

Quelles sont les limites des simulations haptiques et immersives dans l'apprentissage des gestes médicaux ?

Mémoire bibliographique fait par Francesca EL HELOU
Tutrice : Mme. Florence ZARA
Université Lyon 1

Quelles sont les limites des simulations haptiques et immersives dans l'apprentissage des gestes médicaux ?

Abstract

Les technologies de réalité virtuelle (VR), de réalité augmentée (AR), de réalité mixte (MR) et les dispositifs de retour haptique occupent une place croissante dans la formation chirurgicale. En offrant des environnements immersifs et reproductibles, ces outils permettent aux apprenants de développer leurs compétences techniques dans un contexte sécurisé avant leur exposition au bloc opératoire. L'objectif de cette revue narrative est de présenter les principales applications des simulations haptiques en chirurgie, d'analyser leurs limites actuelles et d'explorer les perspectives de développement futures. Une revue de la littérature a été réalisée à partir d'articles scientifiques récents portant sur les technologies immersives et le retour haptique appliqués à la formation chirurgicale. Les travaux sélectionnés concernent principalement la chirurgie mini-invasive, la chirurgie ouverte ainsi que les principaux dispositifs de simulation actuellement disponibles. Les études montrent que les simulations haptiques améliorent l'apprentissage des gestes techniques, en particulier lors de l'entraînement laparoscopique, et permettent une évaluation plus objective des performances lorsqu'elles intègrent des indicateurs quantitatifs. Toutefois, plusieurs limites persistent, notamment concernant le réalisme biomécanique des tissus, la qualité du retour haptique, la latence des systèmes, les technologies de suivi spatial (tracking), le coût élevé des dispositifs, ainsi que la validation clinique et la transférabilité des compétences vers la pratique opératoire réelle. Les perspectives actuelles s'orientent vers le développement de simulateurs plus réalistes, multimodaux et personnalisés, intégrant des modèles biomécaniques avancés, des données expérimentales, l'intelligence artificielle et des environnements collaboratifs associant réalité virtuelle, augmentée et mixte. Malgré les progrès importants réalisés ces dernières années, la reproduction fidèle des interactions physiques, sensorielles et décisionnelles rencontrées au cours d'une intervention chirurgicale demeure un défi majeur. Les avancées technologiques attendues devraient néanmoins contribuer à renforcer la qualité de la formation des futurs professionnels de santé.

Mots-clés : simulation haptique ; réalité virtuelle ; réalité augmentée ; réalité mixte ; chirurgie ; formation chirurgicale ; retour de force.

Introduction

Dans le domaine de la chirurgie et de la médecine, l'expérience du praticien joue un rôle essentiel dans la qualité des soins et le déroulement des interventions. En effet, plus un chirurgien maîtrise un geste technique ou une procédure spécifique, plus le risque de complications diminue et plus la prise en charge du patient est optimisée. Or, l'acquisition de ces compétences repose principalement sur la répétition et la pratique, rendant l'entraînement aux gestes chirurgicaux et médicaux indispensable dans la formation des professionnels de santé.

De plus, l'évolution actuelle des pratiques médicales accorde une importance croissante au confort du patient, notamment à travers le développement de procédures mini-invasives nécessitant des incisions plus petites, des manipulations plus précises et une maîtrise gestuelle toujours plus fine. [3]

Face à cette problématique, de nombreux chercheurs se sont intéressés au développement de nouvelles méthodes de simulation et d'apprentissage. Ces dernières années, l'essor des technologies immersives, regroupées sous le terme d'*Extended Reality* (XR) et incluant la réalité virtuelle (VR), la réalité augmentée (AR) et la réalité mixte (MR), a profondément transformé le domaine de la simulation chirurgicale. Ces technologies permettent aujourd'hui de créer des environnements interactifs capables de reproduire, avec un niveau de fidélité croissant, les gestes, les interactions et les sensations associées à la pratique médicale réelle. [3]

Parmi ces avancées, les simulations haptiques occupent une place particulièrement importante. Grâce au retour haptique, ces systèmes cherchent à reproduire les sensations tactiles et les

interactions de force rencontrées lors des procédures médicales et chirurgicales, dans le but d'améliorer l'apprentissage moteur et la précision gestuelle des utilisateurs. [3]

