'accélération de la pointe instrumentale normalisée par la durée de la procédure. Plusieurs auteurs ont évalué leur formule par leur passé en chirurgie laparoscopique [53,149] sans qu'il n'y ait de consensus [150,151]. Oropesa et al., ont montré des différences significatives entre les groupes, en particulier pour les tâches de préhension impliquant une coordination bimanuelle dans un contexte de chirurgie laparoscopique [152]. Il n'a pas encore été déterminé si les métriques analysant la fluidité de mouvement telles que le jerk sont pertinents pour l'arthroscopie. La fluidité a pourtant été considérée comme une mesure importante pour l'échelle IGARS, mais n'a pas été quantifiée [138].

Il est difficile de déterminer une trajectoire optimale pour chaque procédure. Il est courant de considérer que la ligne droite entre deux points est le chemin idéal mais en chirurgie laparoscopique, il a toutefois été prouvé que ce n'était pas toujours le cas [153]. Évaluer uniquement la distance instrumentale ne serait alors pas suffisante et d'autres mesures basées sur la célérité pourraient être intéressantes (vitesses moyenne et maximale, accélérations moyenne et maximale).

D'autres mesures de mouvement concernent la maîtrise par l'apprenant de son espace de travail, en termes de dimensions et d'orientation. Il s'agit de la profondeur, de la surface angulaire, du volume, de la perception spatiale et de l'économie de mouvement. Cependant, il est difficile d'établir leur validité car elles ne sont pas souvent prises en compte. Néanmoins, les études qui les ont pris en compte en chirurgie laparoscopique ont montré des différences significatives pour des tâches telles que la navigation, la préhension, et la coordination bimanuelle [154,155]. L'économie de mouvement a été mesuré par le passé en chirurgie laparoscopique [156] mais reste sujette à controverse sur son utilité pour discriminer le niveau techniques des apprenants [157].

### **5.c. Analyse des trajectoires**

L'analyse des trajectoires permet de comparer la trajectoire instrumentale d'un participant pour une procédure donnée par rapport à un groupe de trajectoires de chirurgiens de différents niveaux. Il existe plusieurs techniques comme l'utilisation de modèle de Markov caché en chirurgie laparoscopique [158], ou bien l'utilisation de la classification hiérarchique [159]. La classification hiérarchique (ou clustering) est une méthode d'analyse qui cherche à construire une hiérarchie de groupes avec critère de liaison. Pour l'analyse des séries temporelles, la déformation temporelle dynamique (Dynamic Time Warping, DTW) est un algorithme permettant de mesurer la similarité entre deux séquences temporelles dont la vitesse peut varier. Le clustering hiérarchique avec DTW a déjà été utilisé avec succès pour distinguer différents niveaux d'expertise dans des études portant sur la formation à la chirurgie laparoscopique [160], ou bien à la chirurgie robotique par simulation VR [161] mais n'a pas encore été analysé dans la formation à l'arthroscopie.

### **5.d. Analyse des compétences non techniques**

Les compétences non techniques peuvent donner des informations différentes et complémentaires pour le formateur sur le niveau de l'apprenant. Même s'il s'agit de la « deuxième composante » du Chirurgien selon Yule [162], la majorité des événements indésirables en chirurgie viennent d'un défaut non-technique [163,164]. Pourtant, l'analyse des composantes non techniques reste encore à la marge de l'évaluation pédagogique et dont il reste à déterminer les contours pour les intégrer efficacement dans les processus de formation [165].

## **6. OBJECTIFS DE LA THESE**

L'état actuel des recherches en pédagogie médicale s'intéressant à la simulation arthroscopique montre qu'il reste encore à :

- (1) Valider de façon plus approfondie les simulateurs en termes de *Construct Validity* et *Transfer Validity* ;
- (2) Analyser l'influence des compétences non techniques en chirurgie arthroscopique ;
- (3) Évaluer efficacement les apprenants soit par des échelles de compétences, soit par des métriques innovantes voire via d'autres méthodes de mesure.

Ces trois points seront les objectifs de ce travail de thèse et des chapitres à venir.

## 7. REFERENCES

- [1] Loisançe D. Réflexions sur la formation initiale du chirurgien en 2010 : l'acquisition des fondamentaux. *Bull Académie Natl Médecine* 2011;195:131–49. [https://doi.org/10.1016/S0001-4079\(19\)32112-0](https://doi.org/10.1016/S0001-4079(19)32112-0).
- [2] Ericsson KA. Deliberate practice and acquisition of expert performance: a general overview. *Acad Emerg Med Off J Soc Acad Emerg Med* 2008;15:988–94. <https://doi.org/10.1111/j.1553-2712.2008.00227.x>.
- [3] Arrêté du 21 avril 2017 relatif aux connaissances, aux compétences et aux maquettes de formation des diplômés d'études spécialisées et fixant la liste de ces diplômés et des options et formations spécialisées transversales du troisième cycle des études de médecine - Légifrance n.d. <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000034502881> (accessed July 15, 2024).
- [4] Ericsson KA, Smith J. *Toward a General Theory of Expertise: Prospects and Limits*. Cambridge University Press; 1991.
- [5] Nasca TJ, Day SH, Amis ES, ACGME Duty Hour Task Force. The new recommendations on duty hours from the ACGME Task Force. *N Engl J Med* 2010;363:e3. <https://doi.org/10.1056/NEJMSb1005800>.
- [6] Inaparthi PK, Sayana MK, Maffulli N. Evolving trauma and orthopedics training in the UK. *J Surg Educ* 2013;70:104–8. <https://doi.org/10.1016/j.jsurg.2012.07.006>.
- [7] Chikwe J, de Souza AC, Pepper JR. No time to train the surgeons. *BMJ* 2004;328:418–9. <https://doi.org/10.1136/bmj.328.7437.418>.
- [8] Faivre G, Marillier G, Nallet J, Nezelof S, Clément I, Obert L. Are French orthopedic and trauma surgeons affected by burnout? Results of a nationwide survey. *Orthop Traumatol Surg Res* 2019;105:395–9. <https://doi.org/10.1016/j.otsr.2018.12.009>.
- [9] Agout C, Rosset P, Druon J, Brillhault J, Favard L. Epidemiology of malpractice claims in the orthopedic and trauma surgery department of a French teaching hospital: A 10-year retrospective study. *Orthop Traumatol Surg Res* 2018;104:11–5. <https://doi.org/10.1016/j.otsr.2017.11.007>.
- [10] Bridges M, Diamond DL. The financial impact of teaching surgical residents in the operating room. *Am J Surg* 1999;177:28–32. [https://doi.org/10.1016/S0002-9610\(98\)00289-X](https://doi.org/10.1016/S0002-9610(98)00289-X).
- [11] Bonnes pratiques en matière de simulation en santé 2024.
- [12] Franzeck FM, Rosenthal R, Muller MK, Nocito A, Wittich F, Maurus C, et al. Prospective randomized controlled trial of simulator-based versus traditional in-surgery laparoscopic camera navigation training. *Surg Endosc* 2012;26:235–41. <https://doi.org/10.1007/s00464-011-1860-5>.
- [13] Seymour NE, Gallagher AG, Roman SA, O'Brien MK, Bansal VK, Andersen DK, et al. Virtual Reality Training Improves Operating Room Performance: Results of a Randomized, Double-Blinded Study. *Ann Surg* 2002;236:458–64. <https://doi.org/10.1097/00000658-200210000-00008>.
- [14] Aggarwal R, Ward J, Balasundaram I, Sains P, Athanasiou T, Darzi A. Proving the effectiveness of virtual reality simulation for training in laparoscopic surgery. *Ann Surg* 2007;246:771–9. <https://doi.org/10.1097/SLA.0b013e3180f61b09>.
- [15] Zendejas B, Cook DA, Bingener J, Huebner M, Dunn WF, Sarr MG, et al. Simulation-based mastery learning improves patient outcomes in laparoscopic inguinal hernia repair: a randomized controlled trial. *Ann Surg* 2011;254:502–9; discussion 509-511. <https://doi.org/10.1097/SLA.0b013e31822c6994>.

- [16] Palter VN, Grantcharov T, Harvey A, Macrae HM. Ex vivo technical skills training transfers to the operating room and enhances cognitive learning: a randomized controlled trial. *Ann Surg* 2011;253:886–9. <https://doi.org/10.1097/SLA.0b013e31821263ec>.
- [17] Overby DW, Watson RA. Hand motion patterns of Fundamentals of Laparoscopic Surgery certified and noncertified surgeons. *Am J Surg* 2014;207:226–30. <https://doi.org/10.1016/j.amjsurg.2013.10.007>.
- [18] Leong JJH, Leff DR, Das A, Aggarwal R, Reilly P, Atkinson HDE, et al. Validation of orthopaedic bench models for trauma surgery. *J Bone Joint Surg Br* 2008;90:958–65. <https://doi.org/10.1302/0301-620X.90B7.20230>.
- [19] Holland JP, Waugh L, Horgan A, Paleri V, Deehan DJ. Cadaveric hands-on training for surgical specialties: is this back to the future for surgical skills development? *J Surg Educ* 2011;68:110–6. <https://doi.org/10.1016/j.jsurg.2010.10.002>.
- [20] Rashed S, Ahrens PM, Maruthainar N, Garlick N, Saeed MZ. The Role of Arthroscopic Simulation in Teaching Surgical Skills: A Systematic Review of the Literature. *JBJS Rev* 2018;6:e8. <https://doi.org/10.2106/JBJS.RVW.17.00201>.
- [21] Hernigou P, Karam S, Khaled I. Scoping out the past: meniscus examination with arthroscopy; the light arrived in the knee before the end of World War I with the cystoscope, Fresnel’s lens, and Edison’s lamp. *Int Orthop* 2023;47:2601–14. <https://doi.org/10.1007/s00264-023-05940-5>.
- [22] Watanabe M. Memories of the early days of arthroscopy. *Arthrosc J Arthrosc Relat Surg Off Publ Arthrosc Assoc N Am Int Arthrosc Assoc* 1986;2:209–14. [https://doi.org/10.1016/s0749-8063\(86\)80073-1](https://doi.org/10.1016/s0749-8063(86)80073-1).
- [23] Jackson RW. A History of Arthroscopy. *Arthrosc J Arthrosc Relat Surg* 2010;26:91–103. <https://doi.org/10.1016/j.arthro.2009.10.005>.
- [24] Oh C, Kakar S. NanoScope Arthroscopy: Lessons Learned in the First 75 Cases. *J Wrist Surg* 2022;11:280–7. <https://doi.org/10.1055/s-0042-1749089>.
- [25] Mouchantaf M, Bastard C, Corsia S, Métails P, Nourissat G. High Rates of Return to Play and Low Recurrence Rate After Arthroscopic Latarjet Procedure for Anterior Shoulder Instability in Rugby Players. *Arthrosc Sports Med Rehabil* 2024;6:100912. <https://doi.org/10.1016/j.asmr.2024.100912>.
- [26] Clavert P, Thomazeau H. Peri-articular suprascapular neuropathy. *Orthop Traumatol Surg Res OTSR* 2014;100:S409-411. <https://doi.org/10.1016/j.otsr.2014.10.002>.
- [27] Guegan B, Drouineau M, Common H, Robert H. All the menisco-ligamentary structures of the medial plane play a significant role in controlling anterior tibial translation and tibial rotation of the knee. Cadaveric study of 29 knees with the Dyneelax® laximeter. *J Exp Orthop* 2024;11:e12038. <https://doi.org/10.1002/jeo2.12038>.
- [28] Fernandez A, Sappey-Marinié E, Lavoie F, Batailler C, Servien E, Lustig S. Arthroscopic-assisted robotic bi-unicompartmental knee arthroplasty: a pilot cadaveric study. *Arch Orthop Trauma Surg* 2023;143:3439–46. <https://doi.org/10.1007/s00402-022-04647-3>.
- [29] Karahan M, Kerkhoffs GMMJ, Randelli P, Tuijthof GJM, editors. *Effective Training of Arthroscopic Skills*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2015. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-44943-1>.
- [30] Safir O, Dubrowski A, Mirsky L, Lin C, Backstein D, Carnahan H. What skills should simulation training in arthroscopy teach residents? *Int J Comput Assist Radiol Surg* 2008;3:433–7. <https://doi.org/10.1007/s11548-008-0249-y>.
- [31] Zahiri M, Nelson C, Siu K-C. Portable Laparoscopic Training System Using Virtual Reality. *J Med Devices* 2013;7:020922. <https://doi.org/10.1115/1.4024330>.
- [32] de Witte B. Étude des processus cognitifs impliqués dans la chirurgie minimalement invasive n.d.

- [33] The training of the surgeon : the annual address in medicine delivered at Yale University, June 27, 1904 : Halsted, William, 1852-1922 : Free Download, Borrow, and Streaming : Internet Archive n.d. <https://archive.org/details/b2246413x> (accessed June 19, 2024).
- [34] Sealy WC. Halsted is dead: Time for change in graduate surgical education. *Curr Surg* 1999;56:34–9. [https://doi.org/10.1016/S0149-7944\(99\)00005-7](https://doi.org/10.1016/S0149-7944(99)00005-7).
- [35] McKee J. “Rebooting” orthopaedic resident education: AAOS sponsors second summit on orthopaedic surgery training through simulation. *AAOS Now* 2014:6+.
- [36] Rose K, Pedowitz R. Fundamental arthroscopic skill differentiation with virtual reality simulation. *Arthrosc J Arthrosc Relat Surg Off Publ Arthrosc Assoc N Am Int Arthrosc Assoc* 2015;31:299–305. <https://doi.org/10.1016/j.arthro.2014.08.016>.
- [37] Baumann Q, Hardy A, Courage O, Lacombes P, Accadbled F. Lessons taught by a knee arthroscopy simulator about participants in a European arthroscopy training programme. *Orthop Traumatol Surg Res* 2019;105:S287–91. <https://doi.org/10.1016/j.otsr.2019.09.008>.
- [38] Seil R, Hoeltgen C, Thomazeau H, Anetzberger H, Becker R. Surgical simulation training should become a mandatory part of orthopaedic education. *J Exp Orthop* 2022;9:22. <https://doi.org/10.1186/s40634-022-00455-1>.
- [39] Walbron P, Common H, Thomazeau H, Hosseini K, Peduzzi L, Bulaid Y, et al. Virtual reality simulator improves the acquisition of basic arthroscopy skills in first-year orthopedic surgery residents. *Orthop Traumatol Surg Res* 2020;106:717–24. <https://doi.org/10.1016/j.otsr.2020.03.009>.
- [40] Bauer T, Clavert P, Garreau De Loubresse C, Sonnery-Cottet B. Arthroscopy teaching in 2023: A priority for the Francophone Arthroscopy Society. *Orthop Traumatol Surg Res* 2022;108:103473. <https://doi.org/10.1016/j.otsr.2022.103473>.
- [41] Cychosz CC, Tofte JN, Johnson A, Gao Y, Phisitkul P. Fundamentals of Arthroscopic Surgery Training Program Improves Knee Arthroscopy Simulator Performance in Arthroscopic Trainees. *Arthrosc J Arthrosc Relat Surg* 2018;34:1543–9. <https://doi.org/10.1016/j.arthro.2017.11.028>.
- [42] Braman JP, Sweet RM, Hananel DM, Ludewig PM, Van Heest AE. Development and Validation of a Basic Arthroscopy Skills Simulator. *Arthrosc J Arthrosc Relat Surg* 2015;31:104–12. <https://doi.org/10.1016/j.arthro.2014.07.012>.
- [43] Sandberg RP, Sherman NC, Latt LD, Hardy JC. Cigar Box Arthroscopy: A Randomized Controlled Trial Validates Nonanatomic Simulation Training of Novice Arthroscopy Skills. *Arthrosc J Arthrosc Relat Surg* 2017:S0749806317303948. <https://doi.org/10.1016/j.arthro.2017.04.022>.
- [44] Norman G, Dore K, Grierson L. The minimal relationship between simulation fidelity and transfer of learning. *Med Educ* 2012;46:636–47. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2923.2012.04243.x>.
- [45] Yule S, Flin R, Maran N, Rowley D, Youngson G, Paterson-Brown S. Surgeons’ Non-technical Skills in the Operating Room: Reliability Testing of the NOTSS Behavior Rating System. *World J Surg* 2008;32:548–56. <https://doi.org/10.1007/s00268-007-9320-z>.
- [46] Helmreich RL, Merritt AC, Wilhelm JA. The evolution of Crew Resource Management training in commercial aviation. *Int J Aviat Psychol* 1999;9:19–32. [https://doi.org/10.1207/s15327108ijap0901\\_2](https://doi.org/10.1207/s15327108ijap0901_2).
- [47] Flin R, O’Connor P, Mearns K. Crew resource management: improving team work in high reliability industries. *Team Perform Manag Int J* 2002;8:68–78. <https://doi.org/10.1108/13527590210433366>.

- [48] Fletcher GCL, McGeorge P, Flin RH, Glavin RJ, Maran NJ. The role of non-technical skills in anaesthesia: a review of current literature. *Br J Anaesth* 2002;88:418–29. <https://doi.org/10.1093/bja/88.3.418>.
- [49] Neuhaus C, Grawe P, Bergström J, St.Pierre M. The impact of “To Err Is Human” on patient safety in anesthesiology. A bibliometric analysis of 20 years of research. *Front Med* 2022;9:980684. <https://doi.org/10.3389/fmed.2022.980684>.
- [50] Mitchell L, Flin R. Non-technical skills of the operating theatre scrub nurse: literature review. *J Adv Nurs* 2008;63:15–24. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2648.2008.04695.x>.
- [51] Malhotra N, Poolton JM, Wilson MR, Ngo K, Masters RSW. Conscious monitoring and control (reinvestment) in surgical performance under pressure. *Surg Endosc* 2012;26:2423–9. <https://doi.org/10.1007/s00464-012-2193-8>.
- [52] Bracq M-S, Michinov E, Arnaldi B, Caillaud B, Gibaud B, Gouranton V, et al. Learning procedural skills with a virtual reality simulator: An acceptability study. *Nurse Educ Today* 2019;79:153–60. <https://doi.org/10.1016/j.nedt.2019.05.026>.
- [53] Szawlowski S, Choong PFM, Li J, Nelson E, Nikpour M, Scott A, et al. How do surgeons’ trade-off between patient outcomes and risk of complications in total knee arthroplasty? a discrete choice experiment in Australia. *BMJ Open* 2019;9:e029406. <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2019-029406>.
- [54] Pauley K, Flin R, Yule S, Youngson G. Surgeons’ intraoperative decision making and risk management. *Am J Surg* 2011;202:375–81. <https://doi.org/10.1016/j.amjsurg.2010.11.009>.
- [55] Cristancho SM, Apramian T, Vanstone M, Lingard L, Ott M, Forbes T, et al. Thinking like an expert: surgical decision making as a cyclical process of being aware. *Am J Surg* 2016;211:64–9. <https://doi.org/10.1016/j.amjsurg.2015.03.010>.
- [56] Wetzel CM, Kneebone RL, Woloshynowych M, Nestel D, Moorthy K, Kidd J, et al. The effects of stress on surgical performance. *Am J Surg* 2006;191:5–10. <https://doi.org/10.1016/j.amjsurg.2005.08.034>.
- [57] Jones KI, Amawi F, Bhalla A, Peacock O, Williams JP, Lund JN. Assessing surgeon stress when operating using heart rate variability and the State Trait Anxiety Inventory: will surgery be the death of us? *Colorectal Dis* 2015;17:335–41. <https://doi.org/10.1111/codi.12844>.
- [58] Awad G, Pohl R, Darius S, Thielmann B, Kuzmin B, Slottosch I, et al. Evaluation of Stress Levels of Trainee Cardiac Surgery Residents during Training Interventions Using Physiological Stress Parameters. *Int J Environ Res Public Health* 2021;18:11953. <https://doi.org/10.3390/ijerph182211953>.
- [59] Catanzarite T, Tan-Kim J, Whitcomb EL, Menefee S. Ergonomics in Surgery: A Review. *Female Pelvic Med Reconstr Surg* 2018;24:1–12. <https://doi.org/10.1097/SPV.0000000000000456>.
- [60] Park A, Lee G, Seagull FJ, Meenaghan N, Dexter D. Patients benefit while surgeons suffer: an impending epidemic. *J Am Coll Surg* 2010;210:306–13. <https://doi.org/10.1016/j.jamcollsurg.2009.10.017>.
- [61] Sari V, Nieboer TE, Vierhout ME, Stegeman DF, Kluivers KB. The operation room as a hostile environment for surgeons: physical complaints during and after laparoscopy. *Minim Invasive Ther Allied Technol* 2010;19:105–9. <https://doi.org/10.3109/13645701003643972>.
- [62] Heaton SR, Little Z, Akhtar K, Ramachandran M, Lee J. Using simulation to train orthopaedic trainees in non-technical skills: A pilot study. *World J Orthop* 2016;7:475. <https://doi.org/10.5312/wjo.v7.i8.475>.

- [63] Cahan EM, Cousins HC, Steere JT, Segovia NA, Miller MD, Amanatullah DF. Influence of team composition on turnover and efficiency of total hip and knee arthroplasty. *Bone Jt J* 2021;103-B:347–52. <https://doi.org/10.1302/0301-620X.103B2.BJJ-2020-0170.R2>.
- [64] Storey R, Frampton C, Kieser D, Ailabouni R, Hooper G. Does Orthopaedic Training Compromise the Outcome in Knee Joint Arthroplasty? *J Surg Educ* 2018;75:1292–8. <https://doi.org/10.1016/j.jsurg.2018.02.011>.
- [65] Bergovec M, Orlic D. Orthopaedic Surgeons' Cardiovascular Response During Total Hip Arthroplasty. *Clin Orthop* 2008;466:411–6. <https://doi.org/10.1007/s11999-007-0037-y>.
- [66] Haffar A, Khan IA, Ong C, Magnuson JA, Austin MS, Krueger CA, et al. Stress and Strain During Total Joint Arthroplasty Are Not Impacted by Hand Dominance or Operative Laterality in Orthopedic Surgeons. *J Arthroplasty* 2022;37:1054–8. <https://doi.org/10.1016/j.arth.2022.02.073>.
- [67] McQuivey KS, Christopher ZK, Deckey DG, Mi L, Bingham JS, Spangehl MJ. Surgical Ergonomics and Musculoskeletal Pain in Arthroplasty Surgeons. *J Arthroplasty* 2021;36:3781-3787.e7. <https://doi.org/10.1016/j.arth.2021.06.026>.
- [68] McQuivey KS, Deckey DG, Christopher ZK, Rosenow CS, Mi L, Spangehl MJ, et al. Surgical Ergonomics and Musculoskeletal Pain in Orthopaedic Surgery Residents: A Multicenter Survey Study. *JAAOS Glob Res Rev* 2021;5. <https://doi.org/10.5435/JAAOSGlobal-D-20-00119>.
- [69] Lurie B, Albanese J, Allenback G, Elliott I, Nelson K. Small Glove Size and Female Gender Are Associated with Greater Reported Difficulty Using Orthopaedic Instruments Among Residents. *JB JS Open Access* 2024;9:e23.00151. <https://doi.org/10.2106/JBJS.OA.23.00151>.
- [70] Satava RM. Historical review of surgical simulation--a personal perspective. *World J Surg* 2008;32:141–8. <https://doi.org/10.1007/s00268-007-9374-y>.
- [71] Akhtar KSN, Chen A, Standfield NJ, Gupte CM. The role of simulation in developing surgical skills. *Curr Rev Musculoskelet Med* 2014;7:155–60. <https://doi.org/10.1007/s12178-014-9209-z>.
- [72] Butler A, Olson T, Koehler R, Nicandri G. Do the Skills Acquired by Novice Surgeons Using Anatomic Dry Models Transfer Effectively to the Task of Diagnostic Knee Arthroscopy Performed on Cadaveric Specimens? *J Bone Jt Surg* 2013;95:e15. <https://doi.org/10.2106/JBJS.L.00491>.
- [73] Wolfson TS, Atesok KI, Turhan C, Mabrey JD, Egol KA, Jazrawi LM. Animation and Surgical Simulation in Orthopedic Education. In: Doral MN, Karlsson J, editors. *Sports Inj.*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2015, p. 3047–63. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-36569-0\\_245](https://doi.org/10.1007/978-3-642-36569-0_245).
- [74] Erquicia JI, Gil González S, Barrera Sancho A, Hernández Fernández G, Pelfort López X. Impact of cadaveric practices on arthroscopic knee training for Orthopaedic Surgery and Traumatology residents. *Rev Espanola Cirugia Ortop Traumatol Engl Ed* 2021;65:41–6. <https://doi.org/10.1016/j.recot.2020.07.002>.
- [75] Chuang H-C, Kuan F-C, Su W-R, Shih C-A, Chiang C-H, Ko P-Y, et al. Evaluating effectiveness of cadaveric arthroscopic training for orthopaedic residents: A comparison of joints and training levels. *J Exp Orthop* 2024;11:e12030. <https://doi.org/10.1002/jeo2.12030>.
- [76] Rocha de Faria JL, Pavão DM, de Sousa EB, Mozella A de P, Leal AC, Guimarães JAM, et al. How to Create an Arthroscopy Training Laboratory Using a Bovine Knee Model. *Arthrosc Tech* 2021;10:e1865–71. <https://doi.org/10.1016/j.eats.2021.04.007>.
- [77] Karahan M, Unalan PC, Bozkurt S, Odabaş I, Akgün U, Cifçili S, et al. [Correlation of basic motor skills with arthroscopic experience]. *Acta Orthop Traumatol Turc* 2009;43:49–53. <https://doi.org/10.3944/AOTT.2009.049>.

- [78] Martin JA, Regehr G, Reznick R, MacRae H, Murnaghan J, Hutchison C, et al. Objective structured assessment of technical skill (OSATS) for surgical residents. *Br J Surg* 1997;84:273–8. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2168.1997.02502.x>.
- [79] Kovac N, Grainger N, Hurworth M. Training models for meniscal repairs and small joint arthroscopy. *ANZ J Surg* 2015;85:649–51. <https://doi.org/10.1111/ans.13063>.
- [80] Chong ACM, Pate RC, Prohaska DJ, Bron TR, Wooley PH. Validation of Improvement of Basic Competency in Arthroscopic Knot Tying Using a Bench Top Simulator in Orthopaedic Residency Education. *Arthrosc J Arthrosc Relat Surg* 2016;32:1389–99. <https://doi.org/10.1016/j.arthro.2016.01.059>.
- [81] Kaufman HH, Wiegand RL, Tunick RH. Teaching surgeons to operate--principles of psychomotor skills training. *Acta Neurochir (Wien)* 1987;87:1–7. <https://doi.org/10.1007/BF02076007>.
- [82] Sherman KP, Ward JW, Wills DP, Sherman VJ, Mohsen AM. Surgical trainee assessment using a VE knee arthroscopy training system (VE-KATS): experimental results. *Stud Health Technol Inform* 2001;81:465–70.
- [83] Heng P-A, Cheng C-Y, Wong T-T, Xu Y, Chui Y-P, Chan K-M, et al. A virtual-reality training system for knee arthroscopic surgery. *IEEE Trans Inf Technol Biomed Publ IEEE Eng Med Biol Soc* 2004;8:217–27. <https://doi.org/10.1109/titb.2004.826720>.
- [84] Srivastava S, Youngblood PL, Rawn C, Hariri S, Heinrichs WL, Ladd AL. Initial evaluation of a shoulder arthroscopy simulator: establishing construct validity. *J Shoulder Elbow Surg* 2004;13:196–205. <https://doi.org/10.1016/j.jse.2003.12.009>.
- [85] McCarthy AD, Moody L, Waterworth AR, Bickerstaff DR. Passive haptics in a knee arthroscopy simulator: is it valid for core skills training? *Clin Orthop* 2006;442:13–20. <https://doi.org/10.1097/01.blo.0000194678.10130.ff>.
- [86] Bayona S, Fernández-Arroyo JM, Martín I, Bayona P. Assessment study of insight ARTHRO VR ® arthroscopy virtual training simulator: face, content, and construct validities. *J Robot Surg* 2008;2:151–8. <https://doi.org/10.1007/s11701-008-0101-y>.
- [87] Palet MJ, Antúnez-Riveros M, Barahona M. Construct Validity of a Virtual Reality Simulator for Surgical Training in Knee Arthroscopy. *Cureus* n.d.;13:e15237. <https://doi.org/10.7759/cureus.15237>.
- [88] Fucentese SF, Rahm S, Wieser K, Spillmann J, Harders M, Koch PP. Evaluation of a virtual-reality-based simulator using passive haptic feedback for knee arthroscopy. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2015;23:1077–85. <https://doi.org/10.1007/s00167-014-2888-6>.
- [89] Rahm S, Germann M, Hingsammer A, Wieser K, Gerber C. Validation of a virtual reality-based simulator for shoulder arthroscopy. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2016;24:1730–7. <https://doi.org/10.1007/s00167-016-4022-4>.
- [90] Rahm S, Wieser K, Bauer DE, Waibel FW, Meyer DC, Gerber C, et al. Efficacy of standardized training on a virtual reality simulator to advance knee and shoulder arthroscopic motor skills. *BMC Musculoskelet Disord* 2018;19:150. <https://doi.org/10.1186/s12891-018-2072-0>.
- [91] Cychosz C, Khazi ZM, Karam M, Duchman K, Willey M, Westermann R. Validation of a novel hip arthroscopy simulator: establishing construct validity. *J Hip Preserv Surg* 2019;6:385–9. <https://doi.org/10.1093/jhps/hnz059>.
- [92] Mulligan A, Vaghela KR, Jeyaseelan L, Lee J, Akhtar K. Transferable Global Rating Scales in the Validation of the ArthroSim™ Virtual Reality Arthroscopy Simulator. *Surg Technol Int* 2020;37:306–11.
- [93] Satava RM. Virtual reality surgical simulator. The first steps. *Surg Endosc* 1993;7:203–5. <https://doi.org/10.1007/BF00594110>.

- [94] Freeman D, Reeve S, Robinson A, Ehlers A, Clark D, Spanlang B, et al. Virtual reality in the assessment, understanding, and treatment of mental health disorders. *Psychol Med* 2017;47:2393–400. <https://doi.org/10.1017/S003329171700040X>.
- [95] Kim JH, Jang SH, Kim CS, Jung JH, You JH. Use of virtual reality to enhance balance and ambulation in chronic stroke: a double-blind, randomized controlled study. *Am J Phys Med Rehabil* 2009;88:693–701. <https://doi.org/10.1097/PHM.0b013e3181b33350>.
- [96] Grange L, Grange R, Bertholon S, Morisson S, Martin I, Boutet C, et al. Virtual reality for interventional radiology patients: a preliminary study. *Support Care Cancer Off J Multinatl Assoc Support Care Cancer* 2024;32:416. <https://doi.org/10.1007/s00520-024-08621-0>.
- [97] Le Duff M, Michinov E, Bracq M-S, Mukae N, Eto M, Descamps J, et al. Virtual reality environments to train soft skills in medical and nursing education: a technical feasibility study between France and Japan. *Int J Comput Assist Radiol Surg* 2023;18:1355–62. <https://doi.org/10.1007/s11548-023-02834-0>.
- [98] Logishetty K, Rudran B, Cobb JP. Virtual reality training improves trainee performance in total hip arthroplasty: a randomized controlled trial. *Bone Jt J* 2019;101-B:1585–92. <https://doi.org/10.1302/0301-620X.101B12.BJJ-2019-0643.R1>.
- [99] Lohre R, Bois AJ, Athwal GS, Goel DP, on behalf of the Canadian Shoulder and Elbow Society (CSES). Improved Complex Skill Acquisition by Immersive Virtual Reality Training: A Randomized Controlled Trial. *J Bone Jt Surg* 2020;102:e26. <https://doi.org/10.2106/JBJS.19.00982>.
- [100] Edwards TC, Patel A, Szyszka B, Coombs AW, Liddle AD, Kucheria R, et al. Immersive virtual reality enables technical skill acquisition for scrub nurses in complex revision total knee arthroplasty. *Arch Orthop Trauma Surg* 2021;141:2313–21. <https://doi.org/10.1007/s00402-021-04050-4>.
- [101] Bellos T, Manolitsis I, Katsimperis S, Juliebø-Jones P, Feretzakis G, Mitsogiannis I, et al. Artificial Intelligence in Urologic Robotic Oncologic Surgery: A Narrative Review. *Cancers* 2024;16:1775. <https://doi.org/10.3390/cancers16091775>.
- [102] Sharma N, Mallela AN, Khan T, Canton SP, Kass NM, Steuer F, et al. Evolution of the meta-neurosurgeon: A systematic review of the current technical capabilities, limitations, and applications of augmented reality in neurosurgery. *Surg Neurol Int* 2024;15:146. [https://doi.org/10.25259/SNI\\_167\\_2024](https://doi.org/10.25259/SNI_167_2024).
- [103] Longo UG, Lalli A, Gobbato B, Nazarian A. Metaverse, virtual reality and augmented reality in total shoulder arthroplasty: a systematic review. *BMC Musculoskelet Disord* 2024;25:396. <https://doi.org/10.1186/s12891-024-07436-8>.
- [104] Wingfield LR, Kulendran M, Chow A, Nehme J, Purkayastha S. Cognitive Task Analysis: Bringing Olympic Athlete Style Training to Surgical Education. *Surg Innov* 2015;22:406–17. <https://doi.org/10.1177/1553350614556364>.
- [105] Militello LG, Hutton RJ. Applied cognitive task analysis (ACTA): a practitioner’s toolkit for understanding cognitive task demands. *Ergonomics* 1998;41:1618–41. <https://doi.org/10.1080/001401398186108>.
- [106] Sullivan ME, Yates KA, Inaba K, Lam L, Clark RE. The Use of Cognitive Task Analysis to Reveal the Instructional Limitations of Experts in the Teaching of Procedural Skills. *Acad Med* 2014;89:811. <https://doi.org/10.1097/ACM.0000000000000224>.
- [107] Clark RE, Pugh CM, Yates KA, Inaba K, Green DJ, Sullivan ME. The use of cognitive task analysis to improve instructional descriptions of procedures. *J Surg Res* 2012;173:e37-42. <https://doi.org/10.1016/j.jss.2011.09.003>.
- [108] Pugh CM, DaRosa DA. Use of cognitive task analysis to guide the development of performance-based assessments for intraoperative decision making. *Mil Med* 2013;178:22–7. <https://doi.org/10.7205/MILMED-D-13-00207>.

