



**HAL**  
open science

# Retour Haptique et Acquisition des Compétences Chirurgicales : Impacts sur la Performance lors de la Formation en Environnement Immersif

Intissar Cherif, Amine Chellali, Mohamed Chaouki Babahenini, Samir Otmane

## ► To cite this version:

Intissar Cherif, Amine Chellali, Mohamed Chaouki Babahenini, Samir Otmane. Retour Haptique et Acquisition des Compétences Chirurgicales : Impacts sur la Performance lors de la Formation en Environnement Immersif. 35e Conférence Internationale Francophone sur l'Interaction Humain-Machine (IHM 2024), AFIHM; Sorbonne Université, Mar 2024, Paris, France. hal-04487296

**HAL Id: hal-04487296**

**<https://hal.science/hal-04487296v1>**

Submitted on 3 Mar 2024

**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.

## **Haptic Feedback and Surgical Skills Acquisition: Impacts on Performance during Training in an Immersive Environment**

### **Retour Haptique et Acquisition des Compétences Chirurgicales : Impacts sur la Performance lors de la Formation en Environnement Immersif**

Intissar, Cherif

Laboratoire IBISC, Université d'Évry Paris-Saclay, France, intissar.cherif@universite-paris-saclay.fr

Laboratoire LESIA, Université de Biskra, Algérie, intissar.cherif@univ-biskra.dz

Amine, Chellali

Laboratoire IBISC, Université d'Évry Paris-Saclay, France, amine.chellali@univ-evry.fr

Mohamed Chaouki, Babahenini

Laboratoire LESIA, Université de Biskra, Algérie, mc.babahenini@univ-biskra.dz

Samir, Otmame

Laboratoire IBISC, Université d'Évry Paris-Saclay, France, samir.otmane@univ-evry.fr

While previous research has focused on the graphical aspects of surgical immersive simulators, the role of haptic feedback is still underexplored. Our study investigates the impact of haptic feedback on acquiring technical skills during training in an immersive environment. The results show that participants' starting performance was lower with haptic feedback, but the latter led to a higher rate of performance improvement. These results suggest that haptic feedback may make it more challenging to learn technical skills in an immersive environment, but it allows for better long-term performance improvement. This research opens new research perspectives on the role of haptic feedback on surgical skills acquisition in immersive environments.

**CCS CONCEPTS** • Human-centered computing—Virtual Reality, Human-centered computing— Haptic devices, Human-centered computing— User studies.

**Additional Keywords and Phrases:** Virtual Reality, Surgical training, Haptic feedback.

Alors que des recherches antérieures se sont concentrées sur les aspects graphiques des simulateurs chirurgicaux immersifs, le rôle du retour haptique reste encore à explorer. Notre étude examine l'impact du retour haptique sur l'acquisition de compétences techniques lors d'une formation en environnement immersif. Les résultats montrent que les performances des participants étaient meilleures sans retour haptique mais que ce dernier a conduit à un taux d'amélioration des performances plus élevé. Ces résultats suggèrent que le retour haptique peut rendre plus difficile l'acquisition de compétences techniques dans un environnement immersif. Cependant, il permet une meilleure amélioration des performances sur le long terme. Cette recherche ouvre de nouvelles perspectives concernant le rôle du retour haptique dans l'acquisition des compétences chirurgicales en environnements immersifs.

**Mots-clés additionnels :** Réalité virtuelle, Formation chirurgicale, Retour Haptique.

#### **Reference:**

Intissar Cherif, Amine Chellali, Mohamed Chaouki Babahenini et Samir Otmame. Retour Haptique et Acquisition des Compétences Chirurgicales : Impacts sur la Performance lors de la Formation en Environnement Immersif. *IHM'24 : Actes étendus de la 35ème conférence Francophone sur l'Interaction Humain-Machine, March 25–29, 2024, Paris, France.*

## 1 INTRODUCTION

Les simulateurs de réalité virtuelle (RV) ont émergé comme des outils pédagogiques essentiels pour la formation chirurgicale, offrant un apprentissage sécurisé et efficace à différents niveaux de formation [1, 2, 3, 4]. Plusieurs études [5, 6, 7, 8, 9] ont validé leur efficacité, notant une amélioration des compétences techniques, de la précision chirurgicale et une réduction de la charge cognitive. L'efficacité de ces simulateurs dépend du transfert des compétences acquises dans l'environnement virtuel (EV) dans les tâches du monde réel, avec une importance particulière accordée à la fidélité du simulateur [10, 11, 12].

