

[Page de garde]



**HEC MONTRÉAL**

**Influence du retour haptique en contexte d'apprentissage par  
simulation dans le secteur industriel**

par  
**Charles Léonard-Thiffault**

**Pierre-Majorique Léger**  
**HEC Montréal**  
**Directeur de recherche**

**Théophile Démazure**  
**HEC Montréal**  
**Codirecteur de recherche**

**Sciences de la gestion**  
**(Spécialisation Expérience Utilisateur)**

*Mémoire présenté en vue de l'obtention  
du grade de maîtrise ès sciences en gestion  
(M. Sc.)*

Décembre 2024  
Charles Léonard-Thiffault, 2024



## CERTIFICAT D'APPROBATION ÉTHIQUE

La présente atteste que le projet de recherche décrit ci-dessous a fait l'objet d'une évaluation en matière d'éthique de la recherche avec des êtres humains et qu'il satisfait aux exigences de notre politique en cette matière.

---

**Projet # :** 2024-5898

**Titre du projet de recherche :** Évaluation de l'apprentissage multisensoriel avec retour haptique

**Chercheur principal :** Pierre-Majorique Léger, Professeur titulaire, Technologies de l'information, HEC Montréal  
**Cochercheurs :** Sylvain Sénécal; Constantinos K. Coursaris; Marc Fredette; Frédérique Bouvier; Juan Fernandez Shaw; Luis Carlos Castiblanco; David Briegne; Xavier Côté; Salima Tazi; Elise Imbeault; Charles Léonard-Thiffault; Shang Lin Chen

**Date d'approbation du projet :** 09 mai 2024

**Date d'entrée en vigueur du certificat :** 09 mai 2024

**Date d'échéance du certificat :** 01 mai 2025

---



Maurice Lemelin  
Président  
CER de HEC Montréal

Signé le 2024-05-09 à 16:11

## Résumé

Cette étude examine l'influence du retour haptique – spécifiquement son intensité et sa richesse – dans les simulateurs d'entraînement de machinerie lourde sur les performances des opérateurs apprenants dans le secteur industriel, en considérant le sentiment de présence et la charge cognitive comme médiateurs potentiels de cette relation. Malgré que l'apprentissage et la formation par simulation avec intégration de technologies haptiques soient de plus en plus répandus, peu de recherches ont exploré l'impact du retour haptique sur la performance à l'entraînement des opérateurs, notamment dans le contexte industriel où la demande en main-d'œuvre qualifiée est croissante. Une étude expérimentale en laboratoire a été menée avec 17 participants. Ces opérateurs apprentis et novices ont réalisés des tâches sur des simulateurs de machinerie lourde. Les résultats suggèrent que l'intensité et la richesse du retour haptique sont des facteurs clé pour améliorer la performance des opérateurs dans les simulateurs de machinerie lourde (i.e.; pelle excavatrice). Les implications pratiques de cette recherche incluent des recommandations pour les concepteurs de simulateurs, les centres de formation en machinerie lourde et les entreprises dans le secteur industriel (opérant plus particulièrement dans le domaine de la construction). Cette recherche contribue également à la littérature en étendant l'application de modèles théoriques existants, tels que le modèle Immersion, Présence et Performance (IPP), et en soulignant la nécessité d'explorer d'autres mécanismes par lesquels le retour haptique influence la performance. Cette étude ouvre ainsi la voie à de futures recherches visant à optimiser les environnements de formation immersifs virtuels par simulation dans le secteur industriel.

**Mots clés :** Apprentissage par simulation – Simulateurs d'entraînement - Retour haptique  
- Formation d'opérateurs - Machinerie lourde – Plateforme de mouvement

## **Abstract**

This study examines the influence of haptic feedback - specifically its intensity and richness - in heavy machinery training simulators on the performance of learning operators in the industrial sector, considering sense of presence and cognitive load as potential mediators of this relationship. Despite the fact that simulation-based learning and training with the integration of haptic technologies is becoming increasingly widespread, little research has explored the impact of haptic feedback on operator training performance, particularly in the industrial context where the demand for skilled labor is growing. An experimental laboratory study was carried out with 17 participants. These apprentice and novice operators performed tasks on heavy machinery simulators. The results suggest that the intensity and richness of haptic feedback are key factors in improving operator performance in heavy machinery simulators (i.e.; excavator). The practical implications of this research include recommendations for simulator designers, heavy machinery training centers and companies in the industrial sector (operating more specifically in the construction field). This research also contributes to the literature by extending the application of existing theoretical models, such as the Immersion, Presence and Performance (IPP) model, and by highlighting the need to explore other mechanisms by which haptic feedback influences performance. This study thus paves the way for future research aimed at optimizing virtual immersive simulation training environments in the industrial sector.

**Keywords :** Simulation-based learning – Training simulators – Haptic feedback – Operator training – Heavy machinery – Motion platform



# Table des matières

Résumé.....	iv
Abstract.....	v
Table des matières.....	vii
Avant-propos.....	ix
Remerciements.....	xi
Chapitre 1 : Introduction.....	1
Chapitre 2 : Influence du retour haptique dans les simulateurs d'entraînement de machinerie lourde sur les performances des opérateurs en contexte d'apprentissage par simulation dans le secteur industriel.....	15
Abstract.....	15
2.1 Introduction.....	16
2.2 Travaux Connexes.....	19
2.3 Méthodologie.....	29
2.4 Résultats.....	38
2.5 Discussion.....	46
2.6 Conclusion.....	58
References.....	59
Chapitre 3 : Le Retour Haptique et son Influence Positive sur les Performances des Opérateurs de Machinerie Lourde.....	69
Chapitre 4 : Conclusion.....	76
Bibliographie.....	81
Annexes.....	i



## **Avant-propos**

Ce mémoire en expérience utilisateur a été soumis avec l'autorisation de la direction administrative du programme de la Maîtrise en Science de la gestion (M.Sc) de HEC Montréal.

Le projet de recherche lié à ce mémoire a obtenu l'approbation du comité d'éthique en recherche (CER) de HEC Montréal le 9 mai 2024 sous le numéro de projet 2024-5898. Un article scientifique et un article managériaux issus du projet sont inclus dans ce mémoire avec le consentement des coauteurs.

L'article est actuellement en préparation pour soumission au journal *International Journal of Human-Computer Interaction*.



## Remerciements

Tout d'abord, j'aimerais remercier mes parents pour m'avoir mis sur cette planète, sans qui ce mémoire n'aurait été possible. Ils me supportent et m'encouragent dans tout ce que je fais depuis un tout jeune âge. Je dois aussi laisser un mot spécial pour ma mère qui a toujours été là pour moi et qui m'a tout donné.

Ensuite, sur un niveau plus académique, j'aimerais remercier mes superviseurs qui m'ont guidé et aidé à travers tout le projet. Plus particulièrement, je tiens à remercier mon directeur Pierre-Marjorique Léger pour son expertise exceptionnelle et sa rigueur scientifique. Il a toujours été là pour me pousser à m'améliorer et me faire travailler plus fort (même si parfois cela ne pouvait pas toujours se refléter en la gratitude et l'attachement que j'ai actuellement). Il a pour moi été comme un mentor. Son optimisme, sa passion et sa curiosité intellectuel ont été pour moi des sources profondes d'inspiration. Ensuite, je tiens à remercier mon superviseur Théophile Démazure, qui m'a guidé tout au long de mon parcours grâce à son incroyable expertise, et Thaddé Rollon-Merettes . Ces deux "docteurs" au talent incommensurable ont définitivement été de grandes sources d'inspiration tout au long de mon projets. Ils ont su me guider, m'aider à me dépasser dans les moments qui comptaient et me comprendre lorsque des points plus complexes devaient être démystifiés. Ces personnes extraordinaires et talentueuses que sont mes directeurs et co-directeurs suscitent en moi une reconnaissance éternelle.

Un grand merci également au professeur Sylvain Sénécal pour sa bienveillance. Ce pédagogue inouïe a été d'une aide inestimable et d'un calme ressourçant.

Je tiens aussi à remercier ma copine que j'ai rencontré dans ce même programme, qui a été présente dans les bons et mauvais moments, à travers les tempêtes et contre le ciel. Elle m'a fait beaucoup rigoler, mais aussi réfléchir. Elle me fait grandir à chaque jour et sans elle la route n'aurait peut-être pas été aussi belle et colorée.

Enfin, je souhaite exprimer ma profonde gratitude envers l'organisation du Tech3lab et tous ses membres et étudiants. Les moments mémorables que nous avons partagés en groupe resteront gravés dans ma mémoire. Grâce à eux, j'ai pu élever mon expertise en recherche, en analyse, en UX et en technologie de l'information à un niveau supérieur. Leur compétence est exceptionnelle. Je les remercie également pour le financement de ce projet. Je tiens aussi à exprimer ma reconnaissance envers D-BOX, le partenaire pour ce projet, pour le financement de ce projet, sans lequel il n'aurait jamais vu le jour.

# Chapitre 1 : Introduction

## *L'apprentissage par simulation et l'émergence technologique*

Influencée par les avancées technologiques et des pratiques pédagogiques innovantes, la simulation, en tant qu'outil d'apprentissage, a été largement adoptée dans divers domaines, notamment la médecine, l'éducation physique et d'autres secteurs professionnels, en raison de son efficacité dans l'amélioration des compétences pratiques et théoriques des apprenants. L'évolution de la formation par simulation est particulièrement marquée dans le domaine médical. Par exemple, des études ont démontré que l'utilisation de dispositifs pédagogiques basés sur la simulation pour la formation des résidents en anesthésie-réanimation a conduit à une amélioration significative des performances des apprenants (Bouchareb et al., 2020). De même, Mohammed et al. ont constaté que l'intégration de la simulation dans l'enseignement des gestes procéduraux et de l'examen physique a eu un impact positif sur l'apprentissage des étudiants en médecine (Mohammed et al., 2020). Ces études soulignent l'importance de la simulation comme méthode d'enseignement qui favorise l'apprentissage actif et l'engagement des apprenants. En outre, l'apprentissage par simulation a été appliqué avec succès dans d'autres domaines, comme l'éducation physique. L'étude de Turcotte et al. explore les pratiques pédagogiques des éducateurs physiques et ont mis en lumière l'importance de l'éducation à la santé, qui peut être renforcée par des approches basées sur la simulation (Turcotte et al., 2010). Cette approche permet non seulement d'améliorer les compétences techniques des apprenants, mais aussi de développer des compétences interpersonnelles et de communication essentielles dans des contextes pratiques.

L'évolution technologique a également joué un rôle crucial dans l'amélioration des méthodes de formation par simulation. L'émergence de technologies telles que la réalité virtuelle (VR), la réalité augmentée (AR) et les plateformes de mouvements dans les simulateurs d'entraînement (training simulator motion platforms) a ouvert de nouvelles avenues pour l'apprentissage immersif. L'étude de Potvin-Rosselet et al. suggère que l'apprentissage immersif, facilité par ces technologies, pourrait améliorer la compréhension de concepts complexes en engageant les apprenants de manière plus

interactive (Potvin-Rosselet et al., 2023). Cette tendance vers des environnements d'apprentissage plus interactifs et immersifs est renforcée par des innovations technologiques qui permettent une personnalisation et une adaptabilité accrues des expériences d'apprentissage. C'est le cas par exemple des simulateurs d'entraînement avec retour haptique.

### ***Simulateurs d'entraînement et retour haptique***

Ces technologies permettent de créer des environnements d'apprentissage interactifs et réalistes, favorisant une meilleure acquisition des compétences, une meilleure expérience d'apprentissage et de meilleures performances à l'entraînement. Par exemple, des études ont démontré que les simulateurs haptiques améliorent la performance des résidents en anesthésie en leur fournissant un retour tactile sur leurs actions, ce qui est essentiel pour développer des compétences pratiques (Herfort et al., 2022). Dans le secteur industriel forestier, les simulateurs de machinerie lourde sont utilisés pour réduire l'usure des machines coûteuses et éviter les risques associés à la formation sur des terrains dangereux. Le retour du mouvement est essentiel pour les opérateurs novices, car il recrée la réalité des vibrations et secousses des machines en action. Cela permet aux opérateurs apprenants d'améliorer leur aptitude à manœuvrer en forêt et d'acquérir des compétences pratiques librement et en toute sécurité (Burk, 2022). Les simulateurs de machinerie lourde forestière offrent une variété d'affichages visuels allant d'écran basés sur PC avec un seul écran, à des plug-ins de réalité virtuelle (VR). Les affichages basés sur PC sont des représentations en deux dimensions (2D) d'un environnement, souvent affichées sur un ou plusieurs écrans d'ordinateur ou de télévision. En revanche, dans les affichages en VR (simulateurs VR), l'utilisateur porte des lunettes VR qui lui permettent de voir son environnement en trois dimensions et à 360 degrés. Les configurations en VR, dans ce contexte, sont cependant moins adaptées pour des raisons de confort et de réalisme de l'environnement. Des simulateurs basés sur des écrans avec retour de mouvement sont privilégiés pour simuler les variations physiques et environnementales. D'ailleurs, même si les simulateurs VR peuvent offrir des affichages réalistes, les individus peu habitués à opérer dans un environnement VR deviennent souvent malades en moins de 15 minutes d'utilisation de l'équipement, limitant ainsi leur temps de pratique effectif (Burk, 2022).

Dans le domaine de l'aviation et de la formation aéronautique, la littérature discute aussi de ces différents types de simulateurs. L'étude de Paul (2023) distingue trois niveaux de fidélité de simulateurs ou trois types de simulateurs basé sur la fidélité. Les simulateurs à haute-fidélité (Flight Training Devices – FTD) incluent une réplique complète de l'habitacle et des commandes, souvent montés sur une plateforme mobile permettant de simuler les sensations que ressentent un pilote dans un avion réel. Cela procure une fidélité physique (physique-haptique) et fonctionnelle plus élevée (Jones, 2022; Paul, 2023). Ces simulateurs de vol visent à développer des compétences psychomotrices et une conscience situationnelle essentielles pour les manœuvres. Les simulateurs de moyenne fidélité sont des dispositifs dotés de commandes connectées à un ordinateur, permettant une certaine interaction physique, mais sans la plateforme de mouvement. Ils offrent une fidélité réduite en raison de l'absence de retour kinesthésique et de vibration naturelle des manœuvres. Les simulateurs de réalité virtuelle (VR) offrent une immersion visuelle et spatiale avec un casque, mais manque souvent de plateforme de mouvement qui recrée les forces physiques réelles (accélérations, forces de virage, etc.) sur le corps du pilote, diminuant ainsi la fidélité physique-haptique et l'efficacité pour certaines tâches de maniement d'appareil aéronef. Poursuivant dans le domaine de l'aviation, les simulateurs de vol avec retour haptique offrent aux pilotes en formation une expérience immersive qui simule les sensations physiques d'un vol réel comme les forces de gravité et les mouvements de l'appareil (Hodge et al., 2015). Ceux-ci illustrent comment l'intégration de la réalité virtuelle et des plateformes de mouvement peut améliorer l'apprentissage en offrant au pilote un retour haptique (mouvements, vibrations, forces, sensations kinesthésiques, tactiles et proprioceptives) qui s'avère essentiel pour développer des compétences pratiques dans un environnement sécurisé (Casas et al., 2017). De plus, des études ont montré que l'utilisation de ces simulateurs peut réduire le temps nécessaire pour acquérir des compétences complexes, tout en augmentant la confiance des apprenants dans leurs capacités (Volkaner et al., 2016). Un retour haptique adéquatement intégré peut fournir des indices sensoriels qui améliorent l'immersion et la présence, éléments cruciaux pour un apprentissage efficace. En effet, l'utilisation de la technologie haptique, en contexte d'apprentissage sur simulateur et par simulation, démontre notamment un fort potentiel pour améliorer la performance à l'entraînement (durant la

simulation) des apprenants (Bystrom et al., 1999; Malik et al., 2020; Stanney & Salvendy, 1998), les compétences techniques, le développement de compétences motrices (Cuppone et al., 2016), la rétention et le transfert des compétences et de la mémoire motrice (Jones, 2022). Par exemple, des recherches ont montré que les plateformes de mouvements dans les simulateurs de conduite peuvent réduire les temps de réaction des utilisateurs en fournissant des informations vestibulaires, ce qui est particulièrement pertinent dans des contextes tels que la conduite ou le pilotage (Asadi et al., 2018; Riera et al., 2022). En intégrant des retours haptiques, les simulateurs peuvent aussi renforcer l'apprentissage kinesthésique, permettant aux apprenants de développer des compétences motrices fines dans des situations simulées (Vassallo, 2023; Warren et al., 2023). L'étude de Cuppone et al. (2016) a aussi démontré que l'entraînement assisté par retour haptique améliore les performances somatosensorielles et motrices, ce qui est particulièrement pertinent pour les tâches nécessitant une précision élevée (Cuppone et al., 2016). Vassallo (2023) a additionnellement mis en évidence que le retour haptique, en renforçant le sentiment de présence, améliore la rétention des connaissances procédurales à long terme.

### *Contexte théorique*

Sous une perspective plus théorique, l'intégration de la technologie haptique dans les environnements de simulation montre un potentiel pour améliorer la performance des apprenants en renforçant des éléments clés tels que la fidélité de la simulation, l'immersion et le sentiment de présence (Bystrom et al., 1999; Jones, 2022). Le modèle Immersion, Présence et Performance (IPP), proposé par Bystrom (1999), établit un lien direct entre l'immersion, augmentée par une haute fidélité sensorielle, et le sentiment de présence, condition nécessaire à une performance optimale.

La fidélité d'une simulation immersive se réfère à la mesure dans laquelle cette simulation reproduit fidèlement les aspects visuels, sonores, haptiques, ainsi que l'apparence physique et le comportement de l'environnement opérationnel (Jones, 2022). Plus spécifiquement, la dimension physique-haptique de la fidélité, qui se réfère aux forces, mouvements et vibrations ressenties par l'apprenant dans l'environnement simulé, fournit des signaux haptiques réalistes qui permettent aux apprenants de développer des schémas

moteurs et de reconnaissance transférables à des situations réelles. Cette dimension physique-haptique induit aussi une fidélité cognitive, car les signaux haptiques pertinents aident l'apprenant à former des mémoires associatives et des schémas moteurs proches de ceux requis en situation réelle.

Le retour haptique vise à exploiter le sens du toucher dans l'interaction homme-machine, en complément de la vue et de l'ouïe, par exemple via des vibrations (retours vibrotactiles) ou des forces (retours kinesthésiques) appliquées à l'utilisateur. On distingue notamment le retour kinesthésique (forces physiques ressenties via les muscles et articulations) et le retour cutané (simulation des récepteurs de la peau) ; le feedback vibrotactile relève de ce second type et sollicite directement les mécanorécepteurs cutanés (Haghighi et al., 2020). Dans le cas des simulateurs d'entraînement pour opérateurs de machinerie lourde, les deux types de retours haptiques peuvent être présents : le retour kinesthésique est souvent généré par les plateformes de mouvement ou les leviers à résistance, tandis que le retour vibrotactile peut être transmis via des sièges vibrants ou des gilets sensoriels pour simuler les micro-vibrations de l'engin ou de l'environnement.

Selon la théorie IPP, sans une présence suffisante, les apprenants ne peuvent pas exploiter pleinement les avantages de la simulation pour développer leur compétences et bien performer durant celle-ci (Bystrom et al., 1999). Des travaux comme ceux de (Sallnäs et al., 2000) montrent qu'un retour de force haptique accroît simultanément la présence perçue et l'efficacité d'exécution des tâches. Le retour haptique améliore ainsi l'immersion et la présence en offrant des interactions physiques réalistes avec l'environnement opérationnel, ce qui d'ailleurs est essentiel pour engager les apprenants dans le processus de formation et optimiser les résultats d'apprentissage (Stevens & Kincaid, 2015). Par exemple, Vassallo (2023) a mis en évidence que le retour haptique, en renforçant le sentiment de présence, améliore la rétention des connaissances procédurales à long terme.