- [109] Villarreal ME, Rothwell C, Huang E. Uncovering patient safety considerations in laparoscopic cholecystectomy using cognitive task analysis. *Surg Endosc* 2023;37:3921–5. <https://doi.org/10.1007/s00464-023-09970-3>.
- [110] Karamchandani U, Bhattacharyya R, Patel R, Oussedik S, Bhattacharya R, Gupte C. Training Surgeons to Perform Arthroscopic All-Inside Meniscal Repair: A Randomized Controlled Trial Evaluating the Effectiveness of a Novel Cognitive Task Analysis Teaching Tool, Imperial College London/University College London Meniscus Repair Cognitive Task Analysis (IUMeRCTA). *Am J Sports Med* 2021;49:2341–50. <https://doi.org/10.1177/03635465211021652>.
- [111] Bhattacharyya R, Davidson DJ, Sugand K, Bartlett MJ, Bhattacharya R, Gupte CM. Knee Arthroscopy Simulation: A Randomized Controlled Trial Evaluating the Effectiveness of the Imperial Knee Arthroscopy Cognitive Task Analysis (IKACTA) Tool. *J Bone Jt Surg* 2017;99:e103. <https://doi.org/10.2106/JBJS.17.00190>.
- [112] Bhattacharyya R, Sugand K, Al-Obaidi B, Sinha I, Bhattacharya R, Gupte CM. Trauma simulation training: a randomized controlled trial -evaluating the effectiveness of the Imperial Femoral Intramedullary Nailing Cognitive Task Analysis (IFINCTA) tool. *Acta Orthop* 2018;89:689–95. <https://doi.org/10.1080/17453674.2018.1517442>.
- [113] Luker KR, Sullivan ME, Peyre SE, Sherman R, Grunwald T. The use of a cognitive task analysis-based multimedia program to teach surgical decision making in flexor tendon repair. *Am J Surg* 2008;195:11–5. <https://doi.org/10.1016/j.amjsurg.2007.08.052>.
- [114] Logishetty K, Gofton WT, Rudran B, Beaulé PE, Gupte CM, Cobb JP. A Multicenter Randomized Controlled Trial Evaluating the Effectiveness of Cognitive Training for Anterior Approach Total Hip Arthroplasty. *J Bone Joint Surg Am* 2020;102:e7. <https://doi.org/10.2106/JBJS.19.00121>.
- [115] Ducournau F, Meyer N, Xavier F, Facca S, Liverneaux P. Learning a MIPO technique for distal radius fractures: Mentoring versus simple experience versus deliberate practice. *Orthop Traumatol Surg Res OTSR* 2021;107:102939. <https://doi.org/10.1016/j.otsr.2021.102939>.
- [116] Duensing IM, Stewart W, Novicoff WM, Meneghini RM, Browne JA. The Impact of Robotic-Assisted Total Knee Arthroplasty on Resident Training. *J Arthroplasty* 2023;38:S227–31. <https://doi.org/10.1016/j.arth.2023.02.016>.
- [117] Tuijthof GJM, Visser P, Sierevelt IN, Van Dijk NC, Kerkhoffs GMMJ. Does Perception of Usefulness of Arthroscopic Simulators Differ with Levels of Experience? *Clin Orthop* 2011;469:1701–8. <https://doi.org/10.1007/s11999-011-1797-y>.
- [118] Stunt JJ, Kerkhoffs GMMJ, Horeman T, van Dijk CN, Tuijthof GJM. Validation of the PASSPORT V2 training environment for arthroscopic skills. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2016;24:2038–45. <https://doi.org/10.1007/s00167-014-3213-0>.
- [119] Gomoll AH, O’Toole RV, Czarnecki J, Warner JJP. Surgical Experience Correlates with Performance on a Virtual Reality Simulator for Shoulder Arthroscopy. *Am J Sports Med* 2007;35:883–8. <https://doi.org/10.1177/0363546506296521>.
- [120] Ward CM. Arthroscopic Basic Task Performance in Shoulder Simulator Model Correlates with Similar Task Performance in Cadavers. *Yearb Hand Up Limb Surg* 2012;2012:189–90. <https://doi.org/10.1016/j.yhls.2012.04.084>.
- [121] Roberts PG, Guyver P, Baldwin M, Akhtar A, Alvand A, Price AJ, et al. Validation of the updated ArthroS simulator: face and construct validity of a passive haptic virtual reality simulator with novel performance metrics. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2017;25(2):616–25. <https://doi.org/10.1007/s00167-016-4114-1>.
- [122] Vaghela KR, Trockels A, Lee J, Akhtar K. Is the Virtual Reality Fundamentals of Arthroscopic Surgery Training Program a Valid Platform for Resident Arthroscopy

- Training? Clin Orthop 2022;480:807–15.  
<https://doi.org/10.1097/CORR.0000000000002064>.
- [123] Fried GM, Feldman LS, Vassiliou MC, Fraser SA, Stanbridge D, Ghitulescu G, et al. Proving the value of simulation in laparoscopic surgery. *Ann Surg* 2004;240:518–25; discussion 525–528. <https://doi.org/10.1097/01.sla.0000136941.46529.56>.
- [124] Gallagher AG, Seymour NE, Jordan-Black J-A, Bunting BP, McGlade K, Satava RM. Prospective, randomized assessment of transfer of training (ToT) and transfer effectiveness ratio (TER) of virtual reality simulation training for laparoscopic skill acquisition. *Ann Surg* 2013;257:1025–31. <https://doi.org/10.1097/SLA.0b013e318284f658>.
- [125] Howells NR, Gill HS, Carr AJ, Price AJ, Rees JL. Transferring simulated arthroscopic skills to the operating theatre: A RANDOMISED BLINDED STUDY. *J Bone Joint Surg Br* 2008;90-B:494–9. <https://doi.org/10.1302/0301-620X.90B4.20414>.
- [126] Cannon WD, Garrett WE, Hunter RE, Sweeney HJ, Eckhoff DG, Nicandri GT, et al. Improving residency training in arthroscopic knee surgery with use of a virtual-reality simulator. A randomized blinded study. *J Bone Joint Surg Am* 2014;96:1798–806. <https://doi.org/10.2106/JBJS.N.00058>.
- [127] Henn RF, Shah N, Warner JJP, Gomoll AH. Shoulder Arthroscopy Simulator Training Improves Shoulder Arthroscopy Performance in a Cadaveric Model. *Arthrosc J Arthrosc Relat Surg* 2013;29:982–5. <https://doi.org/10.1016/j.arthro.2013.02.013>.
- [128] Delpech PO, Danion J, Oriot D, Richer JP, Breque C, Faure JP. SimLife a new model of simulation using a pulsated revascularized and reventilated cadaver for surgical education. *J Visc Surg* 2017;154:15–20. <https://doi.org/10.1016/j.jviscsurg.2016.06.006>.
- [129] Orzech N, Palter VN, Reznick RK, Aggarwal R, Grantcharov TP. A comparison of 2 ex vivo training curricula for advanced laparoscopic skills: a randomized controlled trial. *Ann Surg* 2012;255:833–9. <https://doi.org/10.1097/SLA.0b013e31824aca09>.
- [130] Rahman OF, Kunze KN, Yao K, Kwiczen SY, Ranawat AS, Banffy MB, et al. Hip Arthroscopy Simulator Training With Immersive Virtual Reality Has Similar Effectiveness to Nonimmersive Virtual Reality. *Arthrosc J Arthrosc Relat Surg Off Publ Arthrosc Assoc N Am Int Arthrosc Assoc* 2024:S0749-8063(24)00207-X. <https://doi.org/10.1016/j.arthro.2024.02.042>.
- [131] Messick S. Validity of psychological assessment: Validation of inferences from persons' responses and performances as scientific inquiry into score meaning. *Am Psychol* 1995;50:741–9. <https://doi.org/10.1037/0003-066X.50.9.741>.
- [132] Borgersen NJ, Naur TMH, Sørensen SMD, Bjerrum F, Konge L, Subhi Y, et al. Gathering Validity Evidence for Surgical Simulation: A Systematic Review. *Ann Surg* 2018;267:1063–8. <https://doi.org/10.1097/SLA.0000000000002652>.
- [133] Craig RL, Bittel LR. TRAINING AND DEVELOPMENT HANDBOOK. 1967.
- [134] Gumbs AA, Hogle NJ, Fowler DL. Evaluation of resident laparoscopic performance using global operative assessment of laparoscopic skills. *J Am Coll Surg* 2007;204:308–13. <https://doi.org/10.1016/j.jamcollsurg.2006.11.010>.
- [135] Insel A, Carofino B, Leger R, Arciero R, Mazzocca AD. The Development of an Objective Model to Assess Arthroscopic Performance: *J Bone Jt Surg-Am Vol* 2009;91:2287–95. <https://doi.org/10.2106/JBJS.H.01762>.
- [136] Koehler RJ, Amsdell S, Arendt EA, Bisson LJ, Bramen JP, Butler A, et al. The Arthroscopic Surgical Skill Evaluation Tool (ASSET). *Am J Sports Med* 2013;41:1229–37. <https://doi.org/10.1177/0363546513483535>.
- [137] Koehler RJ, Goldblatt JP, Maloney MD, Voloshin I, Nicandri GT. Assessing Diagnostic Arthroscopy Performance in the Operating Room Using the Arthroscopic Surgery Skill

- Evaluation Tool (ASSET). *Arthrosc J Arthrosc Relat Surg* 2015;31:2314-2319.e2. <https://doi.org/10.1016/j.arthro.2015.06.011>.
- [138] Bayona S, Akhtar K, Gupte C, Emery RJH, Dodds AL, Bello F. Assessing Performance in Shoulder Arthroscopy: The Imperial Global Arthroscopy Rating Scale (IGARS). *J Bone Jt Surg* 2014;96:e112. <https://doi.org/10.2106/JBJS.M.00304>.
- [139] Middleton RM, Baldwin MJ, Akhtar K, Alvand A, Rees JL. Which Global Rating Scale?: A Comparison of the ASSET, BAKSSS, and IGARS for the Assessment of Simulated Arthroscopic Skills. *J Bone Jt Surg* 2016;98:75–81. <https://doi.org/10.2106/JBJS.O.00434>.
- [140] Alvand A, Logishetty K, Middleton R, Khan T, Jackson WFM, Price AJ, et al. Validating a Global Rating Scale to Monitor Individual Resident Learning Curves During Arthroscopic Knee Meniscal Repair. *Arthrosc J Arthrosc Relat Surg* 2013;29:906–12. <https://doi.org/10.1016/j.arthro.2013.01.026>.
- [141] Anetzberger H, Becker R, Eickhoff H, Seibert FJ, Döring B, Haasters F, et al. The Diagnostic Arthroscopy Skill Score (DASS): a reliable and suitable assessment tool for arthroscopic skill training. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2022;30:349–60. <https://doi.org/10.1007/s00167-021-06554-3>.
- [142] Anetzberger H, Reppenhagen S, Eickhoff H, Seibert FJ, Döring B, Haasters F, et al. Ten hours of simulator training in arthroscopy are insufficient to reach the target level based on the Diagnostic Arthroscopic Skill Score. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2022;30:1471–9. <https://doi.org/10.1007/s00167-021-06648-y>.
- [143] Aïm F, Lonjon G, Hannouche D, Nizard R. Effectiveness of Virtual Reality Training in Orthopaedic Surgery. *Arthrosc J Arthrosc Relat Surg* 2016;32:224–32. <https://doi.org/10.1016/j.arthro.2015.07.023>.
- [144] James HK, Chapman AW, Pattison GTR, Fisher JD, Griffin DR. Analysis of Tools Used in Assessing Technical Skills and Operative Competence in Trauma and Orthopaedic Surgical Training: A Systematic Review. *JBJS Rev* 2020;8:e19.00167-e19.00167. <https://doi.org/10.2106/JBJS.RVW.19.00167>.
- [145] Howells NR, Brinsden MD, Gill RS, Carr AJ, Rees JL. Motion Analysis: A Validated Method for Showing Skill Levels in Arthroscopy. *Arthrosc J Arthrosc Relat Surg* 2008;24:335–42. <https://doi.org/10.1016/j.arthro.2007.08.033>.
- [146] Tashiro Y, Miura H, Nakanishi Y, Okazaki K, Iwamoto Y. Evaluation of skills in arthroscopic training based on trajectory and force data. *Clin Orthop* 2009;467:546–52. <https://doi.org/10.1007/s11999-008-0497-8>.
- [147] Stunt JJ, Kerkhoffs GMMJ, van Dijk CN, Tuijthof GJM. Validation of the ArthroS virtual reality simulator for arthroscopic skills. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2015;23:3436–42. <https://doi.org/10.1007/s00167-014-3101-7>.
- [148] Alvand A, Auplish S, Gill H, Rees J. Innate arthroscopic skills in medical students and variation in learning curves. *J Bone Joint Surg Am* 2011;93:e115(1-9). <https://doi.org/10.2106/JBJS.K.00199>.
- [149] Aghazadeh F, Zheng B, Tavakoli M, Rouhani H. Motion Smoothness-Based Assessment of Surgical Expertise: The Importance of Selecting Proper Metrics. *Sensors* 2023;23:3146. <https://doi.org/10.3390/s23063146>.
- [150] Balasubramanian S, Melendez-Calderon A, Burdet E. A Robust and Sensitive Metric for Quantifying Movement Smoothness. *IEEE Trans Biomed Eng* 2012;59:2126–36. <https://doi.org/10.1109/TBME.2011.2179545>.
- [151] Cotin S, Stylopoulos N, Ottensmeyer M, Neumann P, Rattner D, Dawson S. Metrics for Laparoscopic Skills Trainers: The Weakest Link! In: Dohi T, Kikinis R, editors. *Med. Image Comput. Comput.-Assist. Interv. — MICCAI 2002*, vol. 2488, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2002, p. 35–43. [https://doi.org/10.1007/3-540-45786-0\\_5](https://doi.org/10.1007/3-540-45786-0_5).

- [152] Oropesa I, Chmarra MK, Sánchez-González P, Lamata P, Rodrigues SP, Enciso S, et al. Relevance of motion-related assessment metrics in laparoscopic surgery. *Surg Innov* 2013;20:299–312. <https://doi.org/10.1177/1553350612459808>.
- [153] Chmarra MK, Jansen FW, Grimbergen CA, Dankelman J. Retracting and seeking movements during laparoscopic goal-oriented movements. Is the shortest path length optimal? *Surg Endosc* 2008;22:943–9. <https://doi.org/10.1007/s00464-007-9526-z>.
- [154] Chmarra MK, Klein S, de Winter JCF, Jansen F-W, Dankelman J. Objective classification of residents based on their psychomotor laparoscopic skills. *Surg Endosc* 2010;24:1031–9. <https://doi.org/10.1007/s00464-009-0721-y>.
- [155] van Dongen KW, Tournioij E, van der Zee DC, Schijven MP, Broeders I a. MJ. Construct validity of the LapSim: can the LapSim virtual reality simulator distinguish between novices and experts? *Surg Endosc* 2007;21:1413–7. <https://doi.org/10.1007/s00464-006-9188-2>.
- [156] Szabo Z, Hunter J, Berci G, Sackier J, Cuschieri A. Analysis of surgical movements during suturing in laparoscopy. *Endosc Surg Allied Technol* 1994;2:55–61.
- [157] Oropesa I, Escamiroso FP, Sánchez-Margallo JA, Enciso S, Rodríguez-Vila B, Martínez AM, et al. Interpretation of motion analysis of laparoscopic instruments based on principal component analysis in box trainer settings. *Surg Endosc* 2018;32:3096–107. <https://doi.org/10.1007/s00464-018-6022-6>.
- [158] Rosen J, Solazzo M, Hannaford B, Sinanan M. Objective laparoscopic skills assessments of surgical residents using Hidden Markov Models based on haptic information and tool/tissue interactions. *Stud Health Technol Inform* 2001;81:417–23.
- [159] Huaultmé A, Jannin P, Reche F, Faucheron J-L, Moreau-Gaudry A, Voros S. Offline identification of surgical deviations in laparoscopic rectopexy. *Artif Intell Med* 2020;104:101837. <https://doi.org/10.1016/j.artmed.2020.101837>.
- [160] Kowalewski K-F, Garrow CR, Schmidt MW, Benner L, Müller-Stich BP, Nickel F. Sensor-based machine learning for workflow detection and as key to detect expert level in laparoscopic suturing and knot-tying. *Surg Endosc* 2019;33:3732–40. <https://doi.org/10.1007/s00464-019-06667-4>.
- [161] Despinoy F, Bouget D, Forestier G, Penet C, Zemiti N, Poignet P, et al. Unsupervised Trajectory Segmentation for Surgical Gesture Recognition in Robotic Training. *IEEE Trans Biomed Eng* 2016;63:1280–91. <https://doi.org/10.1109/TBME.2015.2493100>.
- [162] Yule S, Flin R, Paterson-Brown S, Maran N. Non-technical skills for surgeons in the operating room: A review of the literature. *Surgery* 2006;139:140–9. <https://doi.org/10.1016/j.surg.2005.06.017>.
- [163] Panesar SS, Carson-Stevens A, Mann BS, Bhandari M, Madhok R. Mortality as an indicator of patient safety in orthopaedics: lessons from qualitative analysis of a database of medical errors. *BMC Musculoskelet Disord* 2012;13:93. <https://doi.org/10.1186/1471-2474-13-93>.
- [164] Agha RA, Fowler AJ, Sevdalis N. The role of non-technical skills in surgery. *Ann Med Surg* 2015;4:422–7. <https://doi.org/10.1016/j.amsu.2015.10.006>.
- [165] Johnson AP, Aggarwal R. Assessment of non-technical skills: why aren't we there yet? *BMJ Qual Saf* 2019;28:606–8. <https://doi.org/10.1136/bmjqs-2018-008712>.

## **CHAPITRE 2. ETUDE PRELIMINAIRE**

### **Validation de la pertinence d'un simulateur d'arthroscopie en réalité virtuelle pour caractériser les chirurgiens expérimentés**

Alexandre TRONCHOT, MSc<sup>(1,2)</sup> ; Julien BERTHELEMY, MSc<sup>(1)</sup> ; Hervé THOMAZEAU, MD<sup>(1,2)</sup> ; Arnaud HUAULMÉ, PhD<sup>(1)</sup> ; Paul WALBRON, MD<sup>(3)</sup> ; François SIRVEAUX, MD PhD<sup>(3)</sup> ; Pierre JANNIN, PhD<sup>(1)</sup>

1. Univ Rennes, Inserm, LTSI – UMR 1099, F-35000 Rennes, France
2. Orthopaedics and Trauma Department, Rennes University Hospital, 2 rue Henri Le Guilloux, 35000, Rennes, France
3. Orthopaedics Department, Nancy University Hospital, Centre Chirurgical Emile Gallé, 49 rue Hermite, 54000 Nancy, France

#### **Citation (English Version, OTSR) :**

**Tronchot A**, Berthelemy J, Thomazeau H, Hualmé A, Walbron P, Sirveaux F, Jannin P. Validation of virtual reality arthroscopy simulator relevance in characterising experienced surgeons. *Orthop Traumatol Surg Res.* 2021 Dec;107(8):103079. doi: 10.1016/j.otsr.2021.103079. Epub 2021 Sep 28. PMID: 34597826.

## **Abstract**

*Introduction* La simulation par réalité virtuelle (VR) est adaptée à l'apprentissage de l'arthroscopie. Malgré de nombreuses études, il reste néanmoins difficile de distinguer des niveaux de compétence (*Construct Validity*) parmi les chirurgiens expérimentés. Il semble donc adéquat de rechercher de nouvelles méthodes de mesure de compétence en utilisant l'analyse des trajectoires instrumentales au lieu des mesures couramment utilisées.

*Hypothèse* Nous avons émis l'hypothèse qu'une plus grande expérience en arthroscopie d'épaule serait corrélée à une meilleure performance sur simulateur VR d'arthroscopie d'épaule et que les opérateurs expérimentés partageraient des trajectoires instrumentales similaires.

*Matériels & Méthodes* Après réponse à un questionnaire standardisé, 104 trajectoires de 52 chirurgiens répartis en 2 cohortes (26 intermédiaires et 26 experts) ont été enregistrées sur simulateur d'arthroscopie. La procédure analysée était le retrait de corps étranger dans une articulation d'épaule droite. 10 mesures ont été calculées sur les trajectoires, notamment la durée de procédure, la distance instrumentale, l'économie de mouvement et la fluidité. De plus, le Dynamic Time Warping (DTW) a été calculé sur les trajectoires pour une classification hiérarchique non supervisée des chirurgiens.

*Résultats* Les experts furent significativement plus rapides (Médiane 70.9s Écart Interquartile [56.4-86.3] vs. 116.1s [82.8-154.2],  $p < 0.01$ ), plus fluides ( $4.6 \cdot 10^5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-3}$  [ $3.1 \cdot 10^5$ - $7.2 \cdot 10^5$ ] vs.  $1.5 \cdot 10^6 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-3}$  [ $2.6 \cdot 10^6$ - $3.5 \cdot 10^6$ ],  $p = 0.05$ ), et plus économes en mouvement ( $19.3 \text{ mm}^2$  [ $9.1$ - $25.9$ ] vs.  $33.8 \text{ mm}^2$  [ $14.8$ - $50.5$ ],  $p < 0.01$ ), mais il n'y avait pas de différence significative de performance sur la distance ( $671.4 \text{ mm}$  [ $503.8$ - $846.1$ ] vs  $694.6 \text{ mm}$  [ $467.0$ - $1090.1$ ],  $p = 0.62$ ). Le clustering par DTW a différencié deux groupes de trajectoires similaires liées à l'expertise avec respectivement 48 trajectoires d'experts pour le premier groupe et 52 trajectoires d'intermédiaires et 4 d'experts pour le second groupe (Sensibilité de 92%, Spécificité de 100%). Le clustering hiérarchique avec DTW a identifié significativement les chirurgiens experts des intermédiaires en trouvant des trajectoires similaires pour 24/26 experts.

*Conclusion* Cette étude a démontré la *Construct Validity* du simulateur VR d'arthroscopie d'épaule au sein d'un groupe de chirurgiens expérimentés. Grâce à de nouveaux types de mesures simplement basées sur les trajectoires, il a été possible de distinguer de manière significative les niveaux d'expertise. Nous avons démontré que l'analyse par clustering avec Dynamic Time Warping est capable de distinguer de manière fiable les opérateurs experts des opérateurs intermédiaires.

*Pertinence clinique* Les résultats ont des implications pour l'avenir de la formation en chirurgie arthroscopique ou des programmes d'accréditation postuniversitaire utilisant la simulation par réalité virtuelle.

*Niveau de preuve* III, étude comparative prospective

**Mots-Clés** Simulation VR- Arthroscopie d'épaule – Entraînement – Compétences Arthroscopiques

## 1. Introduction

La simulation chirurgicale vise à enseigner des compétences pratiques en dehors du bloc opératoire. Elle est nécessaire pour des raisons de sécurité [1], d'organisation liées au fonctionnement des établissements de santé [2] et aux contraintes de temps des enseignants et des étudiants. En France, la simulation procédurale est officiellement incluse dans le programme national de formation médicale et chirurgicale des internes depuis 2017 [3].

La simulation par réalité virtuelle (VR) est un outil qui complète les techniques traditionnelles sur maquettes [4], ou sur sujets cadavériques [5]. Elle est particulièrement adaptée à l'apprentissage de l'arthroscopie [6-8]. De nombreuses recherches ont été consacrées au développement de cet outil et à son utilisation. Dans deux méta-analyses récentes [9,10], l'une des principales limites soulignées est la difficulté à distinguer les niveaux de compétences (*Construct Validity*) avec les métriques traditionnelles (telles que la durée et la distance instrumentale) dans des populations expérimentées. Par conséquent, il semble adéquat de rechercher de nouvelles métriques ou de nouvelles méthodes de mesure des performances.

En analyse de données, le classification hiérarchique (ou clustering) est une méthode d'analyse qui cherche à construire une hiérarchie de groupes avec critère de liaison. Pour l'analyse des séries temporelles, la déformation temporelle dynamique (*Dynamic Time Warping*, DTW) est un algorithme permettant de mesurer la similarité entre deux séquences temporelles dont la vitesse peut varier. Le clustering hiérarchique avec DTW a déjà été utilisé avec succès pour distinguer différents niveaux d'expertise dans des études portant sur la formation à la chirurgie robotique par simulation VR [11] mais n'a pas encore été analysé dans la formation à l'arthroscopie.

Nous avons émis l'hypothèse qu'une plus grande expérience en arthroscopie d'épaule serait corrélée à de meilleure performance sur simulateur VR d'arthroscopie d'épaule et que les opérateurs expérimentés partageraient des trajectoires instrumentales similaires. L'objectif de cette étude était d'analyser les trajectoires instrumentales et de déterminer la capacité du simulateur à distinguer les niveaux de performance individuels au sein de cohortes de chirurgiens expérimentés de différents niveaux d'expertise en utilisant des métriques innovantes et un clustering hiérarchique avec DTW.

## 2. Méthodes

### 2.1. Participants

Les trajectoires de deux cohortes de chirurgiens ont été recueillies prospectivement lors de congrès internationaux de chirurgie orthopédique, celui de la Société française d'arthroscopie (SFA) tenue à Strasbourg en décembre 2018, et celui de l'International Shoulder Course de Val d'Isère en janvier 2019. Chaque participant a répondu à un questionnaire standardisé sur son expertise en arthroscopie et ses loisirs (**tableau 1**). Le consentement éclairé a été obtenu pour tous les participants. Les questions concernant le nombre de procédures chirurgicales réelles déjà effectuées avant de réaliser l'exercice ont servi à établir les niveaux d'expérience de base pour chaque cohorte. La première cohorte appelée INTERMEDIAIRE est composée de 29 chirurgiens orthopédiques intéressés par l'arthroscopie (chirurgiens en fin d'internat, assistants spécialistes, jeunes installés), qui ont réalisé entre une et 99 chirurgies arthroscopiques en tant qu'opérateur principal éventuellement sous la supervision d'un chirurgien senior. La seconde cohorte appelée EXPERT est composée de 28 chirurgiens orthopédistes avec une surspécialisation en chirurgie arthroscopique d'épaule ayant réalisé plus de 100 arthroscopies en tant qu'opérateur principal. Ce seuil d'expérience a été précédemment utilisé dans une étude similaire [12]. Seule la pratique chirurgicale réelle a été évaluée pour déterminer le niveau d'expertise, la pratique antérieure sur simulateur chirurgical n'a pas été prise en compte. Les données de trois trajectoires INTERMEDIAIRE et de deux trajectoires EXPERT étaient incomplètes. Les 26 données restantes sur les trajectoires des participants INTERMEDIAIRE et 26 EXPERTS ont été analysées pour l'étude. Un calcul de puissance bilatéral a été effectué pour l'hypothèse nulle ("la performance des experts est égale à celle des intermédiaires") avec une erreur de type 1 acceptable,  $\alpha = 0,05$  et une erreur de type 2 acceptable  $\beta = 0,20$ , puissance = 0,8. Pour le calcul de la puissance, les données d'une précédente étude de validation d'un simulateur d'arthroscopie de l'épaule ont été utilisées [13]. Cela a permis d'obtenir un nombre minimum de 14 sujets dans chaque groupe, ce qui est conforme aux études de validation précédemment rapportées [12-15].

## **2.2. Méthodes d'évaluation**

Le simulateur d'arthroscopie ArthroS™ de VirtaMed AG (Zurich) a été utilisé pour recueillir les trajectoires. La *Face Validity* et la *Construct Validity* du simulateur ont été évaluées dans des études précédentes pour des populations de novices et d'experts [12,13,16]. Les modules *FAST* et *SHOULDER* ont été utilisés pour l'étude. L'exercice correspondait à une procédure de base en chirurgie de l'épaule : l'extraction de corps étrangers dans une articulation native d'épaule. "*Catch the Stars Glenohumeral*" est un exercice semi-réaliste avec modélisation d'une articulation d'épaule indemne de pathologie où le but est de saisir et d'extraire cinq corps étrangers (e.g. cinq étoiles).

La récolte des données des participants à l'étude s'est faite selon un modèle standardisé (**Figure 1**). Premièrement, le participant a réalisé des exercices sur le module FAST (**1.1, 1.2 et 1.3, Figure 1**). Ensuite, le participant a effectué une identification vidéo-guidée des différentes structures de l'épaule droite dans le module SHOULDER, procédure effectuée en décubitus latéral pour tous les participants. (**2.1, Figure 1**). Troisièmement, les utilisateurs ont effectué l'exercice de « *Catch the Stars* » dans le module SHOULDER (**2.2, Figure 1**) en décubitus latéral, qu'ils ont effectué 3 fois. Le premier essai correspondant à la courbe d'apprentissage a été retiré de l'analyse.

#### **2.4. Analyse statistique**

Le programme TRACAS (*TRajjectory Analysis for Computer Assisted Surgery*) basé sur Matlab a été adapté aux données du simulateur et utilisé pour l'analyse des trajectoires. Dans un premier temps, les données extraites du simulateur ont été utilisées pour calculer dix métriques (définies dans la **Figure 2**) : *durée, longueur de la trajectoire, vitesse, accélération, tremblement, volume de travail, économie de mouvement, fluidité du mouvement, fluidité de la longueur de l'arc spectral et profondeur*. L'analyse a été effectuée en suivant les techniques publiées précédemment [17-20]. Le calcul de toutes les métriques et l'analyse des trajectoires ont été effectués sur un ordinateur dédié (Xeon E5-1650V4 @3.60GHz avec 32Go de RAM) en utilisant Matlab\_R2018b. Un test non paramétrique (test U bilatéral de Mann-Whitney) a été utilisé afin d'observer lesquelles des métriques présentaient des différences statistiques ( $p < 0,05$ ). Des diagrammes moustaches ont été modélisées. La deuxième étape de l'étude a consisté à regrouper les trajectoires des participants en utilisant la classification hiérarchique ascendante avec Dynamic Time Warping (DTW). Le DTW est pertinent pour l'indexeur de séries temporelles car il a la capacité de reconnaître des formes indépendamment de leur distorsion temporelle ou de leur déphasage [21].

### **3. Résultats**

#### **3.1. Analyse des Métriques**

L'analyse des trajectoires instrumentales par métriques a révélé des différences significatives entre les groupes INTERMEDIAIRE et EXPERT (**Tableau 2**). Les diagrammes moustaches sont représentés en (**Figure 3**) et (**Figure 4**). Le groupe EXPERT a obtenu des résultats significativement supérieurs à ceux du groupe INTERMEDIAIRE pour les métriques suivantes (**Figure 3**) : *Durée (s)*,  $p < 0,01$  (**Figure 3.1**) ; *Vitesse moyenne (mm.s<sup>-1</sup>)*,  $p < 0,01$  (**Figure 3.2**) ; *Économie (mm<sup>2</sup>)*,  $p < 0,01$  (**Figure 3.3**) ; *Fluidité de mouvement (mm.s<sup>-3</sup>)*,  $p = 0,05$

(**Figure 3.4**) ; *Fluidité de longueur d'arc spectral*,  $p < 0,01$  (**Figure 3.5**) et *Volume de travail* ( $mm^3$ ),  $p < 0,01$  (**Figure 3.6**). Il n'y avait pas de différences significatives entre les groupes pour les métriques suivantes (**Figure 4**) : *Distance instrumentale* ( $mm$ ),  $p = 0,08$  (**Figure 4.1**) ; *Accélération moyenne* ( $mm.s^{-2}$ ),  $p = 0,39$  (**Figure 4.2**) ; *tremblement moyen* ( $mm.s^{-3}$ ),  $p = 0,41$  (**Figure 4.3**) et *Profondeur* ( $mm$ ),  $p = 0,11$  (**Figure 4.4**).