Dans ce mémoire, nous présenterons tout d'abord les principes fondamentaux des simulations haptiques ainsi que leurs principaux domaines d'application dans le secteur médical. Ces technologies reposent sur une idée centrale : permettre aux apprenants de s'entraîner à réaliser des gestes techniques en toute sécurité, sans risque pour le patient, tout en offrant la possibilité de reproduire une grande variété de situations cliniques. Cela inclut aussi bien des cas simples et usuels que des situations plus complexes, rarement rencontrées lors d'un apprentissage classique. Nous aborderons ensuite les bénéfices apportés par ces technologies dans l'apprentissage des gestes chirurgicaux, avant de nous intéresser plus particulièrement à leurs limites actuelles, qui constituent le point central de ce travail. Enfin, nous discuterons brièvement des perspectives futures de ces technologies avant de conclure.

Les technologies immersives en chirurgie

Qu'est-ce que l'Extended Reality (XR) ?

Les technologies de réalité virtuelle (VR), de réalité augmentée (AR) et de réalité mixte (MR) sont regroupées sous le terme d'*Extended Reality* (XR). Bien qu'elles partagent l'objectif commun d'améliorer l'interaction entre l'utilisateur et les informations numériques, elles diffèrent par le degré d'intégration entre l'environnement réel et l'environnement virtuel. [3]

Réalité virtuelle (VR)

La réalité virtuelle (*Virtual Reality*, VR) est une technologie immersive qui plonge

entièrement l'utilisateur dans un environnement numérique généré par ordinateur, généralement à l'aide d'un casque de réalité virtuelle et de dispositifs d'interaction. L'utilisateur est ainsi isolé du monde réel et interagit uniquement avec l'environnement virtuel. [3]

Exemple en médecine : la simulation laparoscopique permet aux étudiants en chirurgie de s'entraîner à manipuler des instruments chirurgicaux dans un bloc opératoire virtuel. [1]

Réalité augmentée (AR)

La réalité augmentée (*Augmented Reality*, AR) consiste à superposer des informations virtuelles au monde réel sans le remplacer. L'utilisateur continue de percevoir son environnement physique tout en visualisant des éléments numériques complémentaires. [3]

Exemple en médecine : l'affichage en temps réel de la position d'une tumeur ou de structures anatomiques à partir d'images scanner directement sur le patient pendant une intervention chirurgicale. [3]

Réalité mixte (MR)

La réalité mixte (*Mixed Reality*, MR) combine les caractéristiques de la réalité virtuelle et de la réalité augmentée en permettant aux objets virtuels et réels

d'interagir entre eux en temps réel. Les éléments numériques sont intégrés à l'environnement physique et peuvent être manipulés comme s'ils étaient réellement présents. [3]

Exemple en médecine : la visualisation et la manipulation d'un modèle 3D du cerveau ou du cœur d'un patient directement dans la salle d'opération afin de planifier ou guider une intervention chirurgicale. [3]

Ainsi, les technologies XR ne se limitent pas à la création d'environnements virtuels. Elles cherchent surtout à améliorer l'interaction entre l'utilisateur, les informations numériques et, dans le cas de la médecine, les gestes techniques à apprendre ou à reproduire. Parmi ces différentes technologies, les simulations haptiques occupent une place particulière, car elles cherchent à restituer une dimension essentielle de la pratique chirurgicale : le sens du toucher. Elles constituent aujourd'hui l'un des principaux leviers pour améliorer le réalisme des environnements immersifs. [3]

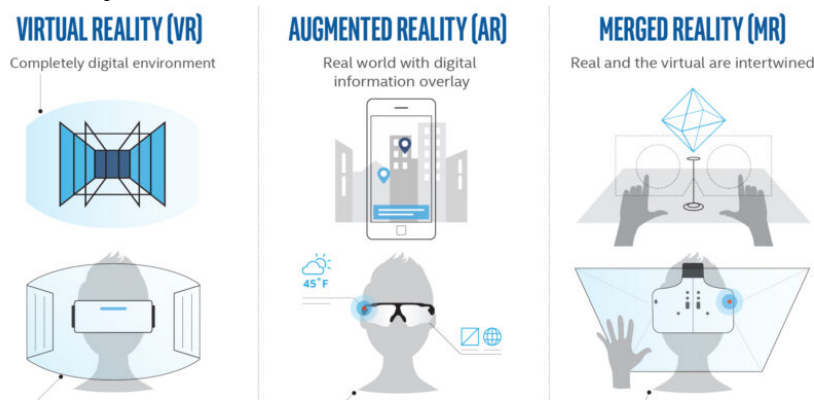


Figure 1 : Schématisation de la différence entre VR, AR et MR.