Parallèlement, la théorie de la charge cognitive, développée par (Sweller, 1988), offre un cadre théorique pour comprendre comment la charge cognitive influence l'apprentissage et la performance en fonction des limitations de la mémoire de travail. La théorie de la

charge cognitive souligne que la mémoire de travail humaine, d'une capacité restreinte, ne peut traiter qu'un nombre limité d'éléments d'information à la fois (Sweller, 1988; Sweller et al., 2011). En conséquence, toute sollicitation superflue accroît la charge mentale et, si cette charge devient excessive, elle finit par entraver la performance et l'apprentissage (Sweller et al., 2011). La charge cognitive est divisée en trois types : intrinsèque, extrinsèque et essentielle (germane). Dans le contexte de la formation par simulateur avec retour haptique, le retour sensoriel peut aider à réduire la charge cognitive extrinsèque en fournissant des informations haptiques réalistes et cohérentes. L'ajout d'un canal sensoriel supplémentaire via le retour haptique répartit l'information sur plusieurs modalités, libérant des ressources de la mémoire de travail et diminuant la surcharge imposée par des affichages visuels ou sonores seuls. En effet, l'ajout d'un canal sensoriel supplémentaire via le retour haptique permet de répartir les informations entre différents sens, allégeant ainsi la charge sur la mémoire de travail et améliorant le traitement de l'information. Cela aide les apprenants à mieux comprendre et interpréter l'environnement simulé, conduisant notamment à une performance améliorée (Vassallo, 2023). Les signaux haptiques présentent l'avantage d'être perçus de manière ambiante et discrète, sans mobilisation consciente de l'attention, tout en offrant des temps de réaction plus courts que les stimuli visuels ou auditifs (Haghighi et al., 2020). De plus, lorsque les canaux visuel ou auditif de l'utilisateur sont saturés, un retour haptique peut servir d'alternative importante pour communiquer une information sans surcharger ces canaux (Haghighi et al., 2020). En ce sens, une vibration ou impulsion tactile subtile peut transmettre un message (alerte, indication directionnelle, etc.) de façon quasi inconsciente, libérant l'attention visuelle et auditive pour d'autres motifs. La fidélité physique-haptique est d'ailleurs essentielle pour les phases cognitive et associative du modèle de l'acquisition de compétences motrices de Fitts et Posner (1967), où (Fitts, 1967) les apprenants réfléchissent activement à chaque mouvement pour atteindre le résultats souhaité. L'exemple de la ponction lombaire simulée (Friedman et al., 2009) illustre comment des signaux haptiques précis guident l'ajustement de la force appliquée, renforçant l'apprentissage moteur.

Lorsque le retour haptique est mal calibré (trop faible ou exagéré), il peut au contraire augmenter la charge cognitive extrinsèque et nuire à la performance, comme l'ont montré

(Malik et al., 2020) en simulation de vol. En effet, il est important de reconnaître que, à l'inverse des cas précédents, un feedback haptique supplémentaire peut parfois augmenter la charge cognitive au lieu de la réduire ; en imposant au cerveau un flot d'informations additionnel à traiter, il peut accroître la charge cognitive extrinsèque et ainsi empêcher la bonne mémorisation de nouvelles informations (Vassallo, 2023).

Ce paradoxe met en lumière un équilibre délicat : le feedback haptique peut simultanément amplifier l'expérience sensorielle (ce qui est positif pour l'engagement de l'utilisateur) et alourdir le traitement cognitif (ce qui peut nuire aux performances si l'on dépasse les capacités de mémoire de travail). En définitive, cela souligne l'importance de concevoir le retour haptique de manière à maximiser les bénéfices sensoriels tout en minimisant la surcharge mentale (Haghighi et al., 2020; Vassallo, 2023) – afin d'exploiter au mieux l'apport du toucher sans outrepasser les limites cognitives de l'opérateur.

Tout de même, des travaux expérimentaux récents confirment que les retours haptiques peuvent apporter des bénéfices tangibles en termes de performance et d'expérience utilisateur. Concrètement, l'ajout d'un feedback haptique peut atténuer certaines illusions perceptives : par exemple, en simulation de vol de nuit, le fait de fournir un retour de force/vibrations lors de l'atterrissage réduit les illusions visuelles de hauteur, car les pilotes se fient davantage aux indices haptiques du manche qu'à des repères visuels potentiellement trompeurs (Malik et al., 2020). Plus globalement, l'intégration de retours haptiques dans une tâche de pilotage a montré une atteinte plus efficace des objectifs et une meilleure conscience de la situation chez l'opérateur, et ce sans accroître sa charge de travail mentale (Malik et al., 2020). Par ailleurs, en environnement virtuel immersif, l'ajout de retours de forces et vibrotactiles a pour effet d'amplifier le sentiment de présence de l'utilisateur dans l'environnement opérationnel simulé, en renforçant l'immersion sensorielle (Vassallo, 2023). Ces avantages suggèrent que le retour haptique, en sollicitant différemment le système sensoriel, peut non seulement décharger les autres modalités (vision, audition) mais aussi améliorer l'engagement et la perception globale de la tâche.

Les théories IPP et de la charge cognitive se complètent en offrant un cadre conceptuel pour comprendre comment le retour haptique influence la performance des apprenants durant leur formation par simulation. Plus l'immersion haptique est élevée, plus la présence ressentie est forte; cette présence soutient l'allocation efficiente des ressources cognitives, réduisant la charge extrinsèque et maximisant la charge essentielle dédiée à l'apprentissage. La charge cognitive extrinsèque est réduite grâce à l'immersion accrue par un retour haptique adéquat, permettant l'allocation de ressources cognitives aux éléments pertinents et aux informations essentielles, ce qui à son tour peut augmenter les performances. Parallèlement, un retour haptique bien conçu augmente l'immersion sensorielle, renforçant le sentiment de présence. Selon le modèle IPP, une présence accrue est essentielle pour une performance optimale, car elle engage davantage l'apprenant dans la tâche. Ainsi, les deux théories convergent et se rejoignent au niveau de la compréhension de l'impact du retour haptique sur la performances des apprenants durant leur simulation d'entraînement : Le modèle IPP décrit le rôle déclencheur de la présence, tandis que la charge cognitive explicite le mécanisme de libération et de réaffectation des ressources mentales qui soutient la performance.

### ***Domaines à haut risque***

L'intégration de la technologie haptique dans les environnements d'apprentissage par simulation est devenu cruciale, et ce surtout dans des domaines à haut risque, comme l'aviation, le domaine militaire, la médecine et le domaine industriel, où la précision, la compétence et la sécurité sont essentiels. Ces domaines à haut risque sont effectivement ceux qui bénéficient le plus de la formation par simulation, de ses bénéfices et de ses avancées. Les domaines de la médecine et de l'aviation sont des domaines qui ont suscité le plus de recherche et d'attention dans ces contextes. Le domaine de la médecine, par exemple, est le domaine le plus couvert par la littérature lorsqu'il en vient à étudier la technologie haptique dans des contextes de formation par simulateurs avec retour haptique (Lelevé et al., 2020). Par exemple, un concept amplement étudié est celui du « guidage haptique », soit un guidage physique dans lequel le sujet est physiquement guidé à travers le mouvement idéal par l'interface haptique, lui donnant ainsi une compréhension kinesthésique de ce qui est requis (Feygin et al., 2002). Les recherches

démontrent d'ailleurs que le retour haptique améliore la rétention des compétences et la motivation des apprenants, ce qui est directement corrélé à leurs performances lors de l'entraînement (Zhou et al., 2021). Le domaine de l'aviation est aussi un domaine dans lequel l'impact du retour haptique sur les performances à l'entraînement et l'efficacité de l'apprentissage suscite beaucoup d'attention, et ce depuis l'ère des tout premiers simulateurs de vol (Dixon, 1992). Par exemple, les recherches montrent que le retour haptique peut améliorer la capacité des opérateurs à contrôler les UAVs (véhicules aériens sans pilote) lors de tâches complexes de maintien d'altitude. Dans une étude, Malik et al (2020) ont examiné comment différents niveaux de retour haptique (absence de retour, retour réaliste, et retour amplifié) influencent la performance des opérateurs. Les résultats indiquent que l'intégration du retour haptique améliore la performance des pilotes durant l'entraînement, les capacités de contrôle, l'immersion et favorise une formation plus efficace des pilotes.

Dans le secteur industriel, l'utilisation de simulateurs avec retour haptique est encore moins exploré, bien qu'elle soit d'une importance capitale. Les statistiques montrent que la formation adéquate des opérateurs de machinerie lourde peut réduire considérablement les accidents de travail, qui sont en hausse, par exemple, dans le secteur de la construction. En effet, chaque année, le secteur de la construction au Québec fait face à une augmentation des accidents impliquant la machinerie lourde. Le rapport de la Commission de la santé et de la sécurité du travail (CSST) du Québec souligne que les accidents de machinerie lourde représentent une proportion significative des accidents de travail dans la province (Burllet-vienney et al., 2016). En effet, une étude de Poupart et al. (2021) démontre que les accidents impliquant la machinerie lourde constituent environ 25% à 30% des décès accidentels en milieu de travail au Québec et au Canada. Plusieurs d'entre eux sont notamment lié à un manque de connaissance ou d'expérience avec l'équipement. Parmi ces causes identifiés, un manque de connaissance des outils ou des règles de sécurité est souvent en jeu, tout comme un non-respect des mesures de sécurité ou une sous-estimation des risques. Ces facteurs pourraient être atténués par une meilleure formation et un encadrement accru. La recherche indique que les accidents peuvent être réduits par une formation mieux adaptée (Poupart et al., 2021). La nécessité d'une main-d'œuvre qualifiée est donc d'une importance capitale pour améliorer la sécurité dans le

secteur industriel et plus particulièrement sur les chantiers de construction. La formation par simulation s'impose comme une méthode efficace pour atteindre cet objectif, en offrant aux opérateurs la possibilité de s'entraîner dans un environnement contrôlé qui reproduit fidèlement les conditions réelles de travail, notamment par l'intégration du retour haptique dans les simulateurs d'entraînement de machinerie lourde, sans les risques associés. Cependant, les données spécifiques en lien avec l'impact du retour haptique dans ces contextes de formation restent très limitées. Cela souligne la nécessité de recherches supplémentaires à ce sujet. La technologie haptique pourrait potentiellement transformer la manière dont les compétences des opérateurs sont acquises, en rendant l'apprentissage plus immersif et interactif, ce qui pourrait se traduire par une meilleure performance à l'entraînement, un apprentissage plus efficace et une meilleure performance sur le terrain. Il serait ainsi pertinent d'étudier son impact sur la formation dans ces contextes et d'appliquer les concepts et notions discutés plus haut à un domaine qui a, jusqu'à présent, suscité peu d'attention à ce sujet, soit le secteur industriel, en particulier dans la formation des opérateurs de machinerie lourde. En effet, il est justifiable de penser que ces concepts pourraient s'appliquer efficacement à ce domaine, en contribuant à des formations plus immersives et à un apprentissage approfondi, ce qui se traduirait par une réduction des accidents de travail et une amélioration des performances des opérateurs sur le terrain. Les études antérieures ont principalement porté sur des domaines comme la médecine, laissant un vide dans la compréhension de la manière dont le retour haptique pourrait améliorer l'efficacité de la formation et la performance dans des contextes industriels (Wildenbeest et al., 2013). Cette approche mérite donc d'être approfondie afin d'explorer pleinement le potentiel du retour haptique dans les environnements industriels impliquant la machinerie lourde (formation sur simulateurs d'entraînement de machinerie lourde).

La performance des apprenants lors de la formation est un indicateur clé de l'efficacité de l'apprentissage. Des performances élevées en formation sont souvent associées à une meilleure acquisition des compétences, une motivation accrue, une confiance renforcée et un engagement plus profond. Ces éléments favorisent une rétention des connaissances soutenue et des performances futures améliorées. Il est important de noter que la performance en formation est un concept complexe et évolutif. Les effets positifs de l'intégration du retour haptique peuvent être observés à court terme par une amélioration

immédiate des performances à l'entraînement. Cependant, pour évaluer pleinement l'impact de ces technologies sur l'efficacité de la formation, notamment sur le transfert des compétences et les performances à long terme, des futures études longitudinales seront nécessaires. C'est d'ailleurs pourquoi, en tenant compte du manque de recherche actuelle sur ce sujet, cette étude se concentre spécifiquement sur la performance à l'entraînement des apprenants. Cette approche vise notamment à fournir des bases solides pour de futures recherches qui pourront explorer les effets à long terme de l'intégration du retour haptique dans les environnements de formation par simulation.

C'est à la lumière de cette problématique que cette étude tente plus spécifiquement de répondre à la question de recherche suivante : « Dans quelle mesure le retour haptique dans les simulateurs d'entraînement de machinerie lourde dans le secteur industriel impacte-t-il les performances (objectives et subjectives) des opérateurs apprenants, en considérant le sentiment de présence et la charge cognitive comme potentiels médiateurs de la relation? »

### ***Portée et limitations***

Cette étude se concentre sur les opérateurs de machinerie lourde, novices ou en formation, dans le secteur industriel. Les variables d'intérêt principales sont la présence, la charge cognitive, les performances objectives des apprenants (ie ; temps de réalisation des tâches, précision et qualité des manœuvres...) et subjectivement (évaluations personnelles de compétences et de confiance). Cette étude tente ainsi de comprendre, à travers ces notions et concepts, dans quelle mesure le retour haptique impacte les performances des opérateurs de machinerie lourde lors de leur simulation d'entraînement sur des simulateurs de machinerie lourde avec retour haptique intégré. Le cadre théorique de l'étude s'appuie sur le modèle Immersion, Présence et Performance (IPP) de Bystrom (1999) et la théorie de la charge cognitive de Sweller (1988).

Parmi les limites de cette étude, on note d'abord l'absence de mesures psychophysiologiques pour évaluer la présence et la charge cognitive, ce qui peut introduire des biais dans les résultats. Ensuite, les différences non contrôlées entre les simulateurs, telles que la taille de l'écran, la qualité des graphismes et les caractéristiques

du logiciel, ont pu influencer les résultats, malgré l'objectif d'introduire de la variance dans le rendu haptique. De plus, le nombre restreint de participants (N=17) réduit la puissance statistique et limite la généralisation des conclusions. Enfin, la manque de précision dans les questions pré-expérience mesurant l'expérience des participants en simulateur et en machinerie lourde empêche une évaluation précise de leur niveau d'expertise, ce qui aurait pu être amélioré avec des catégories d'expérience standardisées.

### ***Approche méthodologique***

Une approche expérimentale en laboratoire a été adoptée, avec un design expérimental intra-participant. Dix-sept participants ont réalisé deux tâches (chargement de camions-bennes et creusement de tranchée) sur deux simulateurs de machinerie lourde. L'intensité et la richesse du retour haptique ont été mesurées objectivement via une veste HexoSkin. Les performances objectives (données télémétriques et observations) et subjectives (questionnaires sur performance perçue et projetée), ainsi que le sentiment de présence et la charge cognitive, ont été recueillies. Des analyses statistiques ont ensuite été menées pour tester les hypothèses.

### ***Structure du mémoire***

Ce mémoire est structuré autour de deux articles (article scientifique et article managérial) principaux qui explorent en profondeur l'impact du retour haptique dans les simulateurs d'entraînement de machinerie lourde au sein du secteur industriel. Cette approche permet d'aborder la problématique à la fois sous un angle scientifique rigoureuse et sous un angle managérial orienté vers les implications pratiques pour l'industrie. Finalement, une conclusion synthétisera les principaux résultats, les principales contributions de l'étude, tout en soulignant les implications théoriques, pratiques et méthodologiques, et proposera des recommandations pour les futurs travaux dans le domaine.

Contribution de l'étudiant aux étapes du projet de recherche	
Étapes	
Développement de la problématique et de la question de recherche	<p>Contribution : 90%</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Contextualisation de la problématique développée en collaboration avec un partenaire industriel</li> <li>- Traduction des besoins du partenaire industriel en question de recherche et définition de la problématique</li> </ul>
Revue de la littérature	<p>Contribution : 90%</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Identification de la littérature existante</li> <li>- Identification des sujets de recherche</li> <li>- Aide sur échelles et mesures à utiliser</li> </ul>

	Rédaction de la revue de la littérature : 100%
Demande de certificat d'éthique de la recherche	Contribution : 50% <ul style="list-style-type: none"> <li>- Rédaction de la demande au CER et des modifications de projet par la suite</li> </ul>
Design expérimental	Contribution : 75% <ul style="list-style-type: none"> <li>- Conception du design expérimental et protocoles de test</li> <li>- Organisation des salles de collecte et organisation du matériel</li> </ul>
Recrutement des participants	Contribution : 60% <ul style="list-style-type: none"> <li>- Rédaction du questionnaire de recrutement</li> <li>- Recrutement et gestion des participants</li> </ul>
Prétests et collecte de données	Contribution : 90% <ul style="list-style-type: none"> <li>- Responsable des opérations lors des prétests et tests</li> <li>- Présence lors du processus de collecte</li> <li>- Gestion et communication avec le partenaire</li> </ul>
Extraction et transformation des données	Contribution : 30%
Analyse des données	Contribution : 90%
Rédaction	Contribution : 100%

## **Chapitre 2 : Influence du retour haptique dans les simulateurs d'entraînement de machinerie lourde sur les performances des opérateurs en contexte d'apprentissage par simulation dans le secteur industriel**

### **Abstract**

L'apprentissage par simulation et l'intégration du retour haptique suscitent un intérêt croissant, notamment comme formation immersive pour le développement des compétences motrices. Cependant, peu d'études se concentrent sur l'impact du retour haptique sur les performances à l'entraînement des opérateurs, en particulier dans le secteur industriel. Cette étude vise à évaluer dans quelle mesure l'intensité et la richesse du retour haptique dans les simulateurs d'entraînement de machinerie lourde influencent les performances à l'entraînement durant la simulation d'apprentissage des opérateurs apprenants. Pour ce faire, une expérience en laboratoire a été menée avec 17 participants recrutés auprès de trois sources différentes (école de formation en machinerie lourde et engins de chantier, étudiants du programme Construction de l'École de technologie supérieure (ETS) de Montréal et communautés de passionnés de machinerie lourde et simulateurs). Chaque participant a été exposé à deux simulateurs d'entraînement pour ajouter de la variance dans les variables indépendantes, soit l'intensité et la richesse du retour haptique. Ces variables indépendantes ont été mesurées par des données physiologiques à l'aide d'une veste HexoSkin. Les variables dépendantes comprenaient la performance objective, la performance perçue, la performance anticipée, le sentiment de présence et la charge cognitive, mesurés par des questionnaires post-expérience. Les résultats montrent que l'intensité du retour haptique a un effet significatif et positif sur plusieurs mesures de performance objective, telles que le taux de remplissage moyen des godets, le score de qualité de la tranchée et le nombre de godets remplis ( $p < 0,05$ ), confirmant l'hypothèse H1. La richesse du retour haptique a également eu un effet significatif, mais plus limité, sur une seule métrique de performance objective, soit le score de qualité de la tranchée ( $p < 0,1$ ), confirmant l'hypothèse H2. Les hypothèses concernant le rôle médiateur du sentiment de présence et de la charge cognitive (H3 à H6) n'ont pas été confirmées.