### 3.2. Analyse des Trajectoires

Les résultats du clustering non supervisé avec DTW sont donnés en (**Figure 5**). Sur ce dendrogramme, chaque donnée est représentée en abscisse pour se rejoindre toutes une à une jusqu'à former un seul cluster. Plus les regroupements de clusters sont faibles, plus la distance DTW entre les données agrégées est faible et plus les trajectoires sont similaires. Comme deux catégories sont étudiées ici, il a été décidé de ne comparer que les deux plus grands clusters. Le premier cluster était composé de 48 trajectoires similaires, 100% des données de la première catégorie provenaient de la cohorte EXPERT (24/26 experts) tandis que 93% du second cluster était composé de données de la cohorte INTERMEDIAIRE (26/26 intermédiaires) et 7% de la cohorte EXPERT (2 experts) pour un total de 56 trajectoires similaires (Sensibilité de 92%, Spécificité de 100%).

## 4. Discussion

À propos de cette procédure arthroscopique d'extraction de corps étrangers dans une épaule simulée VR, les résultats ont confirmé que six des dix métriques calculées sur les trajectoires étaient capables de distinguer les opérateurs experts des non-experts : les experts avaient un geste plus fluide (meilleur résultat pour la fluidité de la longueur d'arc spectral), plus économique (meilleurs résultats pour l'économie et le volume de travail), et plus efficace (meilleurs résultats pour le temps et la vitesse). Cependant, l'accélération et la distance instrumentale ne différaient pas statistiquement entre les groupes. De la même manière, Rahm et al, [13] avaient remarqué que la métrique de distance instrumentale n'était pas aussi discriminante que les autres utilisées dans ce simulateur. Bien que souvent utilisée par les simulateurs VR, la distance instrumentale ne semble pas être corrélée à l'expertise. La mesure de fluidité du mouvement a été calculée avec différentes formules dans le passé [17,18,20]. Pour cette étude, trois formules de fluidité du mouvement ont été calculées. Le calcul selon Hofstad [18] n'était pas significatif et nous avons choisi de ne pas le représenter. Le calcul selon Cotin [17] était juste significatif pour cette étude. Plus intéressant encore, nos résultats sur la fluidité du mouvement via la longueur d'arc spectral étaient très significatifs et cohérents avec les résultats

trouvés par Balasubramanian et al [20]. Avec ces nouvelles métriques simplement basées sur les trajectoires brutes du simulateur, il a donc été possible de distinguer de manière significative les niveaux d'expertise.

Nous avons démontré que l'analyse par cluster non supervisée avec DTW est capable de discriminer de manière fiable les opérateurs experts des opérateurs intermédiaires. Nous suggérons que cette approche basée sur la trajectoire complète pourrait être utilisée pour mieux classer le niveau de performance sur simulateur. Le cluster 2 est composé de l'ensemble de la cohorte intermédiaire et de deux experts. L'âge déclaré de ces deux experts est proche de l'âge médian de la cohorte intermédiaire (31 ans). Leur présence dans ce cluster pourrait s'expliquer par une expérience non liée à l'âge. Nous n'avons pas trouvé d'impact de la nationalité sur la performance en simulateur. Au contraire, la cohorte intermédiaire composée uniquement de participants français se distingue par l'hétérogénéité des trajectoires dans la classification DTW.

La *Construct Validity* du simulateur avait déjà été démontrée pour les novices et les experts [13], [22]. Mais, Stunt et al., [22] ont eu des difficultés à trouver des différences significatives de performance pour le groupe intermédiaire (moins de soixante chirurgies arthroscopiques en tant qu'opérateur principal). Roberts et al, [16] n'ont pas distingué l'expérience chirurgicale pour un exercice similaire d'arthroscopie de l'épaule avec les métriques de performance proposées par le simulateur, remettant en cause son intérêt pour les chirurgiens de niveau intermédiaire. Notre étude a montré qu'il est possible pour un simulateur VR d'arthroscopie de distinguer plusieurs niveaux d'expertise en utilisant de nouvelles métriques ou une analyse par clustering avec DTW.

La majorité de la cohorte intermédiaire a bénéficié d'une formation théorique similaire en arthroscopie (84% titulaires du diplôme national français d'arthroscopie). Près de la moitié d'entre eux avaient déjà reçu une formation sur simulateur (46% vs 27% pour les experts). Cependant, ce groupe se distingue des experts par l'hétérogénéité de leurs trajectoires et leur moindre performance. Il est donc essentiel de combiner une formation pratique sur simulateur à une formation théorique. Or, Manoharan et al, [23] ont récemment démontré la difficulté au Royaume-Uni de créer un programme national de formation à l'arthroscopie. Walbron et al, [6,24] ont rapporté les efforts du Collège Français de Chirurgie Orthopédique et de la SFA pour proposer un programme national d'apprentissage de l'arthroscopie avec simulateur VR. Les premiers résultats furent intéressants mais avec certaines limites dues à la présence nécessaire mais compliquée d'un formateur auprès de l'étudiant. Ainsi, la création d'un programme national standardisé avec suivi régulier des performances de l'étudiant reste complexe en pratique avec seulement quelques exemples réussis dans le monde [25]. Un retour d'information immédiat et

direct sur les performances semble obligatoire plutôt que de laisser l'étudiant travailler de manière autonome avec un retour d'information occasionnel lors de sessions espacées avec le formateur.

Il nous reste à démontrer que les résultats de cette méthode peuvent être extrapolés à d'autres exercices et simulateurs. En effet, l'exercice *Catch the Stars* est identique pour chaque tentative : la position ainsi que l'ordre d'apparition des étoiles sont les mêmes ; de même, l'anatomie et les dimensions de l'épaule simulée sont toujours les mêmes. Cette invariance de l'exercice rend la mesure du DTW très efficace car chaque participant va utiliser le même parcours. Le niveau d'expérience a été évalué uniquement par le nombre d'arthroscopies réalisées en tant qu'opérateur principal, en accord avec les seuils d'expérience des études précédentes [13,22]. Bien que l'exercice ait été réalisé dans des conditions similaires pour les deux cohortes (lors d'un congrès et non dans un environnement de bloc opératoire), les résultats ont pu être faussés par les distractions inhérentes au congrès. Cela peut expliquer la présence de certaines valeurs aberrantes dans l'étude. Également mentionné par Fucentese et al, [12] la collecte de données pendant un congrès peut entraîner un biais de sélection en attirant des participants très intéressés par l'enseignement et la formation VR. L'analyse en sous-groupes pour les pratiques de sports, de jeux vidéo et d'instruments de musique étant limitée par la petite taille de l'échantillon et l'hétérogénéité des sous-groupes, nous avons choisi de ne pas représenter les résultats. Enfin, cette étude ne porte que sur les compétences techniques du chirurgien. L'étude des compétences non techniques, y compris les compétences cognitives et interpersonnelles, revêt également une grande importance [26].

## **5. Conclusion**

Cette étude a démontré la *Construct Validity* du simulateur CR d'arthroscopie de l'épaule au sein d'un groupe de chirurgiens expérimentés. Grâce à de nouveaux types de mesures simplement basées sur les trajectoires du simulateur, il a été possible de distinguer de manière significative les niveaux d'expertise. Nous avons démontré que l'analyse par cluster avec Dynamic Time Warping était capable de distinguer de manière fiable les opérateurs experts des opérateurs intermédiaires.

## **6. Remerciements**

Nous remercions tous les participants de l'étude, ainsi que l'équipe de VirtaMed, Martina Vitz et Benjamin Grauer pour le support technique.

## 7. Références

- [1] Barger LK, Rosner B. Extended Work Shifts and the Risk of Motor Vehicle Crashes among Interns. *N Engl J Med* 2005;10.
- [2] Erivan R, Chaput T, Villatte G, Ollivier M, Descamps S, Boisgard S. Ten-year epidemiological study in an orthopaedic and trauma surgery centre: Are there risks involved in increasing scheduled arthroplasty volume without increasing resources? *Orthop Traumatol Surg Res* 2018;104:1283–9. <https://doi.org/10.1016/j.otsr.2018.08.009>.
- [3] Bonnafeous S, Amiot-Chanal H, Rouanet P. Arrêté du 12 avril 2017 portant organisation du troisième cycle des études de médecine. NOR: MENS1708241A, n.d.
- [4] Banaszek D, You D, Chang J, Pickell M, Hesse D, Hopman WM, et al. Virtual Reality Compared with Bench-Top Simulation in the Acquisition of Arthroscopic Skill: A Randomized Controlled Trial. *J Bone Jt Surg* 2017;99:e34. <https://doi.org/10.2106/JBJS.16.00324>.
- [5] Henn RF, Shah N, Warner JJP, Gomoll AH. Shoulder Arthroscopy Simulator Training Improves Shoulder Arthroscopy Performance in a Cadaveric Model. *Arthrosc J Arthrosc Relat Surg* 2013;29:982–5. <https://doi.org/10.1016/j.arthro.2013.02.013>.
- [6] Walbron P, Common H, Thomazeau H, Hosseini K, Peduzzi L, Bulaid Y, et al. Virtual reality simulator improves the acquisition of basic arthroscopy skills in first-year orthopedic surgery residents. *Orthop Traumatol Surg Res* 2020:S187705682030116X. <https://doi.org/10.1016/j.otsr.2020.03.009>.
- [7] Marcheix P-S, Vergnenegre G, Dalmay F, Mabit C, Charissoux J-L. Learning the skills needed to perform shoulder arthroscopy by simulation. *Orthop Traumatol Surg Res* 2017;103:483–8. <https://doi.org/10.1016/j.otsr.2017.02.008>.
- [8] Baumann Q, Hardy A, Courage O, Lacombes P, Accadbled F. Lessons taught by a knee arthroscopy simulator about participants in a European arthroscopy training programme. *Orthop Traumatol Surg Res* 2019;105:S287–91. <https://doi.org/10.1016/j.otsr.2019.09.008>.
- [9] Frank RM, Wang KC, Davey A, Cotter EJ, Cole BJ, Romeo AA, et al. Utility of Modern Arthroscopic Simulator Training Models: A Meta-analysis and Updated Systematic Review. *Arthrosc J Arthrosc Relat Surg* 2018;34:1650–77. <https://doi.org/10.1016/j.arthro.2017.10.048>.
- [10] Aïm F, Lonjon G, Hannouche D, Nizard R. Effectiveness of Virtual Reality Training in Orthopaedic Surgery. *Arthrosc J Arthrosc Relat Surg* 2016;32:224–32. <https://doi.org/10.1016/j.arthro.2015.07.023>.
- [11] Despinoy F, Zemiti N, Forestier G, Sánchez A, Jannin P, Poignet P. Evaluation of contactless human–machine interface for robotic surgical training. *Int J Comput Assist Radiol Surg* 2018;13:13–24. <https://doi.org/10.1007/s11548-017-1666-6>.
- [12] Fucentese SF, Rahm S, Wieser K, Spillmann J, Harders M, Koch PP. Evaluation of a virtual-reality-based simulator using passive haptic feedback for knee arthroscopy. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2015;23:1077–85. <https://doi.org/10.1007/s00167-014-2888-6>.
- [13] Rahm S, Germann M, Hingsammer A, Wieser K, Gerber C. Validation of a virtual reality-based simulator for shoulder arthroscopy. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2016;24:1730–7. <https://doi.org/10.1007/s00167-016-4022-4>.
- [14] Bayona S, Fernández-Arroyo JM, Martín I, Bayona P. Assessment study of insight ARTHRO VR ® arthroscopy virtual training simulator: face, content, and construct validities. *J Robot Surg* 2008;2:151–8. <https://doi.org/10.1007/s11701-008-0101-y>.
- [15] Gomoll AH, O’Toole RV, Czarnecki J, Warner JJP. Surgical Experience Correlates with Performance on a Virtual Reality Simulator for Shoulder Arthroscopy. *Am J Sports Med* 2007;35:883–8. <https://doi.org/10.1177/0363546506296521>.
- [16] Roberts PG, Guyver P, Baldwin M, Akhtar A, Alvand A, Price AJ, et al. Validation of the

- updated ArthroS simulator: face and construct validity of a passive haptic virtual reality simulator with novel performance metrics. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2017;25(2):616–25. <https://doi.org/10.1007/s00167-016-4114-1>.
- [17] Cotin S, Stylopoulos N, Ottensmeyer M, Neumann P, Rattner D, Dawson S. Metrics for Laparoscopic Skills Trainers: The Weakest Link! In: Dohi T, Kikinis R, editors. *Med. Image Comput. Comput.-Assist. Interv. — MICCAI 2002*, vol. 2488, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2002, p. 35–43. [https://doi.org/10.1007/3-540-45786-0\\_5](https://doi.org/10.1007/3-540-45786-0_5).
- [18] Hofstad EF, Våpenstad C, Chmarra MK, Langø T, Kuhry E, Mårvik R. A study of psychomotor skills in minimally invasive surgery: what differentiates expert and nonexpert performance. *Surg Endosc* 2013;27:854–63. <https://doi.org/10.1007/s00464-012-2524-9>.
- [19] Oropesa I, Sánchez-González P, Lamata P, Chmarra MK, Pagador JB, Sánchez-Margallo JA, et al. Methods and Tools for Objective Assessment of Psychomotor Skills in Laparoscopic Surgery. *J Surg Res* 2011;171:e81–95. <https://doi.org/10.1016/j.jss.2011.06.034>.
- [20] Balasubramanian S, Melendez-Calderon A, Burdet E. A Robust and Sensitive Metric for Quantifying Movement Smoothness. *IEEE Trans Biomed Eng* 2012;59:2126–36. <https://doi.org/10.1109/TBME.2011.2179545>.
- [21] Keogh E, Ratanamahatana CA. Exact indexing of dynamic time warping. *Knowl Inf Syst* 2005;7:358–86. <https://doi.org/10.1007/s10115-004-0154-9>.
- [22] Stunt JJ, Kerkhoffs GMMJ, van Dijk CN, Tuijthof GJM. Validation of the ArthroS virtual reality simulator for arthroscopic skills. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2015;23:3436–42. <https://doi.org/10.1007/s00167-014-3101-7>.
- [23] Manoharan G, Sharma N, Gallacher P. Competence in using the arthroscopy stack system: a national survey of orthopaedic trainees in the UK. *Ann R Coll Surg Engl* 2020;102:149–52. <https://doi.org/10.1308/rcsann.2019.0131>.
- [24] Walbron P, Common H, Thomazeau H, Sirveaux F. Evaluation of arthroscopic skills with a virtual reality simulator in first-year orthopaedic residents. *Int Orthop* 2020. <https://doi.org/10.1007/s00264-020-04520-1>.
- [25] Strandbygaard J, Bjerrum F, Maagaard M, Rifbjerg Larsen C, Ottesen B, Sorensen JL. A structured four-step curriculum in basic laparoscopy: development and validation. *Acta Obstet Gynecol Scand* 2014;93:359–66. <https://doi.org/10.1111/aogs.12330>.
- [26] Yule S, Flin R, Maran N, Rowley D, Youngson G, Paterson-Brown S. Surgeons' Non-technical Skills in the Operating Room: Reliability Testing of the NOTSS Behavior Rating System. *World J Surg* 2008;32:548–56. <https://doi.org/10.1007/s00268-007-9320-z>.

## Tableaux

	INTERMEDIAIRE (n=26)	EXPERT (n=26)	TOTAL (n=52)	P-VALUE
<b>AGE, an</b>	30 [28-31]	41 [36-46]	33 [29-41]	< 0.001*
<b>SEXE</b>				1 <sup>†</sup>
<i>Homme</i>	23 (88.5%)	24 (92.3%)	47 (90.4%)	
<i>Femme</i>	3 (11.5%)	2 (7.7%)	5 (9.6%)	
<b>COTE DOMINANT</b>				0.6 <sup>†</sup>
<i>Droit</i>	24 (92.4%)	25 (96.2%)	49 (94.3%)	
<i>Gauche</i>	1 (3.8%)	0 (0.0%)	1 (1.9%)	
<i>Ambidextre</i>	1 (3.8%)	1 (3.8%)	2 (3.8%)	
<b>PAYS</b>				< 0.001 <sup>†</sup>
<i>France</i>	26 (100.0%)	5 (19.2%)	31 (59.6%)	
<i>Autre</i>	0 (0%)	21 (80.8%)	21 (40.4%)	
<b>PRATIQUE SPORTIVE</b>				0.01 <sup>†</sup>
<i>Oui</i>	15 (57.7%)	24 (92.3%)	39 (75.0%)	-
<i>Non</i>	11 (42.3%)	2 (7.7%)	13 (25.0%)	
<b>PRATIQUE JEUX VIDEOS</b>				0.22 <sup>†</sup>
<i>Oui</i>	10 (38.5%)	5 (19.2%)	15 (28.8%)	
<i>Non</i>	16 (61.5%)	21 (80.8%)	37 (71.2%)	
<b>PRATIQUE INSTRUMENT MUSIQUE</b>				1 <sup>†</sup>
<i>Oui</i>	7 (26.9%)	6 (23.1%)	13 (25%)	
<i>Non</i>	19 (73.1%)	20 (76.9%)	39 (75.0%)	
<b>EXPERIENCE SIMULATEUR CHIRURGICAL</b>				0.25 <sup>†</sup>
<i>Oui</i>	12 (46.2%)	7 (26.9%)	19 (36.6%)	
<i>Non</i>	14 (53.8%)	19 (73.1%)	33 (63.4%)	

**Tableau 1.** Caractéristiques de base des participants

NOTE. Les données sont présentées sous forme de médiane [écart interquartile] ou de nombre (pourcentage).

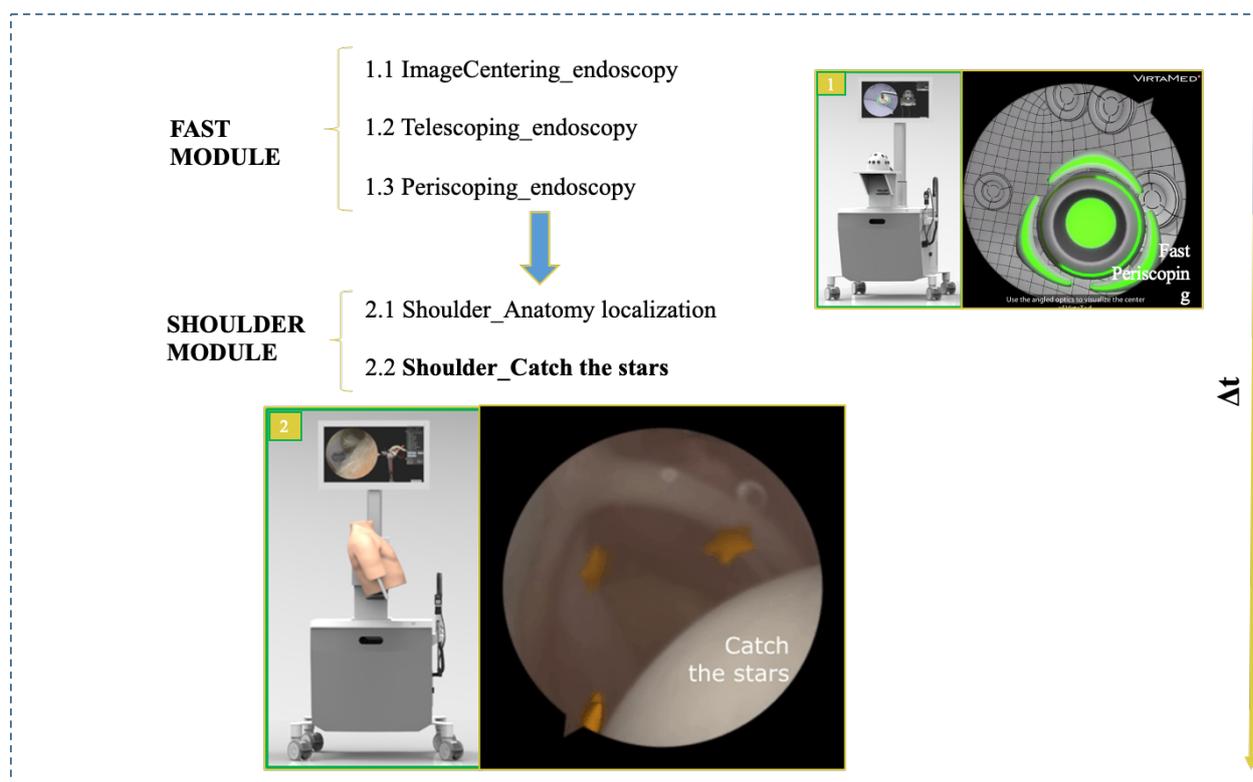
\* *Test t de Student sur échantillons indépendants*

<sup>†</sup> *Test Chi<sup>2</sup> de Pearson*

METRIQUES	Valeurs (Médiane [Écart Interquartile (IQR), 25% - 75%])		p <sup>†</sup>
	INTERMEDIAIRE	EXPERT	
Distance_Instrumentale <i>PL</i>	695 mm [IQR, 467-1090]	671 mm [504-846]	0.62
Durée <i>DUR</i> *	116.1 s [82.8-154.2]	70.9 s [56.4-86.3]	<0.01
Vitesse moyenne <i>AV</i> *	6.9 mm.s <sup>-1</sup> [4.7-9.5]	10.0 mm.s <sup>-1</sup> [7.4-11.6]	<0.01
Accélération moyenne <i>AA</i>	92.3 mm.s <sup>-2</sup> [61.0-141.4]	116.6 mm.s <sup>-2</sup> [79.2-144.2]	0.09
Tremblement moyen <i>AJ</i>	3717 mm.s <sup>-3</sup> [2431-6087]	4211 mm.s <sup>-3</sup> [3017-5604]	0.31
Economie <i>ECO</i> *	33.8 mm <sup>2</sup> [14.8-50.5]	19.3 mm <sup>2</sup> [9.1-25.6]	<0.01
Fluidité du Mouvement <i>HMS</i> *	1.5.10 <sup>6</sup> mm.s <sup>-3</sup> [2.6E+5-3.5E+6]	4.6.10 <sup>6</sup> mm.s <sup>-3</sup> [3.1E+5-7.2E+5]	0.05
Fluidité de Longueur d'Arc Spectral <i>SPARC</i> *	-37.8 [-60.7 - -26.5]	-21.2 [-31.0 - -16.8]	<0.01
Profondeur <i>D</i>	123.8 mm [97.1-155.0]	116.6 mm [92.1-138.8]	0.11
Volume de Travail <i>WV</i> *	28236 mm <sup>3</sup> [7193-52229]	12687 mm <sup>3</sup> [5753-22309]	<0.01

**Tableau 2.** Résultats des métriques pour les catégories INTERMEDIAIRE et EXPERT, p-values  
*Les p-values significatives sont surlignées en gris et marquées d'un \*.*  
<sup>†</sup> p-value U Mann-Whitney

**Figure**



**Figure 1.** Protocole Standardisé (1. Le participant est initié au simulateur avec le module FAST (Fundamentals of Arthroscopy Surgery Training) avec 3 exercices différents 1.1, 1.2 et 1.3 ; 2.1 Le participant est initié à l'anatomie de l'épaule du module SHOULDER en décubitus latéral, 2.2. Le participant réalise l'exercice 3 fois en décubitus latéral)

DEFINITION DES METRIQUES	
<b>Durée (DUR)</b>	Temps d'exécution entre la première fois que la main déplace la sonde, jusqu'à ce que la sonde soit relâchée à la fin de la tâche. Mesurée en secondes (s).
<b>Distance Instrumentale (PL)</b>	Somme des distances totales parcourues par les sondes (caméra et pince) pendant l'exécution de la tâche. Mesurée en millimètres (mm).
<b>Vitesse Moyenne (AV)</b>	Vitesse linéaire moyenne de la sonde pendant la tâche. Mesurée en millimètres par seconde. (mm.s <sup>-1</sup> ).
<b>Accélération Moyenne (AA)</b>	Accélération instantanée moyenne de la sonde pendant la tâche. Mesurée en millimètres par seconde au carré. (mm.s <sup>-2</sup> ).
<b>Tremblement Moyen (AJ)</b>	Tremblement moyen (dérivée de l'accélération) pendant la tâche, également appelée "fluidité". Mesuré en millimètres par seconde au cube. (mm.s <sup>-3</sup> ).
<b>Volume de Travail (WV)</b>	Volume de la coque convexe pour chaque trajectoire. Mesuré en millimètres cubes. (mm <sup>3</sup> ).
<b>Economie de Mouvement (ECO)</b>	Rapport entre le volume de Travail et la Distance Instrumentale. Mesuré en mm <sup>2</sup> .
<b>Fluidité du Mouvement (HMS)</b>	Variation totale de l'accélération de la pointe de l'instrument. Mesurée en millimètres par seconde au cube. (mm.s <sup>3</sup> ) et normalisé par la durée de procédure.
<b>Fluidité de Longueur d'Arc Spectral (SPARC)</b>	Fluidité du profil de vitesse du mouvement linéaire par la méthode de la longueur d'arc spectrale. Mesure sans unité.
<b>Profondeur (D)</b>	Distance totale parcourue par la pointe de l'instrument le long de l'axe z. Mesurée en millimètres (mm).

**Figure 2.** Définitions des métriques

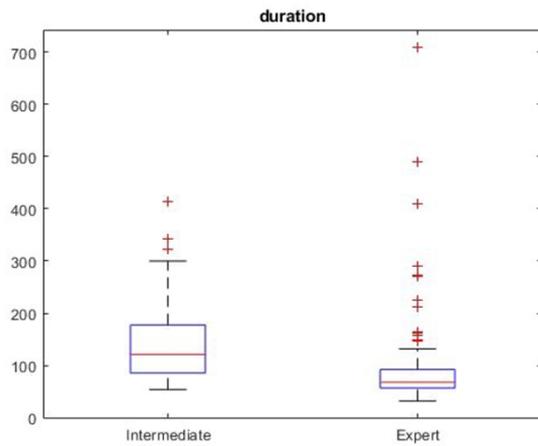


Figure 3.1. Duration

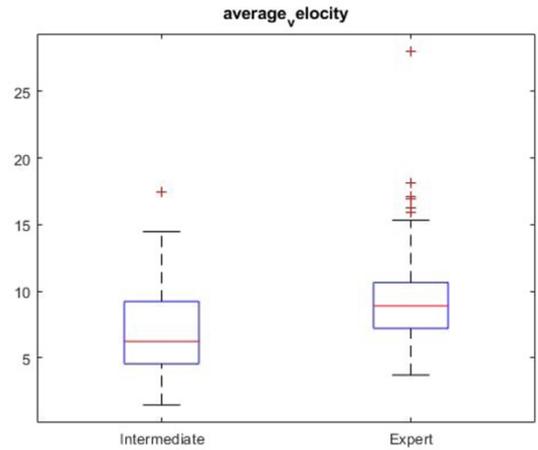


Figure 3.2. Velocity

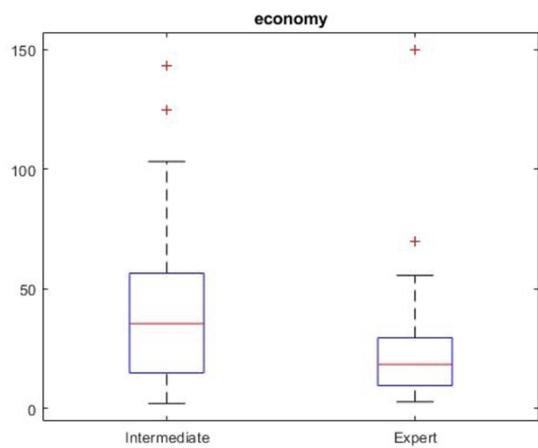


Figure 3.3. Economy

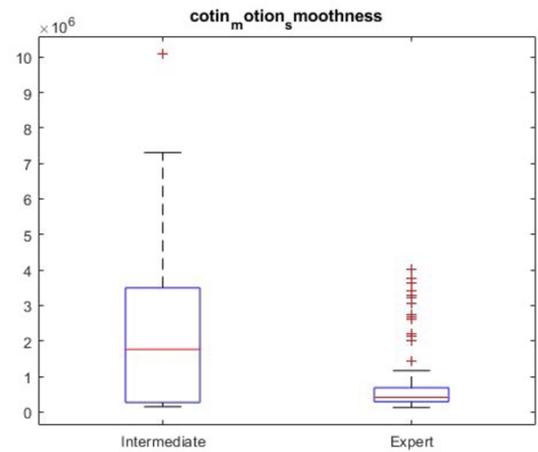


Figure 3.4. Motion Smoothness

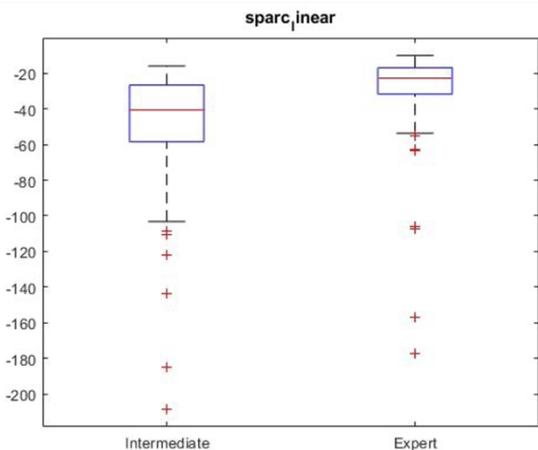


Figure 3.5. Spectral Arc Length Smoothness

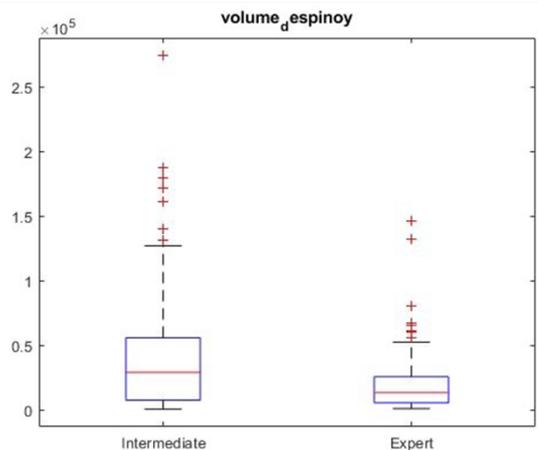


Figure 3.6. Working Volume

**Figure 3.** Diagrammes moustaches des métriques avec différences significatives (3.1. *Durée*, 3.2. *Vitesse*, 3.3. *Volume de Travail*, 3.4. *Economie*, 3.5. *Fluidité du Mouvement*, et 3.6. *Fluidité de Longueur d'Arc Spectral*)

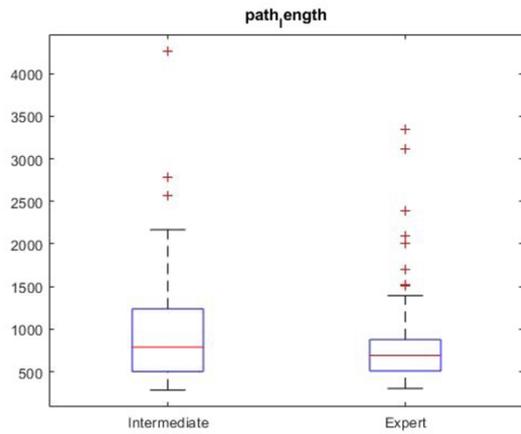


Figure 4.1. Path Length

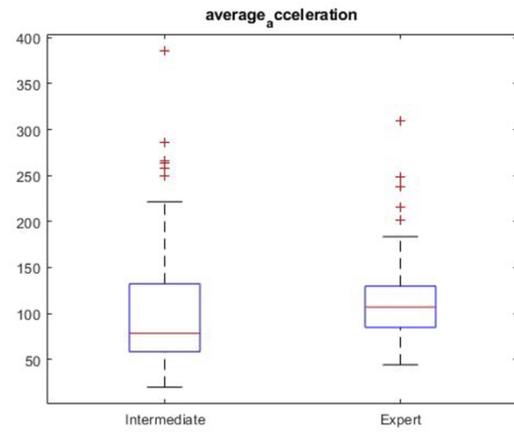


Figure 4.2. Acceleration

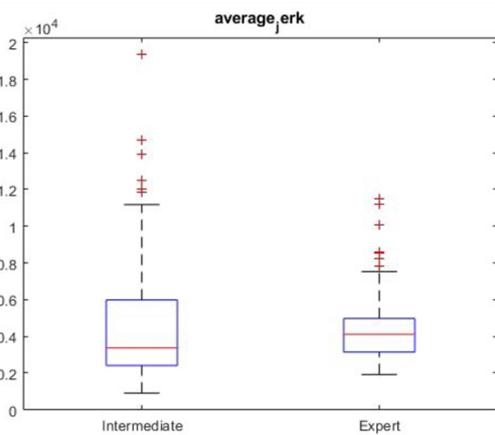


Figure 4.3. Jerk

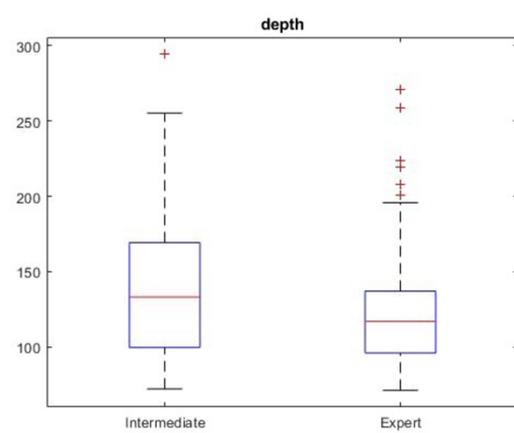
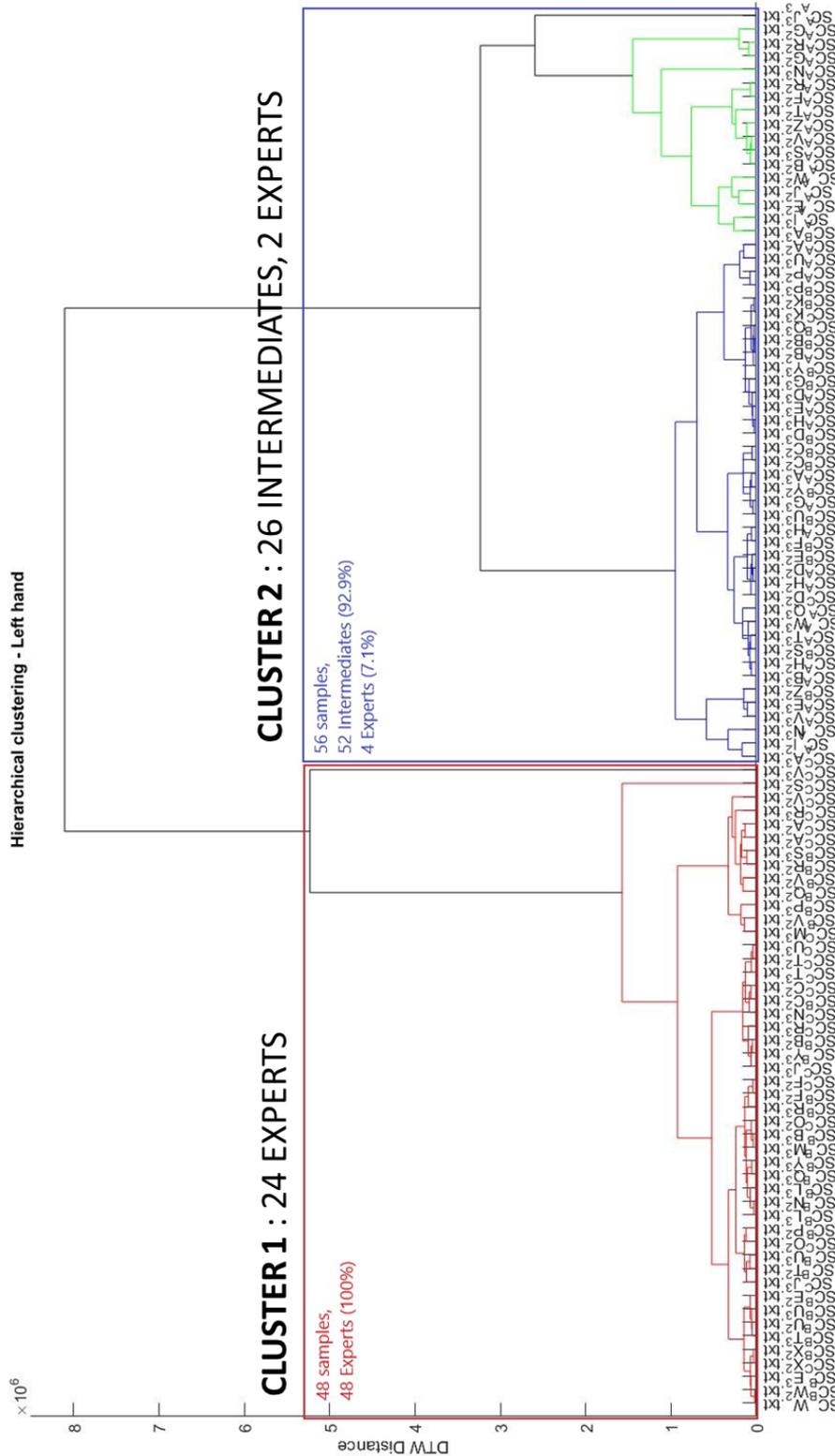


Figure 4.4. Depth

**Figure 4.** Diagrammes moustaches des métriques sans différences significatives (4.1. *Distance Instrumentale*, 4.2. *Accélération*, 4.3. *Tremblement*, et 4.4. *Profondeur*)



**Figure 5.** Dendrogramme du Clustering Hiérarchique avec Dynamic Time Warping (En abscisse les trajectoires et en ordonnées la distance entre clusters. Les deux principaux clusters sont représentés, le cluster 1 est uniquement composé d'experts avec une faible distance DTW, le cluster 2 est composé des intermédiaires et de 2 experts avec une distance DTW plus hétérogène.)