Dans la conception des simulateurs de réalité virtuelle (RV), la fidélité de l'interaction, en particulier la fidélité haptique, est souvent négligée [13]. Des études indiquent que le retour haptique approprié améliore l'acquisition de compétences chirurgicales comme le contrôle des instruments et la manipulation des tissus [2, 14], tandis que son absence peut nuire à la performance et à l'expérience utilisateur [15]. Le concept de fidélité haptique est d'autant plus crucial dans le développement de l'automatisation des compétences chirurgicales, permettant aux chirurgiens d'effectuer des tâches complexes tout en gérant simultanément plusieurs fonctions cognitives [10]. Toutefois, la littérature offre des perspectives nuancées sur l'efficacité du retour haptique dans les simulateurs chirurgicaux [2, 16].

Notre étude aspire à contribuer à cette discussion en examinant spécifiquement le rôle du retour haptique dans l'acquisition des compétences chirurgicales de base au sein d'un environnement immersif. En développant un simulateur centré sur une tâche de transfert bimanuel d'anneaux, avec et sans retour haptique, nous visons à offrir une analyse empirique qui pourrait enrichir le corpus scientifique sur la nécessité et l'efficacité du retour haptique pour la formation chirurgicale.

Cette recherche est importante car elle examine non seulement l'efficacité initiale de l'apprentissage, mais aussi son évolution dans le temps. Elle vise à comprendre les facteurs affectant la formation chirurgicale en environnement immersif. Les résultats pourraient influencer la conception de futurs simulateurs chirurgicaux et les programmes de formation.

## 2 ETAT DE L'ART

Avec l'intérêt croissant pour l'amélioration des simulateurs chirurgicaux en RV, plusieurs études ont examiné l'effet de l'intégration du retour haptique dans ces systèmes.

Certaines recherches ont suggéré que le retour haptique peut être particulièrement avantageux pour les tâches complexes nécessitant des niveaux élevés de précision et une manipulation complexe des outils [14, 17]. Les décisions des chirurgiens activent et informent diverses actions motrices, y compris des mouvements très fins de translation et de rotation des instruments, qui sont cruciaux pour traiter une anatomie complexe. Ainsi, offrir des sensations de force réalistes améliore le sens du toucher, aidant les chirurgiens en formation à mieux comprendre les propriétés des tissus, la manipulation des instruments et les contraintes physiques des procédures chirurgicales. En effet, fournir trop peu ou trop de retour pourrait probablement entraîner des effets négatifs sur la formation [2]. L'étude de Gani et al. [18] renforce cette idée en démontrant que dans la formation chirurgicale orthopédique, les groupes formés avec retour haptique affichent une plus grande précision et des techniques plus sûres, notamment dans le forage osseux.

L'étude de Hagelsteen et al. [19] a montré un impact positif du retour haptique et de la vision 3D sur l'apprentissage laparoscopique en RV, surtout pour les tâches nécessitant une perception de profondeur. Brickler et al. [13] ont trouvé une amélioration significative dans la coordination perception-action en chirurgie laparoscopique avec le retour haptique combiné à la vision stéréoscopique. De même, de Boer et al. [20] ont observé de meilleures performances et

une plus grande satisfaction chez les apprenants en chirurgie dentaire utilisant le simulateur Simodont avec retour haptique.

Cependant, l'étude de Collaço et al. [21] a révélé que dans la formation en anesthésie dentaire, les participants formés avec et sans retour haptique présentaient des niveaux similaires de perception tactile, suggérant un rôle dominant de la perception visuelle. De même, l'étude de Salkini et al. [16] a indiqué que l'inclusion du retour haptique n'entraînait pas d'améliorations significatives des performances en laparoscopie, notamment en termes de précision et d'économie de mouvement. Une autre étude sur la formation à la cholécystectomie laparoscopique réalisée par Thompson et al. [22], a conclu que le retour haptique avait un impact limité sur la performance globale.

En résumé, la revue précédente offre une vision complexe et multi facettes du rôle du retour haptique dans la formation chirurgicale. D'une part, il existe des études soutenant les avantages potentiels de l'intégration du retour haptique, en particulier lorsqu'il est combiné avec d'autres modalités sensorielles comme la vision 3D stéréoscopique [13, 18, 19, 20]. D'autre part, des études [16, 21, 22] remettent en question son efficacité et suggèrent que des indices visuels peuvent suffire ou même surpasser le retour haptique dans certains contextes. De manière significative, l'influence du retour haptique semble être soumise à divers facteurs, incluant mais sans s'y limiter, la complexité de la tâche, les exigences spécifiques de la procédure, la durée de l'utilisation du système, et le niveau d'expertise du participant.

Étant donné ces conclusions variées, des recherches supplémentaires sont nécessaires pour distinguer les effets du retour haptique des autres stimuli sensoriels afin de mieux comprendre où le retour haptique est le plus utile ou moins efficace.