**Mots-clés :** Apprentissage par simulation – Simulateurs d’entraînement - Retour haptique  
- Formation d’opérateurs - Machinerie lourde – Plateforme de mouvement

## 2.1 Introduction

L’apprentissage par simulation (*simulation-based learning*) dans des environnements formatifs est devenu une approche incontournable pour la formation professionnelle dans certains domaines, particulièrement dans des domaines nécessitant la formation et l’entraînement de compétences physiques motrices, tels que l’aviation, la médecine ou le secteur industriel (Jones, 2022; Lelevé et al., 2020). Ces environnements simulés offrent aux apprenants l’opportunité de s’exercer, développer et acquérir des compétences dans un environnement sécurisé et contrôlé, et ce dans des conditions plus réalistes. Cela permet notamment de minimiser les risques associés à leur sécurité, celle des autres ou celle du matériel (sécurité, coût, etc.). Ceci est crucial pour la formation dans des domaines à haut risque comme la médecine, l’aviation, le secteur industriel ou le secteur militaire. Un aspect central dans la formation par simulation est le concept de fidélité. Plus spécifiquement, la fidélité dans une simulation d’entraînement peut se diviser en trois types : la fidélité cognitive, physique (incluant la fidélité physique-haptique) et fonctionnelle, qui sont essentielles pour que les simulations reproduisent avec précision des situations réelles. Plus le réalisme et le rendu des signaux multisensoriels (visuel, audio, haptique, proprioception, etc.) est adéquat, plus l’apprentissage est efficace, et ce surtout lorsqu’il s’agit de reproduire les processus cognitifs et comportementaux que les apprenants appliqueront dans des environnements réels par la suite (Jones, 2022). L’étude de Paul (2023), ayant pour but de comparer des simulateurs de différentes fidélités dans la formation des pilotes, montre que le retour haptique et une haute fidélité sensorielle sont particulièrement avantageux pour les tâches de maniement d’équipement nécessitant une réponse motrice précise. L’interaction de l’apprenant avec le retour haptique, interaction physique naturelle (ressenti des mouvements et vibrations), est particulièrement cruciale pour l’apprentissage des tâches et compétences motrices, car elle permet aux utilisateurs d’acquérir une mémoire musculaire (Paul, 2023). Cette fidélité a aussi par le fait même un impact sur la performance des apprenants lors de la simulation (Bystrom et al., 1999; Sigrist et al., 2013). Continuant sous cette idée, l’intégration du

retour haptique dans des contextes d'apprentissage ou de formation par simulation, dans certains domaines nécessitant le développement de compétences motrices ou pratiques, gagne beaucoup en intérêt dans la littérature. L'étude de Vassallo (2023) explore l'impact du retour de force et du retour vibratoire dans la rétention des connaissances procédurales dans des environnements de formation en VR. Celle-ci montre que le retour haptique améliore la rétention des connaissances procédurales et soutient les processus d'apprentissage, tels que l'intérêt et la motivation qui augmentent l'engagement. Cette étude montre additionnellement que les opérateurs qui s'entraînent avec un retour haptique (force de résistances et vibrations produite par la machine) obtiennent des performances plus élevées que ceux sans retour haptique. Dans ces contextes, les opérateurs engagés dans un environnement plus réaliste de simulation bénéficient de l'expérience immersive qui améliore leur capacité à réagir aux signaux haptiques comme dans des scénarios réels, ce qui améliore la précision et réduit les erreurs. L'étude de Lelevé et al. (2020) met en avant l'utilité du retour haptique dans la formation pour des tâches manuelles et complexes, comme la chirurgie, l'aviation ou la manufacture. Le retour haptique permet de recréer des sensations tactiles et kinesthésiques réalistes et essentielles pour acquérir des compétences pratiques et motrices, ce qui est particulièrement pertinent pour des tâches répétitives en production ou en sécurité industrielle. Dans sa recherche sur les simulateurs pour les opérateurs de machinerie forestière, Burk (2022) souligne le besoin, pour la formation de ces opérateurs, d'avoir des simulateurs réalistes qui simulent les vibrations et les réponses aux forces de conduite qu'un opérateur ressentira dans une machine en forêt. Les simulateurs qui ne possèdent pas cette fonctionnalité de retour de mouvement ne procurent pas aux utilisateurs la sensation physique de conduire une véritable machine dans les bois et ne ressemblent donc pas de près à l'environnement opérationnel réel.

Les simulateurs d'entraînement ou de formation avec retour haptique intégré deviennent donc essentiels dans plusieurs domaines. Par exemple, dans le domaine militaire, les simulateurs haptiques sont utilisés pour l'entraînement au maniement des armes et autres tâches à risque élevé dans des conditions sûres. Dans le domaine médical, domaine le plus largement étudié, des simulateurs haptiques pour la chirurgie, dans lesquels le retour haptique aide à améliorer la précision et réduit les erreurs comme les dommages aux tissus

musculaires du patient. Dans le domaine industriel, et plus précisément de manufacture et maintenance, des simulateurs d'entraînement avec retour haptique peuvent généralement être utilisés pour les tâches répétitives comme l'assemblage, le désassemblage et la maintenance, permettant de s'entraîner sur des tâches. En effet, les technologies haptiques évoluent rapidement pour répondre aux exigences de ces divers domaines, notamment avec des avancées dans les actionneurs hybrides pour un retour de force et l'intégration du retour tactile. Cela permet aux simulateurs de représenter plus fidèlement les environnements opérationnels (résistances, textures, etc.), améliorant ainsi l'efficacité et la sécurité de la formation (Lelevé et al., 2020).

Quand même bien que certaines études portent sur l'analyse des simulateurs avec rendu haptique, peu d'études se concentrent sur l'impact du retour haptique sur les performances et l'expérience d'apprentissage à l'entraînement des opérateurs, et ce particulièrement dans le secteur industriel. Burk (2022) mentionne notamment un manque de recherche dans la littérature et un manque de données en ce qui concerne la manière dont les simulateurs d'entraînement de machinerie lourde influencent réellement la performance des opérateurs apprenants. Un secteur moins étudié est celui du secteur industriel, et plus précisément en ce qui concerne les simulateurs de machinerie lourde dans le secteur industriel.

C'est entre autres pour ces raisons que cette étude se concentre sur les simulateurs d'entraînement traditionnels et plus spécifiquement dans le secteur industriel de la construction (simulateurs d'entraînement de machinerie lourde pour la construction). En ajoutant l'importance de la technologie haptique et du retour haptique dans ces contextes de formation par simulation, cette étude se concentre de manière plus précise sur la question de recherche suivante :

*« Dans quelle mesure le retour haptique (intensité et richesse) dans les simulateurs d'entraînement de machinerie lourde dans le secteur industriel impact-t-il les performances (objectives et subjectives) des opérateurs apprenants, en considérant le sentiment de présence et la charge cognitive comme potentiels médiateurs de la relation? »*

Cette problématique ou lacune devient encore plus pertinente à combler lorsqu'on prend en considération la demande croissante de main-d'œuvre qualifiée pour contrôler les machines lourdes (Lustosa et al., 2018) et la pénurie de main d'œuvre qualifiée dans le secteur de la construction au Québec (Le Devoir, 2023). Ainsi, en se concentrant sur les simulateurs avec retour haptique dans le secteur industriel et en s'intéressant à l'impact de ce retour haptique, cette recherche a pour objectif d'évaluer dans quelle mesure l'intensité et la richesse du retour haptique dans ces simulateurs influence les performances et l'expérience des opérateurs durant l'utilisation de ces simulateurs de formation pour opérateurs. En analysant cette relation, cette recherche bénéficiera non seulement à la littérature scientifique existante concernant les simulateurs avec retour haptique, à la technologie haptique et à l'utilisation du retour haptique dans des contextes de formation par simulation, mais bénéficiera aussi aux designers/développeurs de simulateurs de formation et aux entreprises en fournissant des insights précieux concernant la formation des opérateurs sur simulateurs de formation avec retour haptique dans le secteur industriel.

## **2.2 Travaux Connexes**

### ***2.2.1 Modèle Immersion, Présence et Performance (IPP) en contexte d'environnements simulés***

L'application de la technologie haptique démontre un fort potentiel pour améliorer la performance des apprenants, car elle renforce plusieurs éléments clés dans l'environnement de la simulation, comme la fidélité du rendu de la simulation, l'immersion et le sentiment de présence (Bystrom et al., 1999). En effet, le modèle IPP de Bystrom (1999) relie l'immersion (augmentée par une fidélité sensorielle élevée) au sentiment de présence, qui est une condition nécessaire pour une performance optimale. La fidélité d'une simulation virtuelle immersive signifie la mesure dans laquelle cette simulation reproduit fidèlement les aspects visuels, sonores, haptiques, l'apparence physique et le comportement de l'environnement opérationnel (Jones, 2022). L'aspect haptique concerne la dimension physique-haptique de la fidélité d'un environnement virtuel simulé. Cette dimension concerne, parmi les trois principales dimensions de la fidélité d'une simulation, soient la dimension fonctionnelle, cognitive et physique, elle

fait partie de la dimension « physique » de la fidélité. Par exemple, elle peut faire référence aux *motion platforms* dans les simulateurs d'aéronefs ou à la résistance simulée que les tissus exercent (*force feedback* ou *haptic feedback*) sur les instruments dans certains simulateurs de chirurgie endoscopique (Jones, 2022). La dimension physique-haptique, faisant référence au retour haptique (forces, mouvements, vibrations), induit une fidélité cognitive en offrant un environnement dans lequel les apprenants développent des schémas moteurs et de reconnaissance transférables. Un objectif commun dans la formation par simulation est d'apprendre aux apprenants à reconnaître les signaux pertinents. Il s'agit de la formation de la mémoire associative, qui est un processus cognitif (Jones, 2022). En effet, afin de former des schémas de reconnaissance qui seront transférables à l'environnement opérationnel réel, les signaux ou instances dans le retour perçu doivent avoir une fidélité suffisante pour former les mêmes mémoires associatives que celles qui seraient formées dans l'environnement opérationnel de formation (fictive). Ainsi, la qualité de la fidélité cognitive chez l'apprenant est en partie déterminée par la fidélité physique-haptique de la simulation. Un parallèle peut être fait pour le transfert des schémas moteurs (également appelée mémoire motrice). La mémoire motrice consiste à manipuler des objets physiques d'une manière spécifique pour atteindre un résultat précis (Lee & Schmidt, 2008). Les premières étapes de l'acquisition des compétences motrices proposées par Fitts & Posner (1967), soient les phases associatives et cognitives, sont des activités cognitives ; l'apprenant doit consciemment réfléchir à chaque mouvement moteur qu'il effectue (Jones, 2022). Le retour haptique représentant la fidélité physique-haptique fournit les signaux de retour de force nécessaires aux phases cognitive et associative du modèle de Fitts & Posner (1967). (Friedman et al., 2009) illustrent bien ce concept en décrivant l'utilisation de la formation par simulation avec retour haptique chez les médecins pour leur apprendre à réaliser une ponction lombaire. Dans ce contexte, la fidélité physique-haptique s'avère importante, car ils mentionnent que l'anesthésie péridurale est une procédure qui repose fortement sur le retour haptique. Pour réussir la procédure, les apprenants doivent ajuster la quantité de pression qu'ils appliquent sur l'aiguille en fonction de la résistance qu'ils ressentent lors du passage de l'aiguille. Pendant le processus d'apprentissage, l'apprenant réfléchit à la gestion de la force appliquée sur l'aiguille pour effectuer la procédure et avoir le résultat escompté. Selon le

modèle de (Fitts, 1967), l'apprenant formule un plan pour modifier son approche lors de la prochaine tentative. Il s'agit d'un processus cognitif, mais il nécessite des signaux haptiques pour fonctionner, d'où le rôle de la fidélité physique-haptique qui est de favoriser une meilleure fidélité cognitive. La fidélité d'un simulateur, définie par sa capacité à reproduire les sensations et les expériences du monde réel, est un facteur clé qui influence non seulement la performance des utilisateurs, mais aussi leur capacité à transférer les connaissances et les compétences acquises vers des situations pratiques (Stanney & Salvendy, 1998).

La théorie IPP (Immersion, Présence, Performance), proposée par Bystrom et ses collègues (1999), offre un cadre conceptuel théorique pertinent pour comprendre comment l'utilisation de la technologie haptique, en contexte d'apprentissage sur simulateur et par simulation multisensorielle, démontre un fort potentiel pour améliorer la performance des apprenants. D'abord, la théorie IPP explique que l'immersion, influencée entre autres par les technologies d'affichage graphiques, les informations/données sensorielles et les sensations proprioceptives, joue un rôle fondamental sur le sentiment de présence que l'utilisateur peut ressentir. La présence se définit comme l'expérience subjective d'être dans un lieu ou un environnement, même lorsqu'on est physiquement situé dans un autre (Stevens & Kincaid, 2015). Ainsi, la fidélité sensorielle, incluant le retour haptique, est un élément clé qui influence l'immersion et le sentiment de présence dans les environnements immersifs simulés. Une fidélité sensorielle élevée, obtenue grâce à un retour haptique adéquat, permet aux utilisateurs d'être plus engagés dans la simulation et de percevoir l'environnement opérationnel de simulation comme un lieu réel. Dans le contexte de l'apprentissage par simulation, une immersion accrue et un sentiment de présence élevé sont essentiels pour que les apprenants puissent interagir efficacement avec l'environnement opérationnel simulé et accomplir les tâches. Le modèle IPP suggère que le sentiment de présence est une condition nécessaire à la performance (Bystrom et al., 1999). En d'autres mots, sans une présence suffisante, les apprenants ne peuvent pas exploiter pleinement les avantages de la simulation pour développer leurs compétences. L'utilisation de simulateurs en contexte de formation ou d'entraînement, en particulier avec un retour haptique, facilite également le transfert de connaissances des apprenants vers des situations réelles. Une

fidélité élevée favorise des comportements plus réalistes de la part de l'utilisateur, ce qui impact positivement leur niveau de performance (Stanney & Salvendy, 1998). De plus, selon Stanney & Salvendy (1998), un niveau élevé de présence ressenti dans la simulation est essentiel pour un transfert de connaissances optimal, car il engendre un état d'immersion permettant à l'utilisateur de mieux assimiler les informations et de les appliquer plus efficacement dans des contextes réels. Cela est d'autant plus vrai lorsque les caractéristiques haptiques du simulateur sont adéquatement et soigneusement intégrées, car celles-ci augmentent la fidélité de l'environnement simulé, ce qui améliore l'expérience perçue et l'engagement (Sallnäs et al., 2000). Les résultats de Sallnäs et al. (2000) montrent que les retours haptiques permettent de simuler de manière plus réaliste les interactions physiques avec l'environnement, ce qui favorise un sentiment de présence plus élevé et une meilleure efficacité d'apprentissage. En effet, dans leur expérimentation sur l'impact du retour de force haptique dans un environnement virtuel (desktop) collaboratif sur la perception du sentiment de présence, sur la performance et sur la performance perçue, ils ont observé une amélioration significative de la performance des tâches et de la présence perçue avec l'ajout de retours haptiques dans un environnement collaboratif distribué. En parallèle, l'étude de Vassallo (2023) met en évidence le fait que le retour haptique, en augmentant le niveau de présence, aide non seulement à améliorer les performances des utilisateurs pendant la formation, mais favorise aussi la rétention des connaissances procédurales à long terme. L'étude démontre que la présence accrue grâce aux dispositifs haptiques est corrélée avec une meilleure rétention des connaissances après une semaine de formation, mettant l'accent sur l'importance de l'intégration du retour haptique pour renforcer l'impact pédagogique des simulateurs (Vassallo, 2023). D'autre part, Stevens et Kincaid (2015) ont établi une relation entre le niveau de présence ressenti et les performances des apprenants dans un environnement de simulation virtuelle. Leur étude démontre que des niveaux plus élevés de présence peuvent conduire à des performances accrues, car les apprenants se sentent plus engagés dans le processus de formation, ce qui est crucial pour l'optimisation des résultats d'apprentissages (Stevens & Kincaid, 2015). Enfin, Wong (2014) démontre dans son étude que la présence, définie par des facteurs comme la fidélité sensorielle et l'immersion multisensorielle, joue un rôle clé dans la performance des utilisateurs en stimulant des environnements plus proches de

la réalité et représentatifs des environnements de formation réels. Plus précisément, il démontre que le retour haptique peut améliorer la précision et la rapidité d'exécution des tâches, tout en réduisant le temps de formation nécessaire. Il met aussi l'accent sur l'importance de la congruence des signaux sensoriels pour induire un sentiment de présence accru et favoriser des comportements plus réalistes, ce qui est primordial pour un transfert de connaissances efficace (Wong, 2014).

C'est à la lumière de ces concepts, notions et travaux que cette étude propose les hypothèses suivante concernant le rôle médiateur du sentiment de présence dans la relation concernant le retour haptique, le sentiment de présence et la performance (objective et subjective) des opérateurs:

*H3 : Le sentiment de présence a un effet médiateur positif dans la relation entre l'intensité du retour haptique et la performance objective, la performance perçue et la performance anticipée des opérateurs.*

*H5 : Le sentiment de présence a un effet médiateur positif dans la relation entre la richesse du retour haptique et la performance objective, la performance perçue et la performance anticipée des opérateurs.*

La théorie IPP (Bystrom, 1999) est donc particulièrement pertinente car elle offre un cadre théorique permettant de comprendre, dans un contexte de formation par simulation avec retour haptique, comment les différentes dimensions sensorielles, dont la dimension haptique (retour de force tactile et kinesthésique) , affectent l'immersion, la présence et les performances des apprenants dans les simulateurs de formation pour opérateurs de machinerie lourde. En étudiant l'impact de l'intensité et de la richesse du retour haptique, cet étude explore comment ces dimensions, impactant la fidélité sensorielle, influencent la présence et les performances des opérateurs apprenants. De plus, la théorie IPP reconnaît que la nature de la tâche et l'allocation des ressources attentionnelles joue un rôle dans le niveau de présence ressenti. Cela correspond à la présente étude dans laquelle la charge cognitive est considérée comme médiateur potentiel de la relation entre le retour haptique et la performance (objective et perçue) des opérateurs apprenants.

Par conséquent, cette étude formule les hypothèses suivantes :

*H1 : Une plus grande intensité (clarté) du retour haptique dans les simulateurs de formation améliore la performance objective, la performance perçue et la performance anticipée des opérateurs.*

*H2 : Une plus grande richesse (finesse) du retour haptique dans les simulateurs de formation améliore la performance objective, la performance perçue et la performance anticipée des opérateurs.*

### **2.2.2 Charge cognitive**

La charge cognitive correspond à la quantité des ressources mentales nécessaires pour traiter les informations pendant l'exécution d'une tâche, influençant ainsi la performance et l'apprentissage dans des environnements simulés et en contextes de formation (Vassallo, 2023). La théorie de la charge cognitive, initialement développée par Sweller (1988), offre un cadre théorique qui conceptualise la manière dont la charge cognitive influence l'apprentissage et la performance en fonction des limitations de la mémoire de travail. Cette théorie postule que la mémoire de travail a une capacité et une durée limitées lorsqu'elle traite de nouvelles informations, mais que ces contraintes peuvent être diminuées une fois les informations transférées dans la mémoire long terme (Sweller et al., 1998). La charge cognitive est divisée en trois types. Le premier type de charge cognitive s'agit de la charge cognitive intrinsèque. Celle-ci est imposée par la nature intrinsèque de l'information à apprendre. Il s'agit ici de la complexité intrinsèque du matériel à apprendre, déterminée par la structure de base de l'information que l'apprenant doit acquérir pour atteindre ses objectifs d'apprentissage, indépendamment des méthodes pédagogiques utilisés. Le deuxième type de charge cognitive s'agit de la charge cognitive extrinsèque. Celle-ci est imposée non par l'information elle-même, mais par la manière dont cette information est présentée ou par les activités dans lesquelles les apprenants doivent s'engager. Elle fait notamment référence aux éléments de la conception pédagogique qui rendent l'apprentissage plus difficile en ajoutant une complexité inutile, comme des distractions, des instructions mal organisées, ou un contenu redondant. Cela, au lieu de soutenir l'apprentissage, surcharge la mémoire de travail de l'apprenant sans contribuer à l'atteinte des objectifs d'apprentissage. Ce type de charge cognitive influence

négalement l'apprentissage et la performance. En effet, une charge cognitive extrinsèque élevée détourne les ressources cognitives des apprenants de l'acquisition de compétences ou de connaissances pertinentes et les oblige à traiter des informations inutiles, ce qui diminue leur efficacité et leur performance (Sweller et al., 2011). Par exemple, l'article de Vassallo (2023) discute comment le retour haptique peut influencer la charge cognitive des utilisateurs en simulation. Dans le contexte de leur étude, ils établissent que l'intégration du retour haptique dans des environnements de formation virtuelle peut augmenter la performance et alléger la charge cognitive extrinsèque en fournissant un retour adéquat, réaliste et intuitif. Ce retour haptique offre un canal sensoriel supplémentaire permettant de répartir les informations entre différents sens et aide les utilisateurs à mieux comprendre et interpréter les informations sensorielles dans l'environnement simulé. À l'inverse, des signaux mal conçus, inadéquats ou utilisés de manière excessive peuvent faire augmenter la charge cognitive extrinsèque (Vassallo, 2023). Le troisième type de charge cognitive est la charge cognitive essentielle (ou « germane »). Contrairement aux charges cognitives intrinsèque et extrinsèque, la charge cognitive essentielle n'est pas imposée par le matériel d'apprentissage. Elle représente les ressources de la mémoire de travail dédiées au traitement de l'information pertinente pour l'apprentissage. Ces ressources servent à la compréhension profonde, à l'intégration et à la construction des schémas cognitifs (Sweller et al., 2011).