Source : <https://www.appliedart.com/blog/vr-ar-or-mr-whats-the-difference-why-should-i-care>

Les simulations haptiques

Au sein des technologies immersives, la simulation haptique occupe une place essentielle. La simulation haptique (*haptic simulation*) désigne l'ensemble des technologies permettant de reproduire artificiellement les sensations tactiles et les interactions de force afin de permettre à l'utilisateur de « ressentir » les objets virtuels et les manipulations réalisées dans un environnement numérique. [1]

Cette technologie repose principalement sur l'utilisation de dispositifs à retour de force (*force-feedback devices*) capables de convertir les mouvements de l'utilisateur en interactions avec des objets virtuels, tout en renvoyant des forces ou des résistances simulant les propriétés physiques des tissus ou des instruments chirurgicaux. [1]

D'un point de vue technique, les simulations haptiques utilisent des modèles physiques, notamment des systèmes de ressorts et d'amortissement (*spring-damper models*), afin de créer un couplage virtuel entre les actions de l'utilisateur et les objets numériques. [1]

Dans le cadre des simulations chirurgicales, ces systèmes permettent notamment de reproduire les interactions entre un instrument médical et les tissus biologiques, en simulant la déformation des tissus, leur résistance ou encore les forces générées lors du contact. [1]

L'objectif principal est ainsi de proposer une expérience immersive plus réaliste et d'améliorer l'apprentissage moteur et gestuel des professionnels de santé. [1]

Applications médicales des technologies immersives

Chirurgie mini-invasive

La chirurgie mini-invasive constitue aujourd'hui l'un des principaux domaines d'application des technologies immersives. Les chirurgiens y opèrent indirectement à l'aide d'instruments longs et d'un retour visuel fourni par une caméra. Cette dépendance aux informations visuelles et haptiques rend ces procédures particulièrement compatibles avec les systèmes de réalité virtuelle et de retour de force. [1,3]

Les simulations haptiques semblent particulièrement adaptées aux procédures mini-invasives. En effet, lors de ces interventions, le chirurgien interagit déjà avec les tissus par l'intermédiaire d'instruments chirurgicaux et d'un retour visuel indirect fourni par un écran. Cette similarité entre les conditions réelles et les modalités d'interaction proposées par les systèmes de réalité virtuelle contribue probablement à la prédominance actuelle des simulateurs VR dans la formation chirurgicale. [1,3]

Dans ce contexte, plusieurs outils ont été développés pour l'entraînement laparoscopique. Parmi eux, les *Box Trainers* correspondent à des dispositifs physiques permettant aux apprenants de manipuler de véritables instruments chirurgicaux dans une boîte d'entraînement. Ils offrent un retour haptique réaliste, car l'utilisateur interagit avec des objets ou tissus réels, mais nécessitent généralement la présence d'un observateur pour évaluer la performance. Malgré le développement rapide des simulateurs de réalité virtuelle, les *Box Trainers* restent aujourd'hui une référence importante pour l'apprentissage des compétences laparoscopiques. Le programme *Fundamentals of Laparoscopic Surgery* (FLS), basé sur ce type

d'entraînement, est d'ailleurs largement utilisé comme outil standardisé d'évaluation des compétences en laparoscopie. [9]

Cependant, les données de la littérature restent nuancées concernant la supériorité des simulateurs VR avec retour haptique par rapport aux *Box Trainers*. Si l'ajout d'un retour haptique semble améliorer l'efficacité des simulateurs VR comparativement aux dispositifs VR dépourvus d'haptique, les études ne montrent pas toujours de différence significative entre les simulateurs VR haptiques et les *Box Trainers* en termes d'apprentissage. Cette observation suggère que la réalité virtuelle haptique constitue un outil prometteur, mais qu'elle ne remplace pas encore clairement les méthodes d'entraînement physiques déjà établies. [9]



Figure 2 : Exemple d'un box trainer pour s'entraîner à la laparoscopie.