## **CHAPITRE 3. DEROULE DE L'ETUDE**

L'objectif de ce projet de recherche en pédagogie consiste à analyser de façon approfondie l'apport de la simulation VR pour l'apprentissage des compétences de bases en arthroscopie. Nous nous sommes portés sur deux méthodes de validation du simulateur pour :

- 1) Établir la "**Construct Validity**" du simulateur VR ArthroS lors d'un exercice simple de ménissectomie partielle du ménisque médiale à travers des métriques innovantes et d'autres modalités de classement des performances telles que le Dynamic Time Warping.
- 2) Établir la "**Transfer Validity**" des compétences acquises sur simulateur VR au sujet anatomique (et sur maquette) pour une cohorte de novices.

36 chirurgiens novices (internes inscrits en DES-1 et 2 de chirurgie orthopédique) et 30 chirurgiens expérimentés (plus de 30 arthroscopies du genou et/ou de l'épaule par an) ont été enrôlés pour l'étude de *Construct Validity*. La procédure analysée était une ménissectomie médiale partielle guidée dans une articulation du genou droit. 30 métriques ont été calculées sur les trajectoires, notamment la durée de la procédure, les distances instrumentales, l'économie de mouvement et la fluidité. De plus, le Dynamic Time Warping (DTW) a été calculé sur les trajectoires afin d'effectuer un regroupement hiérarchique non supervisé des trajectoires instrumentales des chirurgiens. La cohorte composée de 36 chirurgiens novices a ensuite été divisée en deux sous-groupes (16 formés avec un programme de formation sur simulateur hybride VR d'une heure par mois (**Annexe 1**) et 20 qui ont suivi leur programme national d'orthopédie sans programme de formation VR pour l'apprentissage de l'arthroscopie. Après 6 mois de suivi, les 36 internes ont été évalués par deux chirurgiens experts en arthroscopie du genou, indépendants de l'étude et en aveugle des bras d'inclusion. Trois exercices ont été évalués : (1) une ménissectomie partielle médiale guidée par arthroscopie sur maquette de genou ; (2) un tour diagnostique du genou sous arthroscopie puis (3) une ménissectomie partielle guidée sur genou de sujet anatomique issus du don de corps. Tous ont été évalués via l'échelle d'évaluation globale ASSET-FR (ASSET traduit en français) (**Annexe 2**)

En parallèle de ces deux études de validation du simulateur pour l'analyse des compétences techniques, nous avons combiné ce projet à une recherche fondamentale sur l'analyse des compétences non techniques :

- 1) L'analyse posturale par capture vidéo via caméra RGBD (*Red Green Blue-Depth*), travail de Master 2 puis PhD de Tiphaine Casy
- 2) L'analyse du stress par mesure de variation de la fréquence cardiaque (VFC)
- 3) L'analyse de fatigabilité musculaire par capteurs EMG (Electromyographique) non encore étudiée.

## **CHAPITRE 4. ETUDE 1**

**Progression des compétences techniques sur simulateur d'arthroscopie en Réalité Virtuelle : analyse numérique**

*Etude non encore soumise à publication*

## **Abstract**

*Introduction* : Une étude récente a montré les limites des simulateurs VR d'arthroscopie pour caractériser les niveaux de compétences sur des exercices simples à partir des métriques du simulateur. A l'inverse d'une autre étude ayant montré la capacité du simulateur à détecter des niveaux des compétences à partir de métriques spécifiques et de clustering hiérarchique.

*Hypothèse* : Nous avons émis l'hypothèse qu'une plus grande expérience en arthroscopie (réelle ou simulée) serait corrélée à une meilleure performance sur simulateur VR d'arthroscopie et que les opérateurs expérimentés partageraient des trajectoires instrumentales similaires.

*Matériels & Méthodes* Après réponse à un questionnaire standardisé, 56 trajectoires de 56 chirurgiens répartis en 3 cohortes (14 internes novices non formés, 16 internes novices formés pendant 6 mois sur simulateur VR et 28 chirurgiens expérimentés) ont été enregistrées sur simulateur d'arthroscopie. La procédure analysée était la ménissectomie partielle médiale sur le module GENOU. 19 métriques ont été calculées sur les trajectoires : durée, distance instrumentale, économie de mouvement et fluidité. De plus, le Dynamic Time Warping (DTW) a été calculé sur les trajectoires pour une classification hiérarchique non supervisée des chirurgiens.

*Résultats* A l'inclusion, les chirurgiens expérimentés sont significativement plus rapides ( $p < 0.001$ ), plus fluides ( $p < 0.001$ ), plus économes ( $p = 0.004$ ) que les cohortes de chirurgien novices (formés ou non). Après formation de 6 mois, les internes formés sont significativement plus rapides ( $p < 0.001$ ), plus fluides ( $p = 0.05$ ) par rapport à la cohorte novice de l'inclusion mais ils restent moins rapides ( $p = 0.003$ ), moins fluides ( $p = 0.03$ ) et moins économes ( $p = 0.04$ ) par rapport aux chirurgiens expérimentés. Les clustering hiérarchique par DTW n'a pas permis de différencier de groupes de trajectoires similaires liées à l'expertise.

*Conclusion* Cette étude remet en question la *Construct Validity* fine du simulateur VR d'arthroscopie par l'analyse de métriques au sein d'un groupe de chirurgiens. Nous n'avons pas démontré que l'analyse par clustering avec Dynamic Time Warping est capable de distinguer de manière fiable les effets bénéfiques d'une formation sur des internes novices.

*Pertinence clinique* Les résultats ont des implications pour l'avenir de la formation en chirurgie arthroscopique ou des programmes d'accréditation postuniversitaire utilisant la simulation par réalité virtuelle.

*Niveau de preuve* II, étude comparative prospective

**Mots-Clés** Simulation VR- Arthroscopie – Entraînement – Compétences Arthroscopiques

## **1. Introduction**

L'apprentissage pratique de la chirurgie fait partie des enjeux de santé publique pour des raisons de sécurité, d'organisation liées au fonctionnement des établissements de santé et aux contraintes de disponibilité des enseignants et des étudiants. De fait, la simulation procédurale est officiellement incluse dans le programme national de formation médicale et chirurgicale des internes depuis 2017 [1]. Les simulateurs utilisant la réalité virtuelle (VR) sont des alternatives aux apprentissages traditionnelles sur maquettes [2] ou sur sujets anatomiques [3], tout particulièrement pour l'apprentissage de l'arthroscopie en fournissant des données quantitatives pour la mesure des performances, le suivi des progrès et l'évaluation des compétences [4]. Parmi les avantages des simulateurs VR, le suivi de la progression des apprenants sur simulateur permettrait une évaluation continue des acquis [5]. De nombreuses recherches ont été consacrées au développement de cet outil et à son utilisation [6–8]. La plupart des études s'accordent à valider l'utilisation du simulateur pour l'apprentissage des compétences même si une étude en a récemment montré les limites pour valider les niveaux de compétence de base sur le programme FAST à partir des métriques du simulateur [9]. Toutefois, une seconde étude a démontré qu'il était possible de différencier des niveaux de compétences chez des chirurgiens expérimentés à partir de nouvelles métriques [10].

Pour cette étude, nous avons émis l'hypothèse que des chirurgiens novices ayant suivi un programme mensuel de formation sur simulateur VR partageraient des trajectoires instrumentales similaires avec des opérateurs expérimentés. L'objectif de cette étude était d'analyser les trajectoires instrumentales de différentes cohortes de chirurgiens et de montrer la capacité du simulateur à distinguer les niveaux de performance individuels en utilisant des métriques innovantes.

## **2. Méthodes**

Cette étude a été enregistrée dans la base de données nationale sous le numéro d'identification F20201214092057 en étant conforme à une méthodologie de référence MR-004. Aucun financement externe n'a été reçu pour cette étude.

### ***2.1. Participants***

Entre novembre 2020 et janvier 2021, trente-deux internes en chirurgie orthopédique (première et deuxième année d'études, DES-1 et DES-2) du même pays sans expérience

préalable en chirurgie arthroscopique ont participé à un cours théorique et pratique sur les bases de l'arthroscopie : conférence didactique par un chirurgien senior spécialisé en arthroscopie, et cours pratique de 30 minutes par participant sur le simulateur VR avec le même instructeur pour tous. Il s'agissait du groupe NOVICE. Tous les internes ont ensuite été inclus dans l'étude pour recevoir soit une formation standard à l'arthroscopie du genou (appelée groupe NOVICE NON-VR), soit une formation standard plus six protocoles mensuels supplémentaires d'une heure de formation sur simulateur d'arthroscopie VR (appelé groupe NOVICE VR). Ces groupes étaient respectivement composé de 16 internes (7 DES-1, 7 DES-2) pour le groupe NOVICE VR, et 20 internes (8 DES-1, 8 DES-2) pour le groupe NOVICE NON-VR. Tous les participants ont répondu à un questionnaire à l'inclusion et ont suivi un premier protocole de formation sur les modules FAST & GENOU permettant de connaître leur niveau de base. Les deux groupes n'ont pas été randomisés pour des raisons de commodité géographique, car la formation s'est déroulée sur un seul site, avec un temps de trajet imposé d'une heure et demie entre le lieu de travail et le centre de simulation. Tous les participants ont donné leur consentement éclairé. Tous les internes inscrits avaient effectué moins de cinq chirurgies arthroscopiques en tant qu'opérateur principal, éventuellement sous la supervision d'un chirurgien senior. Un second groupe de chirurgiens expérimentés a été inclus dans l'étude sur la base du volontariat, le groupe EXPERIMENTE. Il était composé de 30 chirurgiens orthopédistes avec une surspécialisation en chirurgie arthroscopique du genou et/ou d'épaule réalisant plus de 50 arthroscopies en tant qu'opérateur principal par an. Ce seuil d'expérience a été précédemment utilisé dans une étude similaire [11]. Seule la pratique chirurgicale réelle a été évaluée pour déterminer le niveau d'expertise, la pratique antérieure sur simulateur chirurgical n'a pas été prise en compte. Nous avons eu 8 participants avec des données incomplètes (2 NOVICE VR, 4 NOVICE NON-VR, 2 EXPERIMENTE). L'ensemble des formations a eu lieu dans la même salle du laboratoire, dans les mêmes conditions de recueils de données, de calme, de luminosité, avec le même intervenant afin de garder les groupes comparables. Chaque participant a répondu à un questionnaire standardisé sur son expertise en arthroscopie et ses loisirs (**Tableau 1**).

## ***2.2. Protocole d'entraînement***

Le groupe NOVICE VR a suivi un programme de formation standardisé fixe avec une difficulté croissante en utilisant le simulateur d'arthroscopie ArthroS™ de VirtaMed AG (Schlieren). La validité apparente (*face validity*) et la validité de construction (*construct validity*) du simulateur et de ses différents modules ont été évaluées dans des études antérieures

(reference) [8,12,13]. Les modules FAST et GENOU ont été utilisés pour l'étude. Nous avons organisé et financé le voyage des internes par groupes de 3 maximum pour suivre une formation individuelle pratique supervisée d'une heure par mois dans le même centre désigné pendant 6 mois avec le même instructeur. Cette formation a été conçue de difficulté croissante afin d'apprendre les bases de l'arthroscopie : triangulation, périscopie, centrage et alignement de la caméra, dextérité bimanuelle, arthroscopie diagnostique du genou et de l'épaule... (le programme complet est disponible dans l'**Annexe 1**). L'ensemble des données instrumentales du simulateur VR a été collecté au fur et à mesure de son déroulement (score global, temps (s), trajectoire instrumentale (cm)). Le groupe NOVICE VR a suivi le programme d'apprentissage national actuel avec divers cours de formation théorique et pratique en arthroscopie [1], à la discrétion de chaque centre. La seule limite imposée était de ne pas s'entraîner sur simulateur d'arthroscopie VR afin de garder les groupes comparables.

### ***2.3. Procédure analysée : Ménisectomie partielle médiale***

La procédure analysée lors de cette étude est la ménisectomie partielle, procédure de base en chirurgie arthroscopie du genou combinant plusieurs gestes techniques basiques (déplacement de l'arthroscope dans l'articulation du genou, maintien de l'arthroscope en position de travail, triangulation avec la main instrumentale, respect des tissus par gestion de son espace de travail, ...). La ménisectomie partielle médiale sur le simulateur est un exercice guidé séquentiel en plusieurs étapes (**Figure 1**) : (1) Repérer la lésion ; (2) Ménisectomie à la pince coupante type « basket » ; (3) Finition et avivement des berges au couteau à synoviale motorisé (shaver) ; (4) Palpation de la lésion au palpeur. Pour éviter le recueil de données aberrantes lors de l'analyse instrumentale du fait du changement d'instrument en extra-articulaire (comptabilisé dans les distances instrumentales) et de certains bugs informatiques intermittents constatés sur la partie (3) Shaver et (4) palpeur, ont été analysés uniquement les parties (1) et (2).

### ***2.4. Analyse statistique***

Un calcul de puissance bilatéral a été effectué pour l'hypothèse nulle ("la performance des chirurgiens expérimentés est égale à celle des novices") avec une erreur de type 1 acceptable,  $\alpha = 0,05$  et une erreur de type 2 acceptable  $\beta = 0,20$ , puissance = 0,8. Pour le calcul de la puissance, les données de précédentes études de validation du simulateur d'arthroscopie VR ont été utilisées [10]. Cela a permis d'obtenir un nombre minimum de 14 sujets dans chaque groupe, conforme aux études de validation précédemment rapportées. Le programme TRACAS (*TRajjectory Analysis for Computer Assisted Surgery*) basé sur Matlab a été adapté aux données du simulateur

et utilisé pour l'analyse des trajectoires. Dans un premier temps, les données extraites du simulateur ont été utilisées pour calculer dix-neuf métriques (définies en **Figure 2**) : *durée*, *distance instrumentale*, *vitesse*, *accélération*, *tremblement*, *volume de travail*, *économie de mouvement*, *fluidité du mouvement*, *fluidité de la longueur de l'arc spectral* et *profondeur*. L'analyse a été effectuée en suivant les techniques publiées précédemment. Le calcul de toutes les métriques et l'analyse des trajectoires ont été effectués sur un ordinateur dédié (Xeon E5-1650V4 @3.60GHz avec 32Go de RAM) en utilisant Matlab\_R2018b. Un test non paramétrique (test U bilatéral de Mann-Whitney) a été utilisé afin d'observer lesquelles des métriques présentaient des différences statistiques ( $p < 0,05$ ). Des diagrammes moustaches ont été modélisés. Les similarités de trajectoires des participants ont été enfin analysées par classification hiérarchique ascendante avec Dynamic Time Warping (DTW). Le DTW est pertinent pour l'indexeur de séries temporelles car il a la capacité de reconnaître des formes indépendamment de leur distorsion temporelle ou de leur déphasage [14].

### 3. Résultats

#### 3.1. Analyse des groupes lors de l'inclusion

L'analyse des trajectoires instrumentales par métriques a révélé des différences significatives entre les groupes NOVICE VR, NOVICE NON VR et EXPERIMENTE (**Tableau 1**). Le groupe EXPERIMENTE a obtenu des résultats significativement supérieurs à ceux du groupe NOVICE NON VR pour 10/19 métriques. Concernant le groupe NOVICE VR à l'inclusion, il y avait des différences significatives avec le groupe NOVICE NON VR pour 1 métrique (*vitesse moyenne arthroscopie* ( $m.s^{-1}$ ),  $p 0.03$ ) et 13/19 métriques avec le groupe EXPERIMENTE (**Tableau 1**).

#### 3.1. Analyse de la progression des apprenants

Concernant le groupe NOVICE VR après formation, on observait des différences significatives avec le groupe NOVICE NON VR pour 4/19 métriques (**Tableau 2**) différentes de l'inclusion : *vitesse moyenne pince* ( $m.s^{-1}$ ),  $p 0.026$  ; *durée* ( $s$ ),  $p 0.01$  ; *fluidité du mouvement arthroscopie*,  $p 0.044$  et *longueur arc spectral arthroscopie*,  $p 0.026$ . Il y avait des différences significatives avec le groupe EXPERIMENTE pour 7/19 métriques (**Tableau 2**). Les diagrammes moustaches les plus représentatifs de la progression sont représentés en (**Figure 3**). 8/19 métriques restent significatives avant et après formation sur le niveau d'expérience.

### ***3.3. Analyse des similarités de trajectoires par classification hiérarchique***

Les résultats du clustering non supervisé avec DTW ne sont pas contributifs, sans tendance visualisable. Il a été décidé de ne pas présenter les résultats.

## **4. Discussion**

Les résultats ont confirmé que 8 des 19 métriques calculées sur les trajectoires étaient capables de distinguer l'expertise pour cet exercice : les experts avaient un geste plus fluide (meilleur résultat pour la fluidité de la longueur d'arc spectral) avec l'arthroscope, plus économique (meilleurs résultats pour l'économie et le volume de travail) avec l'arthroscope, et plus efficace (meilleurs résultats pour le temps, la vitesse et l'accélération) avec la pince emporte-pièce. On remarque que la distance instrumentale de l'arthroscope est significativement plus petite parmi les chirurgiens du groupe expérimenté et dans une moindre mesure pour le groupe d'internes formés, la distance instrumentale de la pince emporte-pièce ne diffère pas de façon significative entre les groupes. Cette information concorde avec de précédentes études mettant en doute la distance instrumentale comme marqueur fiable de l'expertise [10,12]. Bien que souvent utilisée par les simulateurs VR, la distance instrumentale ne semble pas être forcément corrélée à l'expertise, ici pour la pince emporte-pièce. Comme retrouvé dans une étude précédente, la fluidité de mouvement (selon la formule de Cotin (Cotin) et longueur d'arc spectral (Balasubramanian) peut être un marqueur significatif d'expertise et pour notre étude de progression sur simulateur [10]. Toutefois, cette affirmation ne concerne ici que l'analyse de trajectoire de l'arthroscope, les données sur l'analyse de trajectoires de la pince n'étant pas contributive.

Dans cette étude, il a donc été possible de distinguer de manière significative les niveaux d'expertise entre débutant et expérimenté à travers certaines métriques. La *Construct Validity* du simulateur avait déjà été démontrée pour les novices et les experts [8,12] puis dans une étude plus récente entre chirurgiens expérimentés pour un exercice de retrait de corps étrangers dans une épaule [10]. Notre étude a montré qu'il est possible pour un simulateur VR d'arthroscopie d'évaluer la progression en utilisant de nouvelles métriques. Pour autant, nous remarquons que les métriques peuvent être intimement liés à la trajectoire de l'instrument analysé. Une métrique donnée peut être intéressante pour un geste technique dans le cadre d'une procédure spécifique mais peut être non significative dans un autre contexte. Il faudra donc en tenir compte à l'avenir dans l'évaluation des compétences à partir des métriques numériques d'analyses de trajectoire.

Notre étude présente plusieurs limites. On déplorera dans un premier temps qu'il persiste des différences significatives pour 7/22 métriques par rapport à la cohorte de chirurgiens expérimentés. Pour des raisons pratiques et pour coïncider avec les plannings de formation et de permanence de soins des internes, nous avons choisi un programme de formation mensuel d'une heure par mois sur un semestre (6h de formation). Or des études plus récentes ont depuis montré que les formations sur simulateurs inférieurs à 10h n'étaient pas suffisantes [15]. Il est donc possible qu'en poursuivant le programme de formation, nous aurions pu avoir des résultats plus probants. Nous avons réalisé une analyse par clustering hiérarchique utilisant le DTW [16] en parallèle de l'analyse sur les métriques, les résultats ne montrent pas clusters évidents de groupes de compétences. Il est possible qu'en analysant uniquement un geste court simple (résection méniscale à la pince emporte-pièce), il soit difficile d'extrapoler des groupes de trajectoires similaires. Nous pourrions conclure que ce programme de formation n'a pas été efficace. Pourtant, les compétences post-formation de ces 2 groupes d'internes ont été évaluées sur maquette synthétique et sujets anatomiques par 2 chirurgiens experts lors d'une étude précédemment publiée [17]. Cette étude a confirmé le transfert des compétences et objectiver la progression des internes. Notre étude montre donc les limites restantes des simulateurs numériques en termes de métriques et d'analyse fine des compétences. Ainsi, la mise en place d'une évaluation certifiante basé uniquement sur simulateur VR d'arthroscopie pose encore questions [5].

## **5. Conclusion**

Cette étude a confirmé partiellement la *Construct Validity* du simulateur VR d'arthroscopie. Grâce à des métriques exhaustives d'analyses des trajectoires, il a été possible de distinguer de manière significative les chirurgiens experts des chirurgiens novices. Cependant, les résultats sont plus modestes en ce qui concerne l'analyse de la progression des chirurgiens novices. L'analyse par cluster avec Dynamic Time Warping n'a pas été capable de distinguer de manière fiable les opérateurs experts des opérateurs intermédiaires pour cet exercice.

## **6. Remerciements**

Nous remercions tous les participants ainsi que le réseau HUGORTHO pour la participation active à ce projet.

## 7. Références

- [1] Bauer T, Clavert P, Garreau De Loubresse C, Sonnery-Cottet B. Arthroscopy teaching in 2023: A priority for the Francophone Arthroscopy Society. *Orthop Traumatol Surg Res* 2022;108:103473. <https://doi.org/10.1016/j.otsr.2022.103473>.
- [2] Chong ACM, Pate RC, Prohaska DJ, Bron TR, Wooley PH. Validation of Improvement of Basic Competency in Arthroscopic Knot Tying Using a Bench Top Simulator in Orthopaedic Residency Education. *Arthrosc J Arthrosc Relat Surg* 2016;32:1389–99. <https://doi.org/10.1016/j.arthro.2016.01.059>.
- [3] Butler A, Olson T, Koehler R, Nicandri G. Do the Skills Acquired by Novice Surgeons Using Anatomic Dry Models Transfer Effectively to the Task of Diagnostic Knee Arthroscopy Performed on Cadaveric Specimens? *J Bone Jt Surg* 2013;95:e15. <https://doi.org/10.2106/JBJS.L.00491>.
- [4] Aïm F, Lonjon G, Hannouche D, Nizard R. Effectiveness of Virtual Reality Training in Orthopaedic Surgery. *Arthrosc J Arthrosc Relat Surg* 2016;32:224–32. <https://doi.org/10.1016/j.arthro.2015.07.023>.
- [5] Seil R, Hoeltgen C, Thomazeau H, Anetzberger H, Becker R. Surgical simulation training should become a mandatory part of orthopaedic education. *J Exp Orthop* 2022;9:22. <https://doi.org/10.1186/s40634-022-00455-1>.
- [6] Walbron P, Common H, Thomazeau H, Hosseini K, Peduzzi L, Bulaid Y, et al. Virtual reality simulator improves the acquisition of basic arthroscopy skills in first-year orthopedic surgery residents. *Orthop Traumatol Surg Res* 2020;106:717–24. <https://doi.org/10.1016/j.otsr.2020.03.009>.
- [7] Marcheix P-S, Vergnenegre G, Dalmay F, Mabit C, Charissoux J-L. Learning the skills needed to perform shoulder arthroscopy by simulation. *Orthop Traumatol Surg Res* 2017;103:483–8. <https://doi.org/10.1016/j.otsr.2017.02.008>.
- [8] Fucentese SF, Rahm S, Wieser K, Spillmann J, Harders M, Koch PP. Evaluation of a virtual-reality-based simulator using passive haptic feedback for knee arthroscopy. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2015;23:1077–85. <https://doi.org/10.1007/s00167-014-2888-6>.
- [9] Vaghela KR, Trockels A, Lee J, Akhtar K. Is the Virtual Reality Fundamentals of Arthroscopic Surgery Training Program a Valid Platform for Resident Arthroscopy Training? *Clin Orthop* 2022;480:807–15. <https://doi.org/10.1097/CORR.0000000000002064>.
- [10] Tronchot A, Berthelemy J, Thomazeau H, Hualmé A, Walbron P, Sirveaux F, et al. Validation of virtual reality arthroscopy simulator relevance in characterising experienced surgeons. *Orthop Traumatol Surg Res* 2021;107:103079. <https://doi.org/10.1016/j.otsr.2021.103079>.
- [11] Rahm S, Wieser K, Bauer DE, Waibel FW, Meyer DC, Gerber C, et al. Efficacy of standardized training on a virtual reality simulator to advance knee and shoulder arthroscopic motor skills. *BMC Musculoskelet Disord* 2018;19:150. <https://doi.org/10.1186/s12891-018-2072-0>.
- [12] Rahm S, Germann M, Hingsammer A, Wieser K, Gerber C. Validation of a virtual reality-based simulator for shoulder arthroscopy. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2016;24:1730–7. <https://doi.org/10.1007/s00167-016-4022-4>.
- [13] Cychosz C, Khazi ZM, Karam M, Duchman K, Willey M, Westermann R. Validation of a novel hip arthroscopy simulator: establishing construct validity. *J Hip Preserv Surg* 2019;6:385–9. <https://doi.org/10.1093/jhps/hnz059>.
- [14] Keogh E, Ratanamahatana CA. Exact indexing of dynamic time warping. *Knowl Inf Syst* 2005;7:358–86. <https://doi.org/10.1007/s10115-004-0154-9>.

- [15] Anetzberger H, Reppenhagen S, Eickhoff H, Seibert FJ, Döring B, Haasters F, et al. Ten hours of simulator training in arthroscopy are insufficient to reach the target level based on the Diagnostic Arthroscopic Skill Score. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2022;30:1471–9. <https://doi.org/10.1007/s00167-021-06648-y>.
- [16] Despinoy F, Bouget D, Forestier G, Penet C, Zemiti N, Poignet P, et al. Unsupervised Trajectory Segmentation for Surgical Gesture Recognition in Robotic Training. *IEEE Trans Biomed Eng* 2016;63:1280–91. <https://doi.org/10.1109/TBME.2015.2493100>.
- [17] Tronchot A, Casy T, Vallee N, Common H, Thomazeau H, Jannin P, et al. Virtual reality simulation training improve diagnostic knee arthroscopy and meniscectomy skills: a prospective transfer validity study. *J Exp Orthop* 2023;10:138. <https://doi.org/10.1186/s40634-023-00688-8>.

## Tableaux

	<b>NOVICE NON VR (n=16)</b>	<b>NOVICE VR (n=14)</b>	<b>EXPERIMENTE (n=28)</b>	<b>TOTAL (n=58)</b>
<b>AGE, an</b>	25.5 [24.5-26.5]	25.3 [24.8-25.8]	44.0 [32.5-55.5]	28.3 [25-37]
<b>SEXE</b>				
<i>Homme</i>	9 (56.2%)	12 (85.7%)	26 (92.9%)	47 (81%)
<i>Femme</i>	7 (43.8%)	2 (14.3%)	2 (7.1%)	11 (19%)
<b>COTE DOMINANT</b>				
<i>Droit</i>	13 (81.2%)	14 (87.5%)	26 (92.9%)	51 (87.9%)
<i>Gauche</i>	3 (18.8%)	2 (12.5%)	1 (3.6%)	6 (10.3%)
<i>Ambidextre</i>	0 (0.0%)	0 (0.0%)	1 (3.6%)	1 (1.8%)
<b>ANNEE D'INTERNAT</b>				
<i>DES-1</i>	8 (50%)	7 (50%)	//	//
<i>DES-2</i>	8 (50%)	7 (50%)	//	//
<b>EXPERIENCE ARTHROSCOPIQUE*</b>				
<i>INFERIEUR A 5</i>	16 (100%)	14 (100%)	0 (0%)	30 (51.7%)
<i>SUPERIEUR A 50</i>	0 (0%)	0 (0%)	100 (100%)	28 (48.3%)
<b>PRATIQUE SPORTIVE</b>				
<i>Oui</i>	12 (75%)	8 (57.1%)	21 (75%)	41 (70.7%)
<i>Non</i>	4 (25%)	6 (42.9%)	7 (25%)	17 (29.3%)
<b>PRATIQUE JEUX VIDEOS</b>				
<i>Oui</i>	7 (43.8%)	8 (57.1%)	10 (35.7%)	25 (43.1%)
<i>Non</i>	9 (56.2%)	6 (42.9%)	18 (64.3%)	33 (56.9%)
<b>PRATIQUE INSTRUMENT MUSIQUE</b>				
<i>Oui</i>	7 (43.8%)	1 (7.1%)	6 (21.4%)	14 (24.1%)
<i>Non</i>	9 (56.2%)	13 (92.9%)	22 (78.6%)	44 (75.9%)
<b>EXPERIENCE SIMULATEUR CHIRURGICAL</b>				
<i>Oui</i>	5 (31.2%)	4 (28.6%)	8 (28.6%)	17 (29.3%)
<i>Non</i>	11 (68.8%)	10 (71.4%)	20 (71.4%)	41 (70.7%)

**Tableau 1.** Caractéristiques de base des participants

NOTE. Les données sont présentées sous forme de médiane [écart interquartile] ou de nombre (pourcentage).