Dans le contexte formation par simulateurs avec retour haptique, le retour sensoriel est un facteur clé qui influence la charge cognitive. Le retour haptique (vibrations, mouvements) peut aider les apprenants à alléger ou contrôler leur charge cognitive extrinsèque en fournissant un retour de force réaliste, adéquat et cohérent. Cela peut à son tour avoir une influence positive sur la performance des opérateurs du simulateur d'entraînement (Malik et al., 2020) ou même sur la rétention des connaissances procédurales (Vassallo, 2023). Additionnellement, plusieurs études montrent que des niveaux élevés de charge cognitive, mesurés par des outils comme le NASA TLX, sont associés à une diminution de la performance lors de tâches motrices complexes, comme la laparoscopie simulée (Yurko et al., 2010) ou le pilotage d'aéronefs (Malik et al., 2020). Yurko et al. (2010) montrent qu'une charge cognitive élevée augmente la probabilité d'erreurs et réduit l'efficacité des apprenants, ce qui met en évidence l'importance de gérer cette charge dans les

environnements de simulation (Yurko et al., 2010). De même, Malik et al. (2020) démontrent que le retour haptique peut influencer la charge cognitive des opérateurs lors de simulations de vol. Un retour haptique réaliste et adéquat améliore la performance des tâches de contrôle de l'altitude, alors qu'un retour haptique exagéré peut ajouter une charge cognitive extrinsèque inutile, réduisant ainsi la performance (Malik et al., 2020).

Ainsi, cette étude émet les hypothèses suivantes concernant le rôle médiateur de la charge cognitive dans la relation concernant le retour haptique, la charge cognitive et la performance des opérateurs :

*H4 : La charge cognitive a un effet médiateur négatif dans la relation entre l'intensité du retour haptique et la performance objective, la performance perçue et la performance anticipée des opérateurs.*

*H6 : La charge cognitive a un effet médiateur négatif dans la relation entre la richesse du retour haptique et la performance objective, la performance perçue et la performance anticipée des opérateurs.*

Pour accentuer le lien avec la théorie IPP, la théorie de la charge cognitive et la théorie IPP se complètent. Ces deux modèles théoriques offrent un cadre conceptuel pour comprendre comment le retour haptique, influençant simultanément la charge cognitive et le sentiment de présence pour améliorer la performance des apprenants, dans un contexte de formation par simulation sur simulateur avec retour haptique. La charge cognitive extrinsèque est réduite grâce à l'immersion accrue par un retour haptique adéquat, permettant l'allocation de ressources cognitives aux éléments pertinents et aux informations essentielles, ce qui à son tour peut augmenter les performances. Parallèlement, un retour haptique adéquat augmente l'immersion sensorielle, renforçant le sentiment de présence. Selon le modèle IPP, une présence accrue est essentielle pour une performance optimale, car elle engage davantage l'apprenant dans la tâche.

En somme, les hypothèses sont résumées dans le modèle présenté en figure 1. Il est donc justifiable de croire que le retour haptique dans les simulateurs et dans un contexte d'apprentissage par simulation joue un rôle clé dans la formation des apprenants, non

seulement car, par la présence et par la charge cognitive, il induit et permet de meilleures performance lors de la formation par simulation, mais aussi car il induit une meilleure fidélité cognitive permettant un apprentissage plus efficace et un meilleur transfert des connaissances lors de réelles tâches. D'ailleurs, cela peut avoir impact sur plusieurs sphères importantes dans le contexte des opérateurs industriels, notamment sur tout ce qui a trait à la sécurité des opérateurs.

---

### Hypothèses

---

**H1** : Une plus grande intensité du retour haptique dans les simulateurs de formation améliore la performance à la tâche (performance objective), la performance perçue et la performance anticipée des opérateurs

**H2** : Une plus grande richesse du retour haptique dans les simulateurs de formation améliore la performance à la tâche (performance objective), la performance perçue et la performance anticipée des opérateurs.

**H3** : Le sentiment de présence a un effet médiateur positif dans la relation entre l'intensité du retour haptique et la performance à la tâche (performance objective), la performance perçue et la performance anticipée des opérateurs.

**H4** : La charge cognitive a un effet médiateur négatif dans la relation entre l'intensité du retour haptique et la performance à la tâche (performance objective), la performance perçue et la performance anticipée des opérateurs.

**H5** : Le sentiment de présence a un effet médiateur positif dans la relation entre la richesse du retour haptique et la performance à la tâche (performance objective), la performance perçue et la performance anticipée des opérateurs.

**H6** : La charge cognitive a un effet médiateur négatif dans la relation entre la richesse du retour haptique et la performance à la tâche (performance objective), la performance perçue et la performance anticipée des opérateurs.

---

*Figure 1.* Liste des hypothèses

### 2.2.3 Analyse du retour haptique sous plusieurs dimensions

Du fait de l'importance de la fidélité haptique pour améliorer la performance des utilisateurs dans divers contextes, il serait encore plus intéressant d'analyser la variable du retour haptique sous plusieurs dimensions. Cela peut être nécessaire pour une évaluation plus complète et précise de son impact. Dans la littérature, bien que l'importance du retour haptique est soulignée dans ces contextes, peu d'études s'attardent à l'analyse de cette variable sous plusieurs dimensions. En effet, il est pertinent d'examiner la validité d'une mesure en prenant en compte plusieurs traits (ou dimensions) et plusieurs méthodes de mesures (Campbell & Fiske, 1959). Cela peut aussi rejoindre l'idée que le ressenti haptique est une expérience multidimensionnelle. Les différents aspects du ressenti haptique sont essentiels non seulement pour concevoir des dispositifs haptiques efficaces (qui produisent un retour haptique réaliste et améliorent l'interaction utilisateur et potentiellement la performance dans des tâches), mais aussi pour mieux comprendre et évaluer ses impacts et les manières dont ces dimensions influencent la perception haptique dans divers contextes, y compris l'apprentissage et la formation des opérateurs (Kappers & Bergmann Tiest, 2013). Cette étude étudie la variable du retour haptique sous deux dimensions, soient l'intensité du retour haptique et la richesse du retour haptique (nous y reviendrons dans la section *méthodologie – analyses statistiques*). L'intensité haptique représente l'accélération du mouvement sur chacune des trois axes (x, y, z) à une fréquence d'une seconde (voir annexe 2). La richesse haptique se réfère à la diversité et à la finesse des mouvements ou vibrations perçus à travers un dispositif haptique. Elle est mesurée par l'indice de réponse haptique (HRI), correspondant au ratio de densité spectrale de puissance (PSD ratio), qui met en relation les proportions des vibrations à hautes et moyennes fréquences par rapport aux proportions des vibrations à basses fréquences. Un HRI élevé indique un retour haptique plus détaillé et subtil, avec des vibrations fines et rapides, tandis qu'un HRI faible représente des sensations plus profondes et globales (Tessier et al., 2024). Cette distinction permet d'évaluer de manière plus détaillée et approfondie la relation entre le retour haptique et les performances des opérateurs lors de leur simulation, offrant une perspective plus complète sur l'impact du retour haptique en contexte de formation d'opérateurs de machinerie lourde sur simulateur de formation pour opérateur. Pour optimiser les résultats de la formation, il est essentiel

de prendre en compte ses différentes dimensions, telles que l'intensité des mouvements et vibration ou la finesse des vibrations. Chacune de ces dimensions pourraient affecter différemment des variables comme le sentiment de présence, la charge cognitive et la performance. Cela est particulièrement pertinent pour les opérateurs industriels, dont les tâches complexes et potentiellement dangereuses nécessitent une préparation précise et réaliste.

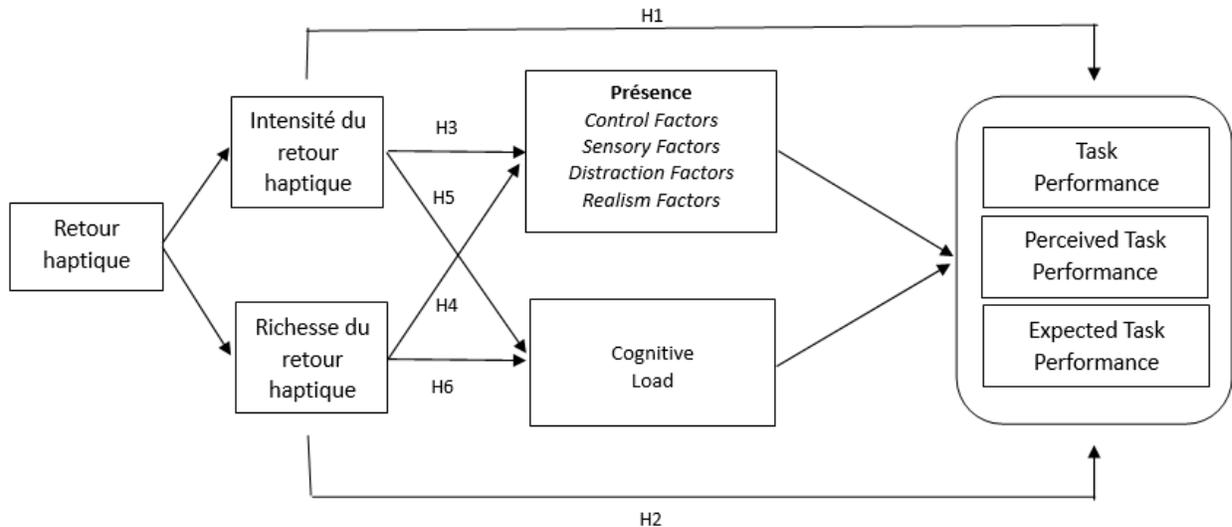


Figure 2. Représentation graphique résumant les hypothèses et le modèle de recherche

## 2.3 Méthodologie

### 2.3.1 Participants

Un total de 17 participants opérateurs ont été recrutés. Les participants étaient composés de 12 hommes et 5 femmes et avaient un âge moyen de 29 ans. Les participants ont été recrutés via trois sources. Premièrement, un centre spécialisé en formation de conduite d'engins et de machinerie lourde de chantier duquel nous avons recruté certains de ses étudiants. Deuxièmement, des étudiants d'ingénierie en construction provenaient de l'École de technologie supérieure (ETS) à Montréal. Troisièmement, des membres de communautés de passionnés de simulateurs de formation pour opérateurs et/ou de machinerie lourde de chantier ont été recrutés via des groupes ciblés sur Facebook. Plus précisément, de ces 17 participants, 5 provenaient de l'école de conduite d'engins et de

machinerie lourde de chantier, 6 provenaient de l'École de technologie supérieure (ETS) de Montréal et 6 provenaient de communautés Facebook. La population cible pour cette étude comprend les opérateurs de machinerie lourde dans le secteur industriel au Québec. Il est à noter que l'Union des Opérateurs de Machinerie Lourde est composé de près de 8000 membres travaillant dans différentes régions et dans différents secteurs de l'industrie de la construction (Saguenay, 2020). Les critères d'inclusion étaient les suivants : avoir plus de 18 ans, avoir un intérêt pour la machinerie lourde, ou être étudiant en école spécialisée et compréhension avancée du Français à l'oral et à l'écrit. Les critères d'exclusion étaient les suivants : critères standards du Tech3lab concernant l'utilisation des outils physiologiques et allergies cutanées ou sensibilités particulières de la peau. Finalement, les participants ont reçu une compensation via virement Interac d'une valeur de 100\$.

### **2.3.2 *Design expérimental***

Cette étude menée correspond à une expérience en laboratoire, ce qui signifie qu'elle est de nature expérimentale. Nous avons employé un design intra-participant (within-subjects), ce qui signifie que chaque participant a été exposé à toutes les conditions expérimentales. Les participants ont été assignés de manière aléatoire à deux simulateurs de formation différents, chacun offrant un retour haptique différent. Ensuite, sur chaque simulateur, ils avaient deux tâches à faire (*truck loading* et *trenching*), qui elles aussi étaient présentés dans un ordre aléatoire. Ces manipulations avaient pour but de générer de la variance dans les variables indépendantes, à savoir l'intensité et la richesse du retour haptique. La diversité de ces tâches permet d'autant plus de tester la variable dépendante, soit la performance (objective, perçue, anticipée), sur plus d'un volet d'activité. D'ailleurs, ces volets d'activité et ces tâches représentent mieux des opérations courantes dans l'utilisation de la machinerie lourde, permettant de refléter les compétences réelles des opérateurs et d'assurer une meilleure validité écologique.

### **2.3.3 *Vérification des manipulation***

Dans cette étude, les manipulations concernaient principalement deux aspects: les simulateurs de formation utilisés et les tâches assignés aux participants. Ces

manipulations ont été effectués dans le but de mieux explorer l'impact de l'intensité et de la richesse du retour haptique sur les performances des opérateurs apprenants. Premièrement, deux simulateurs de formation distincts ont été utilisés, chacun ayant un profil haptique différent. L'objectif de cette manipulation était d'ajouter de la variance aux variables indépendantes, soient l'intensité et la richesse du retour haptique. Ensuite, deux types de tâches ont été conçus pour cette étude : le remplissage de camion-bennes de déchargement (*truck loading*) et le creusage de tranchée (*trenching*). Ces tâches ont été établies sur les deux simulateurs pour générer un plus grand spectre d'intensité (activity/act1s) et de richesse (ratio PSD) du retour haptique (variables indépendantes). La sélection de ces tâches permet de tester la variable dépendante, soit la performance (objective, perçue, anticipée), sur plus d'un volet d'activité. Ces volets d'activité et ces tâches représentent davantage des opérations courantes dans l'utilisation de la machinerie lourde, ce qui permet de mieux refléter les compétences réelles des opérateurs et d'assurer une validité écologique. Finalement, une randomisation a été effectuée en ce qui concerne l'ordre des tâches et des simulateurs. Chaque participant a été assigné à l'un des deux simulateurs en premier, suivi de l'autre simulateur, avec les deux tâches exécutées de manière aléatoire sur chaque simulateur.

#### **2.3.4 Mesures**

L'intensité du retour haptique a été mesurée de manière physiologique en utilisant les données capturées par la veste HexoSkin (Carré Technologies Inc., Montréal, QC, Canada). Ce signal d'activité, mesuré à une fréquence d'une seconde et basé sur l'accélération de mouvement perçue dans les trois axes (x, y, z), est représenté par l'indicateur d'activité (act1s). La richesse du retour haptique (HFR) a été évaluée à l'aide de l'indice de réponse haptique (HRI), calculé par le ratio de densité spectrale de puissance (PSD). Ce ratio compare la proportion des vibrations (en hertz) en haute et moyenne fréquence par rapport à celles en basse fréquence. Cela traduit la finesse ou la richesse des vibrations et du rendu haptique. Un HRI élevé correspond à un retour haptique plus riche/détaillé/fin. Le sentiment de présence a été mesuré par un questionnaire de présence adapté de (Witmer & Singer, 1998), composé de 24 items. Cette échelle évalue le niveau global de présence perçue par les participants, ainsi que quatre

sous-dimensions : facteur de distraction (*DF*), facteur de contrôle (*CF*), facteur de réalisme (*RF*) et facteur sensoriel (*SF*). Chaque item est noté sur une échelle de 7 points (*Likert*). Questionnaire initialement développé pour des environnements simulés en réalité virtuelle (*VR*), certains items ou termes ont été modifiés au contexte des simulateurs. Certains items ont été modifiés pour adapter le contexte des simulateurs *VR* aux simulateurs *desktop*. Par exemple, la question « Dans quelle mesure pouviez-vous activement observer ou explorer l'environnement virtuel en utilisant le toucher ? » a été reformulée en « Dans quelle mesure les mouvements du simulateur vous ont permis de comprendre facilement l'environnement virtuel ? ». La charge cognitive a été évaluée par l'indice de charge cognitive (*NASA TLX*), un questionnaire auto-reporté développé par Hart et Staveland (1988) composé de 6 items, sur une échelle allant de 0 à 100 points (fonctionnalité *slider*). Les items mesurent différents aspects de la charge cognitive, incluant la demande mentale, physique, temporelle, la performance, l'effort et la frustration. Concernant la performance, la performance objective des participants a été mesurée à l'aide d'observations et de données télémétriques tirées des simulateurs. Les mesures de performances comprennent le taux de succès, la rapidité de remplissage, le quantité de seaux remplis ainsi que le score de qualité pour les tâches de chargement de camion (taux de remplissage moyen d'un bucket) et de creusage de tranchée (score de qualité de la tranchée évaluée par fiabilité inter-évaluateur (*inter-rater reliability*)). La performance perçue a été mesurée à l'aide d'un questionnaire auto-reporté composé de trois items sur une échelle de 7 points (Nadj et al., 2023). La performance anticipée ou projetée a été mesurée via un questionnaire auto-reporté comportant trois items. Celui-ci évalue les attentes futures des participants quant à leur performance en formation sur simulateur (prochaine fois qu'ils utiliseront ce simulateur). Finalement, les variables de contrôle, incluant l'expérience en jeux vidéo, l'expérience sur simulateurs d'entraînement et l'expérience réelle en machinerie lourde, ont été mesurées par un questionnaire pré-expérience. Ces mesures ainsi que leurs items et leurs sources (références) sont détaillés dans la section *Annexe (annexe 2)*.

### **2.3.5 Stimuli expérimentaux**

D'abord, l'étude a été réalisée avec deux simulateurs d'entraînement. Ceci a pour but de générer de la variance dans les variables indépendantes (intensité et richesse du retour haptique). Ensuite, les tâches assignées aux participants sont le remplissage de camion-bennes (truck loading) et le creusage de tranchée (trenching). Ces tâches ont également été conçues et choisies pour créer de la variance dans les variables indépendantes. Celles-ci permettent aussi d'évaluer la relation avec la performance sur plusieurs volets d'activités et représentent les opérations courantes dans l'utilisation de la machinerie lourde par des opérateurs de pelle excavatrice, ce qui notamment améliore la validité écologique. Un exemple de représentation visuelle se retrouve dans la Figure 3.



*Figure 3.* Exemple visuel de la configuration du laboratoire et des simulateurs

Les deux simulateurs de formation, ainsi que les deux tâches, ont été aléatoirement assignés aux participants. Chaque participant a aléatoirement été assigné à l'un des deux simulateurs en premier, suivi de l'autre simulateur, avec les deux tâches exécutées de manière aléatoire dans chacun des simulateurs. Cette randomisation a été mise en place pour minimiser les biais et maximiser la validité des résultats.

### ***2.3.6 Instruments de mesure et équipement de laboratoire***

La présence perçue (et ses facteurs) a été mesurée à l'aide d'un questionnaire administré via la plateforme Qualtrics (Qualtrics, Provo, UT, États-Unis). La performance perçue, la performance anticipée et la charge cognitive ont été mesurés de manière auto-reportée via questionnaires sur Qualtrics. En ce qui a trait à la performance à la tâche (réelle, objective), elle a été mesurée à l'aide de données télémétriques et de mesures de

performances observées, comme le taux de succès, la rapidité de remplissage, le score complétion, le nombre de buckets remplis, le taux de remplissage moyen d'un bucket, le temps de complétion, le nombre de collisions et le score de qualité de la tranchée évalué par fiabilité inter-évaluateurs (inter-rater reliability). L'intensité et la richesse du retour haptique ont été mesurés à l'aide d'une veste HexoSkin (Carré Technologies Inc., Montréal, QC, Canada). Les fréquences de mouvement (hertz) associées au retour haptique ont été enregistrées et analysées pour mesurer l'intensité et la richesse des mouvements et vibrations ressentis. Concernant la configuration du laboratoire, deux simulateurs différents ont été utilisés, chacun avec un profil retour haptique différent pour ajouter de la variance dans les variables indépendantes. Les simulateurs ont chacun été placés dans une pièce dédiée, sans distractions extérieures. Les participants étaient amenés, dans un ordre randomisée, à effectuer les tâches sur chaque simulateur dans chacune des deux pièces dédiées. Les participants portaient une veste HexoSkin pour mesurer les fréquences de mouvement pendant les tâches sur les simulateurs ainsi que la fréquence cardiaque et respiratoire. Les simulateurs étaient équipés d'un grand écran haute résolution installée à la verticale ainsi que de contrôles (joysticks, pédales, etc.). Le modérateur disposaient d'un bureau pour accueillir les participants et faire les procédures pré-tests. Le participant était ensuite dirigé vers l'une des deux pièces dédiées à un simulateur, dépendamment de l'ordre dans laquelle les stimuli (simulateurs) étaient présentés aux participants (ordre déterminée par Qualtrics). L'observateur disposait d'une petite station roulante sur laquelle pouvait se déposer l'ordinateur de contrôle et d'observation, pour la prise de note, et une tablette iPad pour les questionnaires et formulaires. Cette petite table roulante pouvait ensuite être transportée d'une pièce à l'autre pour suivre le participant dans chacune des deux pièces (contenant chacune d'elle un simulateur) au cours du test.