### 3 ETUDE EXPÉRIMENTALE

Cette étude préliminaire vise à examiner de manière systématique l'impact du retour haptique pendant la formation sur simulateur immersif, sur la réalisation d'un geste technique de base, similaire à ceux utilisés en chirurgie. Le focus principal est sur l'évaluation de la courbe d'apprentissage associée. En conséquence, notre étude cherche à répondre à cette question de recherche:

**QR** : Les participants formés sur un simulateur immersif avec et sans retour haptique présentent-ils des différences dans l'évolution de leur performance sur ce geste technique au fil du temps sur le système ?

Pour aborder cette question de recherche, nous avons mis en place un programme de formation sur deux semaines, offrant une expérience d'apprentissage immersive et approfondie pour une évaluation précise de la courbe d'apprentissage. Notre design expérimental comprend deux groupes avec et sans retour haptique. Basés sur nos objectifs et notre revue de la littérature, nous avons formulé une hypothèse spécifique concernant les performances attendues des deux groupes.

**(H)** : On s'attend à ce que le groupe avec retour haptique ait un progrès plus rapide et plus constant de sa performance sur le simulateur en RV par rapport au groupe sans retour haptique. Le retour de force en RV peut enrichir l'apprentissage en offrant des indices haptiques supplémentaires qui sont susceptibles d'améliorer la conscience spatiale et la coordination œil-main, essentiels pour la réalisation des gestes techniques en chirurgie, favorisant ainsi une performance accrue dans le simulateur immersif.

#### 3.1 Participants

Seize personnes (8 hommes, 8 femmes, âge moyen  $\approx$  25 ans,  $\sigma \approx$  3,18) ont participé à notre étude (N = 16). Ce nombre de participants est supérieur à la taille minimale de l'échantillon (n=10) déterminée via G\*Power pour une taille d'effet de

0.4. Recrutés parmi les étudiants et le personnel universitaire, tous étaient novices dans la tâche expérimentale. La majorité (14) étaient droitiers, 10 portaient des lunettes correctrices, et 15 avaient de l'expérience avec les jeux vidéo. Dix participants avaient déjà utilisé des casques de RV, et six avaient déjà eu une expérience avec des dispositifs haptiques mais essentiellement à travers des démonstrations ou des participations à d'autres études expérimentales. Ils ont été répartis aléatoirement en deux groupes : un avec retour de force (RF) et un sans retour de force (NF).

Le Comité d'éthique de la recherche de [caché pour assurer l'anonymat de la soumission] a validé le protocole expérimental. L'étude a respecté les normes éthiques requises, et tous les participants ont signé un formulaire de consentement éclairé avant leur inclusion dans l'étude.

### 3.2 Environnement virtuel

Le prototype du simulateur immersif (Figure 1) comprenait un ordinateur avec un CPU Intel(R) Xeon(R) Silver 4214R, une carte graphique NVIDIA GeForce RTX 3080, et 32 Go de RAM. Deux dispositifs haptiques Geomagic Touch, offrant des mouvements sur 6 degrés de liberté et un retour de force sur 3 degrés de liberté (en translation), ont été utilisés pour interagir avec les objets virtuels. Ils ont un espace de travail d'environ 16cm (largeur) x 12cm (hauteur) x 7cm (profondeur). Le casque Meta Quest 2, avec une résolution de 1832 x 1920 par œil et un taux de rafraîchissement de 72 Hz, a été utilisé pour visualiser l'environnement 3D développé sous Unity 2019 avec C#. L'environnement comprenait une table virtuelle, une plateforme avec douze tiges, deux outils virtuels, et six rondelles. Les tiges étaient associées par paires avec des codes couleurs. Les participants manipulaient les rondelles en utilisant les dispositifs haptiques, avec un retour de force généré lors des collisions entre les objets virtuels (groupe RF uniquement), intégré dans Unity via le plugin Unity 5 Haptic pour Geomagic OpenHaptics 3.3. Pour prendre une rondelle, les participants devaient mettre l'outil en contact avec l'objet à manipuler, puis appuyer et maintenir le bouton du dispositif haptique. L'objet était alors collé à l'outil simulant l'utilisation d'un électroaimant et pouvait être manipulé librement. Pour placer l'objet, les participants devaient simplement relâcher le bouton.