\* *En tant qu'opérateur principal*

METRIQUES	CONTRÔLE		NOVICE VR	
	EXPERIMENTE	NOVICE NON VR	AVANT FORMATION	APRES FORMATION
Accélération Arthroscopie <i>AA</i> (mm.s <sup>-2</sup> )	76.9 [IQR, 51.7-102]	88.1 [71.8-104.3]	96.1 [73.2-119.1]	73 mm [59.8-86.1]
Accélération Instrument <i>AI</i> (mm.s <sup>-2</sup> )	4713.7 [3230.1-6197.3]	1647.3 [474.3-2820.2]	2223.2 [3230.1-6197.3]	2861.7 [1642.6-4080.8]
Tremblement Arthroscopie <i>TA</i> (mm.s <sup>-3</sup> )	4026.7 [2933.6-5119.8]	4271.8 [3123.2-5420.5]	4806.3 [3398.9-6213.7]	3476.5 [2931.2-4021.8]
Tremblement Instrument <i>TI</i> (mm.s <sup>-3</sup> )	281134.7 [208693.9-353575.4]	96740.9 [23429.1-170052.8]	142542.1 [69044.9-216039.3]	171305 [91835.2-250774.8]
Vitesse Arthroscopie <i>VA</i> (mm.s <sup>-1</sup> )	3.1 [2.3-3.9]	3.1 [2.9-3.3]	3.7 [3-4.4]	3.2 [2.9-3.5]
Vitesse Instrument <i>VI</i> (mm.s <sup>-1</sup> )	123 [95.9-150.2]	44.3 [23.2-65.3]	47.6 [16.1-79.1]	74.9 [50-99.7]
Profondeur Arthroscopie <i>PA</i> (mm)	11.6 [9.7-13.6]	18.5 [16.1-20.9]	20.8 [16.1-25.5]	15.4 [12.6-18.1]
Profondeur Instrument <i>PI</i> (mm)	79.9 [67.7-92.1]	80.1 [67.2-93]	87.6 [82-93.1]	84.5 [74.6-94.5]
Durée <i>D</i> (s)	13 [10-16.1]	26.5 [20.5-32.4]	27 [18.6-35.4]	17.7 [12.7-22.6]
Economie Arthroscopie <i>EA</i> (mm <sup>2</sup> )	4022.8 [2000.3-6045.3]	1335.3 [423.4-2247.1]	1685.9 [338.9-3032.8]	2430.4 [1640-3220.8]
Economie Instrument <i>EI</i> (mm <sup>2</sup> )	98.6 [68.2-129]	68.2 [40.7-95.8]	102.7 [68.9-136.5]	90.8 [66.8-114.8]
Fluidité Mouvement Arthroscopie <i>FMA</i> (mm.s <sup>-3</sup> )	39853.6 [26471.1-53236.2]	72013.1 [43567.6-100458.6]	83621 [58008-109234]	46685.4 [32403.4-60967.3]
Fluidité Mouvement Instrument <i>FMI</i> (mm.s <sup>-3</sup> )	7458459.2 [5127315.9-9789602.6]	4924831.7 [1536183.5-8313480]	9561015.4 [6560099.5-12561931.2]	6272818.2 [4784255.8-7761380.7]
Distance Arthroscopie <i>DA</i> (mm)	6.4 [4.6-8.2]	14.4 [10.6-18.2]	19.2 [11.1-27.4]	10.2 [6.4-14]
Distance Instrument <i>DI</i> (mm)	237.3 [190.1-284.5]	231.2 [171.1-291.4]	282.6 [253-312.2]	255.9 [202.7-309.2]
Fréquence Arthroscopie <i>FA</i> (Hz)	0.5 [0-1]	0.4 [0.3-0.5]	0.3 [0.2-0.5]	0.4 [0.2-0.6]
Fréquence Instrument <i>FI</i> (Hz)	1 [0.9-1.2]	0.6 [0.4-0.8]	0.7 [0.5-0.9]	0.8 [0.4-1.1]
Longueur Arc Spectral Arthroscopie <i>SPARCA</i> (NI)	-2.7 [-3.1--2.3]	-5 [-6--4.1]	-4.8 [-6--3.5]	-3.3 [-4.3--2.4]
Longueur Arc Spectral Instrument <i>SPARCI</i> (NI)	-1.8 [-2.2--1.5]	-2.1 [-2.5--1.6]	-2.1 [-2.8--1.5]	-2.3 [-3--1.6]

**Tableau 2.** Résultats des métriques pour les catégories EXPERIMENTE, NOVICE NON VR, NOVICE VR AVANT ET APRES FORMATION

Les métriques d'intérêts sont surlignées en gris

P-VALUE <sup>†</sup>	CONTRÔLE	AVANT FORMATION		APRES FORMATION	
	EXPERIMENTE VS NOVICE NON VR	NOVICE VR VS NOVICE NON VR	NOVICE VR VS EXPERIMENTE	NOVICE VR VS NOVICE NON VR	NOVICE VR VS EXPERIMENTE
Accélération Arthroscopie <i>AA</i> (mm.s <sup>-2</sup> )	0,7419	0,0586	0,0196	0,3941	0,6216
Accélération Instrument <i>AI</i> (mm.s <sup>-2</sup> )	0,0005	0,4669	0,0108	0,0586	0,0317
Tremblement Arthroscopie <i>TA</i> (mm.s <sup>-3</sup> )	0,7978	0,0845	0,0387	0,3714	0,4631
Tremblement Instrument <i>TI</i> (mm.s <sup>-3</sup> )	0,0007	0,4176	0,0259	0,0773	0,0531
Vitesse Arthroscopie <i>VA</i> (mm.s <sup>-1</sup> )	0,7235	0,0323	0,1008	0,7238	0,6406
Vitesse Instrument <i>VI</i> (mm.s <sup>-1</sup> )	0,0001	0,5747	0,0027	0,0261	0,0100
Profondeur Arthroscopie <i>PA</i> (mm)	<0,0001	0,2706	<0,0001	0,0706	0,0412
Profondeur Instrument <i>PI</i> (mm)	0,8167	0,1515	0,1956	0,3286	0,4006
Durée <i>D</i> (s)	<0,0001	0,9503	<0,0001	0,0106	0,0032
Economie Arthroscopie <i>EA</i> (mm <sup>2</sup> )	0,0007	0,9503	0,0016	0,0643	0,0440
Economie Instrument <i>EI</i> (mm <sup>2</sup> )	0,0655	0,3286	0,5662	0,4176	0,3714
Fluidité Mouvement Arthroscopie <i>FMA</i> (mm.s <sup>-3</sup> )	0,0048	0,3496	0,0003	0,0438	0,3170
Fluidité Mouvement Instrument <i>FMI</i> (mm.s <sup>-3</sup> )	0,2272	0,1006	0,3573	0,3496	0,7590
Distance Arthroscopie <i>DA</i> (mm)	<0,0001	0,2201	<0,0001	0,0706	0,0196
Distance Instrument <i>DI</i> (mm)	0,5664	0,1006	0,1866	0,2530	0,4312
Fréquence Arthroscopie <i>FA</i> (Hz)	0,3864	0,6326	0,2799	0,4928	0,1694
Fréquence Instrument <i>FI</i> (Hz)	0,0026	0,4176	0,0242	0,2530	0,1124
Longueur Arc Spectral Arthroscopie <i>SPARCA</i> (NI)	<0,0001	1,0000	<0,0001	0,0261	0,0100
Longueur Arc Spectral Instrument <i>SPARCI</i> (NI)	0,1047	0,3496	0,0317	0,8516	0,1613

**Tableau 3.** P-Value des métriques pour les catégories EXPERIMENTE, NOVICE NON VR, NOVICE VR AVANT ET APRES FORMATION

Les p-values significatives sont présentées en verts

Les métriques d'intérêts sont surlignées en gris

<sup>†</sup> p-value U Mann-Whitney

## Figure

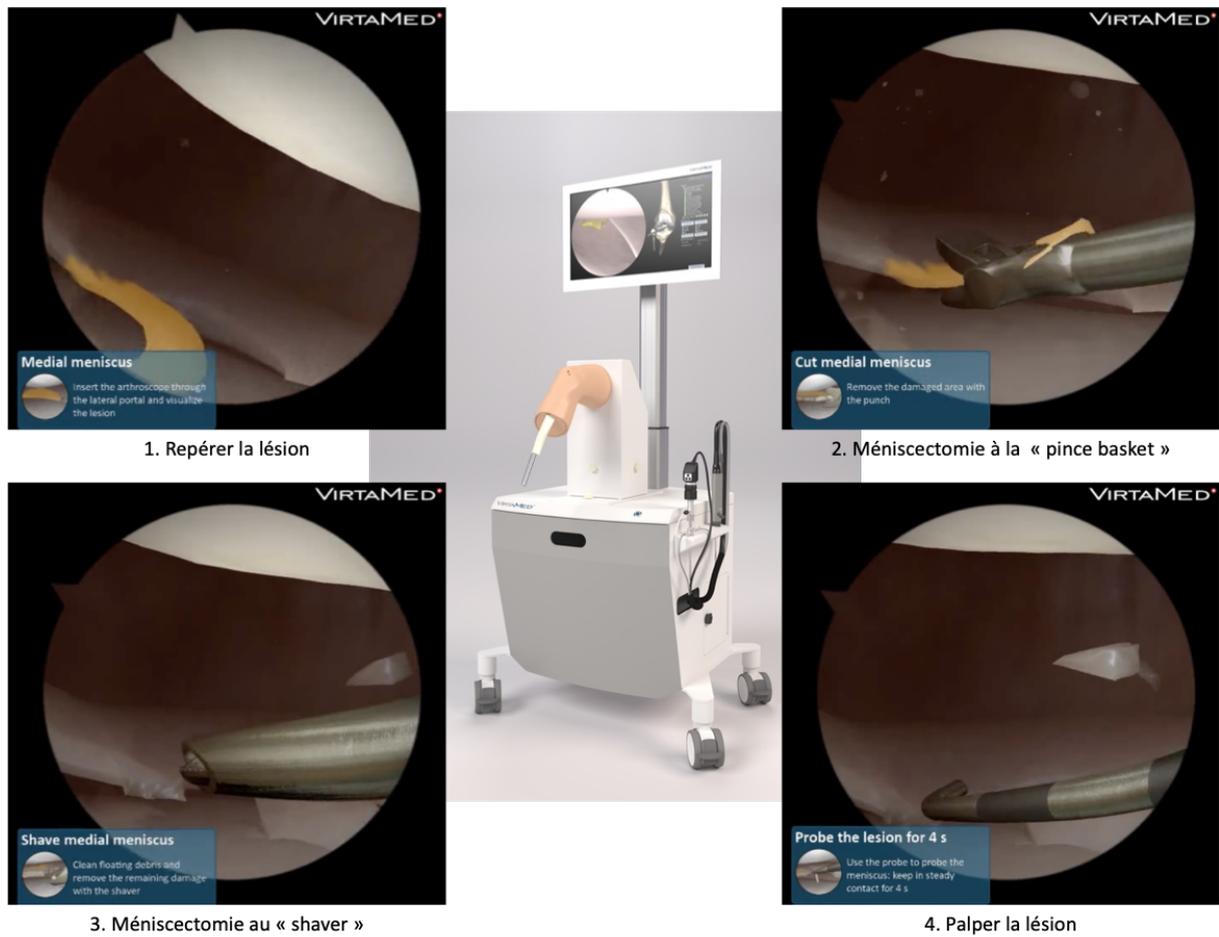
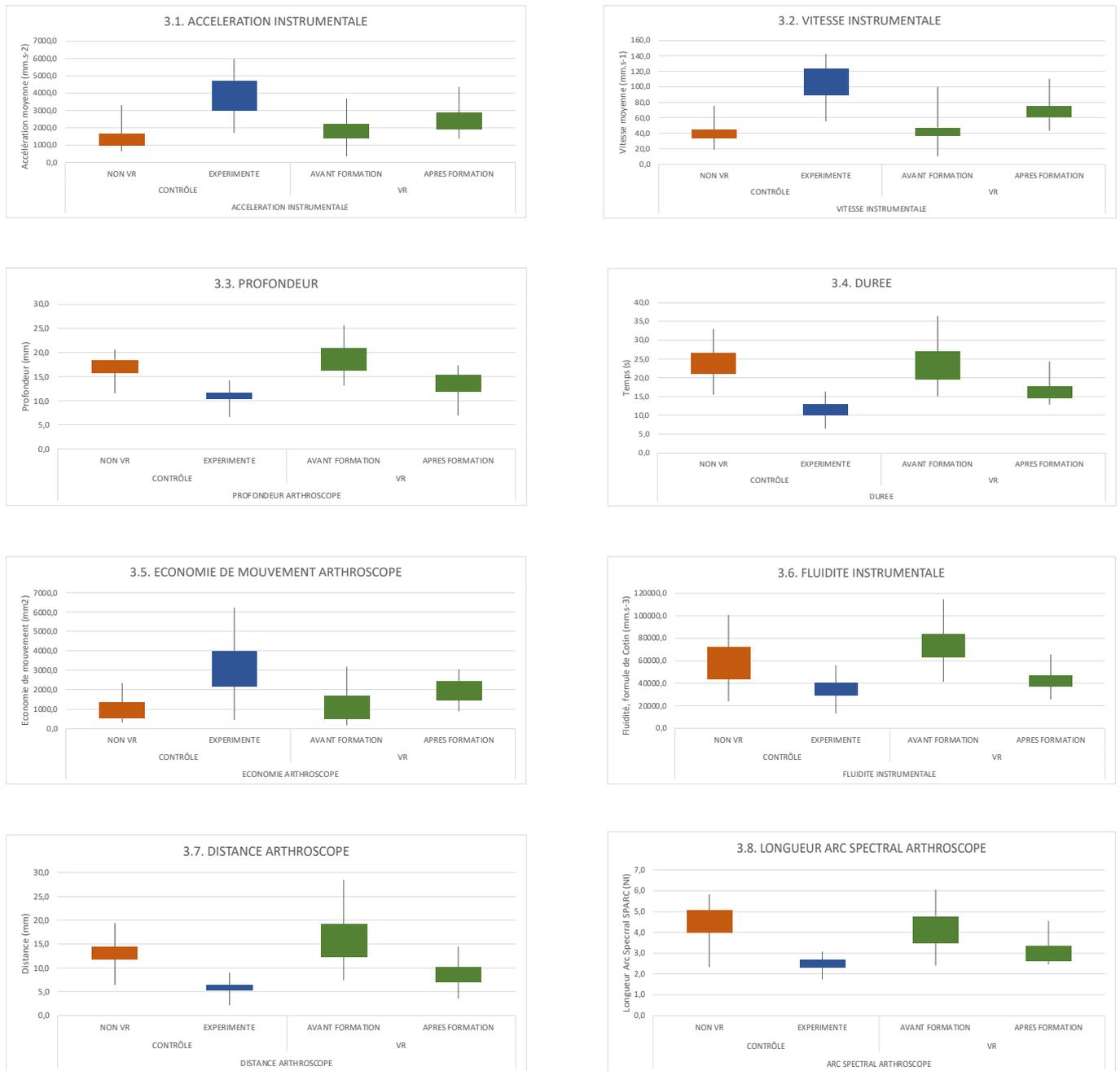


Figure 1. Étapes de la ménissectomie partielle médiale sur simulateur

<b>DEFINITION DES METRIQUES</b>	
<b>Durée (<i>D</i>)</b>	Temps d'exécution entre la première fois que la main déplace la sonde, jusqu'à ce que la sonde soit relâchée à la fin de la tâche. Mesurée en secondes (s).
<b>Distance Instrumentale (<i>DI</i>)</b>	Somme des distances totales parcourues par les sondes (caméra et pince) pendant l'exécution de la tâche. Mesurée en millimètres (mm).
<b>Vitesse Moyenne (<i>V<sub>m</sub></i>)</b>	Vitesse linéaire moyenne de la sonde pendant la tâche. Mesurée en millimètres par seconde. ( $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ).
<b>Accélération Moyenne (<i>A<sub>m</sub></i>)</b>	Accélération instantanée moyenne de la sonde pendant la tâche. Mesurée en millimètres par seconde au carré. ( $\text{mm}\cdot\text{s}^{-2}$ ).
<b>Tremblement Moyen (<i>T<sub>m</sub></i>)</b>	Tremblement moyen (dérivée de l'accélération) pendant la tâche, également appelée "fluidité". Mesuré en millimètres par seconde au cube. ( $\text{mm}\cdot\text{s}^{-3}$ ).
<b>Volume de Travail (<i>VT</i>)</b>	Volume de la coque convexe pour chaque trajectoire. Mesuré en millimètres cubes. ( $\text{mm}^3$ ).
<b>Economie de Mouvement (<i>ECO</i>)</b>	Rapport entre le volume de Travail et la Distance Instrumentale. Mesuré en $\text{mm}^2$ .
<b>Fluidité du Mouvement (<i>FM</i>)</b>	Variation totale de l'accélération de la pointe de l'instrument. Mesurée en millimètres par seconde au cube. ( $\text{mm}\cdot\text{s}^{-3}$ ) et normalisé par la durée de procédure.
<b>Fluidité de Longueur d'Arc Spectral (<i>SPARC</i>)</b>	Fluidité du profil de vitesse du mouvement linéaire par la méthode de la longueur d'arc spectrale. Mesure sans unité.
<b>Profondeur (<i>P</i>)</b>	Distance totale parcourue par la pointe de l'instrument le long de l'axe z. Mesurée en millimètres (mm).

**Figure 2.** Définitions des métriques



**Figure 3.** Diagrammes moustaches des métriques avec différences significatives (3.1. Accélération Instrumentale, 3.2. Vitesse Instrumentale, 3.3. Profondeur Arthroscopie, 3.4. Durée, 3.5. Economie de Mouvement Arthroscopie, 3.6. Fluidité Instrumentale, 3.7. Distance Arthroscopie, 3.8. Longueur Arc Spectral Arthroscopie)

## **CHAPITRE 5. ETUDE 2**

### **Virtual Reality Simulation is valuable for arthroscopic diagnosis and meniscectomy: a transfer validity study of 36 residents**

Alexandre TRONCHOT, MD MSc<sup>(1,2)</sup> ; Tiphaine CASY, PhD<sup>(1)</sup> ; Nicolas VALLEE, MD MSc<sup>(1,2)</sup> ; Harold COMMON, MD<sup>(2)</sup> ; Hervé THOMAZEAU, MD<sup>(1,2)</sup> ; Pierre JANNIN, PhD<sup>(1)</sup> ; Arnaud HUAULMÉ, PhD<sup>(1)</sup>

1. Univ Rennes, Inserm, LTSI – UMR 1099, F-35000 Rennes, France
2. Orthopaedics and Trauma Department, Rennes University Hospital, 2 rue Henri Le Guilloux, 35000, Rennes, France

#### **Citation :**

**Tronchot A**, Casy T, Vallee N, Common H, Thomazeau H, Jannin P, Huaulmé A. Virtual reality simulation training improve diagnostic knee arthroscopy and meniscectomy skills: a prospective transfer validity study. *J Exp Orthop*. 2023 Dec 14;10(1):138. doi: 10.1186/s40634-023-00688-8. PMID: 38095746; PMCID: PMC10721743.

## **Abstract**

*Background:* There is limited literature on the transfer of skills learned on the virtual reality (VR) simulator to the operating room (transfer validity) for arthroscopic training; instead, studies mainly focused on the improvement of performance directly in the VR simulator.

*Purpose:* The purpose of this multicentre, blinded, controlled trial was to objectively investigate transfer validity of VR simulation for basic knee arthroscopic training.

*Study Design:* Controlled laboratory study.

*Methods:* Thirty-six orthopaedic junior residents (postgraduate year one and two, PGY-1 and PGY-2) with no prior experience in arthroscopic surgery were enrolled to receive either standard training about knee arthroscopy surgery (NON-VR group) or standard training plus additional monthly-fixed one-hour protocol of arthroscopic training on a hybrid VR simulator (VR group).

All the participants answered a questionnaire at the inclusion and succeeded a diagnostic tour and meniscectomy on the VR Knee arthroscopic simulator. Both groups were comparable in terms of performance level in the VR simulator at the inclusion for meniscectomy. After 6 months of training, both groups answered a second questionnaire about their acquired expertise in arthroscopy after the inclusion and performed three exercises: first an arthroscopic partial meniscectomy on a bench-top knee simulator, second, a supervised cadaveric diagnostic knee arthroscopy and third a supervised cadaveric knee partial meniscectomy, assessed independently by two blinded consultant trainers. Training superiority was determined by the outcome measures of the Arthroscopic Surgical Skill Evaluation Tool (ASSET) score.

*Results:* VR trained residents performed at a higher level than control group ones, global ASSET difference,  $p < 0.001$ ; for bench-top meniscectomy,  $p = 0.03$ ; cadaver knee diagnostic tour,  $p = 0.04$ ; and for cadaver meniscectomy,  $p = 0.02$ . Subgroup analysis by residency year showed a significant difference between the NON-VR PGY-1 and the other subgroups (VR PGY-1; VR

PGY2 and NON VR PGY-2), regardless of the exercise performed. In contrast, there was no significant difference between the VR PGY-1 and the PGY-2 subgroups with or without VR training.

*Conclusion:* This study showed the transferability of the skills acquired on the hybrid virtual reality simulator to the bench-top model and the anatomical subject. The first-year residents benefited the most from this monthly training program over 6 months for learning the basics of knee arthroscopy.

*Clinical Relevance:* Surgical skill acquired with a VR arthroscopy surgical simulator might safely improve arthroscopy competences in the operating room.

**Keywords:** Surgical Training; Arthroscopy Simulator; Virtual Reality; Transfer Validity

## **1. Introduction**

Due to the time constraints of teachers and students, the traditional orthopaedic surgical training relying on a mentor-apprentice model seems to have reach a limit. This is particularly true for a high demanding surgical technique such as arthroscopy<sup>17</sup> combining limited motion in a narrow joint space as well as non-intuitive hand–eye coordination<sup>19</sup>. Surgical simulation permits to safely learn technical skills outside the operating room<sup>7</sup>. Computer-based simulation such as hybrid virtual reality (VR) devices are particularly suitable for learning arthroscopy skills and provide quantitative data for performance measurement, progress follow-up and skill assessment<sup>1,20,24</sup>. However, there is limited literature on the transfer of skills learned with VR simulator to the operating room (i.e., transfer validity) regarding arthroscopic training; studies mainly focused on the improvement of performance directly in the VR simulator<sup>18,24</sup>. Several Global Rating Scales (GRS) for arthroscopic surgery were created in the last decade<sup>2,8,10,22</sup>. The Arthroscopic Surgical Skill Evaluation Tool (ASSET) was recently shown as the best GRS<sup>9</sup> and was widely used in the literature for comparing bench-top models<sup>13</sup>, cadaver studies<sup>10</sup>, virtual reality simulators<sup>14</sup> and even during real surgical intervention<sup>11</sup>.

In this study, we hypothesized that residents trained with an arthroscopy hybrid VR simulator will demonstrate better technical surgical skills for diagnostic knee arthroscopy and partial meniscectomy than those who followed the current national learning curricula. The objective of this multicentre, single-blinded, controlled study was to objectively confirm the transfer validity of VR simulation for basic knee arthroscopic training comparing the performance outcomes of junior orthopaedic surgery residents trained or not with arthroscopy VR simulator program.

## **2. Methods**

This study complies with the reference methodology MR-004 and was approved by the National Commission for Information Technology and Civil Liberties, registered in the national database. No external funding was received for this study.

## ***2.1. Population***

Between November 2020 and January 2021, thirty-six orthopaedic junior residents (postgraduate year one and two, PGY-1 and PGY-2) from the same country with no prior experience in arthroscopic surgery participated in a theoretical and practical course on the basics of arthroscopy: didactic lecture by a senior surgeon specialized in arthroscopy, and practical course of 30 minutes per participant on the hybrid VR simulator with the same instructor for all.

All the residents were then enrolled to receive either the common national training program about knee arthroscopy surgery (named as NON-VR group) or this standard training plus six additional monthly-fixed one-hour protocol of arthroscopic simulator training on a hybrid VR simulator (named as VR group). All the participants answered a questionnaire at the inclusion and succeeded a diagnostic tour and meniscectomy on the VR Knee arthroscopic simulator. Both groups were not randomized for geographical convenience as the training was done in one site only, with an imposed travel time limit of one and a half hour between the workplace and the simulation centre. Informed consent was obtained for all the participants.

All residents enrolled had performed less than five arthroscopic surgeries as principal operator possibly under supervision of a senior surgeon. The VR group was composed of 16 residents (8 PGY-1, 8 PGY-2) with VR simulator training and the NON-VR group was composed of 20 residents (10 PGY-1, 10 PGY-2) without VR simulator training. Only actual surgical practice was assessed to determine the expertise level, therefore previous practice on any surgical simulator has not been taken into account.

## ***2.2. Training Protocol***

The VR group followed a fixed standardized training program with increasing difficulty using The VirtaMed AG (Schlieren) ArthroS™ arthroscopy simulator. This hybrid virtual-reality simulator with passive haptic (feeling of resistance, without robotic force feedback) has several modules combining physical interface and computer software. Face and construct validity of the

simulator and its different modules was assessed in previous studies<sup>6,21,23</sup>. We organized and funded the travel of residents in groups of 3 maximum to follow a supervised practical training of one hour per month in the same designated skill laboratory for 6 months with the same instructor (**Figure 1**). This training was set to be increasingly difficult to learn the basics of arthroscopy: *triangulation, periscoping, centering and camera alignment, bimanual dexterity, diagnostic arthroscopy of the knee and shoulder...* (complete program is available in the **Appendix 1**). The hybrid VR simulator instrumental data set was collected as it progressed (*Global Score, Time (s), Instrumental Path Length (cm)*). The NON-VR group followed the current national learning curricula with various theoretical and practical training courses in arthroscopy. The only limit imposed was not to practice on a VR arthroscopy simulator in order to keep the groups comparable.



**Figure 1. Training session for a VR+ trainee**

### **2.3. Global Rating Scale**

Training superiority assessment was determined by the outcome measures of the Arthroscopic Surgical Skill Evaluation Tool (ASSET). This 40 points-score was chosen because of its use in numerous studies<sup>11,4,3,5</sup> and its superiority to other arthroscopic GRS scores according to the literature review by James et al<sup>9</sup>. We meticulously translated the score with the help of the two independent evaluators, experts in knee arthroscopy. The checklist for the

diagnostic and meniscectomy rounds were redesigned to make the procedure as standard and reproducible as possible. The translated score is available in **Appendix 2**. Prior to the evaluation of the 36 residents, the two evaluators practiced by assessing arthroscopy videos (knee diagnostic tour and meniscectomy) done on the hybrid VR simulator by 10 anonymized participants on 2 sessions after 2 weeks of interval. The inter-observer and intra-observer reproducibility values were comparable to that found in the literature<sup>14</sup> ( *$\alpha$ -Cronbach 0.95; Intra-Class Coefficient Correlation 0.81; Inter-Class Coefficient Correlation 0.76*).

#### **2.4. Evaluation**

After 6 months of training, both groups performed three exercises: first an arthroscopic partial meniscectomy on a bench-top knee simulator, second, a supervised cadaveric diagnostic knee arthroscopy and third a supervised cadaveric knee partial meniscectomy, assessed independently by the two blinded consultant trainers (**Figure 2**). Training superiority was determined by the outcome measures of the ASSET. Each participant answered a second standardized questionnaire about his/her newly acquired expertise in arthroscopy during the past 6 month (including questions about number of performed arthroscopic surgical procedures as an assistant or as a principal operator under supervision of a senior surgeon, and type and hours of arthroscopic simulation training). Each trainee was given instruction and a video demonstration of a diagnostic arthroscopy of the knee a week before the evaluation. An arthroscopy knee bench-top simulator (Arthroscopy Dry Knee, Sawbones, Malmö, Sweden) and 36 disposable menisci with no lesion, one for each resident (Menisci Insert, Normal Anatomy, Off-White 35a Elastomer, Sawbones, Malmö, Sweden) were set up in a first room of the cadaver lab at the institution. The second room was dedicated to the cadaveric evaluation; 20 cadaveric knees were used (approximately one knee every two evaluations depending on preservation quality, all cadavers came from donation to the university anatomy program). Portal landmarks and incisions were made by both assessors, and they both did a first assessment to establish the same

notation for the "Added complexity to the procedure" item in the ASSET Score. For both rooms, a standard 30-degree arthroscope with an arthroscopic camera and display system (Smith & Nephew Endoscopy, Huntingdon, United Kingdom) were used for all cases. All the arthroscopic videos were recorded in a dedicated laptop computer (Legion Y920-17IKB Laptop, Lenovo).



**Figure 2. Evaluation session with both evaluators, the trainee and the surgical assistant**

## **2.5. Statistical Analysis**

A two-sided power calculation was performed for the null hypothesis, “performance of residents from the VR group is equal to the residents from the NON-VR group” with an acceptable type 1 error,  $\alpha = 0.05$  and acceptable type 2 error  $\beta = 0.20$ ,  $power = 0.8$ . For the power calculation, data from previous ASSET scores arthroscopy validation study were used<sup>10</sup> with a difference of 4 for the median result (17/40 for the NON-VR group vs 21/40 for the VR group) and 4 for the standard deviation result. This resulted in a minimum number of 13 subjects in each group, in line with previously reported validation studies. Descriptive statistics were used to report subject demographic variables: median and interquartile range for continuous variables (i.e., age, Simulator Score, ASSET score) and percentages for categorical variables (i.e., sex, dominant side, year of residency, arthroscopic experience, arthroscopic training, simulator training). Group differences for discrete variables were evaluated using chi-square or Fisher

exact test. The Kolmogorov–Smirnov test was used to analyse normally distributed data, the parametric t-test was used when there was normal distribution, the non-parametric t-test Mann-Whitney otherwise. For all calculations, a p value of  $< 0.05$  was considered to be statistically significant. Further sub-analysis of the surgical group to differentiate between PGY-1 and PGY-2 residents was also performed. Statistical analyses were carried out using Excel (version 16.32, Microsoft, Seattle, United States).

### **3. Results**

#### ***3.1 Demographics***

Both groups were comparable in terms of age, residency year, and performance level in the VR simulator at the inclusion for meniscectomy (**Table 1**). We found a different gender ratio between both groups without significant difference. Regarding newly acquired arthroscopic experience for the evaluation session, both groups were comparable for surgical assistance, but we noted a higher proportion of active practice in the operating room for the VR group, without this being significant (**Table 2**). With regard to feeling progress in arthroscopic skills, there was a significant difference in favour of the VR group.

**Table 1. Baseline characteristics of participants at inclusion**

	NON VR TRAINING (n=20)	VR TRAINING (n=16)	TOTAL (n=36)	P- VALUE
<b>AGE, yr</b>	25.3 [24-27]	25.4 [24-29]	25.3 [24-29]	0.77*
<b>GENDER</b>				0.48†
<i>Male</i>	13 (65%)	13 (81.2%)	26 (72.2%)	
<i>Female</i>	7 (35%)	3 (18.8%)	10 (27.8%)	
<b>DOMINANT SIDE</b>				1†
<i>Right</i>	17 (85%)	14 (87.5%)	31 (86.1%)	
<i>Left</i>	3 (15%)	2 (12.5%)	5 (13.9%)	
<i>Ambidextrous</i>	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	
<b>YEAR OF RESIDENCY</b>				1†
<i>PGY-1</i>	10 (50%)	8 (50%)	18 (50%)	
<i>PGY-2</i>	10 (50%)	8 (50%)	18 (50%)	
<b>ARTHROSCOPIC EXPERIENCE before inclusion</b>				
<b>Surgical Assistant (&lt; 100 arthroscopies)</b>				0.91†
<i>Yes</i>	20 (100%)	15 (93.8%)	35 (97.2%)	
<i>No</i>	0 (0%)	1 (6.2%)	1 (2.8%)	
<b>Principal operator (&lt; 5 arthroscopies)</b>				0.96†
<i>Yes</i>	5 (25%)	3 (18.8%)	8 (22.2%)	
<i>No</i>	15 (75%)	13 (81.2%)	28 (77.8%)	
<b>ARTHROSCOPIC TRAINING before inclusion</b>				0.95†
<i>Yes (Cadaveric Model)</i>	3 (15%)	3 (18.8%)	6 (16.7%)	
<i>Yes (1h, Bench-Top Model)</i>	3 (15%)	2 (13.2%)	5 (13.9%)	
<i>No</i>	14 (70%)	11 (68.8%)	25 (69.4%)	
<b>SIMULATOR TRAINING before inclusion</b>				0.94†
<i>Yes</i>	6 (M :4.8h) (30%)	5 (M :7.2h) (31.2%)	11 (M :5.5h) (30.6%)	
<i>No</i>	14 (70%)	11 (68.8%)	25 (69.4%)	
<b>VR ARTHROSCOPIC SIMULATOR SCORE AT INCLUSION</b>	125 [116-134]	123 [111-135]	124 [113-135]	0.14*

NOTE. Data are reported as median [interquartile range] or number (percentage).