### ***2.3.7 Procédure***

Durant la phase pré-test, les participants étaient d'abord accueillis à leur arrivée au laboratoire. Ensuite, après une courte introduction, chaque participant était invité à signer un formulaire de consentement éclairé sur la tablette électronique, confirmant leur accord à participer à l'étude. Les participants étaient ensuite équipés d'une veste HexoSkin,

utilisée pour mesurer l'intensité et la richesse du retour haptique lors de la simulation et du test. Avant de commencer la simulation, les participants remplissaient un questionnaire pré-expérience sur la tablette via la plateforme Qualtrics, qui recueillait des données sur l'expérience en jeux vidéo, en machinerie lourde et sur simulateurs pour opérateurs. Les participants étaient ensuite amenés à la première pièce assignée dans laquelle se trouvait le premier simulateur. L'ordre de présentation des simulateurs était randomisé. Durant la phase test, les participants réalisaient une série de tâches sur chaque simulateur : tutoriel, truck loading (charger un camion-bennes) et trenching (creuser une tranchée). La première tâche consistait toujours d'un tutoriel qui avait pour but de familiariser le participants avec les différentes fonctionnalités et l'engin. Ensuite, les deux tâches officielles suivantes étaient effectuées par le participant dans un ordre randomisé. Après chaque tâche, un questionnaire recueillant la charge mentale et la performance perçue était administrée. Après chaque session sur un simulateur, en plus du questionnaire post-tâche, un questionnaire recueillant des données sur la performance anticipée et le sentiment de présence était administré. Finalement, les participants signaient le formulaire de compensation qui leur était présenté sur la tablette et étaient ensuite dirigés vers la sortie, après avoir été remerciés pour leur participation.

### **2.3.8 Analyses Statistiques**

Toutes les analyses statistiques de cette étude ont été réalisées à l'aide du logiciel SAS. Les hypothèses de recherche ont été testées en utilisant une combinaison de régressions linéaires, logistiques et non-binaires, selon la nature des variables dépendantes. D'abord, avant de procéder aux analyses, il y a eu prétraitement des données. Plus spécifiquement, les distributions des variables dépendantes ont été visualisées à l'aide d'histogrammes et des tests de normalité ont été effectués pour choisir les tests statistiques appropriés. Les vérifications de normalité des distributions des variables dépendantes ont été effectuées à l'aide du test de Shapiro-Wilk. Les variables pour lesquelles la normalité n'était pas respectée ont fait l'objet d'ajustements ou de transformations. Par exemple, la variable de performance anticipée (« expected performance ») mesurée sur une échelle de Likert de 1 à 7 a été transformée en une variable binaire via un split médian (*median split*). Cette transformation a permis de catégoriser les participants en deux groupes : ceux ayant une

performance anticipée élevée et ceux ayant une performance anticipée faible. De telles transformations sur les variables « durée de la tâche », « présence » et « facteur de contrôle » ont aussi été effectuées. De plus, en raison de la taille relativement petite de l'échantillon (N=17), certaines catégories de variables ont été regroupées. Par exemple, pour la variable « truck loading success », qui comportait trois niveaux (« success », « partial success » et « échec »), un regroupement a été opéré pour créer une variable binaire (succès ou échec) en combinant les catégories « partial success » et « success ». De plus, une régression non-binaire a été nécessaire pour analyser une mesure de performance objective, soit la sous-variable « nombre de collisions » de la performance objective, qui se trouve à être un compte d'événements et ne correspondent pas à une régression linéaire classique ni à une régression logistique binaire. Les relations à tester auxquelles étaient associées les autres variables dépendantes suivant une distribution normale (performance objective, performance perçue, la charge cognitive, la présence globale, le facteur de réalisme et le facteur sensoriel) ont été analysées à l'aide de régressions linéaires. Comme c'est commun dans en recherche HCI (*human computer interaction*) pour des études exploratoires, un seuil de significativité de 0.1 (10%) a été utilisé. Ce seuil est différent du standard de 0.05, donc le terme « marginally significant » – ou « marginalement significatif » – a été utilisé pour des interactions qui sont significatives entre 0.05 et 0.1, et le terme « significatif » a été utilisé pour standard inférieur à 0.05 (5%). Ceci permet notamment d'identifier des interactions ou effets intéressants dans des études exploratoires dans le domaine de recherche HCI (*human computer interaction*), comme l'ont fait Burgoon et al. (2000), Li et al. (2022) et (Zhang et al., 2025).

La fidélité des échelles de mesure a été évaluée à l'aide du coefficient alpha de Cronbach. Un alpha de Cronbach inférieur à 0,7 est généralement considéré comme indicatif d'une faible validité interne (Tavakol & Dennick, 2011), ce qui a été le cas pour le facteur de distraction de la présence ( $\alpha = 0,059$ ). En conséquence, ce sous-construit de la présence (facteur de distraction) a été exclu des analyses. Tous les autres construits ont présenté des valeurs d'alpha de Cronbach acceptables.

Les analyses de médiation avaient pour objectif pour explorer le rôle médiateur du sentiment de présence et de la charge cognitive dans la relation entre les variables indépendantes (intensité et richesse du retour haptique) et les performances des opérateurs apprenants. Cependant, comme résumé dans la Figure 4, ces analyses de médiation n'ont pas pu être conduites en raison de l'absence de lien statistiquement significatif entre les variables indépendantes (X) et les variables médiatrices (M). En effet, pour qu'une médiation puisse être validement testée, trois conditions doivent être remplies (Baron & Kenny, 1986):

- 1) Lien direct entre X et Y : La variable indépendante (X) doit être significativement associée à la variable dépendante (Y), ce qui reflète une relation directe.
- 2) Lien entre X et M : La variable indépendante (X) doit être significativement liée à la variable médiatrice (M), indiquant que X influence potentiellement M.
- 3) Lien entre M et Y : La variable médiatrice (M) doit être significativement liée à la variable dépendante (Y), suggérant que M influence Y.

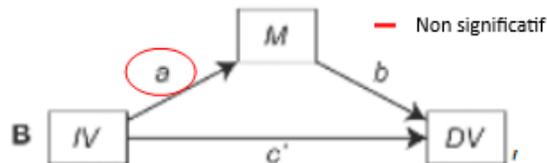


Figure 4. Représentation graphique d'une relation de médiation

Dans notre étude, bien que certaines relations directes entre X (intensité et richesse du retour haptique) et Y (performances des opérateurs) aient été significatives, aucune relation statistiquement significative n'a été trouvée entre les variables indépendantes (X), soient l'intensité et la richesse du retour haptique, et les variables médiatrices (M), soient le sentiment de présence et la charge cognitive. Les conditions nécessaires pour tester la médiation n'étant pas remplies, nous ne pouvons pas conclure que la présence ou la charge cognitive servent de mécanisme par lequel l'intensité ou la richesse du retour haptique influence les performances des opérateurs. Cette absence de médiation pourrait suggérer

que d'autres facteurs ou mécanismes, non pris en compte dans ce modèle, pourraient expliquer l'effet observé des variables haptique sur les performances des opérateurs.

Finalement, la variable haptique a été divisée en deux dimensions distinctes : l'intensité haptique et la richesse haptique. Cette division permet une exploration plus détaillée, approfondie et contextuelle de la variable haptique et de son influence. Elle permet de mieux comprendre comment chacune de ces dimensions influence les performances des opérateurs dans des simulateurs de formation pour machinerie lourde. L'intensité haptique représente l'accélération du mouvement sur chacune des trois axes (x, y, z) à une fréquence d'une seconde (voir *annexe 2*). Cette mesure capte la dynamique des mouvements perçus par les participants et est représentée par la variable « motion » ou « activity/act1s ». La richesse haptique, quant à elle, a été évaluée à l'aide du ratio de densité spectrale de puissance (PSD ratio). La densité spectrale de puissance (*power spectral density* ; PSD) décrit essentiellement comment la puissance d'un signal est répartie sur différentes bandes de fréquences. Le ratio PSD, quant à lui, se définit comme la somme des PSD des hautes et moyennes fréquences divisée par la PSD des basses fréquences. Il s'agit de l'index de réponse haptique (HRI) comme représenté dans l'équation 1 (Tessier et al., 2024).

$$(1) HRI = \frac{PSD_{hf} + PSD_{mf}}{PSD_{lf}}$$

La division des fréquences représente des caractéristiques distinctives des systèmes haptiques : les vibrations à basse fréquence ( $PSD_{lf}$  ; 1-5 Hz), les vibrations à fréquence moyenne ( $PSD_{mf}$  ; 6-20 Hz) et les vibrations à haute fréquence ( $PSD_{hf}$  ; 21-34 Hz). Cette mesure permet de quantifier la diversité des sensations haptiques perçues, en distinguant les mouvements et vibrations fins et rapides des sensations plus globales et profondes. Un ratio élevé indique un retour haptique plus riche.

## 2.4 Résultats

### 2.4.1 Statistiques descriptives

**Table 1**

*Caractéristiques sociodémographiques des participants*

	<i>n</i>	<i>%</i>	<i>h/semaine</i>
Genre			
Femme	5	29.0	-
Homme	12	71.0	-
Expérience en jeu vidéo	17	76.5	9h
Déjà opéré de la machinerie lourde	17	53.0	-
Déjà utilisé un simulateur de formation (OTS)	17	17.7	-

Concernant les variables démographiques des participants (table 1), la majorité des participants sont familiers avec les jeux vidéo. Cette variable a été étudiée comme potentielle variable confondante pouvant affecter leur performance lors de leur simulation. En ce qui concerne l'expérience en machinerie lourde, 47% des participants n'ont jamais opéré de tels engins. De plus, seulement 17.65% des participants avaient déjà utilisé un simulateur de formation pour opérateurs, ce qui montre que, pour la majorité, l'utilisation de cette technologie était une nouvelle expérience. D'ailleurs, cette faible familiarité s'agence bien avec le contexte de l'étude car elle reflète la réalité du contexte d'apprentissage ou formatif, où les technologies sont conçues pour initier et former les apprenants.

Dans la table 2 se trouvent les statistiques descriptives des variables d'intérêt, y compris la moyenne (M), l'écart-type (SD), et, le cas échéant, les coefficients alpha de Cronbach. La table de corrélation correspondante est également disponible dans la section annexe (*annexe 1*).

**Table 2**

*Statistiques descriptives*

Variable	<i>n</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	Cronbach's $\alpha$
1. Intensité du retour haptique	34	0.24	0.07	-
2. Richesse du retour haptique	34	0.01	0.00	-
3. Performance perçue	34	5.03	0.92	-
4. Performance anticipée	34	5.63	1.12	0.909
5. Taux de succès (TL)	34	0.68	0.47	-
6. Collisions (TL)	34	1.88	2.80	-
7. Volume rempli (TL)	34	0.99	0.41	-
8. Vitesse de remplissage (TL)	34	9.73	5.78	-
9. Nb de buckets remplis (TL)	34	10.35	4.18	-
10. Taux remplissage moyen bucket (TL)	34	0.90	0.19	-
11. Taux succès (trenching)	34	0.44	0.50	-
12. Nb de collisions (trenching)	34	0.21	0.55	-
13. Score de qualité (trenching)	34	2.78	0.87	-
14. Durée de la tâche	34	448.54	88.44	-
15. Facteur de contrôle (CF)	34	5.93	0.79	0.914
16. Facteur de distraction (DF)	34	4.16	2.08	0.059
17. Facteur sensoriel (SF)	34	5.57	0.99	0.896
18. Facteur de réalisme (RF)	34	5.52	1.06	0.837
19. Présence	34	5.65	0.69	0.944

*Note* : Puisque le construit facteur de distraction de la présence présente un alpha de Cronbach extrêmement faible de 0,059, celui-ci a été exclu des analyses.

*Note* : Les données ne respectant la normalité ont été transformées (voir section 2.3.8 – Analyses Statistiques)

## 2.4.2 Test des hypothèses

Dans cette section, les résultats sont présentés hypothèse par hypothèse, en rappelant systématiquement la variable indépendante (VI) testée, les variables dépendantes (VD) concernées ainsi que le renvoi au modèle conceptuel (figure 2). En guise de rappel, 17 opérateurs novices ou intermédiaires ont complété deux tâches (truck loading & trenching) selon un design expérimental intra-participant dans lequel chaque participant

était exposé à deux simulateurs d'entraînement pour ajouter de la variance dans les variables indépendantes, soit l'intensité et la richesse du retour haptique

### **Hypothèse 1 (H1) : Impact de l'intensité du retour haptique sur la performance**

VI : intensité du retour haptique (*activity*) – c'est-à-dire l'amplitude des forces et des vibrations reproduites par la plateforme

VD : performances objectives (taux de remplissage moyen d'un bucket et nombre de buckets remplis lors de la tâche de chargement de camions-bennes, score de qualité de tranchée lors de la tâche de creusage de tranchée, volume total déplacé, temps de complétion, score de complétion, collisions et taux de succès) et performances subjectives (performance perçue, performance anticipée). Voir Figure 2 pour la correspondance des flèches H1

Les résultats ont montré que l'intensité du retour haptique (*activity*) a un effet significatif et positif sur plusieurs mesures de performance objective. Par exemple, l'intensité du retour haptique a amélioré le taux de remplissage moyen des buckets ( $B = 14,65$  ;  $SE B = 8,88$  ;  $p = 0,059 < 0,1$ ), le score de qualité de la tranchée ( $B = 66,09$  ;  $SE B = 45,60$  ;  $p = 0,083 < 0,1$ ), et le nombre de buckets remplis ( $B = 460,76$  ;  $SE B = 183,91$  ;  $p = 0,0117 < 0,05$ ). De plus, le volume total rempli lors de la tâche de remplissage de camion-bennes a été positivement influencé par l'intensité du retour haptique ( $B = 36,28$  ;  $SE B = 18,92$  ;  $p = 0,037 < 0,05$ ). Ces résultats confirment l'hypothèse H1. Aucun lien significatif a été trouvé en ce qui concerne la performance perçue et la performance anticipée.

Les analyses ont également révélé que l'intensité du retour haptique est un prédicteur significatif de réussite dans les tâches de simulation. L'intensité du retour haptique a influencé positivement la taux de succès dans les tâches de chargement de camion ( $B = 182,68$  ;  $SE B = 136,16$  ;  $p = 0,099 < 0,1$ ) et de creusage de tranchée ( $B = 168,48$  ;  $SE B = 113,71$  ;  $p = 0,079 < 0,1$ ).

### **Hypothèse 2 (H2) : Impact de la richesse du retour haptique sur la performance**

VI : richesse du retour haptique – mesurée par le ratio HRI (Power Spectral Density) qui reflète la présence de hautes et moyennes fréquences par rapport aux basses fréquences et traduit une couverture complète du spectre fréquentiel du signal haptique

VD : performances objectives (taux de remplissage moyen d'un bucket et nombre de buckets remplis lors de la tâche de chargement de camions-bennes, score de qualité de tranchée lors de la tâche de creusage de tranchée, volume total déplacé, temps de complétion, score de complétion, collisions et taux de succès) et performances subjectives (performance perçue, performance anticipée). Voir Figure 2 pour la correspondance des flèches H2

Contrairement à l'intensité du retour haptique, la richesse du retour haptique, mesurée par le ratio HRI utilisant le PSD (Power Spectral Density), a montré un effet significatif sur le score de qualité de la tranchée ( $B = 3,52$  ;  $SE B = 2,29$  ;  $p = 0,0719 < 0,1$ ). Ces résultats confirment l'hypothèse H2, mais cet effet est d'une importance et d'une répartition (sur les métriques de performance) plus faible que celui de l'intensité du retour haptique.

### **Hypothèses 3 et 5 (H3 et H5) : Effet médiateur du sentiment de présence**

VI : Intensité (H3) ou richesse (H5) du retour haptique

Médiateur : sentiment de présence (global, facteur de contrôle (CF), facteur sensoriel (SF) et facteur de réalisme (RF))

VD : performances objectives (taux de remplissage moyen d'un bucket et nombre de buckets remplis lors de la tâche de chargement de camions-bennes, score de qualité de tranchée lors de la tâche de creusage de tranchée, volume total déplacé, temps de complétion, score de complétion, collisions et taux de succès) et performances subjectives (performance perçue, performance anticipée). Voir Figure 2 pour la correspondance des flèches H3 & H5

Dans l'analyse des effets médiateurs du sentiment de présence, plusieurs dimensions distinctes ont été prises en compte : le sentiment de présence global, le facteur de contrôle de la présence, le facteur sensoriel ainsi que le facteur de réalisme. Le facteur de

distraction, comme mentionné précédemment, n'a pas été pris en compte en raison d'un alpha de Cronbach très faible.

Le sentiment de présence global a eu un impact positif significatif sur la performance perçue ( $B = 0,523$  ;  $SE B = 0,233$  ;  $p = 0,0198 < 0,05$ ). Le facteur de contrôle de la présence a aussi démontré un impact positif significatif notable sur la performance perçue ( $B = 0,559$  ;  $SE B = 0,206$  ;  $p = 0,008 < 0,01$ ). Le facteur sensoriel de la présence a aussi démontré un impact positif significatif sur la performance perçue ( $B = 0,233$  ;  $SE B = 0,166$  ;  $p = 0,0898 < 0,1$ ). Ce dernier facteur a également montré avoir un impact positif significatif sur la performance objective, en particulier au niveau de deux métriques de performance, soient le nombre de buckets remplis durant la tâche de remplissage de camion de déchargement ( $B = 1,024$  ;  $SE B = 0,701$  ;  $p = 0,0817 < 0,1$ ) et le succès dans cette tâche ( $B = 0,855$  ;  $SE B = 0,5383$  ;  $p = 0,066 < 0,1$ ). D'autres éléments ont aussi montré avoir un impact positif significatif sur le taux de succès. Les analyses montrent que la présence globale est aussi un prédicteur significatif du succès dans la tâche de remplissage de camion de déchargement ( $B = 0,9808$  ;  $SE B = 0,7011$  ;  $p = 0,090 < 0,1$ ). Ainsi, plus la perception du niveau de présence est élevée, plus les chances de réussir la tâche sont grandes. Le facteur de contrôle de la présence a également été un prédicteur significatif de succès dans cette tâche ( $B = 0,9523$  ;  $SE B = 0,6211$  ;  $p = 0,072 < 0,1$ ).

Ensuite, basé sur les analyses, nous observons que le sentiment de présence global est un prédicteur significatif d'une haute performance anticipée ( $B = 2,015$  ;  $SE B = 0,807$  ;  $p = 0,012 < 0,05$ ). Également, le facteur de contrôle ( $B = 2,2032$  ;  $SE B = 0,880$  ;  $p = 0,012 < 0,1$ ), le facteur sensoriel ( $B = 1,0634$  ;  $SE B = 0,482$  ;  $p = 0,0213 < 0,05$ ) et le facteur de réalisme ( $B = 0,956$  ;  $SE B = 0,467$  ;  $p = 0,0289 < 0,05$ ) ont aussi été des prédicteurs significatifs de la performance anticipée.