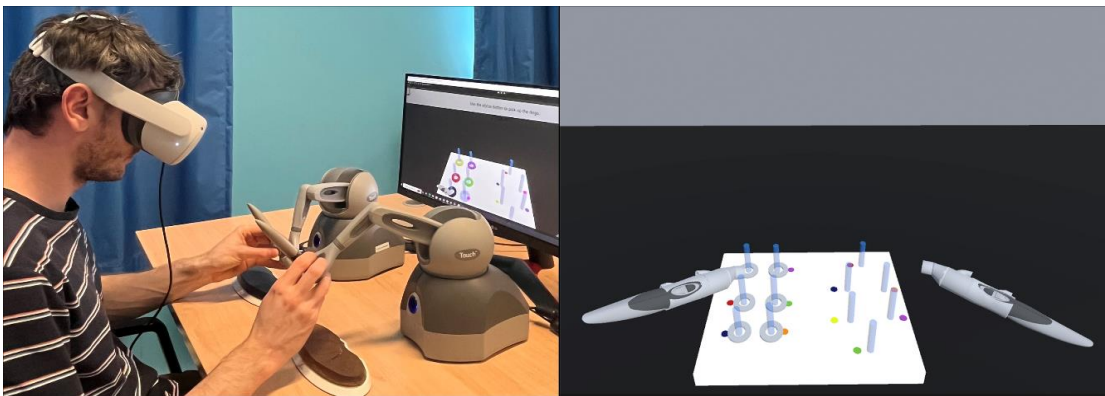


Figure 1 : (à gauche) Dispositif expérimental : l'utilisateur porte un casque de RV et manipule 2 interfaces haptiques. (à droite) Environnement virtuel composé d'une table virtuelle, une plateforme de support avec douze tiges, deux outils virtuels, et six rondelles virtuelles.

### 3.3 Tâche expérimentale

Dans le cadre de notre étude, les participants devaient s'entraîner à la réalisation d'une tâche de transfert d'anneaux (Ring Transfer), dans un EV. Cette tâche est classiquement utilisée pour l'apprentissage des gestes techniques de base en chirurgie [23, 24, 25]. Pour cette tâche, les participants ont utilisé le prototype pour effectuer une séquence de manipulations bimanuelles d'objets 3D, nécessitant une grande coordination œil-main. La tâche consistait à saisir des rondelles colorées à l'aide d'un outil contrôlé par la main gauche, les transférer à un outil contrôlé par la main droite, puis les placer sur des tiges de couleur correspondante de l'autre côté de la plateforme virtuelle. Les participants avaient la liberté de choisir l'ordre de transfert des rondelles, et en cas de chute, ils pouvaient les ramasser uniquement si elles tombaient sur la plateforme. Après avoir placé correctement toutes les rondelles du côté droit, ils devaient répéter la tâche dans le sens inverse. Cette double séquence exigeait une dextérité bimanuelle et une coordination des gestes entre les deux mains. Dans la condition expérimentale haptique (groupe RF), les participants pouvaient ressentir des forces le long des trois DdL sur chaque dispositif, leur permettant de percevoir les poids des rondelles manipulés, ainsi que des collisions entre les outils, les rondelles, les tiges, et la plateforme. Dans l'autre condition (groupe NF), le retour haptique était désactivé offrant ainsi une expérience d'apprentissage différente.

### 3.4 Procédure expérimentale

Au début de l'expérience, les participants ont signé un formulaire de consentement éclairé et rempli un questionnaire démographique. Ils ont visionné une vidéo explicative sur la tâche à réaliser dans l'EV, garantissant un niveau d'information uniforme. Les groupes RF et NF ont ensuite commencé la phase d'entraînement dans l'EV, comprenant neuf sessions de 10 minutes chacune, réparties sur neuf jours en deux semaines. Les participants s'entraînaient à transférer des rondelles pour développer leurs compétences. La procédure expérimentale est illustrée dans la Figure 2.

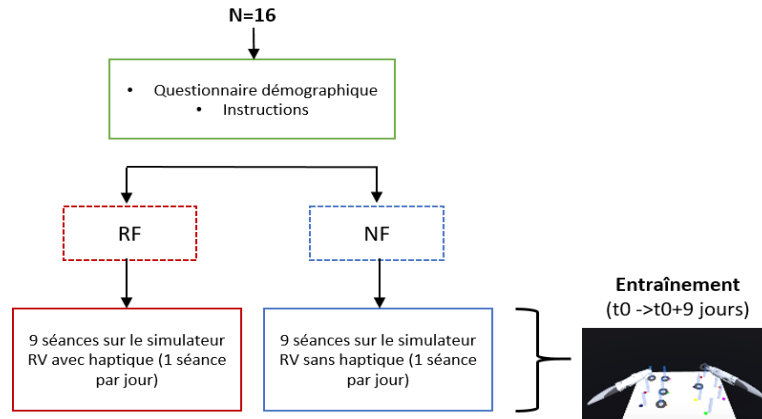


Figure 2 : Résumé de la procédure expérimentale

### 3.5 Collecte et Analyse de Données

#### 1.1.1 Collecte de Données

Pour cette étude, les mesures de performance comprenaient le temps total nécessaire pour accomplir la tâche (de la saisie de la première rondelle jusqu'à la pose de la dernière) et le nombre total d'erreurs commises (le nombre de rondelles tombaient pendant leur transfert). Ces données étaient automatiquement enregistrées sur des fichiers texte par l'application.