Source : <https://www.amazon.fr/Laparoscopy-Laparoscopic-Simulated-Instruments-Accessories/dp/B0BNYXT86M?th=1>

Chirurgie ouverte

Contrairement aux simulations de chirurgie mini-invasive, les simulations de chirurgie ouverte s'appuient davantage sur les technologies de réalité augmentée et de réalité mixte. Ces approches permettent

d'enrichir l'environnement réel du chirurgien en superposant des informations anatomiques ou fonctionnelles directement sur le champ opératoire. [3]

Dans ce contexte, les problématiques de suivi spatial (*tracking*) et d'intégration des données deviennent souvent plus importantes que le retour haptique lui-même. [3]

Méthodes d'évaluation utilisées dans la littérature

Les étudiants en médecine constituent la population la plus fréquemment étudiée dans les travaux portant sur les simulateurs chirurgicaux. En tant que véritables novices en chirurgie laparoscopique, ils présentent le plus fort potentiel d'apprentissage et permettent d'évaluer plus facilement les bénéfices des différents outils de simulation [1,9]

L'efficacité des simulateurs chirurgicaux est généralement évaluée à l'aide de plusieurs critères objectifs, notamment la courbe d'apprentissage, qui correspond à l'évolution des performances au fil de l'entraînement ; le gain immédiat de performance après l'entraînement (*learning effect*) ; ainsi que la capacité des compétences acquises à être transférées vers une situation chirurgicale réelle (*skill transfer*). [1,9]

Dans l'ensemble, ces travaux montrent que les technologies immersives occupent désormais une place importante dans la formation chirurgicale. Toutefois, si leurs bénéfices pédagogiques sont largement reconnus, leur capacité à reproduire fidèlement les conditions réelles d'une intervention reste encore limitée. Cette question constitue précisément l'enjeu central des limites présentées dans la partie suivante.

Les limites actuelles des simulations haptiques et immersives

Les progrès réalisés au cours des dernières années ont considérablement amélioré les performances des simulateurs chirurgicaux. Toutefois, malgré ces avancées, plusieurs limites techniques, biomécaniques et pédagogiques persistent encore. Aujourd'hui, le principal défi n'est plus de créer des simulateurs chirurgicaux immersifs, mais de reproduire fidèlement les conditions réelles de la pratique chirurgicale. La question n'est donc plus : « Peut-on réaliser de la simulation chirurgicale ? », mais plutôt : « Peut-on reproduire fidèlement les sensations, les tissus, les forces et les contraintes du geste chirurgical réel ? »

-> Limites du réalisme biomécanique

Malgré les progrès réalisés dans le domaine du rendu haptique, les interactions entre instruments chirurgicaux et tissus biologiques demeurent imparfaitement reproduites. Les modèles biomécaniques actuels ne permettent pas encore de simuler fidèlement l'ensemble des propriétés mécaniques et physiologiques rencontrées lors d'une intervention réelle.

Les tissus biologiques présentent des comportements mécaniques extrêmement complexes, variables et parfois encore mal compris. Les interactions entre instruments chirurgicaux et tissus nécessitent ainsi la prise en compte d'un très grand nombre de paramètres physiques, ce qui rend leur modélisation particulièrement difficile. [2]

Cette difficulté est également confirmée par des études d'évaluation auprès de chirurgiens expérimentés. Si certaines interactions, comme la manipulation de l'aiguille ou la réalisation d'un nœud, sont

jugées relativement réalistes, le passage de l'aiguille à travers les tissus demeure encore insuffisamment reproduit par les systèmes haptiques actuels. [4]

À cela s'ajoute une limite computationnelle importante : la puissance de calcul actuellement disponible reste insuffisante pour reproduire en temps réel l'ensemble des phénomènes physiques impliqués dans certaines procédures médicales complexes. [2]

Ces difficultés de modélisation influencent directement la qualité du retour haptique fourni à l'utilisateur, puisque celui-ci dépend des propriétés biomécaniques simulées en temps réel. [2]