\* *Independent-samples Student's t-test*

† *Pearson's chi-squared test*

**Table 2. Baseline characteristics of participants at evaluation**

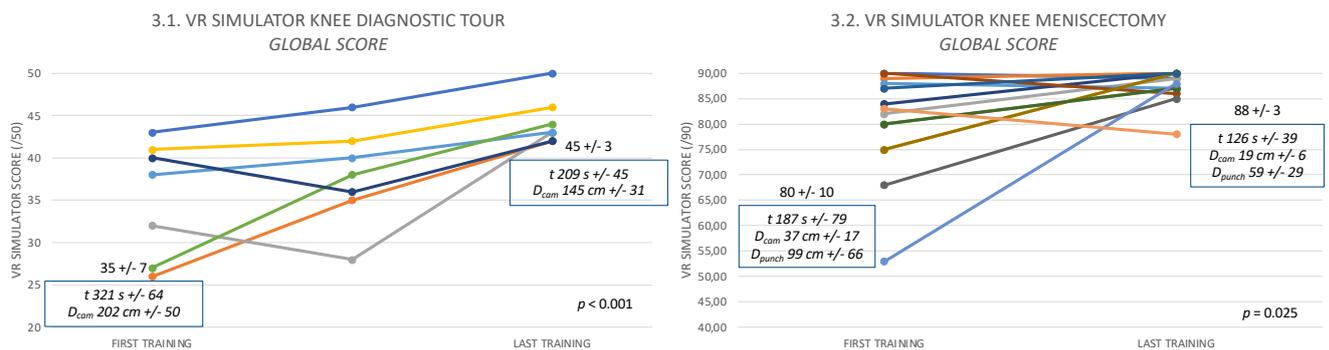
	NON VR TRAINING (n=20)	VR TRAINING (n=16)	TOTAL (n=36)	P-VALUE
<b>ARTHROSCOPIC EXPERIENCE during the 6-month period</b>				
<b>Surgical Assistant (&lt; 100 arthroscopies)</b>				1 <sup>†</sup>
<i>Yes</i>	18 (90%)	14 (87.5%)	32 (88.9%)	
<i>No</i>	2 (10%)	2 (12.5%)	4 (11.1%)	
<b>Principal operator (&lt; 5 arthroscopies)</b>				0.23 <sup>†</sup>
<i>Yes</i>	5 (25%)	8 (50%)	13 (36.1%)	
<i>No</i>	15 (75%)	8 (50%)	23 (63.9%)	
<b>ARTHROSCOPIC TRAINING during the 6-month period</b>				0.48 <sup>†</sup>
<i>Yes (Cadaveric Model)</i>	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	
<i>Yes (1h, Bench-Top Model)</i>	4 (20%)	1 (6.2%)	5 (13.9%)	
<i>No</i>	16 (80%)	15 (93.8%)	31 (86.1%)	
<b>FEELING PROGRESS IN ARTHROSCOPIC SKILLS</b>				< 0.001 <sup>†</sup>
<i>Yes</i>	7 (35%)	16 (100%)	23 (63.9%)	
<i>No</i>	13 (65%)	0 (0%)	13 (36.1%)	

NOTE. Data are reported as number (percentage).

<sup>†</sup> *Pearson's chi-squared test*

### **3.1. Progress of the VR group on VR simulator**

The VR group made significant progress on the VR Simulator during training for the following exercises “Guided Diagnostic Knee Tour” (**Figure 3.1**): *VR Simulator global score (/50)*,  $p < 0.001$ ; *time (s)*,  $p < 0.001$ ; and *path length (cm)*,  $p = 0.002$  and “Guided Partial Medial Meniscectomy” (**Figure 3.2**): *VR Simulator global score (/90)*,  $p = 0.025$ ; *time (s)*,  $p = 0.023$ ; and *path length (cm)*,  $p = 0.008$ .

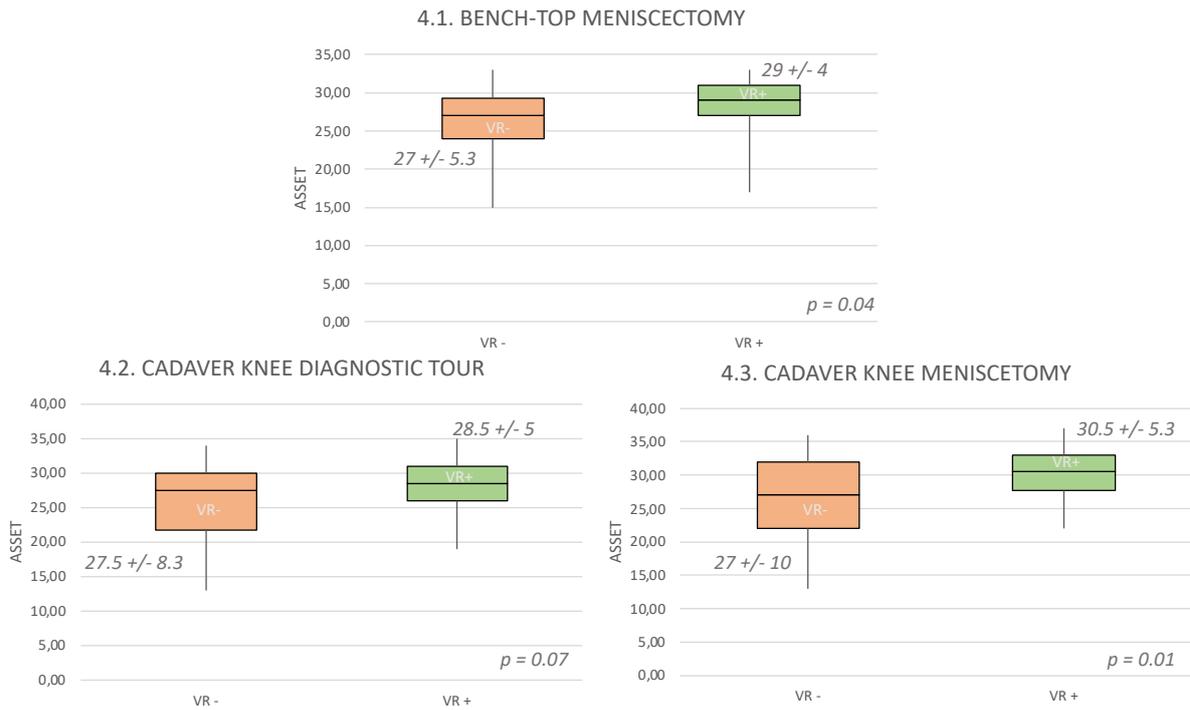


NOTE. Data are reported as median [interquartile range]. t (Time), D<sub>cam</sub> (Instrumental Distance with the Arthroscope), D<sub>punch</sub> (Instrumental Distance with the Punch). Each line represents one trainee, each dot represents one session in the simulator.

**Figure 3. Trainee progress on VR Simulator (3.1. VR Simulator Knee Diagnostic Tour Global Score; 3.2. VR Simulator Knee Meniscectomy Global Score).**

### 3.2. ASSET

ASSET score was found significant different between the VR and the NON-VR groups. The VR group significantly outperformed the NON-VR group for the ASSET score. VR trained residents performed at a higher level than control ones, with a global ASSET (Median ± Interquartile range) of 29±4.3 versus 27±8.3, *p* < 0.001; median ASSET for bench-top meniscectomy of 29±4 versus 27±5.3, *p* = 0.03 (**Figure 4.1**); median ASSET for Cadaver Knee Diagnostic Tour of 28.5±5 versus 27.5±8.3, *p* = 0.04 (**Figure 4.2**); median ASSET for Cadaver Knee Meniscectomy of 30.5±5.3 versus 27±10, *p* = 0.02 (**Figure 4.3**). There was a good internal consistency of the ASSET Score for both evaluators with a mean Cronbach's alpha of 0.90 but it was found moderate reliability between the two evaluators for the interobserver reproducibility with a global Intra-Class Coefficient Correlation (ICC) of 0.66, and respectively for each exercise: Bench-Top Meniscectomy ICC 0.68; Cadaver Knee Diagnostic Tour ICC 0.61; and Cadaver Knee Meniscectomy ICC 0.71.

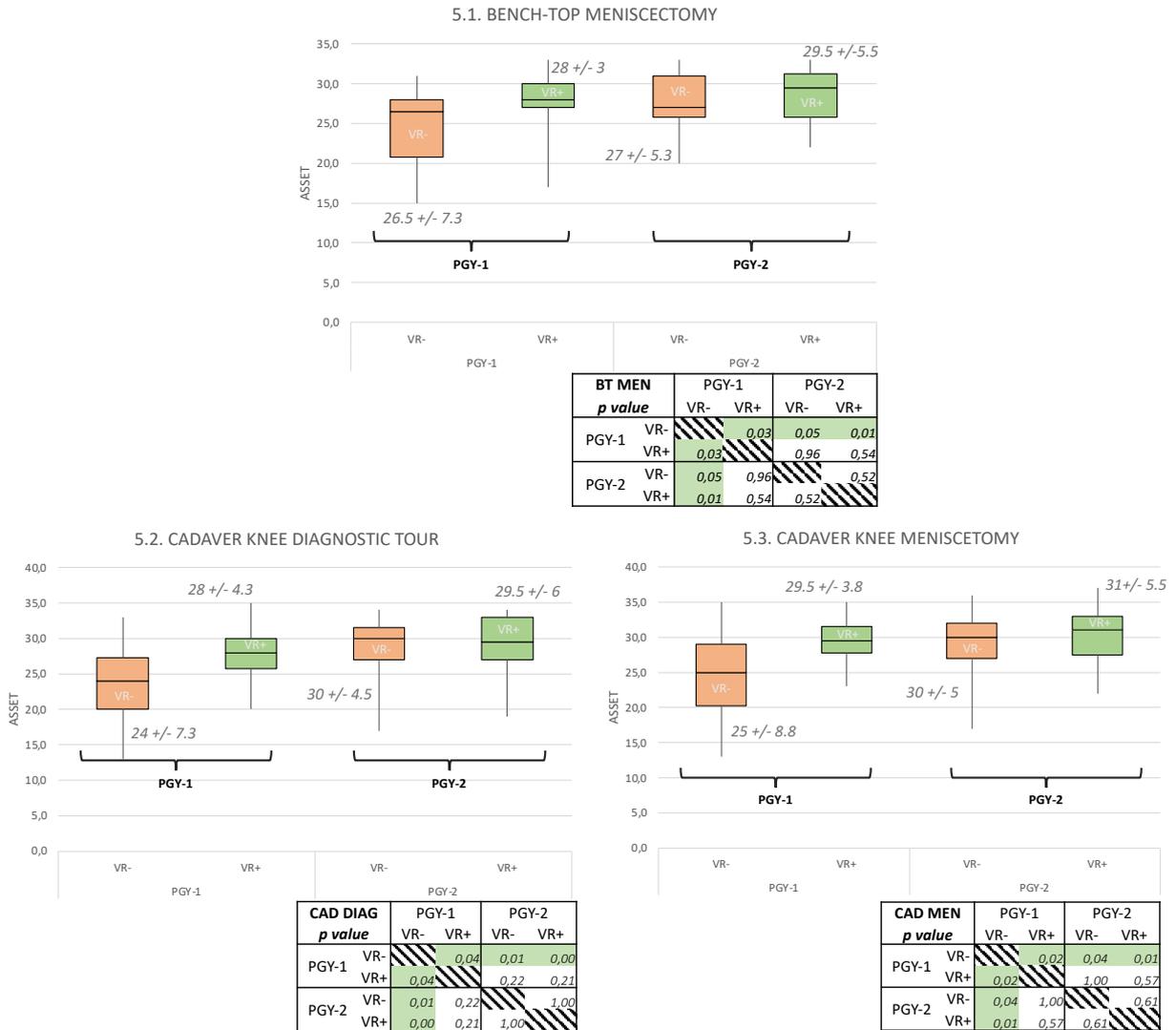


NOTE. Data are reported as median [interquartile range].

Figure 4. ASSET score for each exercise box-plot (4.1. Bench-Top Meniscectomy; 4.2. Cadaveric Knee Diagnostic Tour; 4.3. Cadaveric Knee Meniscectomy)

### 3.2. Subgroup Analysis

Subgroup analysis by residency year showed a significant difference between the VR PGY-1 and the other subgroups (VR PGY-1; VR PGY-2 and NON-VR PGY-2), regardless of the exercise performed (Figure 5, Figure 5.1 for Bench-top Meniscectomy, Figure 5.2 for Cadaver Knee Diagnostic Tour, Figure 5.3 for Cadaver Knee Meniscectomy). In contrast, there was no significant difference between the VR PGY-1 and the PGY-2 subgroups with or without VR training. The VR PGY-2 subgroup tended to have better results than the other subgroups but with no significant difference with the NON-VR PGY-2 subgroup.



NOTE. Data are reported as median [interquartile range]. BT MEN (Bench-Top Meniscectomy), CAD DIAG (Cadaver Knee Diagnostic Tour), CAD MEN (Cadaver Knee Meniscectomy)

**Figure 5. Sub-group analysis box-plot: ASSET score for each exercise and for each year of residency (5.1. Bench-Top Meniscectomy; 5.2. Cadaveric Knee Diagnostic Tour; 5.3. Cadaveric Knee Meniscectomy)**

#### 4. Discussion

Our results confirmed the transfer validity of hybrid VR simulator to the cadaver subject for diagnostic knee tour and partial meniscectomy. These results are consistent and even outperform previous similar studies. First, with a sustained one-week arthroscopic training program, Howells et al.<sup>7</sup> confirmed the transfer validity of bench-top models to the operating

room for diagnostic knee tour. Secondly, with a short two and half-hours arthroscopic training in a VR Simulator, Rebolledo et al.<sup>20</sup> succeeded to show a significant improvement for diagnostic shoulder tour but just a non-significant trend for the diagnostic knee tour. With this realistic training program (one hour per month for 6 months), we succeeded to show significant improvement for both diagnostic knee tour and meniscectomy.

Although there was no randomization due to geographical constraints, we limited this bias by having comparable groups in terms of level on hybrid VR Knee simulator at inclusion. We decided to include all the first and second year of orthopaedic residents from our interregional network since this training is now part of the national curriculum required to obtain the title of medical doctor in orthopaedic surgery. This made it possible to have a panel of residents interested or not in arthroscopy, equally distributed in the two groups limiting a selection bias by attracting participants who are interested in arthroscopy and/or virtual reality training.

Face and construct validity<sup>6,18,23</sup> of VR simulators have already been proven. Validating the transfer of competence of this type of simulator only confirms the contribution of these tools in the initial training of orthopaedic surgeons. It remains to show the economic interest of this tool to justify the investment and spread its use at a wider scale. The study by Pioger et al.<sup>15</sup> brought up the concern of French residents about their level in arthroscopy when they were put in charge at the end of the residency, our study showed that the training on VR simulator not only allows to gain competence but also confidence. This study would not have been as successful without the dedication of the principal investigator who spent a year full time for the study and to train all the participants but also by the participation of the residents (none lost to follow-up) and their motivation despite the constraints related to their care activity. This difficulty had been found by Manoharan<sup>12</sup> and showed the importance of the associated trainer along the simulator. At the moment, although our training program was modest (1 hour per

month), it seems difficult to design a training program without deeply modifying the practical training of residents and the time allocated to train outside the operating room, both for the trainee and the trainer.

Howells<sup>7</sup> regretted having only one evaluator who made them mitigate their results. We chose two evaluators, experts in knee arthroscopy but with a different trainer profile, one from a university hospital and therefore used to having residents of different expertise levels, interested or not in arthroscopy, while the other evaluator was from a clinic specializing in sports surgery and used to having fellows, more advanced in their studies and most often very interested in arthroscopy. During the evaluation process, both assessors did not share their scores except for the difficulty of the procedure. That could explain the moderate reliability between them while we expected to have good reliability consistent with previous studies and their results from the training.

Some studies<sup>4,16</sup> have shown that there was little maintain of skills over time of technical training on simulator, questioning the interest of short condensed training as usually proposed in studies (one day training during a convention, or one week training during a study). We therefore chose a spaced and more modest training program to address this issue. We were able to show that it is possible to make progress in this way as well during the follow-up on hybrid VR simulator as during the evaluation on bench-top model and cadaveric subject, although the results were not conclusive for PGY-2 residents. It would be advisable to re-assess the residents at one-year intervals to see if the significant difference still exists for these simple procedures but also if the VR cohort is still better for a more complex procedure after a very shortened training program (one session and few hours of training). Subgroup analysis showed that this training was the most beneficial for the PGY-1, the VR PGY-1 subgroup reaching the level of PGY-2 subgroups. This program may be sufficient for novices but requires further development for a more experienced cohort. A training program with more complex procedures should be offered

to residents further along in the curriculum to evaluate the benefit of training on a VR simulator. We also noticed an ambiguous result on our ASSET scores. We were on average 10 points above the expected results in relation to the level of the participants, the most logical explanation comes from the fact that the scoring in the Koehler study<sup>10</sup> was done on the arthroscopy videos only and not live. The fact that the evaluator saw the evaluated resident probably modulated his rating positively. The last limitation of this study is the follow-up duration to see if the advantage offered by the simulation remain further along in training residency. In other words, it would be interesting to see if NON-VR PGY-1 who continue their training end up at the same level as VR PGY-1 who then continue their training without further VR exposure.

## 5. Conclusion

This study showed the transferability of the skills acquired on the hybrid virtual reality simulator to the bench-top model and the anatomical subject. The first-year residents benefited the most from this monthly training program over 6 months for learning the basics of knee arthroscopy.

## 6. References

1. Banaszek D, You D, Chang J, et al. Virtual Reality Compared with Bench-Top Simulation in the Acquisition of Arthroscopic Skill: A Randomized Controlled Trial. *J Bone Jt Surg.* 2017;99(7):e34. doi:10.2106/JBJS.16.00324
2. Bayona S, Akhtar K, Gupte C, Emery RJH, Dodds AL, Bello F. Assessing Performance in Shoulder Arthroscopy: The Imperial Global Arthroscopy Rating Scale (IGARS). *J Bone Jt Surg.* 2014;96(13):e112. doi:10.2106/JBJS.M.00304
3. Bishop ME, Ode GE, Hurwit D, et al. The ASSET Global Rating Scale is a Valid and Reliable Adjunct Measure of Performance on a Virtual Reality Simulator for Hip Arthroscopy. *Arthrosc J Arthrosc Relat Surg.* Published online February 2021:S0749806321000633. doi:10.1016/j.arthro.2021.01.046
4. Dunn JC, Belmont PJ, Lanzi J, et al. Arthroscopic Shoulder Surgical Simulation Training Curriculum: Transfer Reliability and Maintenance of Skill Over Time. *J Surg Educ.* 2015;72(6):1118-1123. doi:10.1016/j.jsurg.2015.06.021
5. Dwyer T, Slade Shantz J, Kulasegaram KM, et al. Use of an Objective Structured Assessment of Technical Skill After a Sports Medicine Rotation. *Arthrosc J Arthrosc Relat Surg.* 2016;32(12):2572-2581.e3. doi:10.1016/j.arthro.2016.05.037

6. Fucentese SF, Rahm S, Wieser K, Spillmann J, Harders M, Koch PP. Evaluation of a virtual-reality-based simulator using passive haptic feedback for knee arthroscopy. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2015;23(4):1077-1085. doi:10.1007/s00167-014-2888-6
7. Howells NR, Gill HS, Carr AJ, Price AJ, Rees JL. Transferring simulated arthroscopic skills to the operating theatre: A RANDOMISED BLINDED STUDY. *J Bone Joint Surg Br.* 2008;90-B(4):494-499. doi:10.1302/0301-620X.90B4.20414
8. Insel A, Carofino B, Leger R, Arciero R, Mazzocca AD. The Development of an Objective Model to Assess Arthroscopic Performance: *J Bone Jt Surg-Am Vol.* 2009;91(9):2287-2295. doi:10.2106/JBJS.H.01762
9. James HK, Chapman AW, Pattison GTR, Fisher JD, Griffin DR. Analysis of Tools Used in Assessing Technical Skills and Operative Competence in Trauma and Orthopaedic Surgical Training: A Systematic Review. *JBJS Rev.* 2020;8(6):e19.00167-e19.00167. doi:10.2106/JBJS.RVW.19.00167
10. Koehler RJ, Amsdell S, Arendt EA, et al. The Arthroscopic Surgical Skill Evaluation Tool (ASSET). *Am J Sports Med.* 2013;41(6):1229-1237. doi:10.1177/0363546513483535
11. Koehler RJ, Goldblatt JP, Maloney MD, Voloshin I, Nicandri GT. Assessing Diagnostic Arthroscopy Performance in the Operating Room Using the Arthroscopic Surgery Skill Evaluation Tool (ASSET). *Arthrosc J Arthrosc Relat Surg.* 2015;31(12):2314-2319.e2. doi:10.1016/j.arthro.2015.06.011
12. Manoharan G, Sharma N, Gallacher P. Competence in using the arthroscopy stack system: a national survey of orthopaedic trainees in the UK. *Ann R Coll Surg Engl.* 2020;102(2):149-152. doi:10.1308/rcsann.2019.0131
13. Middleton RM, Alvand A, Garfjeld Roberts P, Hargrove C, Kirby G, Rees JL. Simulation-Based Training Platforms for Arthroscopy: A Randomized Comparison of Virtual Reality Learning to Benchtop Learning. *Arthrosc J Arthrosc Relat Surg.* 2017;33(5):996-1003. doi:10.1016/j.arthro.2016.10.021
14. Middleton RM, Baldwin MJ, Akhtar K, Alvand A, Rees JL. Which Global Rating Scale?: A Comparison of the ASSET, BAKSSS, and IGARS for the Assessment of Simulated Arthroscopic Skills. *J Bone Jt Surg.* 2016;98(1):75-81. doi:10.2106/JBJS.O.00434
15. Pioger C, Harly É, Rattier S, et al. État des lieux de la formation arthroscopique en France : comment les internes perçoivent leur apprentissage ? *Rev Chir Orthopédique Traumatol.* 2019;105(8):S98-S103. doi:10.1016/j.rcot.2019.09.015
16. Polce EM, Kunze KN, Williams BT, et al. Efficacy and Validity of Orthopaedic Simulators in Surgical Training: A Systematic Review and Meta-Analysis of Randomized Controlled Trials. *J Am Acad Orthop Surg.* 2020;28(24):1027-1040. doi:10.5435/JAAOS-D-19-00839
17. Price AJ, Erturan G, Akhtar K, Judge A, Alvand A, Rees JL. Evidence-based surgical training in orthopaedics: how many arthroscopies of the knee are needed to achieve consultant level performance? *Bone Jt J.* 2015;97-B(10):1309-1315. doi:10.1302/0301-620X.97B10.35973
18. Rahm S, Wieser K, Bauer DE, et al. Efficacy of standardized training on a virtual reality simulator to advance knee and shoulder arthroscopic motor skills. *BMC Musculoskelet Disord.* 2018;19(1):150. doi:10.1186/s12891-018-2072-0
19. Randelli PS, Cabitza F, Ragone V, Compagnoni R, Akhtar K, Tuijthof GJM. Needs and Wishes from the Arthroscopy Community. In: Karahan M, Kerkhoffs GMMJ, Randelli P, Tuijthof GJM, eds. *Effective Training of Arthroscopic Skills.* Springer Berlin Heidelberg; 2015:7-15. doi:10.1007/978-3-662-44943-1\_2
20. Rebolledo BJ, Hammann-Scala J, Leali A, Ranawat AS. Arthroscopy Skills Development With a Surgical Simulator: A Comparative Study in Orthopaedic Surgery Residents. *Am J Sports Med.* 2015;43(6):1526-1529. doi:10.1177/0363546515574064

21. Roberts PG, Guyver P, Baldwin M, et al. Validation of the updated ArthroS simulator: face and construct validity of a passive haptic virtual reality simulator with novel performance metrics. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2017;25(2)(2):616-625. doi:10.1007/s00167-016-4114-1
22. Slade Shantz JA, Leiter JR, Collins JB, MacDonald PB. Validation of a Global Assessment of Arthroscopic Skills in a Cadaveric Knee Model. *Arthrosc J Arthrosc Relat Surg.* 2013;29(1):106-112. doi:10.1016/j.arthro.2012.07.010
23. Tronchet A, Berthelemy J, Thomazeau H, et al. Validation of virtual reality arthroscopy simulator relevance in characterising experienced surgeons. *Orthop Traumatol Surg Res.* 2021;107(8):103079. doi:10.1016/j.otsr.2021.103079
24. Walbron P, Common H, Thomazeau H, et al. Virtual reality simulator improves the acquisition of basic arthroscopy skills in first-year orthopedic surgery residents. *Orthop Traumatol Surg Res.* Published online April 2020:S187705682030116X. doi:10.1016/j.otsr.2020.03.009
25. Walbron P, Common H, Thomazeau H, Sirveaux F. Evaluation of arthroscopic skills with a virtual reality simulator in first-year orthopaedic residents. *Int Orthop.* Published online March 26, 2020. doi:10.1007/s00264-020-04520-1

## **CHAPITRE 6. ETUDE 3**

**Intérêt de la simulation VR sur la gestion de la fréquence cardiaque des internes lors d'une évaluation des compétences techniques arthroscopiques : étude prospective observationnelle appariée**

Alexandre TRONCHOT, MD MSc<sup>(1,2)</sup> ; Julien MAXIMEN, MD MSc<sup>(2)</sup> ; Tiphaine CASY, PhD<sup>(1)</sup> ; Harold COMMON, MD<sup>(2)</sup> ; Hervé THOMAZEAU, MD<sup>(1,2)</sup> ; Pierre JANNIN, PhD<sup>(1)</sup> ; Arnaud HUAULMÉ, PhD<sup>(1)</sup>

1. Univ Rennes, Inserm, LTSI – UMR 1099, F-35000 Rennes, France
2. Orthopaedics and Trauma Department, Rennes University Hospital, 2 rue Henri Le Guilloux, 35000, Rennes, France

### **Citation (English Version, OTSR) :**

**Tronchot A**, Maximen J, Casy T, Common H, Thomazeau H, Jannin P, Huaulmé A. The influence of virtual reality simulation on surgical residents' heart rate during an assessment of arthroscopic technical skills: A prospective, paired observational study. *Orthop Traumatol Surg Res.* 2024 Jun 8:103915. doi: 10.1016/j.otsr.2024.103915. Epub ahead of print. PMID: 38857823.

## **Abstract**

*Hypothèse* : Montrer qu'un programme de formation par simulation VR diminue la variabilité de fréquence cardiaque lors d'une évaluation de leurs compétences techniques en arthroscopie.

*Design de l'étude* : Étude prospective observationnelle appariée

*Matériels & Méthodes* : 36 internes en chirurgie orthopédique, novice en arthroscopie, ont reçu une formation standard en chirurgie arthroscopique du genou complétée pour 16 d'entre eux par une formation mensuelle supplémentaire pendant 6 mois sur simulateur de réalité virtuelle. A l'inclusion, les 2 groupes (VR et NON VR) ont répondu à un questionnaire et ont réalisé une méniscectomie sur simulateur VR. Après 6 mois de formation, deux formateurs indépendants en aveugle des bras d'inclusion ont évalué les compétences techniques des deux groupes lors de méniscectomies sur maquette et sujet anatomique. La variabilité de fréquence cardiaque (VFC) a été mesuré à l'aide d'un moniteur de fréquence cardiaque sans fil lors de l'inclusion, des entraînements VR et de l'évaluation.

*Résultats* : Après retrait des données incomplètes, l'analyse a porté sur 10 internes VR appariées à l'inclusion avec 10 internes NON VR. Le groupe VR a une fréquence cardiaque significativement plus basse lors de l'évaluation finale ( $p=0.02$ ) et une variabilité globale plus faible ( $p=0.05$ ). Le rapport basse/haute fréquences (BF/HF) n'était pas significativement différent entre les groupes (1.84 vs 2.05,  $p=0.66$ ) mais la comparaison avant-après entraînement montrait une diminution plus importante de ce ratio dans le groupe VR comparativement au groupe NON VR (- 0.76 (-41%) vs -0.08 (-4%).

*Conclusion* : Cette étude montre une différence significative sur la variabilité de la fréquence cardiaque entre les internes formés versus ceux non formés lors de l'évaluation finale de leurs compétences techniques à 6 mois. Il nous apparaît que l'amélioration de la gestion du stress devrait faire partie intégrante des programmes de formation en chirurgie arthroscopique.

*Niveau de preuve* : III

*Mots-Clés* : Formation chirurgicale ; Arthroscopie ; Simulateur ; Variabilité de fréquence cardiaque ; Stress

## 1. Introduction

L'apprentissage des compétences techniques par simulation est inscrite dans les programmes de formation initiale [1–3]. Ceci s'applique particulièrement pour les techniques exigeantes telle que l'arthroscopie [4] pour laquelle les simulateurs hybrides utilisant la réalité virtuelle (VR) apparaissent adaptés car recueillant des données informatiques quantitatives pour la mesure des performances, le suivi des progrès et l'évaluation des compétences techniques [5]. Cependant, former un chirurgien requiert également l'acquisition de compétences non techniques notamment de gestion du stress [6,7]. L'exposition chronique au stress a d'ailleurs été associée à certains problèmes de santé : burn-out et dépression [8], troubles musculosquelettiques [9], et pathologies cardiovasculaires [10]. A la différence de l'analyse des compétences techniques, la littérature est quasi-inexistante sur l'analyse des compétences non techniques acquises avec les simulateurs VR d'arthroscopie [11,12]. Parmi celles-ci, la variabilité de fréquence cardiaque (VFC) est utilisée depuis une trentaine d'années par les cardiologues pour analyser les pathologies cardiovasculaires [13]. Elle semble être un outil intéressant pour mesurer indirectement l'adaptabilité des personnes au stress en condition d'examen [14].

Nous avons émis l'hypothèse qu'un programme de formation par simulation VR permettrait de diminuer leur variabilité de fréquence cardiaque d'internes lors d'une évaluation de leurs compétences techniques. L'objectif principal de cette étude était d'analyser la variabilité de fréquence cardiaque lors d'une séance d'examen en arthroscopie du genou sur sujet anatomique, entre 2 groupes d'internes ayant bénéficié ou non d'une formation d'arthroscopie en simulation VR au préalable. Les objectifs secondaires étaient de rechercher des facteurs pouvant influencer sur la VFC : score ASSET, genre, pratique sportive, pratique de jeux vidéo, garde et sommeil la veille de l'étude, et sensation de progression en arthroscopie.

## **2. Matériels & Méthodes**

Cette étude enregistrée dans la base de données de la CNIL est conforme à la méthodologie de référence MR-004. Aucun financement externe n'a été reçu pour cette étude. Aucun acteur impliqué dans ce projet n'avait de conflit d'intérêt d'ordre financier avec les résultats de cette étude.

### ***2.1. Population***

Entre novembre 2020 et juin 2021, 36 internes inscrits au Diplôme d'Études Spécialisées en Chirurgie Orthopédique et Traumatologique (première et deuxième année, DES1 et DES2), sans expérience préalable en chirurgie arthroscopique, ont participé à un programme standard national de formation à l'arthroscopie[15] avec pour tous à l'inclusion un cours magistral délivré par un chirurgien senior spécialisé en arthroscopie, puis un cours pratique individuel de 30 minutes sur simulateur VR d'arthroscopie par le même instructeur. Tous les internes ont ensuite été inclus pour recevoir soit une formation standard sur la chirurgie arthroscopique du genou (groupe NON-VR), soit une formation standard plus six protocoles mensuels supplémentaires d'une heure de formation arthroscopique sur simulateur VR (groupe VR). Tous les participants ont répondu à un questionnaire à l'inclusion et ont réussi une ménisectomie guidée sur simulateur. Les deux groupes n'ont pas été randomisés pour des raisons de commodité géographique car la formation s'est déroulée sur un seul site, avec une limite de temps de trajet imposée d'une heure et demie entre le lieu de travail et le centre de simulation. Le consentement éclairé a été obtenu pour tous les participants. Tous les internes inscrits avaient effectué moins de cinq interventions chirurgicales arthroscopiques en tant qu'opérateur principal, éventuellement sous la supervision d'un chirurgien senior. Le groupe VR était composé de 16 internes (8 DES1, 8 DES2) et le groupe NON VR était composé de 20 internes (10 DES1, 10 DES2).

### ***2.2. Protocole de formation sur simulateur***

Le simulateur d'arthroscopie ArthroS™ de VirtaMed AG (Schlieren) a été utilisé. Les validités apparente (*face validity*) et de construction (*construct validity*) du simulateur et de ses différents modules ont été évaluées dans des études antérieures [16–18]. Les modules FAST et KNEE ont été utilisés pour l'étude. Les déplacements des internes ont été organisés vers le même centre de simulation par groupes de 3 maximum pour suivre une formation pratique supervisée d'une heure par mois pendant 6 mois avec le même instructeur. Le groupe NON VR a suivi le programme national d'apprentissage avec divers cours de formation théorique et la formation technique par compagnonnage à la discrétion de chaque centre. La seule limite imposée était que le groupe NON VR ne pratique pas sur simulateur pendant ces 6 mois.