### 1.1.2 Analyse des Données

L'analyse statistique des données a été effectuée à l'aide du logiciel SPSS (version 23.0), avec un seuil de confiance fixé à 95%. Des tests de Shapiro-Wilk ont été utilisés pour vérifier les distributions normales des données de temps d'achèvement de la tâche et le nombre d'erreurs. Le test de Levene a été utilisé pour évaluer l'homogénéité des variances, tandis que le test de Mauchly a été appliqué pour évaluer la sphéricité des données. En fonction de ces vérifications préliminaires, des analyses de variance (ANOVA) mixtes à deux facteurs ont été utilisées. En effet, l'expérience suivait un plan mixte 2x9 à deux facteurs, avec un facteur inter-sujets (le groupe) à deux niveaux : RF et NF ; et un facteur intra-sujets (la séance d'entraînement) à neuf niveaux : séance 1 à séance 9. La correction de Greenhouse-Geisser a été utilisée en cas de non-respect de l'hypothèse de sphéricité. Les comparaisons par paires avec ajustements de Bonferroni ont été utilisées lorsque cela était nécessaire.

## 4 RÉSULTATS

### 4.1 Temps de réalisation de la tâche

Les résultats de l'ANOVA mixte à deux facteurs 2x9 (sphéricité non assumée,  $p < .0001$ , correction de Greenhouse-Geisser utilisée) montrent qu'il y avait une interaction significative entre la séance de formation et le groupe ( $F_{(2,00, 28,04)} = 14,14$ ,  $p < .0001$ ,  $\eta^2$  partiel = 0,50), indiquant que les temps de réalisation de la tâche changent au fil des séances d'une manière différente entre les deux groupes (Figure 3). Ce résultat indique que l'amélioration des performances entre la première et la dernière séance de formation des participants du groupe RF (58%) a été significativement plus importante que celle des participants du groupe NF (46%). Les résultats montrent également un effet principal significatif de la séance de formation sur la performance de la tâche ( $F_{(2,00, 28,04)} = 47,680$ ,  $p < .0001$ ,  $\eta^2$  partiel = 0,77) et un effet principal significatif du groupe ( $F_{(1, 14)} = 32,62$ ,  $p < .0001$ ,  $\eta^2$  partiel = 0,70).

Des analyses des effets principaux simples ont été effectuées pour vérifier si les effets principaux peuvent être interprétés. À cette fin, des séries de comparaisons par paires ont été réalisées. Les résultats montrent que la différence entre les groupes RF et NF était significative sur l'ensemble des neuf séances d'entraînement ( $p$ -ajustée  $< .01$  pour toutes les comparaisons par paires), les performances étant toujours meilleures dans le groupe NF par rapport au groupe RF. Cela suggère que l'effet principal du groupe peut être interprété et indique que le groupe NF a surpassé le groupe RF pendant toutes les séances d'entraînement sur le simulateur immersif. Les analyses des effets principaux simples n'étaient pas significatives pour la séance de formation, et par conséquent, l'effet principal de la séance d'essai n'a pas été interprété.

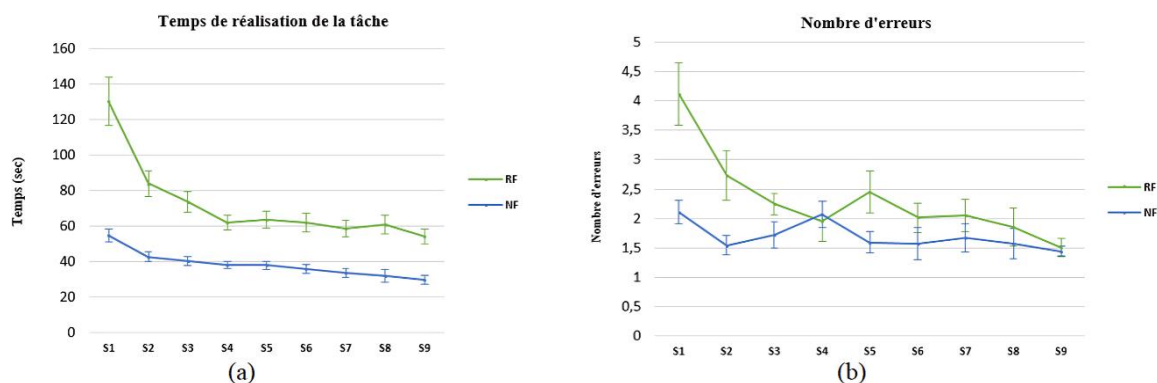


Figure 3 : (a) Temps de réalisation et (b) Nombre d'erreurs de la tâche lors des séances de formation sur le simulateur VR (Les barres d'erreur dans la Figure 3 représentent l'erreur type)