-> Limites du retour haptique et de la latence

Le réalisme des simulations haptiques dépend fortement de la qualité du retour sensoriel fourni à l'utilisateur. Comme les composantes visuelles et auditives, le retour haptique nécessite une fréquence d'actualisation élevée afin de produire une sensation tactile fluide et réaliste. Alors que les systèmes visuels nécessitent généralement un taux de rafraîchissement d'au moins 30 Hz, les systèmes haptiques demandent des fréquences beaucoup plus élevées, souvent comprises entre 500 et 1000 Hz, afin d'assurer une interaction stable et crédible. [2]

Cependant, cette exigence technique s'accompagne d'un défi majeur : la latence. Même lorsque les performances matérielles sont élevées, un délai peut apparaître entre l'action de l'utilisateur et le retour visuel ou haptique fourni par le système. Cette latence peut résulter des temps de calcul, du rendu graphique, des traitements logiciels ou encore des délais de communication, notamment dans le cadre de la télé-chirurgie. Plusieurs études montrent qu'elle altère les performances motrices en diminuant la précision des gestes, et que son

impact devient d'autant plus important que la tâche chirurgicale est complexe et requiert une grande précision. La maîtrise de la latence constitue donc un enjeu majeur lors de la conception des simulateurs chirurgicaux. [5]

Une autre limite importante concerne les gestes chirurgicaux nécessitant l'application de forces élevées. Si les simulateurs haptiques sont déjà relativement développés pour des procédures impliquant de faibles forces, comme la laparoscopie ou l'endoscopie, ils restent beaucoup plus limités pour des interventions telles que l'arthroplastie de hanche, du genou ou de l'épaule. Dans ces situations, les forces réellement exercées peuvent dépasser les capacités de nombreux dispositifs haptiques classiques, ce qui limite fortement le réalisme de l'entraînement. [6]

Enfin, les capacités actuelles des interfaces de retour de force restent parfois insuffisantes pour reproduire fidèlement certaines interactions complexes ou les forces élevées rencontrées lors de certaines procédures chirurgicales. [6]

Au-delà de la qualité du retour sensoriel, une autre question essentielle concerne la manière dont les performances des apprenants sont évaluées pendant l'entraînement.

-> Limites de l'évaluation des performances

Une autre limite de certains simulateurs haptiques est l'absence d'une évaluation objective des performances. Bien qu'ils soient capables de reproduire des sensations tactiles réalistes, ils ne fournissent pas toujours de mesures quantitatives permettant d'évaluer précisément les compétences du praticien, telles que la précision des gestes, le temps d'exécution, la fluidité des mouvements ou les erreurs réalisées. Cette absence de retour objectif

peut limiter le suivi de la progression des apprenants et la standardisation de leur évaluation. [9]

-> Limites du *tracking*

Lorsque l'on aborde les simulations haptiques, il est difficile de ne pas évoquer les problématiques liées aux technologies de suivi spatial (*tracking*), particulièrement importantes dans les systèmes de réalité augmentée et de réalité mixte. [3]

Ces technologies nécessitent un suivi extrêmement précis des instruments chirurgicaux afin de permettre une intégration cohérente entre les éléments réels et virtuels. Plusieurs approches ont été développées, notamment les systèmes basés sur des marqueurs visuels, les dispositifs de suivi tridimensionnel ou encore les capteurs inertiels. [3]

Cependant, aucune solution de tracking n'est aujourd'hui parfaite. Les approches utilisant des marqueurs peuvent entraîner des contraintes de préparation, des risques de contamination ou des pertes de suivi. Les méthodes basées sur l'intelligence artificielle nécessitent quant à elles d'importantes bases de données, présentent parfois un manque de généralisation et demandent des ressources computationnelles considérables. [3]

Les technologies de *tracking* actuelles restent ainsi confrontées à plusieurs défis en termes de précision, de latence, de stabilité du suivi et d'intégration en temps réel des données. [3]

À ces contraintes technologiques s'ajoutent également des considérations matérielles et économiques qui freinent encore la diffusion de ces systèmes. [3]

-> Limites matérielles et économiques

Au-delà des limitations techniques, le coût élevé des dispositifs, leur faible portabilité et l'absence de standards industriels communs constituent également des freins majeurs à l'adoption généralisée des simulations chirurgicales immersives. [3]

Les simulateurs actuels nécessitent souvent du matériel spécialisé coûteux, ce qui limite leur déploiement à grande échelle. De plus, certains systèmes restent encombrants et nécessitent des installations complexes. [3]