#### **Hypothèses 4 et 6 (H4 et H6) : Effet médiateur de la charge cognitive**

VI : Intensité (H4) ou richesse (H6) du retour haptique

Médiateur : charge cognitive globale (NASA-TLX)

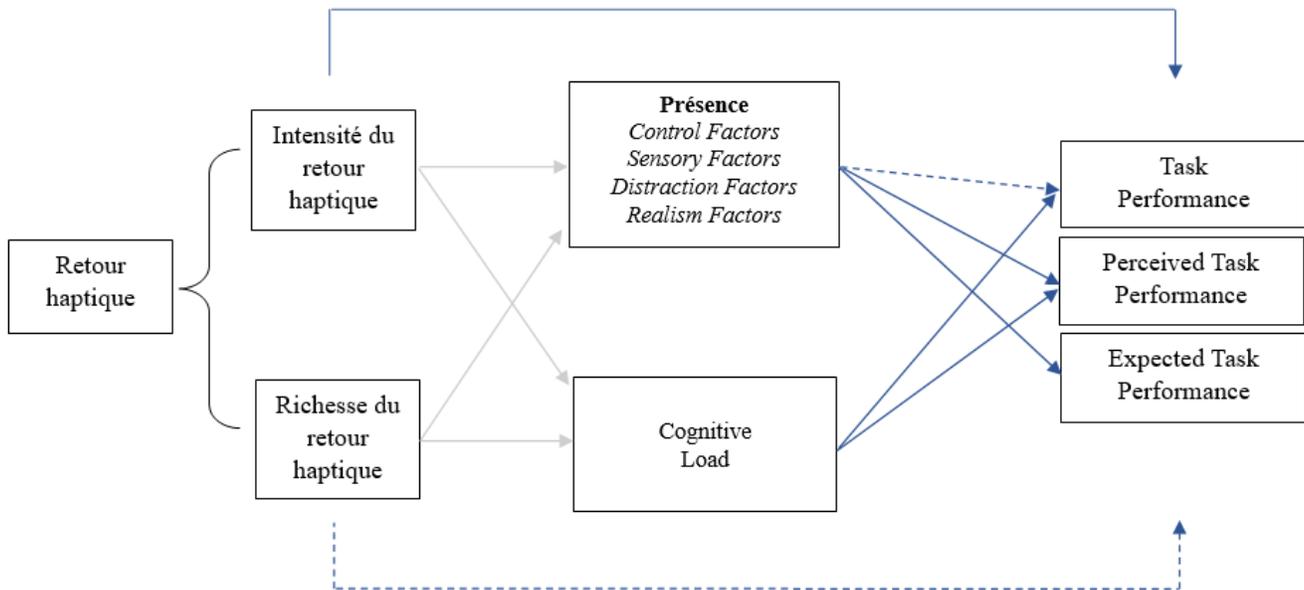
VD : performances objectives (taux de remplissage moyen d'un bucket et nombre de buckets remplis lors de la tâche de chargement de camions-bennes, score de qualité de tranchée lors de la tâche de creusage de tranchée, volume total déplacé, temps de complétion, score de complétion, collisions et taux de succès) et performances subjectives (performance perçue, performance anticipée). Voir Figure 2 pour la correspondance des flèches H3 & H5

Les analyses ont démontré que la charge cognitive a un effet négatif significatif sur le taux de remplissage moyen d'un bucket ( $B = -0,003$  ;  $SE B = 0,002$  ;  $p = 0,081 < 0,1$ ). La charge cognitive semble aussi avoir un effet négatif significatif sur la performance perçue ( $B = -0,031$  ;  $SE B = 0,014$  ;  $p = 0,021 < 0,05$ ), ce qui signifie que les opérateurs se perçoivent comme moins performants lorsqu'ils ont une charge cognitive élevée durant la tâche. Finalement, la charge cognitive semble augmenter significativement le nombre de collisions, à la fois dans la tâche de *truck loading* ( $B = 0.061$ ;  $SE B = 0.02$ ;  $p = 0.00005 < 0.01$ ) que de *trenching* ( $B = 0.054$ ;  $SE B = 0.0316$ ;  $p = 0.053 < 0.1$ ). Aucun effet significatif a été identifié entre la charge cognitive et la performance anticipée.

Concernant les hypothèses H3, H4, H5 et H6 (hypothèses de médiation) bien que bien que certaines relations directes entre X (intensité et richesse du retour haptique) et Y (performances des opérateurs) aient été significatives, aucune relation statistiquement significative n'a été trouvée entre les variables indépendantes (X), soient l'intensité et la richesse du retour haptique, et les variables médiatrices (M), soient le sentiment de présence et la charge cognitive. Cette étude n'a donc pas pu confirmer leurs rôles médiateurs et conclure que la présence ou la charge cognitive servent de mécanisme par lequel l'intensité ou la richesse du retour haptique influence les performances des opérateurs (voir section *Méthodologie – Analyses statistiques* pour plus de détails). La table 3 ci-dessous contient les hypothèses ainsi que leur verdict. La figure 6 représente le modèle de recherche avec résultats des tests d'hypothèses qui ont été significatifs ou marginalement significatifs.

Hypothèses	
<b>H1</b> : Une plus grande intensité du retour haptique dans les simulateurs de formation améliore la performance à la tâche (performance objective), la performance perçue et la performance anticipée des opérateurs	Confirmée
<b>H2</b> : Une plus grande richesse du retour haptique dans les simulateurs de formation améliore la performance à la tâche (performance objective), la performance perçue et la performance anticipée des opérateurs.	Confirmée
<b>H3</b> : Le sentiment de présence a un effet médiateur positif dans la relation entre l'intensité du retour haptique et la performance à la tâche (performance objective), la performance perçue et la performance anticipée des opérateurs.	Rejetée
<b>H4</b> : La charge cognitive a un effet médiateur négatif dans la relation entre l'intensité du retour haptique et la performance à la tâche (performance objective), la performance perçue et la performance anticipée des opérateurs.	Rejetée
<b>H5</b> : Le sentiment de présence a un effet médiateur positif dans la relation entre la richesse du retour haptique et la performance à la tâche (performance objective), la performance perçue et la performance anticipée des opérateurs.	Rejetée
<b>H6</b> : La charge cognitive a un effet médiateur négatif dans la relation entre la richesse du retour haptique et la performance à la tâche (performance objective), la performance perçue et la performance anticipée des opérateurs.	Rejetée

**Table 3.** Tableau des hypothèses et de leurs résultats



**Figure 6.** Modèle de recherche avec résultats des hypothèses. Une flèche pleine représente un résultat significatif ( $< 0.05$ ). Une flèche pointillée représente un résultat marginalement significatif ( $< 0.10$ ).

**Note :** Concernant la mesure de performance objective (task performance), celle-ci est considérée comme significative si au moins une de ses sous-variables est significative.

## 2.5 Discussion

### 2.5.1 *Résumé des résultats*

Cette étude avait pour objectif d'évaluer dans quelle mesure le retour haptique, et plus précisément son intensité et sa richesse, dans les simulateurs d'entraînement de machinerie lourde influencent les performances à l'entraînement et l'expérience d'apprentissage des opérateurs apprenants dans le secteur industriel. Ceci a été réalisé avec un design expérimental intra-participants ou 17 participants fut exposé à diverses configurations de retour haptique lors d'une tâche à machinerie lourde. Les résultats révèlent une relation significative entre l'intensité et la richesse du retour haptique et l'amélioration de la performance objective et subjective... De plus, les construits de la présence et de la charge cognitive se sont aussi été avérés des facteurs clés dans la performance objective et subjective dans la simulation. Ces découvertes soulignent le rôle essentiel du retour haptique, particulièrement de son intensité, pour améliorer l'efficacité des simulateurs, ouvrant la voie à des conceptions optimisées pour la formation des opérateurs.

Les résultats ont montré que l'importance de l'intensité du retour haptique (H1) pour améliorer les performances des opérateurs dans les simulateurs d'entraînement de machinerie lourde. En effet, l'intensité du retour haptique a eu un effet significatif et positif sur plusieurs mesures de performance objective, comme le taux de remplissage moyen des buckets, le score de qualité de la tranchée, le nombre de buckets remplis, le score de complétion (volume total rempli). Cela suggère que l'intensité du retour haptique est un facteur clé pour améliorer la performance dans les tâches lors de la simulation de formation sur simulateur de machinerie lourde, renforçant l'idée qu'un retour haptique plus intense est essentielle pour la performance des opérateurs en contexte d'apprentissage par simulation avec retour haptique. Plusieurs études expérimentales montrent qu'un retour haptique plus intense (forces plus élevées, amplitudes plus grandes, signaux plus clairs) peut améliorer significativement la performance objective des utilisateurs dans des tâches exigeant force, coordination ou efficacité. Par exemple, en pilotage d'un drone à distance (UAV), l'intégration du retour haptique (retour d'effort) sur les commandes a réduit les erreurs de maintien d'altitude, par rapport à l'absence de force de rappel (Malik

et al., 2020). En particulier, une condition de force amplifiée (« exagérée ») a donné les meilleurs résultats en minimisant l'erreur de pourcentage de dépassement de consigne, signe d'une performance supérieure, comparativement à une situation sans force ou avec force réaliste standard (Malik et al., 2020). Dans le contexte de téléopération industrielle, (Wildenbeest, 2020) constate également que fournir un retour de force basique (contenant principalement les composantes de basse fréquence du signal haptique) améliore substantiellement la performance par rapport à l'absence totale de feedback haptique (Wildenbeest, 2020). Avec ce retour de force, les opérateurs accomplissent certaines sous-tâches plus rapidement et efficacement : sur des mouvements contraints, on observe une réduction significative du temps d'exécution, de la force excessive appliquée et du nombre d'ajustements/reversements nécessaires, comparativement à un scénario sans retour haptique (Wildenbeest, 2020). En revanche, augmenter davantage l'intensité ou la fidélité du retour haptique au-delà d'un certain niveau de base n'apporte que des gains marginaux sur la performance globale (Wildenbeest, 2020) – ce qui suggère qu'il existe un palier d'efficacité où un retour haptique intense suffit à favoriser une performance motrice, et qu'au-delà, d'autres facteurs limitants entrent en jeu (fatigue, saturation sensorielle, charge cognitive, etc.)

En revanche, la richesse du retour haptique (H2), mesurée par le HRI utilisant les bandes de densité spectrale de puissance (PSD), a montré un effet significatif positif sur le score de qualité de tranchée, bien que cet effet soit limité à une seule mesure de performance objective. Cela suggère que la richesse haptique est également un facteur clé pour améliorer la performance objective dans la tâche, mais semble jouer un rôle moins crucial dans ce contexte spécifique. Cela pourrait s'expliquer par la différence entre la nature des deux tâches simulées et le niveau d'expertise des opérateurs. D'abord, la variable sur laquelle la richesse haptique a eu un impact positif significatif, soit le score de qualité de la tranchée creusée, est une métrique rattachée à la tâche qui nécessite plus de précision, c'est-à-dire des mouvements moteurs plus fins et précis. Celle-ci requiert une minutie et une précision motrice beaucoup plus fines que la tâche de chargement de camion. En effet, lors du creusage de tranchée, l'opérateur doit respecter des contraintes précises, telles que la profondeur définie et les lignes d'un contour rectangulaire tracé sur le sol (délimitations de la tranchée). Cela nécessite une compréhension plus précise et détaillée des résistances

de la matière du sol lorsque l'opérateur la travaille ou entre en contact avec celle-ci. La richesse du retour haptique, en offrant des vibrations plus fines et détaillées qui simulent les résistances des différentes matières et types de sol, permet à l'opérateur de percevoir ces subtilités et d'ajuster, en temps réel, ses mouvements en conséquence. Ainsi, il est intéressant d'observer que bien que l'impact global de la richesse du retour haptique soit moins prononcé que celui de l'intensité, elle semble jouer un rôle crucial dans des tâches nécessitant une précision motrice élevée. La richesse du retour haptique – c'est-à-dire la complexité et la finesse des sensations rendues, par exemple via des vibrations haute fréquence ou des retours tactiles détaillés – contribue à améliorer la précision motrice et la qualité d'exécution dans des tâches de haute précision. Ainsi, en simulation de téléopération fine, passer d'un retour haptique simplifié (forces de base) à un retour haptique « spectre complet » (incluant les composantes vibrationnelles, des détails plus subtiles et des vibrations plus riches dans les hautes fréquences) permet d'affiner encore la performance de l'utilisateur. (Wildenbeest, 2020) démontre que, comparé au retour haptique constitué principalement de basses fréquences, un spectre haptique complet (plus riche) améliore davantage les tâches de manipulation contrainte, en réduisant le temps d'accomplissement, la force maximale exercée et le taux de corrections nécessaires (Wildenbeest, 2020). De même, lors de transitions de contact rapides, un retour haptique enrichi aide à limiter l'excès de force appliquée par l'opérateur (Wildenbeest, 2020), ce qui traduit un meilleur contrôle fin. Dans des domaines très exigeants en précision comme la chirurgie simulée, les données empiriques vont dans le même sens. Une méta-analyse récente des systèmes robotiques chirurgicaux indique que l'ajout d'un retour haptique (force et/ou tactile) améliore significativement plusieurs métriques de performance pour des gestes délicats. Par exemple, dans des tâches d'insertion d'aiguille, la présence de retour haptique réduit significativement la force exercée par le chirurgien, diminue le temps nécessaire et augmente la précision du geste par rapport à une condition sans haptique (Bergholz et al., 2023). De même, pour des tâches de palpation ou de traçage fin (telles que le suivi d'une trajectoire sur un organe fragile en chirurgie rétinienne), le retour haptique procure un meilleur contrôle de force et une précision accrue, sans pour autant alourdir le temps opératoire (Bergholz et al., 2023). En somme, ces résultats suggèrent qu'un retour haptique riche en informations sensorielles permet aux opérateurs d'atteindre

une exécution plus précise et de meilleure qualité dans les travaux de haute précision – que ce soit en chirurgie virtuelle, en micromanipulation robotique ou en creusage fin avec une pelle excavatrice simulée. La tâche de déchargement de camion, à l'inverse, est une tâche nécessitant peu de précision motrice. Il en va de soi que la richesse haptique n'ait pas été un facteur d'influence significative sur une des métriques de performance objective dans cette tâche.

Suite à cela, il serait intéressant pour des futures recherches de se pencher davantage sur, non seulement l'impact de la richesse haptique dans divers contextes opérationnels, mais aussi sur sa pertinence. Dans le cas où la richesse haptique est primordiale pour l'apprentissage et la performance d'opérations nécessitant une plus grande précision et finesse motrice, en contexte de formation en machinerie lourde par simulateur avec retour haptique, est-elle réellement nécessaire dans les contextes industriels et pour certaines tâches concernant les opérations de machinerie lourde dans le secteur industriel ? Les opérations de machinerie lourde ne requièrent généralement pas le même niveau de précision motrice ou de sensibilité aux mouvements détaillés et fins que des domaines comme la médecine où les simulateurs avec un retour haptique riche et fin sont essentiels pour des interventions délicates (Abiri et al., 2019). Par exemple, bien qu'un score parfait de qualité lors du creusage de tranchée puisse être atteint, il est pertinent de se demander à quel point cette précision est cruciale dans un contexte opérationnel réel. Dans de nombreux cas, les tolérances dans les travaux de terrassement, par exemple, sont moins strictes, et une certaine marge d'erreur est acceptable sans compromettre la qualité globale du projet (Bell, 2004). Ces questionnements pourraient être des questionnements pertinents sur lesquels pourraient se pencher les recherches futures dans le domaine. Plus précisément, par exemple, il serait bénéfique pour les recherches futures de déterminer si l'investissement dans une richesse haptique élevée se traduit par des avantages opérationnels significatifs ou si une intensité haptique optimisée suffit pour former efficacement les opérateurs. Cependant, d'autres contextes d'utilisation de machinerie lourde nécessitant des opérations délicates où la précision est essentielle pour la sécurité et la conformité aux normes de l'industrie pourraient tout de même exister. Ensuite, concernant le niveau d'expertise des opérateurs ou leur familiarité avec les simulateurs et les tâches, les opérateurs apprenants, novices et intermédiaires sont plus susceptibles de

traiter et de se concentrer davantage sur les différences de mouvements plus évidentes (grands mouvements, grandes vibrations, fréquences (hertz) plus basses) que sur les différences de mouvements plus subtiles (petits mouvements, petites vibrations, fréquences (hertz) plus élevées), car leurs cerveaux, étant en phase d'apprentissage, traite d'abord les grandes différences perceptuelles avant de pouvoir discriminer les détails plus subtiles (Goldstone & Hendrickson, 2010). Ainsi, avec une plus grande expertise ou un apprentissage par une exposition répétée, la richesse haptique pourrait peut-être devenir plus pertinente à mesurer.

Concernant le sentiment présence global (H3 et H5), les résultats ont montré que celui-ci a un impact positif significatif sur la performance perçue et anticipée des opérateurs. Cela suggère que plus les participants perçoivent un sentiment de présence élevé (i.e. : se sentent immergés, engagés), plus ils évaluent leurs performances immédiate et projetée (anticipée lors de la prochaine utilisation) comme étant bonnes et élevées. Ce lien entre le niveau de présence subjective est déjà rapporté par (Witmer & Singer, 1998), qui observent une corrélation positive entre scores de présence et performance dans plusieurs expériences en réalité virtuelle. Le facteur de contrôle et le facteur sensoriel de la présence ont aussi exercé une influence positive significative sur la perception de la performance. Cela suggère que le sentiment de contrôle durant la simulation et les aspects sensoriels (comme le retour haptique) améliorent la perception de la performance des apprenants dans leur exécution, lors de la simulation. Cette observation rejoint l'idée, défendue par le modèle IPP de (Bystrom et al., 1999), selon laquelle la présence naît d'un couplage entre immersion sensorielle et allocation de l'attention; une présence plus forte soutient alors la performance, notamment via un meilleur sentiment de contrôle (ou de maîtrise). Ensuite, le facteur sensoriel de la présence a eu un impact positif significatif sur la performance objective, en particulier sur le nombre de *buckets* remplis durant la tâche de camion de déchargement et le taux de succès dans cette tâche. Cela démontre non seulement que les éléments sensoriels de la simulation aident les opérateurs apprenants à accomplir plus efficacement la tâche, mais aussi que l'engagement sensoriel contribue à la réussite des tâches; un résultat cohérent avec l'étude de (Sallnäs et al., 2000), où l'ajout de retour haptique a simultanément augmenté la présence perçue et amélioré la performance mesurée dans une tâche collaborative. Le facteur de contrôle a aussi eu un

impact significatif sur le taux de succès, mettant en évidence l'importance du contrôle perçu dans la simulation pour maximiser les chances de réussite (taux de succès) dans les tâches; ce point est également soutenu par la littérature sur la présence, qui insiste sur le rôle central du sentiment d' « agency » dans l'efficacité des environnements virtuels. Additionnellement, le sentiment de présence global a été un facteur d'impact significatif sur le taux de succès : plus la présence est élevée, plus les chances de réussir la tâche sont grandes, conformément au postulat du modèle IPP selon lequel la présence est une condition nécessaire à la performance. Les résultats ont montré que le sentiment de présence globale et les facteurs de contrôle, sensoriel et de réalisme ont tous eu des effets positifs significatifs sur la performance anticipée. D'une part, cela suggère que plus les apprenant perçoivent un sentiment de présence élevé, plus ils s'attendent à bien performer lors de futures utilisations. D'une autre part, cela suggère, respectivement, que le sentiment de contrôle peut jouer un rôle clé dans l'anticipation d'une bonne performance, que la richesse sensorielle accroît les attentes personnelles de performance et de réussite, et que plus les opérateurs perçoivent la simulation comme réaliste, plus ils anticipent une performance élevée lors de leurs utilisations futures. Cette anticipation ou projection positive peut renforcer la motivation et la confiance des apprenants, éléments cruciaux pour favoriser un apprentissage efficace, de meilleures performances et soutenir l'amélioration continue des apprenants. (Vassallo, 2023) montre par exemple qu'un haut niveau de présence est corrélé à une motivation accrue et à une meilleure rétention des connaissances procédurales une semaine après l'entraînement. De même, (Stevens & Kincaid, 2015) rapportent une relation modérée mais significative entre présence ressentie et performance dans un entraînement de tir embarqué, la corrélation la plus forte apparaissant dans la condition la plus immersive. Enfin, (Wong, 2014) rappelle que, si la présence accroît souvent la confiance subjective, cette auto-évaluation n'est pas toujours parfaitement alignée sur la performance réelle; d'où l'importance de combiner indicateurs objectifs et subjectifs. En somme, ces résultats s'alignent avec la littérature : un sentiment de présence élevé – nourri par l'immersion sensorielle, le réalisme et le contrôle – améliore la performance objective, renforce la perception de réussite et accroît la confiance anticipée des opérateurs.