## 4.2 Nombre d'erreurs

Les résultats de l'ANOVA mixte à deux facteurs 2x9 (sphéricité non assumée,  $p < .0001$ , correction de Greenhouse–Geisser utilisée) montrent qu'il y avait une interaction significative entre la séance de formation et le groupe ( $F_{(1.70, 23.80)} = 4.11$ ,  $p = .035$ ,  $\eta^2$  partiel = 0,22), indiquant que le changement dans le nombre d'erreurs au fil du temps diffère entre les groupes (Figure 3). Ce résultat indique que l'amélioration des performances entre la première et la dernière séance de formation (72%) des participants du groupe RF a été significativement plus importante que pour les participants du groupe NF (31%). De plus, il y avait un effet principal significatif de la séance de formation sur la performance d'erreur ( $F_{(1.70, 23.80)} = 6.73$ ,  $p = .007$ ,  $\eta^2$  partiel = .32) et un effet principal significatif du groupe ( $F_{(1, 14)} = 5.13$ ,  $p = .04$ ,  $\eta^2$  partiel = 0,26).

Comme pour les données de temps de réalisation de la tâche, des analyses des effets principaux simples ont été effectuées pour vérifier si les effets principaux peuvent être interprétés. À cette fin, une série de comparaisons par paires a été réalisée. Les résultats montrent que la différence entre les groupes RF et NF n'était pas significative sur l'ensemble des neuf séances de formation. Cela suggère que l'effet principal de la séance ne devrait pas être interprété. Les analyses des effets principaux simples n'ont pas montré de différences significatives pour la variable groupe, et donc, l'effet principal du groupe n'a pas été interprété.

## 5 DISCUSSION ET CONCLUSIONS

### 5.1 Discussion

L'objectif de notre étude était d'évaluer l'impact du retour de force sur l'apprentissage des gestes techniques de bases dans un simulateur immersif. Pour ce faire, nous avons développé un simulateur immersif pour une tâche bimanuelle de transfert d'anneaux, avec et sans retour haptique, pour une analyse comparative. Les résultats révèlent des différences significatives dans les trajectoires d'apprentissage entre les groupes avec et sans retour haptique. Initialement, le groupe avec retour haptique présentait des temps de réalisation plus longs et des taux d'erreur plus élevés, probablement dus à la complexité et à la charge cognitive supplémentaire introduites par le retour haptique. Les contraintes de collision, inhérentes à la condition haptique, peuvent avoir ajouté une couche de complexité nécessitant des participants une conscience spatiale et une précision accrue, contribuant ainsi à leur progression initialement plus lente. Toutefois, ce groupe a montré une amélioration notable tant pour les temps de réalisation de la tâche que pour les taux d'erreurs au fil des sessions, indiquant un apprentissage accéléré grâce au guidage haptique. En revanche, le groupe sans retour haptique, bien que commençant avec de meilleures performances, a progressé plus lentement potentiellement dus à l'absence de contraintes liées au retour haptique et à un environnement de tâche initial plus simple.

L'étude a révélé que le retour haptique augmente la complexité dans la formation en RV, mais conduit à des gains de performance significatifs, indiquant une courbe d'apprentissage abrupte et la nécessité de périodes de formation plus longues. Malgré les défis initiaux, le retour haptique offre une courbe d'apprentissage unique caractérisée par une phase d'adaptation initiale suivie d'une amélioration rapide des performances, validant ainsi notre hypothèse de départ.

Plusieurs études ont établi l'importance fondamentale du retour haptique dans les simulateurs chirurgicaux en RV pour l'efficacité de la formation, en se concentrant sur la transférabilité des compétences du virtuel au réel. Des recherches, telles que celles de Zhou et al. [26] et de Chmarra et al. [27], ont montré que le retour haptique peut améliorer l'apprentissage laparoscopique, mais des questions subsistent sur sa transférabilité à long terme vers des tâches chirurgicales réelles. L'étude de Våpenstad et al. [28] a révélé des limites, notamment que les compétences acquises avec



retour haptique en RV ne se traduisent pas toujours efficacement en compétences cliniques. Ces travaux mettent en évidence le potentiel et les défis de l'intégration du retour haptique en formation chirurgicale en RV, soulignant la nécessité de futures recherches sur le transfert et la rétention des compétences, ainsi que sur l'impact du retour haptique sur le réalisme et l'efficacité de la formation.

## 5.2 Implications pour la conception des simulateurs immersifs

Nos résultats confirment l'efficacité des environnements immersifs en RV pour la formation chirurgicale et soulignent le rôle complexe du retour haptique, qui reste à explorer. Bien que l'intégration du retour haptique puisse initialement complexifier l'utilisation des simulateurs, elle favorise une courbe d'apprentissage accélérée. Nous recommandons donc son inclusion dans les simulateurs de gestes techniques de base, accompagnée d'une période de prise en main et d'entraînement plus longue afin pour d'atteindre des niveaux de performance optimaux.