Enfin, l'absence de standardisation constitue un défi supplémentaire. Chaque fabricant développe généralement ses propres dispositifs, logiciels et protocoles de communication, limitant ainsi l'interopérabilité entre les différents systèmes. [3]

-> Limites de la validité écologique et du réalisme procédural

Une autre limite importante concerne le périmètre même des simulations chirurgicales. Dans plusieurs domaines, notamment en neurochirurgie, les simulateurs avec retour haptique ne permettent pas encore de reproduire l'ensemble d'une intervention chirurgicale réelle. Ils se concentrent souvent sur une étape précise du geste, comme le *clipping* d'un anévrisme, la dissection, la ponction ou la manipulation d'un instrument, plutôt que sur la procédure complète allant de l'incision initiale à la fermeture. [8]

Cette restriction limite la validité écologique de ces outils, c'est-à-dire leur capacité à reproduire fidèlement les conditions globales d'une situation clinique réelle. En effet, une intervention chirurgicale ne repose pas uniquement sur un geste technique isolé, mais sur une succession d'étapes nécessitant une planification, une adaptation continue, une

gestion des imprévus et une coordination entre plusieurs informations sensorielles et anatomiques. Ainsi, même si ces simulateurs peuvent être utiles pour entraîner certains gestes spécifiques, ils ne remplacent pas encore l'apprentissage d'une procédure chirurgicale complète. [8]

Malgré l'amélioration constante des simulateurs VR, la transférabilité des compétences acquises vers le bloc opératoire réel reste encore discutée. Les environnements virtuels ne reproduisent qu'une partie des conditions rencontrées lors d'une intervention chirurgicale réelle, ce qui soulève des interrogations quant à leur capacité à remplacer totalement l'entraînement clinique. [9]

-> Limites de la validation clinique

Au-delà des limites liées au réalisme des sensations ou à la performance technique des dispositifs, une autre difficulté concerne la validation scientifique et clinique de ces simulateurs. Malgré le développement de simulateurs haptiques de plus en plus sophistiqués, peu d'études permettent encore de valider clairement leur efficacité clinique. Les résultats de la littérature restent parfois contradictoires, notamment concernant le réalisme du retour haptique et la transférabilité des compétences acquises vers le bloc opératoire. [9]

Cette absence de consensus doit toutefois être interprétée avec prudence. Les limites identifiées aujourd'hui ne doivent pas être considérées comme définitives, car l'évolution extrêmement rapide des dispositifs haptiques, des algorithmes biomécaniques et des technologies immersives rend les conclusions de la littérature rapidement obsolètes. Ainsi, les performances des simulateurs actuels ne reflètent pas nécessairement celles des générations futures. [4]

Pris ensemble, ces différents verrous montrent que le principal défi des

simulations haptiques ne réside plus uniquement dans la création d'environnements virtuels interactifs, mais dans leur capacité à reproduire fidèlement l'ensemble des interactions physiques, sensorielles et décisionnelles rencontrées au cours d'une intervention réelle. Les recherches actuelles s'orientent ainsi vers le développement de simulateurs toujours plus réalistes, personnalisés et capables d'intégrer plusieurs modalités sensorielles simultanément [3,7,1].

Perspectives futures

Les limites présentées précédemment ouvrent naturellement plusieurs pistes d'amélioration. Les recherches actuelles ne visent plus seulement à accroître le réalisme des simulations, mais également à améliorer leur accessibilité, leur capacité d'évaluation et leur intégration dans la pratique clinique.

5.1. Fusion des technologies VR, AR et MR

Les travaux futurs pourraient s'orienter vers le développement de plateformes de simulation plus immersives combinant différentes technologies de réalité virtuelle, augmentée et mixte. Les auteurs soulignent notamment l'intérêt de systèmes collaboratifs permettant à plusieurs utilisateurs d'interagir simultanément dans un même environnement virtuel, où un chirurgien expérimenté pourrait guider un apprenant en temps réel.[3]

5.2. Amélioration des modèles biomécaniques

Les recherches futures pourraient également s'orienter vers des approches hybrides combinant plusieurs méthodes de rendu haptique. En effet, certaines méthodes semblent plus adaptées à la simulation d'un contact dur, tandis que d'autres reproduisent mieux les mouvements de rotation ou les forces

progressives. L'association de plusieurs approches pourrait ainsi permettre d'améliorer le réalisme global des simulations, en adaptant le retour haptique aux caractéristiques spécifiques de chaque geste chirurgical. [6]