En ce qui concerne la charge cognitive (H4 et H6), les résultats démontrent qu'elle a un effet négatif significatif sur certaines mesures de performance, notamment le taux de remplissage moyen de bucket et le nombre de collisions dans les deux tâches. Cela sous-entend qu'une charge cognitive élevée diminue l'efficacité opérationnelle des apprenants opérateurs dans l'accomplissement de la tâche. Cela montre aussi qu'un niveau élevé de charge cognitive compromet également la sécurité : dans cette étude, davantage de collisions accompagnent systématiquement les niveaux de charge les plus élevés, un constat cohérent avec les travaux de Yurko et al. (2010) qui ont montré qu'une charge mentale accrue (scores NASA-TLX élevés) s'accompagnait d'une hausse significative des erreurs et des blessures involontaires lors d'une tâche de suture laparoscopique simulée. Concernant l'impact sur la performance perçue, d'un point de vue subjectif, les opérateurs se perçoivent comme moins performants lorsqu'ils ont une charge cognitive élevée durant la tâche : les sous-échelles du NASA-TLX, comme « performance » et « effort » perçues, se détériorent donc parallèlement à la charge mentale, reflétant une auto-évaluation négative de leurs capacités, phénomène également rapporté par (Yurko et al., 2010). Les observations de cette étude rejoignent aussi celles obtenues en simulation de vol : (Malik et al., 2020) montrent qu'une charge de travail élevée se traduit par un contrôle moins précis de l'altitude et davantage de déviations, alors qu'un retour haptique réaliste abaisse la charge cognitive et améliore la tenue de la trajectoire. Ensemble, ces résultats confirment que la charge cognitive agit comme un frein direct à la performance objective et perçue, et qu'il est essentiel de la réguler pour optimiser à la fois l'efficacité et la sécurité des opérateurs durant la simulation.

Dernièrement, bien que le sentiment de présence et la charge cognitive influencent les performances de manière attendue, ils ne semblent pas médier l'effet du retour haptique sur les performances (voir section *Méthodologie – Analyses statistiques* pour plus de détails). Ces résultats suggèrent que d'autres variables, peut-être liées au système somatosensoriel (Ten Donkelaar et al., 2020) ou au système vestibulaire (Cullen, 2019), pourraient jouer un rôle dans le mécanisme par lequel le retour haptique influence la performance des opérateurs en contexte d'apprentissage multisensoriel par simulation sur simulateurs de formation avec retour haptique. Ces aspects pourraient être explorés dans des recherches futures pour mieux comprendre ce mécanisme.

### **2.5.2 Contribution théorique**

Cette étude enrichit la compréhension de l'apprentissage par simulation et de son croisement avec l'émergence de nouvelles technologies immersives comme la technologie haptique. Cette étude démontre effectivement que l'intensité du retour haptique a un impact direct et positif sur la performance objective à l'entraînement des opérateurs de machinerie lourde. Elle étend le modèle théorique Immersion, Présence et Performance (IPP) en montrant que, contrairement aux attentes, le sentiment de présence et la charge cognitive ne sont pas médiateurs de cette relation dans ce contexte, même s'ils ont été observés comme ayant des effets directs sur la performance. Cela suggère que d'autres mécanismes, possiblement liés aux systèmes somatosensoriel ou vestibulaire, pourraient expliquer l'effet du retour haptique sur la performance, ouvrant ainsi de nouvelles perspectives théoriques.

En décomposant la variable du retour haptique vers intensité et richesse haptique, l'étude nuance le rôle de la fidélité physique-haptique dans les formations par simulation. Dans le contexte de simulateurs de machinerie lourde avec retour haptique, l'intensité du retour haptique se révèle plus déterminante pour améliorer la performance d'un point de vue plus global, tandis que la richesse influence spécifiquement les tâches nécessitant une précision motrice fine. Cette distinction apporte une nouvelle dimension à la théorie en montrant que différentes composantes du retour haptique peuvent avoir des effets variés selon le contexte, la nature des tâches opérationnelles et potentiellement selon le niveau d'expertise des opérateurs apprenants.

De plus, l'étude contribue à la théorie de la charge cognitive en constatant que, bien qu'elle affecte la performance, supportant cette théorie, la charge cognitive n'est cependant pas directement influencée par le retour haptique dans ce contexte.

De plus, en se focalisant sur le secteur industriel, souvent moins étudié, cette recherche comble une lacune dans la littérature et élargit l'application des modèles théoriques existants à de nouveaux domaines professionnels. Elle met notamment en valeur l'importance de prendre en compte les spécificités sectorielles lors de la conception de

simulateurs d'entraînement et de l'élaboration de théories sur l'apprentissage par simulation.

Enfin, cette recherche vise à étendre le cadre théorique de l'UX en incorporant des insights sur le retour haptique dans des contextes d'apprentissage professionnels par simulation et sur simulateurs avec retour haptique. Elle démontre que l'intensité et la richesse du retour haptique peuvent avoir un certain impact positif (dans ce cas-ci à degrés différents) sur la performance des apprenants, soulignant ainsi l'impact de la fidélité haptique sur la performance des apprenants en simulation d'entraînement. Malgré le fait que la médiation par la présence et la charge cognitive n'ait pas été confirmée, l'étude met en évidence que ces variables ont aussi un impact positif sur les performances. Celles-ci peuvent jouer un rôle clé dans l'expérience et l'efficacité d'apprentissage et l'efficacité de l'apprentissage par simulation, ouvrant la voie à des conceptions de simulateurs plus immersifs et efficaces.

De plus, ces résultats s'inscrivent dans la lignée des travaux qui soulignent l'intérêt du retour haptique pour alléger la surcharge des canaux visuels et auditif (Haghighi et al., 2020), tout en nuancant la place de la charge cognitive dans le cadre du modèle IPP (Bystrom et al., 1999). Ils suggèrent que le retour haptique est effectivement fortement lié à la présence, mais peut aussi agir de manière indépendante sur la performance, ce qui invite à reconsidérer la manière dont la charge cognitive extrinsèque est conceptualisée dans les tâches nécessitant des retours sensoriels complexes. Cette étude contribue ainsi additionnellement à la compréhension globale des liens entre l'immersion, présence et charge cognitive, en mettant l'accent sur le rôle distinct de l'intensité haptique par rapport à la richesse haptique.

### ***2.5.3 Implications managériales (contributions à l'industrie, aux praticiens et aux gestionnaires)***

Malgré que la présence et la charge cognitive aient un impact sur la performance, ils ne semblent pas être influencés directement par le retour haptique dans ce contexte. Les concepteurs de simulateurs avec retour haptique pourraient envisager des solutions supplémentaires pour renforcer la présence et gérer la charge cognitive indépendamment

de la technologie haptique utilisée. Ensuite, l'intensité du retour haptique améliore significativement les performances des opérateurs lors de la simulation et est susceptible de mener vers un meilleur apprentissage à long terme, rendant la formation plus efficace. La richesse haptique, en revanche, semble avoir un impact moins prononcé sur les performances des opérateurs lors de la simulation. Par contre, il reste qu'une richesse haptique accrue est associée à une meilleure performance dans les tâches nécessitant une plus grande précision motrice, comme le creusage de tranchée. Investir dans la richesse haptique pourrait ainsi devenir pertinent pour les formations ciblant des tâches complexes nécessitant une manipulation fine et des mouvements moteurs, dans lesquelles l'intégration d'un retour haptique riche et détaillé pourrait améliorer la qualité du travail effectué par les opérateurs. Si non, les développeurs de ce type de simulateurs pourraient prioriser une intensité haptique optimale, plutôt que de trop se concentrer sur la richesse haptique. Additionnellement, en considérant les limites liées au manque d'expertise ou d'exposition répétée à ces stimuli et ces types de tâches pour évaluer l'impact de la richesse haptique dans ce contexte, les résultats de cette étude pourraient aussi indiquer que les concepteurs de simulateurs haptiques doivent ajuster l'intensité et la richesse du retour haptique en fonction du contexte d'utilisation et du niveau d'expertise des utilisateurs. Il pourrait être essentiel de décomposer ces éléments en plusieurs composantes pour mieux adapter les simulateurs aux besoins spécifiques des opérateurs, améliorant ainsi l'efficacité de la formation. Il serait d'autant plus pertinent de se pencher sur la question de la nécessité d'avoir un retour haptique riche dans ce secteur.

Au-delà de ces considérations, nos conclusions éclairent également la manière dont les gestionnaires peuvent calibrer concrètement la technologie haptique pour optimiser les bénéfices : par exemple, privilégier un retour kinesthésique puissant (pouvant diminuer le risque d'erreurs opérationnelles) pour des tâches massivement mécaniques nécessitant moins de mouvements moteurs fins et précis, tout en veillant à ce que la charge cognitive reste soutenable (Malik et al., 2020; Sweller, 1988). Par ailleurs, cette étude suggère aux managers et formateurs de faire un usage sélectif d'un retour haptique riche uniquement pour les opérations à haute précision et fort enjeu, afin d'éviter une surcharge mentale contre-productive. Ainsi, les travaux de cet étude fournissent un cadre pragmatique pour adapter finement l'intensité et la richesse haptique à la complexité des missions de terrain

et des différentes tâches sectorielles, contribuant à la fois à l'amélioration de la performance à l'entraînement en simulation des opérateurs et à la réduction des coûts d'implémentation inutile (Burk, 2022).

#### **2.5.4 Implications managériales (innovations ou extensions méthodologiques)**

L'innovation méthodologique de cette étude réside dans la décomposition et l'analyse détaillée des dimensions haptiques, telles que l'intensité et la richesse du retour haptique. Elle permet d'analyser l'impact d'une plus grande variété de facettes haptiques et leur impact différencié sur la performance des opérateurs de machinerie lourde. Notamment, cette étude suggère que la richesse haptique n'est peut-être pas totalement nécessaire pour améliorer la performance des opérateurs dans le contexte des simulateurs de formation pour opérateurs. Cette approche pourrait aussi éventuellement permettre de mieux adapter les simulateurs en fonction du contexte et du niveau d'expertise des utilisateurs.

#### **2.5.5 Limites et recherches futures**

Premièrement, l'absence de mesures psychophysiologiques pour évaluer la présence et la charge cognitive peut avoir introduit des biais dans l'analyse des résultats. Deuxièmement, l'ajout d'un autre simulateur à l'expérience visait à introduire de la variance dans le rendu haptique (variables indépendantes), mais les différences non contrôlées entre les simulateurs, telles que la taille de l'écran, la qualité des graphiques, ou encore les caractéristiques du software, ont pu influencer les résultats. Même si l'objectif n'était pas de comparer directement les simulateurs ou les tâches entre eux, ces variations pourraient avoir eu un impact sur le niveau de fidélité perçue et ainsi affecter les résultats liés aux variables dépendantes. Troisièmement, le nombre limité de participants réduit la puissance statistique, ce qui pourrait limiter la généralisation des résultats. Un échantillon plus grand serait nécessaire pour discerner les effets réels et améliorer la fiabilité des résultats. Quatrièmement, concernant les variables démographiques liées à l'expérience en simulateur et en machinerie lourde que nous avons collectées pre-expérience, nous avons trop peu de questions posées à ce sujet pour permettre une comparaison efficace des données sur une même échelle. L'utilisation de catégories d'expérience (au lieu de laisser un champ de réponse libre), par exemple, aurait permis de mieux évaluer,

distinguer et analyser cette variable, ce qui aurait facilité une différenciation plus précise au niveau de l'expertise des participants. Il en va de même pour la variable d'expérience en jeux vidéo.

À la lumière de ces résultats et de ces limites, les prochaines études qui examineront ces relations et ce contexte devront d'abord augmenter la taille de l'échantillon pour améliorer la puissance statistique et la validité des conclusions. Ils devront aussi tenter, si intention d'introduire plus d'un simulateur, contrôler rigoureusement les autres éléments des simulateurs qui pourraient avoir impact sur le niveau de fidélité perçu, autre que le retour haptique (actuateurs, *motion cueing*, etc.). Il serait encore plus idéal d'utiliser des simulateurs identiques, à l'exception des actuateurs (retour haptique), afin de minimiser les variations involontaires et obtenir des résultats plus précis sur l'effet spécifique du retour haptique. Ensuite, l'utilisation des mesures implicites (psychophysiologiques en temps réel) s'avère importante pour évaluer plus précisément et de manière plus fiable la présence et la charge cognitive (construits auto-reportés). Cela permettra d'éviter les biais potentiels liés aux auto-évaluations post-hoc. De plus, concernant plus spécifiquement les variables du retour haptique, les recherches futures permettront notamment de revoir, infirmer ou confirmer la séparation des variables haptiques (intensité vs richesse), et pourraient développer, si nécessaire et pertinent dans le présent contexte, d'autres méthodes de catégorisation ou de description du retour haptique et ses impacts potentiels sur la performance (ou valider celle-ci). Ces futures recherches pourront aussi valider ou infirmer la nécessité d'un retour haptique riche dans des contextes industriels, et plus particulièrement de formation pratique en machinerie lourde sur simulateur, et pour certaines tâches nécessitant un plus ou moins grand degré de précision motrice. Finalement, pour approfondir la compréhension de l'influence de l'haptique dans les simulateurs de formation, il serait pertinent d'explorer son impact à travers différents niveaux d'expertise des utilisateurs. D'une part, l'étude des opérateurs experts permettrait de mieux comprendre comment les mouvements fins contribuent à la performance lorsqu'un utilisateur est déjà bien familiarisé avec la machinerie lourde. Les experts, ayant une meilleure capacité à percevoir les nuances et les détails subtils des vibrations, pourraient être plus sensibles à la richesse haptique, ce qui offrirait des insights précieux sur le rôle de ces subtilités dans un contexte de formation avancée. D'autre part, il serait

également crucial d'examiner l'effet de la répétition et de l'apprentissage chez les novices et les opérateurs intermédiaires. À mesure que ces utilisateurs acquièrent de l'expérience et se familiarisent avec les tâches et les stimuli, il est possible que la richesse haptique prenne une importance croissante. La répétition des tâches pourrait entraîner un apprentissage, où les utilisateurs commenceraient à discerner les petites variations de mouvement, ce qui pourrait potentiellement améliorer leur performance. En explorant ces deux axes, les recherches futures pourraient non seulement clarifier le rôle du retour haptique à différents stades d'expertise, mais aussi adapter les simulateurs pour maximiser leur efficacité en fonction du niveau d'expérience des utilisateurs.

## **2.6 Conclusion**

La question de recherche que cette étude tentait de répondre était la suivante : « Dans quelle mesure le retour haptique (intensité et richesse) dans les simulateurs d'entraînement de machinerie lourde dans le secteur industriel impactent-ils les performances à l'entraînement des opérateurs apprenants »

Cette étude confirme que l'intensité du retour haptique a un effet significatif sur plusieurs aspects de la performance, notamment plusieurs métriques de performance objective, soutenant ainsi fortement l'hypothèse H1. L'hypothèse concernant l'impact de la richesse du retour haptique sur la performance des opérateurs a aussi été confirmée, bien qu'elle soit significative sous seulement qu'une métrique de performance objective, soit le score de qualité des tranchées. Cela suggère que, malgré que la richesse du retour haptique puisse contribuer à améliorer la performance dans des tâches nécessitant une plus grande précision motrice, son influence globale est moindre comparée à celle de l'intensité du retour haptique dans le contexte étudié. Cela pourrait aussi laisser croire que, dans ce contexte, la richesse haptique jouerait un rôle moins crucial pour prédire les performances des opérateurs apprenants dans une simulation de formation sur simulateur avec retour haptique. Cela pourrait notamment soulever des questionnements quant à son importance dans des contextes de formation d'opérateurs de machinerie lourde pour des niveaux novices à intermédiaires, pour lesquels la richesse du retour haptique serait peut-être moins importante, ou des niveau expert, pour lesquels il serait plus probable qu'elle ait un impact plus flagrant sur leur performances à l'entraînement sur ces simulateurs.

Concernant les médiateurs (présence et charge cognitive), nos résultats n'ont pas confirmé leur rôle dans le lien entre l'intensité et la richesse du retour haptique et la performance objective ou subjective des opérateurs de machinerie lourde lors de la simulation. Malgré que la présence et la charge cognitive affectent significativement la performance, comme nous l'avons observé, elles ne semblent pas être le mécanisme par lequel l'intensité ou la richesse du retour haptique affecte les performances objectives ou subjectives des opérateurs en contexte d'apprentissage sur simulateurs de formation pour opérateurs. Cela suggère que d'autres facteurs, non explorés ici, pourraient ici être impliqués.

## References

- Abiri, A., Pensa, J., Tao, A., Ma, J., Juo, Y.-Y., Askari, S. J., Bisley, J., Rosen, J., Dutson, E. P., & Grundfest, W. S. (2019). Multi-modal haptic feedback for grip force reduction in robotic surgery. *Scientific reports*, *9*(1), 5016.
- Asadi, H., Lim, C. P., Mohammadi, A., Mohamed, S., Nahavandi, S., & Shanmugam, L. (2018). A genetic algorithm-based nonlinear scaling method for optimal motion cueing algorithm in driving simulator. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, *232*(8), 1025-1038. <https://doi.org/10.1177/0959651818772940>
- Baron, R. M., & Kenny, D. A. (1986). The moderator–mediator variable distinction in social psychological research: Conceptual, strategic, and statistical considerations. *Journal of personality and social psychology*, *51*(6), 1173.
- Bell, F. G. (2004). *Engineering geology and construction*. CRC Press. <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/9781482264661/engineering-geology-construction-fred-bell>

- Bergholz, M., Ferle, M., & Weber, B. M. (2023). The benefits of haptic feedback in robot assisted surgery and their moderators : A meta-analysis. *Scientific Reports*, *13*(1), 19215. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-46641-8>
- Bouchareb, M., Bouaziz, M., Djebien, M., & Saidani, M. (2020). Formation de résidents en anesthésie-réanimation à la gestion des voies aériennes. Évaluation d'un dispositif pédagogique recourant à la simulation dans une faculté de médecine en Algérie. *Pédagogie Médicale*, *21*(2), Article 2. <https://doi.org/10.1051/pmed/2020030>
- Burgoon, J. K., Bonito, J. A., Bengtsson, B., Cederberg, C., Lundeberg, M., & Allspach, L. (2000). Interactivity in human–computer interaction : A study of credibility, understanding, and influence. *Computers in human behavior*, *16*(6), 553-574.
- Burk, E. (2022). *Simulator-based training for logging equipment operators* [PhD Thesis, Northern Arizona University]. [https://search.proquest.com/openview/fbc4b487a0d22373a77796730678d254/1?pq-origsite=gscholar&cbl=18750&diss=y&casa\\_token=5ZEaTXMbmxA:BAqHhza5OEzk3R63QQL7uTme5oHQepDb4u5HLM7e-vrDpZHQaMFpbos1tFk4SJ4pM1G8rtkebGwo](https://search.proquest.com/openview/fbc4b487a0d22373a77796730678d254/1?pq-origsite=gscholar&cbl=18750&diss=y&casa_token=5ZEaTXMbmxA:BAqHhza5OEzk3R63QQL7uTme5oHQepDb4u5HLM7e-vrDpZHQaMFpbos1tFk4SJ4pM1G8rtkebGwo)
- Burlet-Vienney, D., Chinniah, Y. A., Aucourt, B., & Belmekki, T. (2016). *Maintenance des équipements mobiles : Bilan des accidents mortels au Québec*. 20e Congrès de maîtrise des risques et de sûreté de fonctionnement (Lambda Mu 20), Saint-Malo, France. <https://doi.org/10.4267/2042/61746>