### **2.3. Variabilité de fréquence cardiaque (VFC)**

Les mesures de la VFC ont été effectuées à l'aide du moniteur de fréquence cardiaque (*Polar H10, Polar Electro, Inc., Lake Success, NY*). Il s'agit d'un moniteur sans fil non invasif doté d'une ceinture thoracique transmettant par Bluetooth les données permettant de détecter l'intervalle RR entre deux QRS avec une résolution de 1 ms et validé pour l'analyse de la VFC [19]. L'électrocardiogramme a été réalisé en continu lors des sessions d'inclusion, d'entraînements et d'évaluation, permettant une reconstruction du signal sans distorsion d'amplitude ou de phase. Les données ont ensuite été transférées sur ordinateur (*Legion Y920-17IKB Laptop, Lenovo*) et analysées à l'aide d'un logiciel (*Kubios, Kubios®, Finlande*) disponible en libre-accès (**Figure 1**). L'analyse globale de la fréquence cardiaque a été effectuée conformément aux recommandations du groupe de travail de la Société européenne de cardiologie et de la Société nord-américaine de stimulation et d'électrophysiologie. Pour l'analyse temporelle, une analyse de la variabilité globale SDNN (écart-type de l'intervalle N-N) et de la variabilité à court terme RMSSD (moyenne quadratique de l'intervalle N-N) ont été effectués. RMSSD minimise les effets potentiels de la respiration dans l'analyse du tonus vagal de la VFC et est donc moins dépendant du rythme circadien tandis que le SDNN représente une

estimation globale de la VFC et est dépendante de la durée d'enregistrement. L'analyse fréquentielle par transformée de Fourier permet de calculer des composantes distinctes de basse fréquence (BF) (0,04-0,15 Hz) et de haute fréquence (HF) (0,15-0,4 Hz). La composante BF est censée augmenter en réponse à l'activité sympathique (et donc la charge mentale) tandis que la composante HF est censée augmenter en réponse au tonus vagal. Le rapport BF/HF est considéré comme un marqueur sensible de l'équilibre global du tonus sympathique et donc de la réponse au stress mental. Les données du ratio BF/HF sont présentées en unités absolues (norme 1.5-2.0). Une diminution du rapport BF/HF serait en faveur d'une meilleure adaptabilité de l'organisme au stress [20,21].

#### **2.4. Evaluation**

A l'issue des six mois de formation, les deux groupes ont été évalués indépendamment par deux chirurgiens experts [22] sur trois exercices : une méniscectomie partielle arthroscopique sur maquette (*Arthroscopy Dry Knee et Menisci Insert, Normal Anatomy, Off-White 35a Elastomer, Sawbones, Malmö, Suède*), puis une arthroscopie diagnostique avec méniscectomie partielle supervisées sur sujets anatomiques. Les évaluateurs, en aveugle des bras de formation, ont noté indépendamment les évalués via le score *Arthroscopic Surgical Skill Assesment Tool* (ASSET) [23]. Il ne s'agissait pas d'une évaluation sanctionnante pour leur cursus. Ce score a été choisi en raison de son utilisation dans de nombreuses études [24–26] et de sa supériorité par rapport à d'autres scores d'évaluation des compétences arthroscopique [27]. Chaque participant a également répondu à un second questionnaire standardisé sur son expertise nouvellement acquise en arthroscopie au cours des six derniers mois ainsi que leur sensation de progression en arthroscopie. Les repères et voies d'abord ont été réalisés par les deux évaluateurs. Un arthroscope standard de 30° avec une caméra arthroscopique et un système d'affichage (*Smith & Nephew Endoscopy, Huntingdon, Royaume-Uni*) ont été utilisés, à l'identique pour tous les

internes, et dans des conditions expérimentales constantes, sans stress auditif, visuel, ni interaction humaine non contrôlée.

## **2.5. Analyse statistique**

Un calcul de puissance bilatéral a été effectué pour l'hypothèse nulle, "la variabilité de fréquence cardiaque des internes VR est égale à celle des internes NON VR" avec une erreur de type 1 acceptable,  $\alpha = 0.05$  et une erreur de type 2 acceptable  $\beta = 0.20$ , *puissance* = 0.8. Pour le calcul de puissance, nous nous sommes appuyés sur les données d'études précédentes d'analyses de la VFC sur des chirurgiens avec une différence de 8 pour la moyenne de FC et de 5 pour l'écart-type [28]. Cela a permis d'obtenir un nombre minimum de 9 sujets dans chaque groupe, conformément aux études de validation rapportées précédemment. Des statistiques descriptives ont été utilisées pour rapporter les variables démographiques des sujets : la moyenne et l'écart-type pour les variables continues (*âge, score simulateur, FC, SDNN, RMSSD, BF/HF, et score ASSET*) et les pourcentages pour les variables catégorielles (*sexe, côté dominant, année d'internat, expérience arthroscopique, formation arthroscopique, formation sur simulateur*). Les différences entre les groupes pour les variables discrètes ont été évaluées en utilisant le test du chi-2 ou le test exact de Fisher. Le test de Kolmogorov-Smirnov a été utilisé pour analyser les données normalement distribuées, le test t paramétrique de Student a été utilisé en cas de distribution normale, le test t non paramétrique de Mann-Whitney sinon. Pour tous les calculs, une valeur p de  $< 0.05$  a été considérée comme statistiquement significative. Les analyses statistiques ont été réalisées via Excel (*version 16.32, Microsoft, Seattle, États-Unis*).

## **3. Résultats**

### **3.1 Population**

Six données de VFC étaient incomplètes ou manquantes lors des sessions d'inclusion (cinq internes du groupe VR, un interne du groupe NON VR). Deux données de VFC étaient incomplètes ou manquantes lors de la session d'évaluation (un interne du groupe VR, un interne du groupe NON VR). L'analyse a donc porté sur dix internes du groupe VR qui ont été appariées avec 10 des 18 internes du groupe NON VR par méthode directe déterministe pour avoir une comparabilité des groupes à l'inclusion en termes d'âge, de sexe, d'année d'internat, de pratique sportive, de score au SF-12, du niveau de performance sur simulateur VR et de données cardiaques de VFC lors de l'inclusion (**Tableau 1**). La (**Figure 2**) montre le diagramme de flux associé à cette étude.

### ***3.1. Variation de fréquence cardiaque***

#### ***3.1.1. Lors de l'évaluation (Tableau 2)***

Il y avait une différence statistiquement significative pour la fréquence cardiaque moyenne des internes en fonction de leur formation lors de l'évaluation (groupe VR : 85 bpm versus groupe NON VR : 93 bpm ;  $p 0,02$ ). Pour les mesures temporelles de la VFC, la variabilité globale SDNN était significativement plus faible pour le groupe VR ( $p 0,05$ ) sans modification significative de l'indice de variabilité à court terme RMSSD ( $p 0,33$ ). Pour l'analyse fréquentielle, le rapport BF/HF n'était pas significativement différent entre les groupes (1,84 vs 2,05,  $p 0,66$ ). Toutefois, la comparaison intra-groupe de VFC inclusion vs evaluation montre une diminution plus importante du ratio BF/HF dans le groupe VR comparativement au groupe NON VR (- 0,76 (-41%) vs -0,08 (-4%). (**Tableau 3**).

#### ***3.1.2 Analyse en sous-groupe (Tableau 4)***

Les résultats d'analyses en sous-groupe sont résumés dans le (**Tableau 4**) : *score ASSET, genre, pratique sportive, pratique de jeux vidéo, garde et sommeil la veille de l'étude, sensation de*

*progression en arthroscopie*. Seules la pratique sportive (RMSSD) et la sensation de progression en arthroscopie (FC) montrent des tendances positives sur les paramètres de VFC.

#### **4. Discussion**

Cette étude avait pour objectif d'évaluer le rôle d'une formation régulière sur simulateur VR sur la variabilité de fréquence cardiaque lors de l'évaluation de leurs compétences techniques. Notre étude montre une modification significative de certains paramètres de VFC. Nous constatons des différences significatives de fréquence cardiaque et d'intervalle R-R associées à une baisse du rapport BF/HF. Ceci suggère une meilleure adaptabilité au stress. Toutefois, nous constatons *a contrario* une diminution du SDNN plutôt en faveur d'une moins bonne adaptabilité au stress. A la lumière de ces résultats, il est possible que nous ayons créé involontairement de l'anxiété chez les participants du groupe VR de l'étude avec une crainte du regard critique du formateur et des deux évaluateurs, experts nationaux reconnus en arthroscopie du genou. Toutefois, la comparaison intra-groupe entre l'inclusion et l'évaluation montre une diminution plus importante du ratio BF/HF dans le groupe formé VR suggérant un effet positif de la formation sur leur charge mentale lors de l'évaluation. De plus, la diminution du RMSSD est non significative, paramètre étant considéré plus fiable que le SDNN sur des analyses courtes de la VFC telles que faite sur notre étude.

Bien qu'il n'y ait pas eu de randomisation en raison de contraintes géographiques et des pertes notables de données de VFC, nous avons pu limiter ce biais en appariant les groupes afin de les rendre comparables en termes d'âge, de sexe, d'année d'internat, de pratique sportive, de score SF-12 et de niveau de performance sur simulateur. Les études comparant le genre sur la VFC montrent que les jeunes femmes entre 25 et 34 ans ont tendance à avoir une VFC plus élevée comparée aux hommes du même âge [29] ce qui n'est pas retrouvé ici. Nous avons remarqué une discrète différence de la VFC sur la pratique ou non d'une activité sportive (sur la

RMSSD) en phase avec les études montrant de meilleurs paramètres de VFC pour une population sportive [30]. Toutefois, les faibles échantillons et la comparaison entre deux groupes de jeunes actifs en bonne santé peut-être une des raisons de ces résultats modestes. La pratique de jeux vidéo n'a pas eu d'influence sur les paramètres de VFC. Le nombre d'heures de sommeil et le fait d'être de garde la veille n'a pas eu d'influence sur les paramètres de VFC de cette cohorte. Ces résultats sont en contradiction avec des études antérieures ayant montré que les populations soumises à du travail de nuit avec heures de sommeil réduites avaient des paramètres de VFC en faveur d'une moins adaptation cardiaque au stress [7,31]. Enfin, il est intéressant de noter que les internes n'ayant pas senti de progression de leurs compétences arthroscopiques durant les six mois de formation ont des valeurs de VFC suggérant un état de stress plus important lors de l'évaluation.

Un certain nombre d'études ont validé l'utilisation des simulateurs VR d'arthroscopie pour l'apprentissage des compétences techniques. Notre étude est une des premières à analyser cet outil pour l'apprentissage des compétences non techniques telles que la gestion du stress mais il reste de nombreux points à approfondir en lien avec les limites de cette étude [32]. Premièrement, nous avons comparé les internes lors d'une séance d'entraînement sur simulateur correspondant à l'inclusion d'une étude de grande envergure avec le stress que peut engendrer cet enrôlement. Il conviendrait d'avoir des données de VFC plus précises de chaque interne au repos, et lors du sommeil pour avoir un comparatif authentique en situation d'exercice quotidien [7]. Certains auteurs estiment également qu'une formation sur simulateur nécessite plus de 10h d'entraînement pour avoir des résultats significatifs sur les compétences techniques [33]. Ce qui peut expliquer nos résultats modestes sur la VFC, métrique témoignant de l'apprentissage de compétences non techniques telles que la gestion du stress. Ensuite, nous avons analysé la VFC dans la globalité des séances d'inclusions et d'évaluation. Il serait judicieux d'analyser la VFC suivant l'exercice sur simulateur VR et les étapes charnières d'une procédure de ménisectomie.

Enfin, l'analyse de la VFC dans les conditions de charge cognitive et donc de stress ne font pas encore consensus sur les paramètres les plus pertinents à retenir (BF/HF, analyse seule des BF, indice de stress de Baevsky,...) [34]. Il conviendra d'incorporer toutes ces données dans les études futures comparant la VFC sur des procédures plus complexes simulées et/ou pratiquées au bloc opératoire.

## **5. Conclusion**

Cette étude montre quelques différences significatives sur la variabilité de la fréquence cardiaque entre les internes formés versus ceux non formés lors de l'évaluation finale de leurs compétences techniques à 6 mois. Il nous apparaît que l'amélioration de la gestion du stress devrait faire partie intégrante des programmes de formation en chirurgie arthroscopique.

## **6. Remerciements**

Nous remercions les deux évaluateurs de cette étude, le Pr Philippe Beaufile et le Dr Philippe Colombet ; tous les participants de l'étude ; le réseau hospitalier universitaire interrégional HUGORTHO et enfin l'équipe de l'école de Chirurgie, Julien Landreau, David Bec et Jean-Eric Berton pour l'aide et le soutien de cette étude.

## 7. Bibliographie

- [1] Walbron P, Common H, Thomazeau H, Hosseini K, Peduzzi L, Bulaid Y, et al. Virtual reality simulator improves the acquisition of basic arthroscopy skills in first-year orthopedic surgery residents. *Orthop Traumatol Surg Res* 2020;S187705682030116X. <https://doi.org/10.1016/j.otsr.2020.03.009>.
- [2] Arroyo-Berezowsky C. Desarrollo de plan de entrenamiento con simulación de artroscopia para residentes de ortopedia. *Acta Ortopédica Mex* 2018;32:297–302. <https://doi.org/10.35366/84437>.
- [3] Nousiainen MT, McQueen SA, Ferguson P, Alman B, Kraemer W, Safir O, et al. Simulation for Teaching Orthopaedic Residents in a Competency-based Curriculum: Do the Benefits Justify the Increased Costs? *Clin Orthop* 2016;474:935–44. <https://doi.org/10.1007/s11999-015-4512-6>.
- [4] Aïm F, Lonjon G, Hannouche D, Nizard R. Effectiveness of Virtual Reality Training in Orthopaedic Surgery. *Arthrosc J Arthrosc Relat Surg* 2016;32:224–32. <https://doi.org/10.1016/j.arthro.2015.07.023>.
- [5] Frank RM, Wang KC, Davey A, Cotter EJ, Cole BJ, Romeo AA, et al. Utility of Modern Arthroscopic Simulator Training Models: A Meta-analysis and Updated Systematic Review. *Arthrosc J Arthrosc Relat Surg* 2018;34:1650–77. <https://doi.org/10.1016/j.arthro.2017.10.048>.
- [6] Awad G, Pohl R, Darius S, Thielmann B, Varghese S, Wacker M, et al. Activation of the stress response among the cardiac surgical residents: comparison of teaching procedures and other (daily) medical activities. *J Cardiothorac Surg* 2022;17:112. <https://doi.org/10.1186/s13019-022-01873-z>.
- [7] Langelotz C. Stress and Heart Rate Variability in Surgeons During a 24-Hour Shift. *Arch Surg* 2008;143:751. <https://doi.org/10.1001/archsurg.143.8.751>.
- [8] Faivre G, Marillier G, Nallet J, Nezelof S, Clment I, Obert L. Are French orthopedic and trauma surgeons affected by burnout? Results of a nationwide survey. *Orthop Traumatol Surg Res* 2019;105:395–9. <https://doi.org/10.1016/j.otsr.2018.12.009>.
- [9] McQuivey KS, Christopher ZK, Deckey DG, Mi L, Bingham JS, Spangehl MJ. Surgical Ergonomics and Musculoskeletal Pain in Arthroplasty Surgeons. *J Arthroplasty* 2021;36:3781–3787.e7. <https://doi.org/10.1016/j.arth.2021.06.026>.
- [10] Jones KI, Amawi F, Bhalla A, Peacock O, Williams JP, Lund JN. Assessing surgeon stress when operating using heart rate variability and the State Trait Anxiety Inventory: will surgery be the death of us? *Colorectal Dis* 2015;17:335–41. <https://doi.org/10.1111/codi.12844>.
- [11] Randelli PS, Cabitza F, Ragone V, Compagnoni R, Akhtar K, Tuijthof GJM. Needs and Wishes from the Arthroscopy Community. In: Karahan M, Kerkhoffs GMMJ, Randelli P, Tuijthof GJM, editors. *Eff. Train. Arthrosc. Ski.*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2015, p. 7–15. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-44943-1\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-662-44943-1_2).
- [12] Aksoy ME, Kocaoglu B, İzzetoglu K, Agrali A, Yoner SI, Polat MD, et al. Assessment of learning in simulator-based arthroscopy training with the diagnostic arthroscopy skill score (DASS) and neurophysiological measures. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2023. <https://doi.org/10.1007/s00167-023-07571-0>.
- [13] Marsac J. Variabilité de la fréquence cardiaque: un marqueur de risque cardiométabolique en santé publique. *Bull Académie Natl Médecine* 2013;197:175–86. [https://doi.org/10.1016/S0001-4079\(19\)31635-8](https://doi.org/10.1016/S0001-4079(19)31635-8).
- [14] Melillo P, Bracale M, Pecchia L. Nonlinear Heart Rate Variability features for real-life stress detection. Case study: students under stress due to university examination. *Biomed Eng OnLine* 2011;10:96. <https://doi.org/10.1186/1475-925X-10-96>.

- [15] Bauer T, Clavert P, Garreau De Loubresse C, Sonnery-Cottet B. Enseignement de l'arthroscopie en 2023 : une action prioritaire de la SFA. *Rev Chir Orthopédique Traumatol* 2022;108:S181–2. <https://doi.org/10.1016/j.rcot.2022.11.001>.
- [16] Fucentese SF, Rahm S, Wieser K, Spillmann J, Harders M, Koch PP. Evaluation of a virtual-reality-based simulator using passive haptic feedback for knee arthroscopy. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2015;23:1077–85. <https://doi.org/10.1007/s00167-014-2888-6>.
- [17] Tronchet A, Berthelemy J, Thomazeau H, Huaultmé A, Walbron P, Sirveaux F, et al. Validation of virtual reality arthroscopy simulator relevance in characterising experienced surgeons. *Orthop Traumatol Surg Res* 2021;107:103079. <https://doi.org/10.1016/j.otsr.2021.103079>.
- [18] Rahm S, Germann M, Hingsammer A, Wieser K, Gerber C. Validation of a virtual reality-based simulator for shoulder arthroscopy. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2016;24:1730–7. <https://doi.org/10.1007/s00167-016-4022-4>.
- [19] Gamelin FX, Berthoin S, Bosquet L. Validity of the Polar S810 Heart Rate Monitor to Measure R-R Intervals at Rest. *Med Sci Sports Exerc* 2006;38:887–93. <https://doi.org/10.1249/01.mss.0000218135.79476.9c>.
- [20] Servant D, Logier R, Moustier Y, Goudemand M. La variabilité de la fréquence cardiaque. Intérêts en psychiatrie. *L'Encéphale* 2009;35:423–8. <https://doi.org/10.1016/j.encep.2008.06.016>.
- [21] Bernardi L, Wdowczyk-Szulc J, Valenti C, Castoldi S, Passino C, Spadacini G, et al. Effects of controlled breathing, mental activity and mental stress with or without verbalization on heart rate variability. *J Am Coll Cardiol* 2000;35:1462–9. [https://doi.org/10.1016/S0735-1097\(00\)00595-7](https://doi.org/10.1016/S0735-1097(00)00595-7).
- [22] Tang JB, Giddins G. Why and how to report surgeons' levels of expertise. *J Hand Surg Eur Vol* 2016;41:365–6. <https://doi.org/10.1177/1753193416641590>.
- [23] Koehler RJ, Amsdell S, Arendt EA, Bisson LJ, Bramen JP, Butler A, et al. The Arthroscopic Surgical Skill Evaluation Tool (ASSET). *Am J Sports Med* 2013;41:1229–37. <https://doi.org/10.1177/0363546513483535>.
- [24] Koehler RJ, Goldblatt JP, Maloney MD, Voloshin I, Nicandri GT. Assessing Diagnostic Arthroscopy Performance in the Operating Room Using the Arthroscopic Surgery Skill Evaluation Tool (ASSET). *Arthrosc J Arthrosc Relat Surg* 2015;31:2314-2319.e2. <https://doi.org/10.1016/j.arthro.2015.06.011>.
- [25] Bishop ME, Ode GE, Hurwit D, Zmugg S, Rauck R, Nguyen J, et al. The ASSET Global Rating Scale is a Valid and Reliable Adjunct Measure of Performance on a Virtual Reality Simulator for Hip Arthroscopy. *Arthrosc J Arthrosc Relat Surg* 2021:S0749806321000633. <https://doi.org/10.1016/j.arthro.2021.01.046>.
- [26] Middleton RM, Baldwin MJ, Akhtar K, Alvand A, Rees JL. Which Global Rating Scale?: A Comparison of the ASSET, BAKSSS, and IGARS for the Assessment of Simulated Arthroscopic Skills. *J Bone Jt Surg* 2016;98:75–81. <https://doi.org/10.2106/JBJS.O.00434>.
- [27] James HK, Chapman AW, Pattison GTR, Fisher JD, Griffin DR. Analysis of Tools Used in Assessing Technical Skills and Operative Competence in Trauma and Orthopaedic Surgical Training: A Systematic Review. *JBJS Rev* 2020;8:e19.00167-e19.00167. <https://doi.org/10.2106/JBJS.RVW.19.00167>.
- [28] Awad G, Pohl R, Darius S, Thielmann B, Kuzmin B, Slottosch I, et al. Evaluation of Stress Levels of Trainee Cardiac Surgery Residents during Training Interventions Using Physiological Stress Parameters. *Int J Environ Res Public Health* 2021;18:11953. <https://doi.org/10.3390/ijerph182211953>.
- [29] Voss A, Schroeder R, Heitmann A, Peters A, Perz S. Short-Term Heart Rate Variability—Influence of Gender and Age in Healthy Subjects. *PLOS ONE* 2015;10:e0118308. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0118308>.

- [30] Jiménez Morgan S, Molina Mora JA. Effect of Heart Rate Variability Biofeedback on Sport Performance, a Systematic Review. *Appl Psychophysiol Biofeedback* 2017;42:235–45. <https://doi.org/10.1007/s10484-017-9364-2>.
- [31] Chien J-W, Chen C-Y, Lin S-H, Lin S-W, Lin Y-H. Cardiac Autonomic Modulation during on-Call Duty under Working Hours Restriction. *Int J Environ Res Public Health* 2020;17:1118. <https://doi.org/10.3390/ijerph17031118>.
- [32] Mansikka H, Simola P, Virtanen K, Harris D, Oksama L. Fighter pilots' heart rate, heart rate variation and performance during instrument approaches. *Ergonomics* 2016;59:1344–52. <https://doi.org/10.1080/00140139.2015.1136699>.
- [33] Anetzberger H, Reppenhagen S, Eickhoff H, Seibert FJ, Döring B, Haasters F, et al. Ten hours of simulator training in arthroscopy are insufficient to reach the target level based on the Diagnostic Arthroscopic Skill Score. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2022;30:1471–9. <https://doi.org/10.1007/s00167-021-06648-y>.
- [34] Billman GE. The LF/HF ratio does not accurately measure cardiac sympatho-vagal balance. *Front Physiol* 2013;4. <https://doi.org/10.3389/fphys.2013.00026>.

## Tableaux

**Tableau 1.** Caractéristiques de base des participants à l'inclusion et lors de l'évaluation

	NON VR (n=10)	VR (n=10)	TOTAL (n=20)	p-VALUE
<b>AGE, an</b>	25.5 [24-27]	25.7 [24-29]	25.6 [24-29]	0.77*
<b>SEXE</b>				1†
<i>Homme</i>	8 (80%)	8 (80%)	16 (80%)	
<i>Femme</i>	2 (20%)	2 (20%)	4 (20%)	
<b>COTE DOMINANT</b>				1†
<i>Droit</i>	8 (80%)	9 (90%)	17 (85%)	
<i>Gauche</i>	2 (20%)	1 (10%)	3 (15%)	
<i>Ambidextre</i>	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	
<b>NIVEAU D'ETUDE</b>				1†
<i>Interne première année (DES1)</i>	4 (40%)	3 (30%)	7 (35%)	
<i>Interne deuxième année (DES2)</i>	6 (60%)	7 (70%)	13 (65%)	
<b>EXPERIENCE ARTHROSCOPIQUE</b>				
<i>Participation au bloc opératoire (&lt; 100 arthroscopies)</i>				
<i>A l'inclusion</i>				1†
<i>Oui</i>	10 (100%)	9 (90%)	19 (95%)	
<i>Non</i>	0 (0%)	1 (10%)	1 (5%)	
<i>Lors de l'évaluation, compte lors des 6 mois</i>				1†
<i>Oui</i>	8 (80%)	9 (90%)	17 (85%)	
<i>Non</i>	2 (20%)	1 (10%)	3 (15%)	
<i>Pratique au bloc opératoire (&lt; 5 arthroscopies)</i>				
<i>A l'inclusion</i>				1†
<i>Oui</i>	2 (20%)	2 (20%)	4 (20%)	
<i>Non</i>	8 (80%)	8 (80%)	16 (80%)	
<i>Lors de l'évaluation, compte lors des 6 mois</i>				0.17†
<i>Oui</i>	2 (20%)	6 (60%)	8 (40%)	
<i>Non</i>	8 (80%)	4 (40%)	12 (60%)	
<b>FORMATION ARTHROSCOPIQUE</b>				
<i>A l'inclusion</i>				1†
<i>Oui (Sujet Anatomique)</i>	4 (40%)	3 (30%)	7 (35%)	
<i>Non</i>	6 (60%)	7 (70%)	13 (65%)	
<i>Lors de l'évaluation, compte lors des 6 mois</i>				1†
<i>Oui (1h, Maquette)</i>	2 (20%)	1 (10%)	3 (15%)	
<i>Non</i>	8 (80%)	9 (90%)	17 (85%)	
<b>PRATIQUE SPORTIVE</b>				1†
<i>Oui (au moins 1h/semaine)</i>	7 (70%)	6 (60%)	13 (65%)	
<i>Non</i>	3 (30%)	4 (40%)	7 (35%)	
<b>PRATIQUE JEUX VIDEOS</b>				1†
<i>Oui (au moins 1 fois/semaine)</i>	3 (30%)	4 (40%)	7 (35%)	
<i>Non</i>	7 (70%)	6 (60%)	13 (65%)	
<b>FORMATION SUR SIMULATEUR A L'INCLUSION</b>				1†
<i>Oui</i>	4 (M:5.1h, 40%)	3 (M:7.3h, 30%)	7 (M:6.9, 35%)	
<i>Non</i>	6 (60%)	7 (70%)	13 (65%)	
<b>SCORE SF-12</b>	46 +/- 5	45.5 +/- 3	46 +/- 4	0.34*
<b>SCORE VIRTAMED A L'INCLUSION</b>	124 +/- 8	124 +/- 12	124 +/- 10	0.53*

<b>SENSATION DE PROGRESSION EN ARTHROSCOPIE APRES FORMATION</b>				0.03*
Oui	5 (50%)	10 (100%)	15 (75%)	
Non	5 (50%)	0 (0%)	5 (25%)	
<b>HEURE SOMMEIL VEILLE EVALUATION</b>	6h [3-9]	5h [1-7]	5.5h [1-9]	0.22*
<b>GARDE VEILLE EVALUATION</b>				0.3†
Oui	1 (10%)	4 (40%)	5 (25%)	
Non	9 (90%)	6 (60%)	15 (75%)	

NOTE. Les données sont présentées sous forme de médiane +/- écart interquartile ou de nombre (pourcentage).

\* Test t de Student à échantillons indépendants

† Test du khi-deux de Pearson

**Tableau 2. Analyse des paramètres de VFC à l'inclusion et lors de l'évaluation**

INCLUSION		FC	SDNN	RMSSD	BF/HF	
		<i>bpm</i>	<i>ms</i>	<i>ms</i>	<i>//</i>	
VR (n=10)	m	76,65	43,12	35,64	2,60	
	ET	9,82	14,63	10,16	1,22	
NON VR (n=10)	m	82,14	44,25	35,79	2,13	
	ET	6,38	7,34	7,83	1,03	
<b>p value*</b>		<b>0,12</b>	<b>0,84</b>	<b>0,96</b>	<b>0,42</b>	
EVALUATION		FC	SDNN	RMSSD	BF/HF	ASSET
		<i>bpm</i>	<i>ms</i>	<i>ms</i>	<i>//</i>	<i>//</i>
VR (n=10)	m	85,16	32,23	26,86	1,84	29,03
	ET	10,02	5,56	5,85	0,61	2,79
NON VR (n=10)	m	92,97	39,03	29,43	2,05	28,22
	ET	7,22	10,74	10,39	1,66	4,27
<b>p value*</b>		<b>0,02</b>	<b>0,05</b>	<b>0,33</b>	<b>0,66</b>	<b>0,68</b>

NOTE. Les données sont présentées sous forme de moyenne (m) et écart-type (ET)

\* Test t de Student à échantillons indépendants

**Tableau 3. Comparaison intra-groupe inclusion vs évaluation selon la cohorte**

COMPARAISON INCLUSION vs EVALUATION PAR COHORTE		FC	BF/HF	SDNN	RMSSD
		<i>bpm</i>	<i>//</i>	<i>ms</i>	<i>ms</i>
VR (n=10)	m <sub>Eval-mIncl</sub>	8,51	-0,76	-10,89	-8,77
	m <sub>Eval-mIncl</sub> (%)	10%	-41%	-34%	-33%
<b>p value*</b>		<b>0,03</b>	<b>0,15</b>	<b>0,04</b>	<b>0,01</b>
NON VR (n=10)	m <sub>Eval-mIncl</sub>	10,83	-0,08	-5,22	-6,36
	m <sub>Eval-mIncl</sub> (%)	12%	-4%	-13%	-22%
<b>p value*</b>		<b>0,001</b>	<b>0,807</b>	<b>0,076</b>	<b>0,002</b>

NOTE. Les données sont présentées sous forme de différence de moyenne en valeur absolue et pourcentage (%).

\* Test t de Student à échantillons indépendants

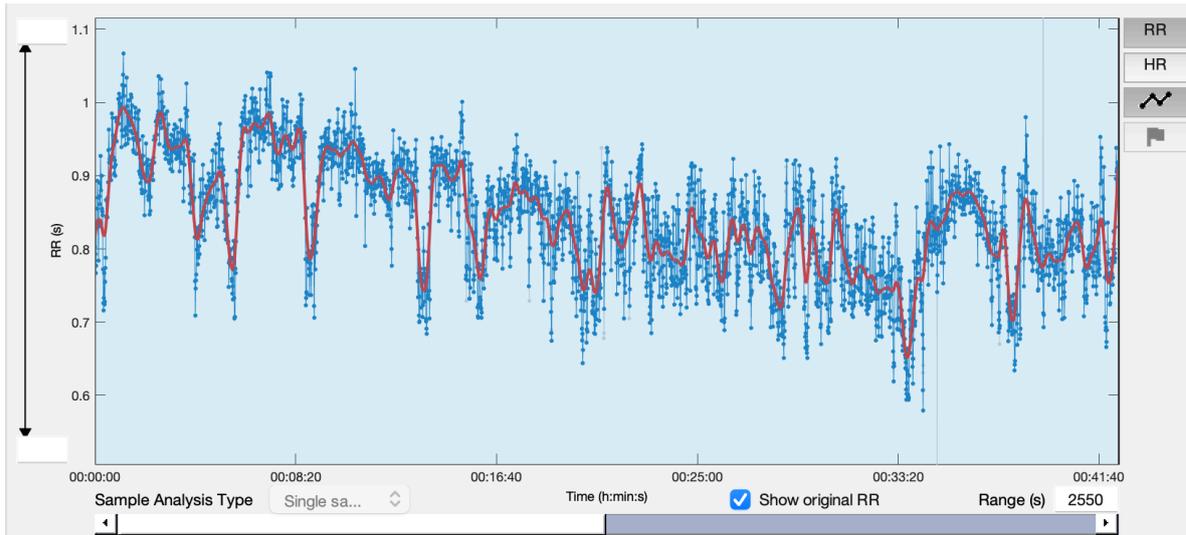
**Tableau 4. Analyse en sous-groupe**

ANALYSE EN SOUS-GROUPE	FC	BF/HF	SDNN	RMSSD
<i>p-value* ou p<sub>Pearson</sub>†</i>				
Score ASSET†	0,13	0,06	0,32	0,49
Genre (Femme / Homme)*	0,26	0,20	0,53	0,64
Pratique sportive*	0,56	0,13	0,53	0,04

<i>Pratique de jeux vidéo*</i>	<i>0,39</i>	<i>0,09</i>	<i>0,90</i>	<i>0,75</i>
<i>Garde et Sommeil veille de l'étude*</i>	<i>0,40</i>	<i>0,97</i>	<i>0,31</i>	<i>0,89</i>
<i>Sensation de progression en arthroscopie*</i>	<b><i>0,01</i></b>	<i>0,63</i>	<i>0,74</i>	<i>0,53</i>

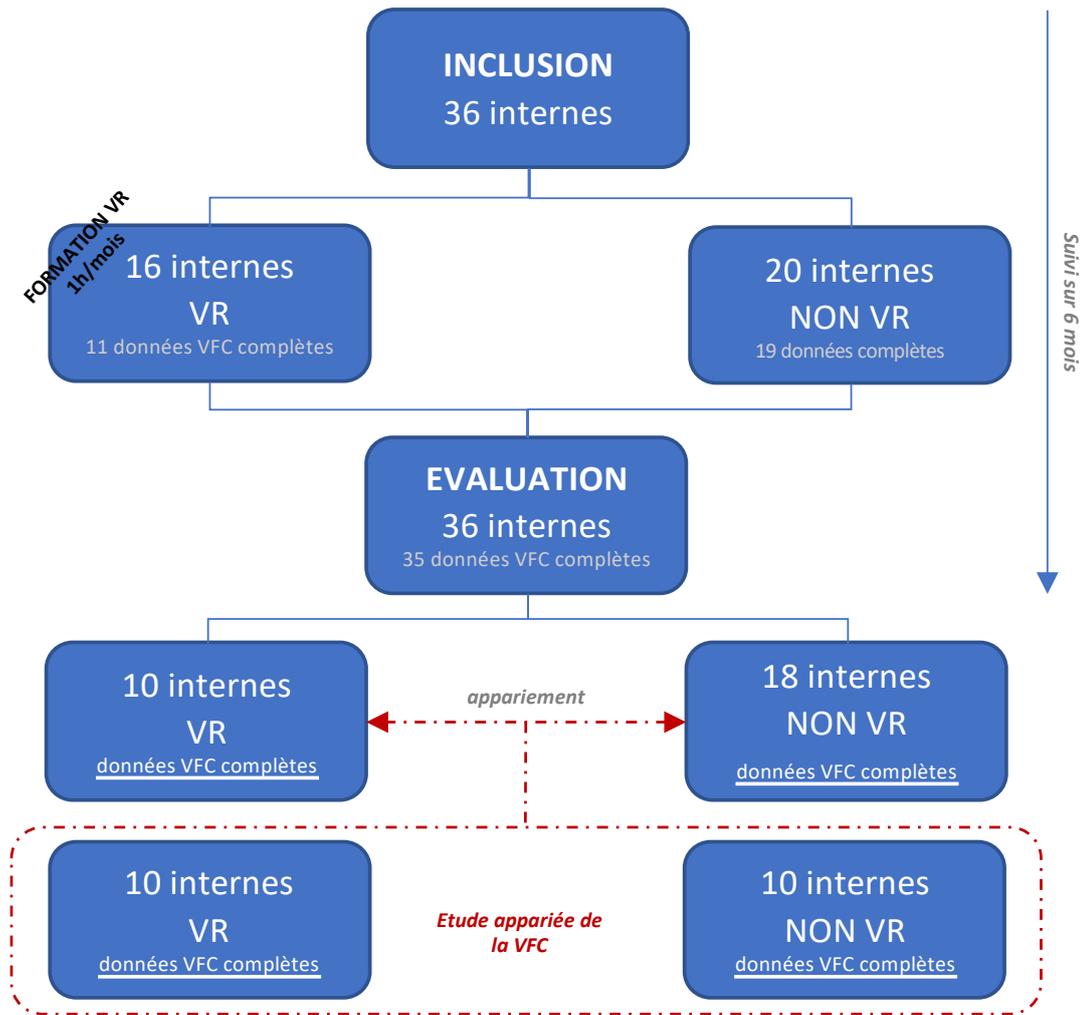
NOTE. Les données sont présentées sous forme de \* p-value (Test t de Student) ou bien de † coefficient de corrélation de Pearson entre variables quantitatives. Les pratiques sportives et de jeux vidéo correspondent à un minimum d'1h par semaine.