Une autre piste d'amélioration consiste à combiner les modèles biomécaniques traditionnels avec des données expérimentales mesurées directement lors d'interventions chirurgicales. Plutôt que de calculer uniquement les forces à partir des propriétés mécaniques théoriques des tissus, ces approches intègrent des profils de force enregistrés en conditions réelles afin d'enrichir le retour haptique. Cette stratégie pourrait permettre de reproduire plus fidèlement certains comportements mécaniques complexes, notamment les interactions non linéaires et les changements de topologie liés à la coupe des tissus. [7]

5.3. Intelligence artificielle et *Deep Learning*

L'intelligence artificielle pourrait également contribuer à l'amélioration des simulations haptiques, notamment en facilitant le suivi des instruments et l'alignement entre les dispositifs réels et leur représentation virtuelle. Des approches basées sur la reconnaissance d'objets ou le suivi par caméras pourraient permettre de réduire certaines erreurs de synchronisation entre les gestes réalisés et leur traduction dans l'environnement simulé. Ces méthodes restent toutefois encore à développer et à valider dans le cadre de la formation chirurgicale.[3]

5.4. Démocratisation et standardisation des dispositifs

Enfin, l'amélioration des simulateurs haptiques ne dépend pas uniquement des algorithmes, mais aussi de leur accessibilité. Les dispositifs actuels restent souvent coûteux, encombrants et difficiles à

standardiser, ce qui limite leur diffusion dans les centres de formation. Les prochaines générations de simulateurs devront donc viser une meilleure portabilité, une réduction des coûts et une plus grande compatibilité entre logiciels et matériels afin de favoriser leur intégration dans les cursus médicaux. [3,8,9]

5.5. Vers une simulation multimodale

Les perspectives futures ne concernent pas uniquement l'amélioration du retour haptique. Plusieurs travaux soulignent l'importance d'une approche multimodale intégrant également les indices visuels et auditifs, car les chirurgiens s'appuient sur l'ensemble de ces informations sensorielles pour guider leurs gestes. L'ajout de retours sonores réalistes, par exemple lors du sciage, du fraisage ou du martelage osseux, pourrait ainsi renforcer l'immersion et améliorer la fidélité des simulateurs chirurgicaux. [3,6,7]

Une autre perspective importante concerne le développement de simulations spécifiques au patient, afin d'adapter l'entraînement à l'anatomie propre de chaque cas clinique. Cette évolution permettrait de rapprocher davantage la simulation de la réalité opératoire et d'offrir une préparation plus personnalisée aux futurs chirurgiens. [1,3,7]

Les futurs simulateurs pourraient également intégrer des critères d'évaluation plus spécifiques au contrôle de la force. Au-delà du temps d'exécution et de la précision du mouvement, il serait pertinent de mesurer en temps réel la force appliquée, sa variabilité, les seuils de force dépassés ou encore les dommages tissulaires associés. Cette évolution permettrait de mieux entraîner les compétences haptiques proprement dites et de standardiser l'évaluation de la manipulation des tissus. [1,2]

Dans leur ensemble, ces différentes évolutions témoignent d'une volonté de rapprocher progressivement les simulateurs de la réalité opératoire. Si plusieurs défis restent encore à relever, les progrès réalisés ces dernières années laissent entrevoir des outils de formation toujours plus immersifs, personnalisés et adaptés aux besoins des futurs professionnels de santé.

Conclusion

Les simulations haptiques constituent aujourd'hui des outils prometteurs pour l'apprentissage des gestes chirurgicaux. Elles permettent aux apprenants de s'entraîner dans un environnement sécurisé, reproductible et progressivement plus réaliste. Toutefois, elles ne démontrent pas encore une supériorité claire par rapport aux méthodes traditionnelles d'entraînement, notamment les *Box Trainers*, en particulier dans les premières étapes de l'apprentissage.