## 5.3 Limites et perspectives

Notre étude a des limitations, notamment l'utilisation d'une tâche simplifiée qui pourrait sous-estimer l'utilité du retour haptique dans des tâches chirurgicales plus complexes. En effet, le retour de force lors de la manipulation des rondelles pendant la tâche expérimentale a été essentiellement utile pendant le transfert des rondelles d'une main à l'autre (la rondelle devait être au contact de l'outil destination afin d'être transférée correctement) et lors de leur placement sur les tiges (l'utilisateur devait localiser le trou sur la rondelle afin de la placer correctement). Le retour visuel pendant la réalisation de ces deux sous-tâches a probablement aidé les participants à compenser le manque du retour haptique. D'autres tâches, ou le retour visuel aura moins d'impact devront être testées afin de mieux isoler l'impact du retour haptique pendant l'apprentissage.

Dans nos travaux futurs, nous envisageons d'examiner de manière approfondie l'impact du retour haptique sur le transfert et la rétention de l'apprentissage. Plus spécifiquement, nous souhaitons évaluer comment l'intégration du retour haptique dans les environnements de formation en RV pourrait affecter la mémoire à long terme des compétences techniques acquises, ainsi que leur applicabilité dans des situations réelles. Ainsi, les objectifs de nos futures études seront de mieux comprendre, non seulement l'impact du retour haptique sur l'amélioration des performances immédiates dans des tâches simulées, mais également si ces améliorations sont durables et transférables à des tâches du monde réel.

De plus, nous prévoyons d'adapter la complexité des tâches chirurgicales dans le simulateur pour mieux refléter les exigences des interventions chirurgicales du monde réel. Ces études nous permettront de concevoir des simulateurs immersifs mieux adaptés aux besoins des apprenants et permettant une meilleure acquisition des compétences chirurgicales techniques de base.

## REFERENCES

- [1] Karan Rangarajan, Heather Davis, and Philip H. Pucher. March 2020. Systematic Review of Virtual Haptics in Surgical Simulation: A Valid Educational Tool? *Journal of Surgical Education*, 77, 337–347.
- [2] Timothy R. Coles, Dwight Meglan, and Nigel W. John. January 2011. The Role of Haptics in Medical Training Simulators: A Survey of the State of the Art. *IEEE Transactions on Haptics*, 4, 51–66.
- [3] Venkata S. Arikatla, Ganesh Sankaranarayanan, Woojin Ahn, Amine Chellali, Suvranu De, G. L. Caroline, John Hwabejire, Marc DeMoya, Steven Schwaizberg, and Daniel B. Jones. December 2012. Face and construct validation of a virtual peg transfer simulator. *Surgical Endoscopy*, 27, 1721–1729.
- [4] Jonathan Balcombe. January 2004. Medical Training using Simulation: Toward Fewer Animals and Safer Patients. *Alternatives to Laboratory Animals*, 32, 553–560.