## Figures



**Figure 1.** Analyse numérique de la VFC d'un participant, logiciel Kubios (Kubios®, Finland)

NB : en abscisse, le temps (h:min:s) et en ordonnées, l'intervalle R-R (s) à partir duquel sont calculées l'analyse temporelle par fréquence cardiaque FC (bpm) ; variabilité globale SDNN (ms) et variabilité à court terme RMSSD (ms). Une analyse fréquentielle par transformée de Fourier est également réalisée pour les basses fréquences (BF) (0,04-0,15 Hz) et hautes fréquences (HF) (0,15-0,4 Hz).



**Figure 2.** Diagramme de Flux de l'étude comparative de VFC entre internes formés par simulateur VR (VR) et non formés par simulateur VR (NON VR)

## **CHAPITRE 7. CONCLUSION ET PERSPECTIVES D'ETUDES**

La formation chirurgicale initiale se compose de trois types d'évaluations :

**- Sommative**

Il faut suivre une progression prédéterminée (par « design »), un programme dorénavant sur 6 ans.

**- Formative**

Accumulation de compétences par compagnonnage. Il faut des maîtres et des responsables de terrain de stages (agrément de sites).

**- Certificative**

Il faut pouvoir documenter les acquis de façons **quantitative** (portefeuille d'actes cibles à cotés comme acquis en autonomie) et **qualitative** (examen par simulation avec des outils, reproductibles et validés).

Ce travail de thèse a permis de montrer plusieurs points.

## **1. Progression pour tous les internes d'orthopédie**

Ce projet de recherche a confirmé que les internes formés sur simulateur VR gagnent en compétences techniques. Nous avons prouvé dans **l'étude 2** le transfert des compétences du simulateur VR vers les maquettes synthétiques et surtout vers le sujet anatomique (simulateur le plus proche des conditions réelles de chirurgie). Tous les internes ont progressé avec un gain de formation plus marqué pour les internes ayant eu les scores les plus bas sur simulateur VR à l'inclusion.

## **2. Amélioration des compétences non techniques**

**L'étude 3** a également confirmé l'intérêt d'avoir une formation standardisée sur simulateur en ce qui concerne les compétences non techniques. La variabilité de fréquence cardiaque étant moindre lors de l'évaluation finale, on peut espérer que l'apprentissage sur simulateur permet de mieux préparer les internes à la mise en responsabilité en termes de gestion du stress. L'ergonomie et la posture chirurgicale ont été étudiées par Tiphaine Casy en parallèle cette thèse dans le cadre son master 2 puis de sa thèse de sciences. Les résultats montrent qu'on peut caractériser l'expertise à travers la posture. Pour autant, les simulateurs actuels ne prennent pas en compte ces aspects de l'acte chirurgical. Il est donc impératif que le formateur soit habitué à la procédure et reste présent pour justement donner les conseils adéquats à l'apprenant.

### **3. Améliorer l'évaluation sommative**

Toutefois, ce programme de formation pourtant simple à mettre en œuvre (1h/mois pendant 6 mois) ne permet toutefois pas d'atteindre le niveau des chirurgiens expérimentés sur simulateur VR comme montré dans **l'étude 1**. En effet, nous avons bien montré un gain de compétences par rapport aux internes non formés mais dont les résultats restent modestes si on les compare aux résultats de l'étude en validité de transfert. Pourtant, les résultats étaient probants dans notre **étude préliminaire** ce qui laisse penser que l'analyse par métriques est intimement liée à la procédure analysée. Des métriques pertinentes pour un exercice donné ne le sont pas forcément pour un autre.

### **4. Vers une évaluation formative « 2.0 »**

Le compagnonnage reste un rouage essentiel de la formation de l'interne en chirurgie aussi bien pour le « savoir-faire » que pour le « savoir-être ». Les changements sociétaux imposent pourtant une mise à niveau du compagnonnage traditionnel (moins d'heures de présence au bloc opératoire pour l'interne, pression administrative avant et après l'intervention chirurgicale pour l'interne et le chirurgien, ...). Cela est nécessaire au risque de voir disparaître sinon le compagnonnage traditionnel pour les évaluations sommative et certificative, seules validations quantifiables pour les organismes de tutelle. En effet, les résultats de ce projet n'auraient probablement pas été aussi positifs sans le dévouement de l'investigateur principal qui a consacré une année à plein temps pour l'étude et la formation de tous les participants mais aussi par la participation des internes (aucun perdu de vue) et leur motivation malgré les contraintes liées à leur activité de soins. A l'heure actuelle, il semble difficile de concevoir un programme de formation sans modifier profondément la formation pratique des internes et le temps alloué à la formation en dehors du bloc opératoire, tant pour le stagiaire que pour le formateur à l'instar de ce qui peut se faire dans le domaine de l'aéronautique.

### **5. Vers une évaluation certificative des compétences**

Comme expliqué en préambule, la validation du diplôme d'études spécialisés en chirurgie uniquement sommative et formative semble anachronique à l'époque des certifications qui se multiplient dans le domaine du soin. L'objectif des instances gouvernementales à travers le monde est donc de proposer une validation certificative des compétences, aussi bien quantitative que qualitative permettant d'aboutir au droit à l'exercice et peut être plus tard à la re-certification. Comme en France où « la validation des compétences en simulation par le responsable du centre de simulation » a été inscrite dans ces termes dans les maquettes de DES de chirurgie depuis la

réforme du troisième cycle des études médicales de 2017. Il reste pourtant de nombreuses limites à l'utilisation seule de simulateurs pour les certifications. Premièrement, il n'y a pas eu de précision sur les modalités et les outils d'évaluations des compétences. Deuxièmement, il n'a pas été précisé non plus les responsables de cette validation entre les écoles de chirurgie et les centres de simulations. Or, nous avons pu remarquer entre **les études 1 et 2** des différences marquées de mesure des compétences techniques entre l'évaluation par les métriques issues des capteurs du simulateur VR (**étude 1**) et les échelles d'évaluations globales issues des ressentis de chirurgiens experts (**étude 2**). La procédure analysée étant simple. Des travaux sont encore à mener sur l'analyse par métrique, et faire la corrélation par intelligence artificielle avec des échelles d'évaluation globale.

## **6. Expertise sur simulateur : en attendons-nous trop ?**

Nous avons remarqué lors de cette étude que les outils d'analyses actuels ne permettent pas de discriminer finement les niveaux d'expertise pour tout type de procédure. Mais peut-être faisons-nous fausse route sur la notion même d'expertise et de compétence attendue sur simulateur. L'objectif de la formation chirurgicale initiale n'est pas d'atteindre l'expertise mais bien de former les chirurgiens à être suffisamment compétent pour réaliser une procédure sans risque pour le patient. La ménissectomie de notre sujet d'études est en effet une procédure simple sur simulateur composée de quelques gestes techniques. Il est possible que ce geste ne soit pas suffisamment discriminant pour caractériser l'expertise. D'où les résultats modestes de **l'étude 1**, notamment sur l'analyse par similarité de trajectoires. Pour autant, un certain nombre d'internes formés ont été considérés ensuite comme compétent par 2 chirurgiens experts en arthroscopie du genou lors de **l'étude 2**. Il convient donc à l'avenir d'avoir une réflexion sur les seuils de validité des compétences techniques du simulateur.

## **7. Les objectifs à venir de la recherche en pédagogie**

L'objectif des études à venir sont d'atteindre le niveau 4 sur l'échelle de Kirkpatrick. C'est-à-dire montrer les supériorités pédagogique et économique de ces outils de simulation par rapport aux programmes existants en termes de retentissements pour les structures de soins et pour les patients. Pour certains outils de simulation VR, nous sommes dans la phase descendante de la courbe du hype de Gartner soit la phase de désillusion juste après la phase d'espérance. En effet, beaucoup de fonds financiers privés et publics ont été levés cette dernière décennie pour promouvoir la simulation VR notamment immersive. Ces outils ont des limites certaines et les proposer à l'apprenant de façon brut sans notion de pratique volontaire associée est à risque

d'effet pervers de la formation. D'où cette phase de désillusion. A nous, en tant que chercheur en pédagogie, de maximiser l'efficacité de ces outils pour remonter la pente d'éclaircissement et d'atteindre le palier de productivité.

# LISTE DES ARTICLES CONNEXES ISSUS DE LA BASE DE DONNEES

## 2024

- The influence of virtual reality simulation on surgical residents' heart rate during an assessment of arthroscopic technical skills: A prospective, paired observational study.  
**TRONCHOT A, MAXIMEN J, CASY T, COMMON H, THOMAZEAU H, JANNIN P, HUAULMÉ A.**  
Orthop Traumatol Surg Res. 2024 Jun 8:103915. <https://doi.org/10.1016/j.otsr.2024.103915>

## 2023

- Virtual reality simulation training improve diagnostic knee arthroscopy and meniscectomy skills: a prospective transfer validity study.  
**TRONCHOT A, CASY T, VALLEE N, COMMON H, THOMAZEAU H, JANNIN P, HUAULME A**  
J EXP ORTOP 10, 138 (2023). <https://doi.org/10.1186/s40634-023-00688-8>
- Gaze behavior is related to objective technical skills assessment during virtual reality simulator-based surgical training: a proof of concept.  
GALURET S, VALLÉE N, **TRONCHOT A**, THOMAZEAU H, JANNIN P, HUAULMÉ A.  
Int J Comput Assist Radiol Surg. 2023 Jun 7. <https://doi.org/10.1007/s11548-023-02961-8>. Epub ahead of print. PMID: 37286642.

## 2022

- “Stand-up straight!”: human pose estimation to evaluate postural skills during orthopedic surgery simulations.  
CASY T, **TRONCHOT A**, THOMAZEAU H, MORANDI X, JANNIN P, HUAULMÉ A.  
Int J Comput Assist Radiol Surg. 2022 Oct 5. doi: 10.1007/s11548-022-02762-5. Epub ahead of print. PMID: 36197605.

## 2021

- *Validation of virtual reality arthroscopy simulator relevance in characterising experienced surgeons*  
**TRONCHOT A, BERTHELEMY J, THOMAZEAU H, HUAULME A, WALBRON P, SIRVEAUX F, JANNIN P**  
Orthop Traumatol Surg Res. 2021 Sep 28:103079. doi: 10.1016/j.otsr.2021.103079. Epub ahead of print. PMID : 34597826.

# LISTE DES COMMUNICATIONS ASSOCIEES AU PROJET DE RECHERCHE

## 2024

- Conférence didactique : *Nouveaux outils d'apprentissage en Chirurgie Orthopédique*  
**TRONCHOT A, GUNEPIN F-X**  
Congrès du GECO, Bourg-Saint-Maurice (France), Janvier 2024
- Conférence didactique : *Intérêt de la simulation VR sur la gestion de la fréquence cardiaque et du stress des internes lors d'une évaluation des compétences techniques arthroscopiques : étude prospective observationnelle appariée*  
**TRONCHOT A, COMMON H, MAXIMEN J, CASY T, THOMAZEAU H, JANNIN P, HUAULMÉ A**  
Congrès annuel de la Société Française d'Arthroscopie (SFA), Session Bonus Recherche & IA, Bordeaux (France), Décembre 2024

## 2023

- Conférence didactique : *Simulator VR rotator cuff repair training improves the overall ease of the procedure: A randomized, controlled and multicentric transfer validity study*  
**VALLEE N, TRONCHOT A, CASY T, THOMAZEAU H, JANNIN P, MAXIMEN J, HUAULME A**  
Congrès de l'ISAKOS, Boston (Etats-Unis), Juin 2023
- Conférence didactique : *"Virtual reality arthroscopy simulator relevance for the meniscus"*  
**COLOMBET P, TRONCHOT A**  
ACL Study Group, Basseterre (Saint-Kitts-et-Nevis), Janvier 2023

## 2022

- Conférence didactique : *"La simulation, ce n'est pas pour les pigeons !"*  
**TRONCHOT A**  
Journée du Jeune Arthroscopiste de la SFA, Paris (France), Avril 2022
- Conférence didactique : *Virtual reality simulation in the learning of a procedure in arthroscopic knee surgery: diagnosis and partial meniscectomy*  
**TRONCHOT A, CASY T, VALLEE N, COMMON H, THOMAZEAU H, JANNIN P, HUAULME A**  
Congrès de l'ESSKA, Paris (France), Avril 2022
- Conférence didactique : *Analyse des mouvements des articulations de chirurgiens orthopédiques de différentes expertises au cours d'un exercice sur simulateur*  
**CASY T, TRONCHOT A, THOMAZEAU H, MORANDI X, JANNIN P, HUAULME A**  
Congrès RITS, Brest (France), Mai 2022
- Conférence didactique : *"Stand-up straight !": Human pose estimation to evaluate postural skills during orthopedic surgery simulations*

CASY T, **TRONCHOT A**, THOMAZEAU H, MORANDI X, JANNIN P, HUAULME A  
Congrès CARS, Tokyo (Japon), Juin 2022

- Conférence didactique : “*Virtual reality arthroscopy simulator relevance for the meniscus*”.  
**TRONCHOT A**  
Surgical Education Session, The Meniscus Congress, Luxembourg (Luxembourg), Juillet 2022

## 2021

- Prix Innovation Pédagogique en Chirurgie de l’Académie Nationale de Chirurgie. « *Place de l'apprentissage de la chirurgie arthroscopique utilisant la simulation en réalité virtuelle à propos d'un geste : la méniscectomie* ».  
**TRONCHOT A**  
Pré-sélection, Journée de la Recherche Clinique Chirurgicale de l’Académie Nationale de Chirurgie, Paris (France), Décembre 2021
- Table Ronde : « *IA et enseignement - IA et formation procédurale en arthroscopie : état des lieux et perspectives* »  
**TRONCHOT A**  
Congrès annuel de la Société Française d’Orthopédie et de Traumatologie (SOFOT), Paris (France), Novembre 2021
- Table Ronde : « *Jamais la première fois sur le patient, toujours la première fois en simulation* ».  
**TRONCHOT A**  
Congrès Sant’Expo, Salon International Santé & Innovation par la Fédération Hospitalière de France, Paris (France), Novembre 2021
- Conférence d’enseignement : *Simulation chirurgicale : Simulateurs d’arthroscopie, programmes d’entraînements*  
**TRONCHOT A**, THOMAZEAU H, JANNIN P  
Journées CAOS FRANCE, e-congrès, Juin 2021
- Best-Of CAOS : *PROJET MENISIM - Classification des performances par analyse des trajectoires lors d’une procédure d’arthroscopie du genou sur simulateur VR*  
**TRONCHOT A**, THOMAZEAU H, JANNIN P  
Journées CAOS FRANCE, e-congrès, Juin 2021

## 2019

- *Kinematic performance on virtual reality arthroscopy simulator correlates with experience level using clustering*  
**TRONCHOT A**, BERTHELEMY J, LE DUFF M, HUAULMÉ A, COMMON H, WALBRON P, SIRVEAUX F, THOMAZEAU H, JANNIN P  
Congrès annuel de la Société Française d’Arthroscopie (SFA) Research Day, Rennes (France), Décembre 2019

# LISTE DES POSTERS ASSOCIEES AU PROJET DE RECHERCHE

## 2023

- *Virtual Reality Simulation is valuable for arthroscopic diagnosis and meniscectomy: a transfer validity study of 36 residents*  
**TRONCHOT A, CASY T, VALLEE N, COMMON H, THOMAZEAU H, JANNIN P, HUAULME A**  
Congrès de l'ISAKOS, Boston (Etats-Unis), Juin 2023

## 2022

- *La simulation procédurale par réalité virtuelle pour l'exploration arthroscopique du genou et la méniscectomie : étude en validité de transfert de 36 internes*  
**TRONCHOT A, CASY T, VALLEE N, COMMON H, THOMAZEAU H, JANNIN P, HUAULME A**  
Congrès SoFraSimS, Lyon (France), Juin 2022

## 2021

- *Classification des performances par analyse des trajectoires lors d'une procédure d'arthroscopie du genou sur simulateur VR*  
**TRONCHOT A, HUAULME A, THOMAZEAU H, JANNIN P**  
Congrès SoFraSimS, Juin 2021

## 2019

- *Kinematic performance on virtual reality arthroscopy simulator correlates with experience level using clustering*  
**TRONCHOT A, BERTHELEMY J, LE DUFF M, HUAULMÉ A, COMMON H, WALBRON P, SIRVEAUX F, THOMAZEAU H, JANNIN P**  
Congrès annuel de la Société Française d'Arthroscopie (SFA) - Research Day, Rennes (France), Décembre 2019

# LISTE DES ANNEXES

## ANNEXE 1

### PROTOCOLE D'ENTRAÎNEMENT SUR SIMULATEUR VR

⇒ SESSION D'ENTRAÎNEMENT N°1 (\*commun pour les 2 groupes, VR et NON-VR)

- MODULE FAST
  - *Horizon*
  - *Centering*
  - *Telescoping*
  - *Periscoping*
  - *Image centering and Periscoping*
  - *Image Probing* (wide field of view)
  - *Remove the stars*
- MODULE GENOU (\*DROIT)
  - *Guided Diagnostic arthroscopy II*
  - *Guided Meniscectomy II* (x3)

⇒ **SESSION D'ENTRAÎNEMENT N°2**

- MODULE FAST
  - *Centering*
  - *Telescoping*
  - *Tracing the lines*
  - *Periscoping*
  - *Image centering and Periscoping*
  - *Image Probing, wide field of view*
  - *Removing the stars*
- MODULE GENOU
  - *Diagnostic Tour II*
  - *Diagnostic Tour II & Palpation*
  - *Hook all rings*
  - *Catch the stars*

⇒ **SESSION D'ENTRAÎNEMENT N°3**

○ MODULE FAST

- *Telescoping*
- *Traces the lines*
- *Image centering and Periscoping*
- *Collect the stars*

○ MODULE GENOU

- *AANA Guided Diagnostic*
- *Diagnostic Tour II & Palpation (\*sans fléchage guidée)*
- *Catch the stars I*
- *Diagnostic X (palpation d'une lésion périphérique du ménisque médial, réponse à un questionnaire) (\*sans la vue d'aide)*
- *Synovitis I (avec couteau à synoviale)*

⇒ **SESSION D'ENTRAÎNEMENT N°4**

- MODULE FAST
  - *Image centering and Periscoping* (arthroscope tenue par **la main gauche**)
  - *Image centering* (arthroscope tenue par **la main droite**)
  - *Image centering and Periscoping* (arthroscope tenue par **la main droite**)
  - *Image Probing, wide field of view* (arthroscope tenue par **la main droite**)
- MODULE GENOU
  - *Diagnostic Tour II*
- MODULE EPAULE
  - *Guided Diagnostic Tour Glenohumeral*
  - *Guided Diagnostic Tour Subacromial*
  - *Diagnostic Tour II & Palpation*
  - *Catch the stars I*

⇒ **SESSION D'ENTRAÎNEMENT N°5**

○ MODULE FAST

- *Image centering and Periscoping* (arthroscope tenue par **la main gauche**)
- *Remove the stars* (arthroscope tenue par **la main gauche**)
- *Image centering and Periscoping* (arthroscope tenue par **la main droite**)
- *Remove the stars* (arthroscope tenue par **la main droite**)

○ MODULE GENOU

- *AANA Guided Diagnostic & Palpation*
- *Guided Meniscectomy II*
- *Diagnostic XVII (palpation d'une « ramp » du ménisque médial par voie postéromédial, réponse à un questionnaire) (\*sans la vue d'aide)*
- *Medial Meniscectomy*, arthroscope tenue par **la main droite** (*exploration diagnostique puis méniscectomie partielle du ménisque médial*)
- *Bonus Exercise (exploration diagnostique avec 5 corps étrangers à retirer)*

## ANNEXE 2

<div style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; width: 40px; height: 40px; display: flex; align-items: center; justify-content: center; margin: 0 auto;"> <span style="font-size: 24px; font-weight: bold;">1</span> </div>	<b>Formulaire d'Évaluation Globale des Compétences en Arthroscopie ASSET-FR</b> <i>(Arthroscopic Surgical Skill Evaluation Tool)</i>
<b>1 - DEROULE SPECIFIQUE DES PROCEDURES EVALUEES</b>	

### 1A – MENISCECTOMIE SUR MAQUETTE SAWBONE

Résection méniscale standardisée / Ménissectomie partielle postérieure	Complété ?	
Mesure au crochet 1 cm de ménisque ( <i>pour information, le crochet palpeur mesure 5mm</i> )	<input type="checkbox"/> Oui	<input type="checkbox"/> Non
Montre les limites du segment postérieur du ménisque	<input type="checkbox"/> Oui	<input type="checkbox"/> Non
Teste la stabilité de tout le ménisque du segment postérieur au segment antérieur	<input type="checkbox"/> Oui	<input type="checkbox"/> Non
Dessine au crochet les limites de la ménissectomie d'1 cm de longueur et d'une demi-largeur en profondeur que tu vas réaliser	<input type="checkbox"/> Oui	<input type="checkbox"/> Non
Réalise cette ménissectomie à la pince emporte-pièce (pince « basket »)	<input type="checkbox"/> Oui	<input type="checkbox"/> Non
Régularise les berges de la ménissectomie	<input type="checkbox"/> Oui	<input type="checkbox"/> Non

### 1B- ARTHROSCOPIE DIAGNOSTIQUE SUR GENOU ANATOMIQUE

Arthroscopie diagnostique du genou	Complété ?	
Inspecter le cul-de-sac sous-quadricipital	<input type="checkbox"/> Oui	<input type="checkbox"/> Non
Inspecter et palper la patella (médial/latéral ; distal/proximal)	<input type="checkbox"/> Oui	<input type="checkbox"/> Non
Inspecter et palper la gorge trochléenne	<input type="checkbox"/> Oui	<input type="checkbox"/> Non
Inspecter la gouttière latérale	<input type="checkbox"/> Oui	<input type="checkbox"/> Non
Inspecter le tendon poplité et le récessus poplité	<input type="checkbox"/> Oui	<input type="checkbox"/> Non
Inspecter la gouttière médiale en repassant par le cul-de-sac sous-quadricipital	<input type="checkbox"/> Oui	<input type="checkbox"/> Non
Inspecter et palper le condyle fémoral médial	<input type="checkbox"/> Oui	<input type="checkbox"/> Non
Inspecter et palper le plateau tibial médial	<input type="checkbox"/> Oui	<input type="checkbox"/> Non
Inspecter et palper le ménisque médial (segments antérieur, moyen et postérieur)	<input type="checkbox"/> Oui	<input type="checkbox"/> Non
Inspecter et palper le Ligament Croisé Antérieur (LCA) / le Ligament Croisé Postérieur (LCP)	<input type="checkbox"/> Oui	<input type="checkbox"/> Non
Inspecter et palper le condyle fémoral latéral	<input type="checkbox"/> Oui	<input type="checkbox"/> Non
Inspecter et palper le plateau tibial latéral	<input type="checkbox"/> Oui	<input type="checkbox"/> Non
Inspecter et palper le ménisque latéral (segments antérieur, moyen et postérieur)	<input type="checkbox"/> Oui	<input type="checkbox"/> Non

### 1C- MENISCECTOMIE SUR GENOU ANATOMIQUE

Résection méniscale standardisée / Ménissectomie partielle	Complété ?	
Mesure au crochet 1 cm de ménisque ( <i>pour information, le crochet palpeur mesure 5mm</i> )	<input type="checkbox"/> Oui	<input type="checkbox"/> Non
Montre les limites du segment postérieur du ménisque	<input type="checkbox"/> Oui	<input type="checkbox"/> Non
Teste la stabilité de tout le ménisque du segment postérieur au segment antérieur	<input type="checkbox"/> Oui	<input type="checkbox"/> Non
Dessine au crochet les limites de la ménissectomie d'1 cm de longueur et d'une demi-largeur en profondeur que tu vas réaliser	<input type="checkbox"/> Oui	<input type="checkbox"/> Non
Réalise cette ménissectomie à la pince emporte-pièce (pince « basket »)	<input type="checkbox"/> Oui	<input type="checkbox"/> Non
Régularise les berges de la ménissectomie	<input type="checkbox"/> Oui	<input type="checkbox"/> Non

<b>Formulaire d'Évaluation Globale des Compétences en Arthroscopie ASSET-FR</b> <i>(Arthroscopic Surgical Skill Evaluation Tool)</i>		
<b>ÉCHELLE D'ÉVALUATION GLOBALE</b> <b>ARTHROSCOPIE DIAGNOSTIQUE</b>		<b>Date de l'évaluation :</b> ... / ... / ...
<b>Votre Numéro d'Examineur :</b>	<b>Identifiant du participant :</b>	<b>Numéro de la procédure :</b>

Instructions : Pour chaque domaine de compétence, ENTOURER UN ÉNONCÉ dans chaque ligne décrivant le mieux dans quelle mesure l'opérateur a exécuté chaque aspect de cette procédure.

	<i>1 – Débutant</i>	<i>2</i>	<i>3 - Compétent</i>	<i>4</i>	<i>5 - Expert</i>
<b>Sécurité</b>	Dégâts importants du cartilage ou des tissus mous		Dégâts mineurs du cartilage ou des tissus mous		Pas de dégât du cartilage ou des tissus mous
<b>Champ de Vision</b>	Champ de vision étroit, positionnement inadéquat de l'arthroscope et/ou du foroblique		Champ de vision acceptable, positionnement adéquat de l'arthroscope et/ou du foroblique		Champ de vision étendu, positionnement optimal de l'arthroscope et/ou du foroblique
<b>Dextérité de la caméra</b>	Mouvements maladroits ou sans grâce, ne parvient pas à garder la caméra centrée et correctement orientée		Utilisation appropriée de la caméra, doit parfois se repositionner		Gracieux et habile tout au long de la procédure, avec une caméra toujours centrée et correctement orientée
<b>Dextérité instrumentale</b>	Maladroit avec les instruments, incapable d'orienter systématiquement les instruments vers la cible		Utilisation prudente et contrôlée des instruments, manque occasionnellement la cible		Utilisation sûre et précise de tous les instruments
<b>Coordination bimanuelle</b>	Incapacité à coordonner ses deux mains ou absence de coordination entre ses deux mains		Utilise ses deux mains mais échoue parfois à coordonner les mouvements de la caméra et des instruments		Utilise les deux mains pour coordonner le positionnement de la caméra et des instruments afin d'obtenir des performances optimales
<b>Fluidité de la procédure</b>	Arrêts fréquents, persiste sans progrès, nombreuses tentatives infructueuses avant d'achever les tâches		Progression régulière de la procédure opératoire avec peu de tentatives infructueuses avant d'achever les tâches		Déroulement évident de la procédure, transition fluide d'une tâche à l'autre sans aucune tentative infructueuse
<b>Qualité de la procédure</b>	Résultat final inadéquat ou incomplet		Résultat final adéquat, défauts mineurs qui ne nécessitent pas de correction		Résultat final optimal et sans défaut
	<i>1</i>		<i>2</i>		<i>3</i>
<b>Complexité ajoutée à la procédure</b>	Aucune difficulté		Difficulté modérée (légèrement inflammatoire et/ou tissus cicatriciels)		Difficulté extrême (inflammatoire et/ou tissus cicatriciels importants, anatomie non conventionnelle)
<b>Autonomie</b>	Impossible de terminer la procédure même avec une ou plusieurs assistances		Capable de mener à bien la procédure mais nécessitant une ou plusieurs assistances		Capable de mener à bien la procédure sans assistance

Selon vous, quel était le niveau de compétence de l'interne pour exécuter cette procédure ? (Faire une marque verticale sur la ligne pour indiquer la compétence)

Aucune compétence |-----| Extrêmement compétent

**Titre :** Place de l'apprentissage de la chirurgie arthroscopique utilisant la simulation en réalité virtuelle à propos d'un geste : la ménissectomie

**Mots clés :** Formation chirurgicale – Simulation – Orthopédie - Arthroscopie

**Résumé :** L'apprentissage de l'arthroscopie par simulation tend à s'imposer dans les programmes nationaux de formation procédurale en chirurgie orthopédique. Son évolution vers la réalité virtuelle (VR) offre un outil à la frontière entre réalités théorique et pratique et, surtout, inlassablement reproductible. Mais bien qu'il y ait de plus en plus d'articles scientifiques parlant de l'intérêt de la simulation VR en chirurgie arthroscopique, peu rapportent sa validité lors de la transposition des performances du simulateur vers le patient réel. Nous avons pu conduire différentes études dans un cadre structuré couplant de façon innovante formation et recherche en pédagogie afin d'évaluer la pertinence de ces simulateurs dans la formation initiale du chirurgien orthopédiste. L'objectif de la première étude fut de caractériser l'expertise chirurgicale sur simulateur VR d'arthroscopie à travers une analyse approfondie et innovante des trajectoires instrumentales.

L'objectif de la seconde étude fut de confirmer l'acquisition et la transposition des compétences arthroscopiques de base du simulateur VR sur sujet anatomique d'un groupe d'internes en phase socle issus de notre réseau inter-régional dans le cadre d'une exploration arthroscopique diagnostique et ménissectomie partielle médiale guidée du genou. L'objectif de la troisième étude fut d'analyser le gain en compétences non techniques grâce à cet apprentissage structuré notamment sur la gestion du stress en analysant la variabilité de fréquence cardiaque. L'un de nos objectifs futurs est de pouvoir transposer ces programmes structurés d'entraînement à d'autres apprentissages procéduraux notamment en réalité virtuelle immersive.

**Title :** Place of virtual reality simulation for the learning of arthroscopic surgery about one procedure : menisectomy

**Keywords:** Surgical Training – Simulation – Orthopaedics - Arthroscopy

**Abstract:** Simulation-based arthroscopy training is becoming an established part of national orthopaedic surgery procedural training programs. Its evolution towards virtual reality (VR) offers a tool at the frontier between theoretical and practical realities and, above all, tirelessly reproducible. But although there are a growing number of scientific articles talking about the value of VR simulation in arthroscopic surgery, few report its validity when transposing simulator performance to the real patient. We have been able to conduct a number of studies within a structured framework that combines training and pedagogical research in an innovative way, in order to assess the relevance of these simulators in the initial training of orthopaedic surgeons. The aim of the first study was to characterize surgical expertise on a VR arthroscopy simulator, using an in-depth

innovative analysis of instrumental trajectories. The aim of the second study was to confirm the acquisition and transposition of the VR simulator's basic arthroscopic skills to an anatomical subject by a group of base-phase interns from our inter-regional network, in the context of diagnostic arthroscopic exploration and guided partial medial menisectomy of the knee. The aim of the third study was to analyze the gain in non-technical skills thanks to this structured training, in particular stress management, by analyzing heart rate variability. One of our future objectives is to transpose these structured training programs to other procedural learning, notably in immersive virtual reality.