Les limites actuelles concernent principalement la fidélité du retour haptique et la capacité des simulateurs à reproduire les sensations tactiles naturelles rencontrées lors d'une intervention réelle. Le « véritable sens du toucher » demeure ainsi l'un des principaux défis de la simulation haptique. De plus, les performances observées dépendent fortement de la complexité de la tâche simulée : certains gestes techniques, comme la suture intracorporelle, restent difficiles à maîtriser quel que soit le type de simulateur utilisé et nécessitent un entraînement prolongé.

Enfin, l'interprétation des résultats de la littérature doit rester prudente. L'évolution rapide des dispositifs haptiques, des modèles biomécaniques et des technologies immersives rend parfois difficiles les comparaisons entre les études, car les simulateurs actuels ne sont déjà plus comparables à ceux des générations précédentes. Ainsi, les limites identifiées aujourd'hui ne doivent pas être considérées

comme définitives, mais comme les principaux défis technologiques, biomécaniques et pédagogiques que les prochaines générations de simulateurs devront relever. Les progrès rapides de la réalité virtuelle, du rendu haptique, de l'intelligence artificielle et des modèles biomécaniques laissent envisager des systèmes toujours plus fidèles à la pratique chirurgicale réelle, capables de renforcer durablement la formation des professionnels de santé.

Références

- [1] Abinaya, P., & Manivannan, M. (2024). Haptic based fundamentals of laparoscopic surgery simulation for training with objective assessments. *Frontiers in Robotics and AI*, 11, Article 1363952. <https://doi.org/10.3389/frobt.2024.1363952>
- [2] Bjelland, Ø., Rasheed, B., Cherif, I., Dalen, A. F., Chellali, A., Steinert, M., & Bye, R. T. (2025). Haptic rendering using reality-based force profiles in surgical simulation. *IEEE Transactions on Haptics*, 18(3), 569–581. <https://doi.org/10.1109/TOH.2025.3570810>
- [3] Deng, Z., Xiang, N., & Pan, J. (2023). State of the art in immersive interactive technologies for surgery simulation: A review and prospective. *Bioengineering*, 10(12), Article 1346. <https://doi.org/10.3390/bioengineering10121346>
- [4] Hagelsteen, K., Johansson, R., Ekelund, M., Bergenfelz, A., & Anderberg, M. (2019). Performance and perception of haptic feedback in a laparoscopic 3D virtual reality simulator. *Minimally Invasive Therapy & Allied Technologies*, 28(5), 309–316. <https://doi.org/10.1080/13645706.2018.1539012>
- [5] Kaber, D. B., Li, Y., Clamann, M., & Lee, Y.-S. (2012). Investigating human performance in a virtual reality haptic simulator as influenced by fidelity and system latency. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics—Part A: Systems and Humans*, 42(6), 1562–1566. <https://doi.org/10.1109/TSMCA.2012.2201466>
- [6] Lorenz, M., Hoffmann, A., Kaluschke, M., Ziadeh, T., Pillen, N., Kusserow, M., Perret, J., Knopp, S., Dettmann, A., Klimant, P., Zachmann, G., & Bullinger, A. C. (2023). Perceived realism of haptic rendering methods for bimanual high force tasks: Original and replication study. *Scientific Reports*, 13, Article 11230. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-38201-x>
- [7] Lorenz, M., Kaluschke, M., Melzer, A., Pillen, N., Sanrow, M., Hoffmann, A., Schmidt, D., Dettmann, A., Bullinger, A. C., Perret, J., & Zachmann, G. (2025). HIPS—A surgical virtual reality training system for total hip arthroplasty (THA) with realistic force feedback. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 31(5), 3418–3428. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2025.3549896>
- [8] Luglietto, D., De Benedictis, A., Marasi, A., Rossi-Espagnet, M. C., Napolitano, A., Capelli, S., Ricciuti, V., Riccio, D., & Marras, C. E. (2025). Simulators with haptic feedback in neurosurgery: Are we reaching the “aviator” type of training? Narrative review and future perspectives. *Life*, 15(5), Article 777. <https://doi.org/10.3390/life15050777>
- [9] Tan, J., Karim, M. R., Tamanna, R., Kim, S., & Patel, B. (2025). Comparing learning outcomes of virtual reality (VR) simulators using haptic feedback versus box trainer (BT) in laparoscopic training: A systematic review and meta-analysis. *Cureus*, 17(2), Article e78910. <https://doi.org/10.7759/cureus.78910>