- [5] C. E. Buckley, E. Nugent, D. Ryan, and P. C. Neary. 2012. Virtual Reality – A New Era in Surgical Training. In *Virtual Reality in Psychological, Medical and Pedagogical Applications*. InTech.
- [6] Neal E. Seymour, Anthony G. Gallagher, Sanziana A. Roman, Michael K. O'Brien, Vipin K. Bansal, Dana K. Andersen, and Richard M. Satava. October 2002. Virtual Reality Training Improves Operating Room Performance. *Annals of Surgery*, 236, 458–464.
- [7] Peng Yu, Junjun Pan, Zhaoxue Wang, Yang Shen, Jialun Li, Aimin Hao, and Haipeng Wang. February 2022. Quantitative influence and performance analysis of virtual reality laparoscopic surgical training system. *BMC Medical Education*, 22.
- [8] S. Haque and S. Srinivasan. January 2006. A Meta-Analysis of the Training Effectiveness of Virtual Reality Surgical Simulators. *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, 10, 51–58.
- [9] Eugenia Yiannakopoulou, Nikolaos Nikiteas, Despina Perrea, and Christos Tsigris. January 2015. Virtual reality simulators and training in laparoscopic surgery. *International Journal of Surgery*, 13, 60–64.
- [10] Aylene Ricca, Amine Chellali, and Samir Otrane. March 2021. The influence of hand visualization in tool-based motor-skills training, a longitudinal study. In *2021 IEEE Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, IEEE.
- [11] Thomas Stoffregen, Randy Pagulayan, L. Smart, and Benoit Bardy. 2003. On the Nature and Evaluation of Fidelity in Virtual Environments. In *Virtual and Adaptive Environments* CRC Press.
- [12] Hettinger Lawrence J. and Haas Michael W., eds. 2003. *Virtual and Adaptive Environments: Applications, Implications, and Human Performance Issues*. CRC Press.
- [13] David Brickler, Matias Volonte, Jeffrey W. Bertrand, Andrew T. Duchowski, and Sabarish V. Babu. March 2019. Effects of Stereoscopic Viewing and Haptic Feedback, Sensory-Motor Congruence and Calibration on Near-Field Fine Motor Perception-Action Coordination in Virtual Reality. In *2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, IEEE.
- [14] Lucian Panait, Ehab Akkary, Robert L. Bell, Kurt E. Roberts, Stanley J. Dudrick, and Andrew J. Duffy. October 2009. The Role of Haptic Feedback in Laparoscopic Simulation Training. *Journal of Surgical Research*, 156, 312–316.
- [15] Amine Chellali, Helena Mentis, Amie Miller, Woojin Ahn, Venkata S. Arikatla, Ganesh Sankaranarayanan, Suvranu De, Steven D. Schwartzberg, and Caroline G. L. Cao. December 2016. Achieving interface and environment fidelity in the Virtual Basic Laparoscopic Surgical Trainer. *International Journal of Human-Computer Studies*, 96, 22–37.
- [16] Mohamad W. Salkini, Charles R. Doarn, Nicholai Kiehl, Timothy J. Broderick, James F. Donovan, and Krishnanath Gaitonde. January 2010. The Role of Haptic Feedback in Laparoscopic Training Using the LapMentor II. *Journal of Endourology*, 24, 99–102.
- [17] Hyun K. Kim, David W. Rattner, and Mandayam A. Srinivasan. January 2004. Virtual-reality-based laparoscopic surgical training: The role of simulation fidelity in haptic feedback. *Computer Aided Surgery*, 9, 227–234.
- [18] Abrar Gani, Oliver Pickering, Caroline Ellis, Omar Sabri, and Philip Pucher. November 2022. Impact of haptic feedback on surgical training outcomes: A Randomised Controlled Trial of haptic versus non-haptic immersive virtual reality training. *Annals of Medicine*
- [19] Kristine Hagelsteen, Anders Langegård, Adam Lantz, Mikael Ekelund, Magnus Anderberg, and Anders Bergenfelz. April 2017. Faster acquisition of laparoscopic skills in virtual reality with haptic feedback and 3D vision. *Minimally Invasive Therapy*
- [20] Ilse R. de Boer, Maxim D. Lagerweij, Merlijn W. de Vries, Paul R. Wesselink, and Johanna M. Vervoorn. April 2017. The Effect of Force Feedback in a Virtual Learning Environment on the Performance and Satisfaction of Dental Students. *Simulation in Healthcare: The Journal of the Society for Simulation in Healthcare*, 12, 83–90.
- [21] Elen Colloço, Elisabeti Kira, Lucas H. Sallaberry, Anna C. M. Queiroz, Maria A. A. M. Machado, Oswaldo Crivello Jr, and Romero Tori. November 2020. Immersion and haptic feedback impacts on dental anesthesia technical skills virtual reality training. *Journal of Dental Education*, 85, 589–598.
- [22] Jonathan R. Thompson, Anthony C. Leonard, Charles R. Doarn, Matt J. Roesch, and Timothy J. Broderick. September 2010. Limited value of haptics in virtual reality laparoscopic cholecystectomy training. *Surgical Endoscopy*, 25, 1107–1114.
- [23] Jason Y. Lee, Phillip Mucksavage, David C. Kerbl, Victor B. Huynh, Mohamed Etafy, and Elspeth M. McDougall. March 2012. Validation Study of a Virtual Reality Robotic Simulator—Role as an Assessment Tool? *Journal of Urology*, 187, 998–1002.
- [24] Thomas S. Lendvay, Pasquale Casale, Robert Sweet, and Craig Peters. July 2008. Initial validation of a virtual-reality robotic simulator. *Journal of Robotic Surgery*, 2, 145–149.
- [25] Jesse S. L. Hu, Jirong Lu, Wee Boon Tan, and Davide Lomanto. July 2015. Training improves laparoscopic tasks performance and decreases operator workload. *Surgical Endoscopy*, 30, 1742–1746.
- [26] M. Zhou, S. Tse, A. Derevianko, D. B. Jones, S. D. Schwartzberg, and C. G. L. Cao. November 2011. Effect of haptic feedback in laparoscopic surgery skill acquisition. *Surgical Endoscopy*, 26, 1128–1134.
- [27] Magdalena K. Chmarra, Jenny Dankelman, John J. van den Dobbela, and Frank-Willem Jansen. April 2008. Force feedback and basic laparoscopic skills. *Surgical Endoscopy*, 22, 2140–2148.

- [28] Cecilie Våpenstad, Erlend Fagertun Hofstad, Lars Eirik Bø, Esther Kuhry, Gjermund Johnsen, Ronald Mårvik, Thomas Langø, and Toril Nagelhus Hernes. May 2017. Lack of transfer of skills after virtual reality simulator training with haptic feedback. *Minimally Invasive Therapy*