- Bystrom, K.-E., Barfield, W., & Hendrix, C. (1999). A conceptual model of the sense of presence in virtual environments. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 8(2), 241-244.
- Campbell, D. T., & Fiske, D. W. (1959). Convergent and discriminant validation by the multitrait-multimethod matrix. *Psychological bulletin*, 56(2), 81.
- Casas, S., Coma, I., Portalés, C., & Fernández, M. (2017). Optimization of 3-DOF parallel motion devices for low-cost vehicle simulators. *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, 11(2), JAMDSM0023-JAMDSM0023. <https://doi.org/10.1299/jamdsm.2017jamdsm0023>
- Cuppone, A. V., Squeri, V., Semprini, M., Masia, L., & Konczak, J. (2016). Robot-Assisted Proprioceptive Training with Added Vibro-Tactile Feedback Enhances Somatosensory and Motor Performance. *PLOS ONE*, 11(10), e0164511. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0164511>
- Dixon, M. (1992). Training simulators. *IEE Colloquium on Operator Training Simulators*, 1/1-1/6. <https://ieeexplore.ieee.org/document/168408/>
- Feygin, D., Keehner, M., & Tendick, R. (2002). Haptic guidance: Experimental evaluation of a haptic training method for a perceptual motor skill. *Proceedings 10th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems. HAPTICS 2002*, 40-47. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/998939/>
- Fitts, P. M. (1967). Human performance. *Brooks/Cole*.
- Friedman, Z., Siddiqui, N., Katznelson, R., Devito, I., Bould, M. D., & Naik, V. (2009). Clinical impact of epidural anesthesia simulation on short-and long-term learning

- curve : High-versus low-fidelity model training. *Regional Anesthesia & Pain Medicine*, 34(3), 229-232.
- Haghighi, N., Vladis, N., Liu, Y., & Satyanarayan, A. (2020). *The Effectiveness of Haptic Properties Under Cognitive Load : An Exploratory Study* (arXiv:2006.00372). arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2006.00372>
- Herfort, L., Brocas, E., Amelon, F.-X., Ricca, A., & Chellali, A. (2022). Validation de l'aspect et du contenu d'un simulateur immersif pour la formation des opérateurs en anesthésie locorégionale échoguidée : Face and content validity of an immersive simulator for training ultrasound-guided locoregional anesthesia operators. *Proceedings of the 33rd Conference on l'Interaction Humain-Machine*, 1-15. <https://doi.org/10.1145/3500866.3516376>
- Hodge, S. J., Perfect, P., Padfield, G. D., & White, M. D. (2015). Optimising the roll-sway motion cues available from a short stroke hexapod motion platform. *The Aeronautical Journal*, 119(1211), 23-44. <https://doi.org/10.1017/S000192400001023X>
- Jones, M. A. (2022). *Fidelity in simulation-based training in diverse professions : A proposed taxonomy*. <https://ir.library.ontariotechu.ca/handle/10155/1575>
- Kappers, A. M. L., & Bergmann Tiest, W. M. (2013). Haptic perception. *WIREs Cognitive Science*, 4(4), 357-374. <https://doi.org/10.1002/wcs.1238>
- Lee, T. D., & Schmidt, R. A. (2008). Motor Learning and Memory. In *Learning and Memory : A Comprehensive Reference* (p. 645-662). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-012370509-9.00163-7>

- Lelevé, A., McDaniel, T., & Rossa, C. (2020). Haptic Training Simulation. *Frontiers in Virtual Reality, 1*. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/frvir.2020.00003>
- Li, J., Sun, C., Xanat, V. M., & Ochiai, Y. (2022). Electroencephalography and Self-assessment Evaluation of Engagement with Online Exhibitions : Case Study of Google Arts and Culture. In M. Rauterberg (Éd.), *Culture and Computing* (Vol. 13324, p. 316-331). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-05434-1\\_21](https://doi.org/10.1007/978-3-031-05434-1_21)
- Lustosa, E. B. S., de Macedo, D. V., & Rodrigues, M. A. F. (2018). Virtual simulator for forklift training. *2018 20th Symposium on Virtual and Augmented Reality (SVR)*, 18-26. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8802419/>
- Malik, H. A., Rasool, S., Maqsood, A., & Riaz, R. (2020). Effect of haptic feedback on pilot/operator performance during flight simulation. *Applied Sciences, 10*(11), 3877.
- Mohammed, M. R., Maizia, A., Seddiki, M. M. S., & Mokhtari, L. (2020). Les effets de l'intégration de la simulation sur l'apprentissage des gestes procéduraux de base et de l'examen physique en stage hospitalier dans le cursus pré-gradué des études médicales d'une faculté de médecine en Algérie. *Pédagogie Médicale, 21*(2), Article 2. <https://doi.org/10.1051/pmed/2020034>
- Nadj, M., Rissler, R., Adam, M. T., Knierim, M. T., Li, M. X., Maedche, A., & Riedl, R. (2023). What disrupts flow in office work? The impact of frequency and relevance of IT-mediated interruptions. *MIS QUARTERLY, 47*(4), 1615-1646.

- Paul, N. (2023). *An Experimental Comparison of the Effectiveness of Various Levels of Simulator Fidelity on Ab Initio Pilot Training* [Master's Thesis, University of Waterloo]. <https://uwspace.uwaterloo.ca/handle/10012/19456>
- Potvin-Rosselet, E., Stockless, A., & Leduc, D. (2023). L'apprentissage immersif peut-il améliorer la compréhension de la théorie de l'évolution? *Médiations et médiatisations*, 15, Article 15. <https://doi.org/10.52358/mm.vi15.355>
- Poupart, A., Delavary, M., Faye, C., Castellucci, H. I., Tremblay, M., & Lavallière, M. (2021). Analyse des accidents de travail mortels survenus au Québec comprenant un véhicule roulant de 2013 à 2017 : Perspectives et avenues d'intervention. *Revue Organisations & territoires*, 30(3), Article 3. <https://doi.org/10.1522/revueot.v30n3.1376>
- Riera, J. V., Casas, S., Alonso, F., & Fernández, M. (2022). A Case Study on Vestibular Sensations in Driving Simulators. *Sensors*, 22(15), Article 15. <https://doi.org/10.3390/s22155837>
- Sallnäs, E.-L., Rasmus-Gröhn, K., & Sjöström, C. (2000). Supporting presence in collaborative environments by haptic force feedback. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, 7(4), 461-476. <https://doi.org/10.1145/365058.365086>
- Sigrist, R., Rauter, G., Riener, R., & Wolf, P. (2013). Augmented visual, auditory, haptic, and multimodal feedback in motor learning : A review. *Psychonomic Bulletin & Review*, 20(1), 21-53. <https://doi.org/10.3758/s13423-012-0333-8>
- Stanney, K., & Salvendy, G. (1998). Aftereffects and Sense of Presence in Virtual Environments : Formulation of a Research and Development Agenda.

*International Journal of Human-Computer Interaction*, 10(2), 135-187.  
[https://doi.org/10.1207/s15327590ijhc1002\\_3](https://doi.org/10.1207/s15327590ijhc1002_3)

Stevens, J. A., & Kincaid, J. P. (2015). The relationship between presence and performance in virtual simulation training. *Open Journal of Modelling and Simulation*, 3(02), 41.

Sweller, J. (1988). Cognitive load during problem solving : Effects on learning. *Cognitive science*, 12(2), 257-285.

Sweller, J., Ayres, P., & Kalyuga, S. (2011). *Cognitive Load Theory*. Springer.  
<https://doi.org/10.1007/978-1-4419-8126-4>

Sweller, J., Van Merriënboer, J. J., & Paas, F. G. (1998). Cognitive architecture and instructional design. *Educational psychology review*, 10, 251-296.

Tavakol, M., & Dennick, R. (2011). Making sense of Cronbach's alpha. *International Journal of Medical Education*, 2, 53-55. <https://doi.org/10.5116/ijme.4dfb.8dfd>

Tessier, D., Léger, P.-M., Demazure, T., & HEC Montréal. (2024). *Améliorer le réalisme en simulation de course : Les effets médiateurs des états psychologiques optimaux sur la performance grâce à la technologie haptique* [HEC Montréal].  
[https://biblos.hec.ca/biblio/memoires/tessier\\_david\\_m2024.pdf](https://biblos.hec.ca/biblio/memoires/tessier_david_m2024.pdf)

Turcotte, S., Gaudreau, L., Otis, J., & Desbiens, J.-F. (2010). Les pratiques pédagogiques d'éducateurs physiques du primaire en éducation à la santé Health education practices of elementary school physical educators Las prácticas pedagógicas de los educadores físicos de la. *Revue des sciences de l'éducation*, 36(3), 717-738.

Vassallo, M. (2023). *The Role of Force Feedback and Vibrotactile Feedback in Learning and Retaining Procedural and Factual Knowledge in an Immersive Virtual*

*Training Simulation* [Master's Thesis].

<https://studenttheses.uu.nl/handle/20.500.12932/45514>

Volkaner, B., Sozen, S. N., & Omurlu, V. E. (2016). Realization of a Desktop Flight Simulation System for Motion-Cueing Studies. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 13(3), 85. <https://doi.org/10.5772/63239>

Warren, A. D., Proctor, R. W., & Dunston, P. S. (2023). Effect of Motion Feedback on Skill Acquisition: Training Performance using an Excavator Simulator. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 67(1), 1329-1330. <https://doi.org/10.1177/21695067231192701>

Wildenbeest, J. (2020). *The effect of haptic feedback on operator control behaviour in telemanipulation* [PhD Thesis, Delft University of Technology]. [https://pure.tudelft.nl/ws/files/73437166/dissertation\\_JGW\\_Wildenbeest.pdf](https://pure.tudelft.nl/ws/files/73437166/dissertation_JGW_Wildenbeest.pdf)

Witmer, B. G., & Singer, M. J. (1998). Measuring presence in virtual environments : A presence questionnaire. *Presence*, 7(3), 225-240.

Wong, L. T. (2014). *Self-evaluation vs. objective performance measures : Evaluation of fidelity, presence and training transfer in two helicopter simulator tasks* [PhD Thesis, University of Liverpool]. <https://livrepository.liverpool.ac.uk/2008671/>

Yurko, Y. Y., Scerbo, M. W., Prabhu, A. S., Acker, C. E., & Stefanidis, D. (2010). Higher mental workload is associated with poorer laparoscopic performance as measured by the NASA-TLX tool. *Simulation in healthcare*, 5(5), 267-271.

Zhang, X., Sun, Y., Yan, C., & Mao, H. (2025). Effects of Task Proficiency and Automation Reliability on Pilot-ePilot Teaming in Intelligent Aircraft Cockpits.

*International Journal of Human-Computer Interaction*, 41(4), 2394-2409.

<https://doi.org/10.1080/10447318.2024.2323276>



# **Chapitre 3 : Le Retour Haptique et son Influence Positive sur les Performances des Opérateurs de Machinerie Lourde**

**Améliorer la Performance à l'entraînement des Opérateurs de Machinerie Lourde grâce au Retour Haptique : Recommandations pour les entreprises dans le secteur industriel, les centres de formation en machinerie lourde et les concepteurs de simulateurs avec retour haptique.**

## **Introduction**

Chaque année, le secteur de la construction au Québec est confronté à une augmentation préoccupante des accidents impliquant la machinerie lourde (Burlet-Vienney et al., 2016; Poupart et al., 2021)). Ces incidents entraînent non seulement des pertes humaines tragiques, mais aussi des coûts économiques considérables pour les entreprises. Selon la Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail (CNESST), les accidents liés à l'utilisation inadéquate de la machinerie lourde représentent une proportion significative des incidents sur les chantiers (Burlet-Vienney et al., 2016; Poupart et al., 2021)). Face à cette réalité, la formation efficace des opérateurs devient une priorité absolue pour améliorer la sécurité, la productivité et la rentabilité des entreprises.

L'apprentissage par simulation s'est imposé comme une méthode incontournable pour former les opérateurs de machinerie lourde, en offrant un environnement sécurisé et contrôlé pour acquérir les compétences nécessaires. Toutefois, tous les simulateurs ne se valent pas. L'intégration du retour haptique, qui reproduit les sensations tactiles et kinesthésiques (mouvements, forces, vibrations) ressenties lors de l'utilisation réelle de la machinerie, pourrait bien être la clé pour optimiser l'efficacité de ces formations.

## **Questions Clés de Recherche**

- Dans quelle mesure l'intensité et la richesse du retour haptique dans les simulateurs d'entraînement de machinerie lourde impactent-elles les

performances objectives et subjectives des opérateurs apprenants lors de leur formation par simulation?

- Comment le sentiment de présence et la charge cognitive influencent-ils cette relation?

## **Méthodologie de Recherche**

Une étude expérimentale a été menée auprès de 17 participants, composés d'étudiants provenant d'un centre spécialisé en formation de conduite d'engins et de machinerie lourde de chantier, des étudiants dans le programme Construction de l'École de technologie supérieure (ETS) à Montréal et membres de communautés de passionnés de machinerie lourde et simulateurs d'entraînement. Chaque participant a effectué deux tâches (chargement de camions-bennes et creusement d'une tranchée) sur des simulateurs avec retour haptique.

Les performances des opérateurs ont été mesurées objectivement à l'aide de données télémétriques (taux de succès, rapidité, précision) et subjectivement via des questionnaires auto-reportés évaluant la performance perçue et anticipée (projetée), le sentiment de présence et la charge cognitive.

Les analyses ont été effectuées à l'aide de régressions linéaires pour déterminer les relations entre l'intensité et la richesse du retour haptique, le sentiment de présence, la charge cognitive et les mesures de performance

## **Résultats et Implications Pratiques**

### ***L'Intensité du Retour Haptique Améliore la Performance***

Les résultats indiquent qu'une intensité accrue du retour haptique est associée à une amélioration significative des performances objectives des opérateurs. Plus précisément, une intensité plus élevée du retour haptique correspond à des meilleurs résultats dans des métriques de performances telles que le taux de remplissage moyen des seaux, le nombre

de seaux remplis, le volume total rempli lors de la tâche de remplissage de camion-bennes et le taux de succès dans les deux tâches.

**Implication pratique :** En optimisant l'intensité du retour haptique dans les simulateurs et en accentuant adéquatement le retour, les opérateurs peuvent mieux ressentir les mouvements et vibrations de la machinerie, ce qui se traduit par une maîtrise plus efficace des équipements lors de la formation. Cela permet de réduire le temps nécessaire pour acquérir les compétences opérationnelles, ce qui peut d'ailleurs permettre de générer des économies pour les entreprises en termes de temps et de ressources de formation.

### *La Richesse du Retour Haptique Influence les Tâches de Précision*

Malgré que l'impact de la richesse du retour haptique ( finesse des vibrations et des mouvements) soit moins prononcé que celui de l'intensité, une richesse haptique accrue est associée à une meilleure performances dans les tâches nécessitant une plus grande précision motrice, comme le creusage de tranchées. Lors du creusage de tranchée, l'opérateur doit respecter des contraintes précises, telles que la profondeur définie et les lignes d'un contour rectangulaire tracé sur le sol (délimitations de la tranchée). Cela nécessite une compréhension plus précise et détaillée des résistances de la matière du sol lorsque l'opérateur la travaille ou entre en contact avec celle-ci. La richesse du retour haptique, en offrant des vibrations plus fines et détaillées qui simulent les résistances des différentes matières et types de sol, permet à l'opérateur de percevoir ces subtilités et d'ajuster, en temps réel, ses mouvements en conséquence.

**Implication pratique :** Pour les formations ciblant des tâches complexes nécessitant une manipulation fine et précise, intégrer un retour haptique riche et détaillé peut améliorer la qualité du travail effectué par les opérateurs. Cela est particulièrement pertinent pour des opérations délicates où la précision est essentielle pour la sécurité et la conformité aux normes de construction.

### **Le Sentiment de Présence et la Charge Cognitive Affectent la Performance**

Le sentiment de présence (l'immersion ressentie par l'utilisateur dans l'environnement simulé ; son sentiment « d'y être vraiment ») a un effet positif sur la performance perçue et anticipée des opérateurs ainsi que sur la performance objective. Les analyses montrent qu'un sentiment de présence plus élevé est associé à un meilleur taux de succès dans les tâches réalisées.

Le facteur sensoriel du sentiment de présence, qui englobe les aspects sensoriels tels que le retour haptique, a eu un impact positif significatif sur la performance objective, notamment sur le nombre de seaux remplis lors de la tâche de chargement de camions et sur le taux de succès de cette tâche. Cela indique que les éléments sensoriels de la simulation aident les opérateurs à accomplir les tâches plus efficacement et contribuent directement à leur réussite.

Le facteur de contrôle du sentiment de présence a également montré une corrélation positive avec le taux de succès, soulignant l'importance du contrôle perçu dans la simulation pour augmenter les chances de réussite. Un sentiment de contrôle élevé permet aux opérateurs de mieux anticiper et gérer les actions nécessaires pour accomplir les tâches, renforçant ainsi leur efficacité opérationnelle.

Les résultats indiquent également que le sentiment de présence, ainsi que ses facteurs, ont des effets positifs significatifs sur la performance anticipée (ou projetée) lors de prochaines utilisations d'un tel simulateur. Cette projection positive est cruciale car elle renforce la motivation, l'engagement et la confiance des apprenants, éléments essentiels pour favoriser un apprentissage efficace et des performances futures améliorées et soutenues.

En revanche, une charge cognitive élevée est associée à une diminution des performances, notamment à une augmentation du nombre de collisions lors des simulations.

**Implication pratique** : Pour la conception de simulateurs, il est important de mettre l'accent sur la nécessité de concevoir des simulateurs qui offrent une expérience immersive tout en évitant de surcharger cognitivement les utilisateurs. D'une part, les simulateurs doivent être conçus pour renforcer le sentiment de présence, notamment en améliorant les aspects

sensoriels, le réalisme et le contrôle perçu. Pour les entreprises, cela se traduit par des opérateurs plus compétents, performants et engagés, ce qui améliore la productivité et réduit les coûts liés à la formation prolongée ou aux erreurs opérationnelles. D'une autre part, une charge cognitive contrôlée (ni trop haute, ni trop basse) permet aux opérateurs d'avoir le juste niveau de concentration et d'engagement pour une performance optimale. Cela permet aussi aux opérateurs de se concentrer sur l'apprentissage des compétences clés et permet de réduire le risque d'erreurs, améliorant l'efficacité globale de la formation et la sécurité opérationnelle.

## **Meilleures Pratiques et Recommandations pour les Entreprises Industrielles, les Centres de Formation et les Concepteurs de Simulateurs**

### *Concepteur de simulateurs et Ingénieurs haptiques*

- Optimiser l'intensité du retour haptique en investissant dans des technologies qui permettent un retour haptique d'intensité adéquate et réaliste. Cela implique l'utilisation d'actionneurs capables de reproduire fidèlement, de manière évidente et prononcée, les mouvements et les vibrations ressentis.
- Adapter la richesse haptique en fonction des tâches. Pour les formations ciblant des tâches de haute précision, il est primordial d'intégrer des retours haptiques riches qui reproduisent les nuances fines et sensations tactiles détaillées. Cependant, pour des tâches plus générales ou des opérateurs ayant un faible niveau d'expertise, l'accent peut être mis sur l'intensité, ce qui optimise les coûts de développement.
- Intégrer des éléments qui augmentent le sentiment de présence sans alourdir la charge cognitive. Cela peut s'agir par exemple d'interfaces intuitives, des graphismes réalistes et un environnement sonore immersif

- Faire des évaluations et test utilisateurs de manière constante avec des opérateurs de différents niveaux d'expertise pour affiner les paramètres haptiques et l'ergonomie du simulateur

### *Gestionnaires d'Entreprises et les Centres de formation*

- Investir dans les simulateurs de haute qualité à haute fidélité. Le coût initial est plus élevé, certes, mais les simulateurs avec un retour haptique optimisé offrent un meilleur retour sur investissement à long terme en accélérant la courbe d'apprentissage des opérateurs et en réduisant les risques d'accidents.
- Personnaliser les programmes de formation, c'est-à-dire adapter les formations en fonction du niveau d'expérience des opérateurs. Les novices bénéficieront davantage d'un retour haptique à intensité accrue, tandis que les opérateurs expérimentés pourraient tirer davantage profit d'une richesse haptique accrue pour perfectionner des compétences spécifiques

## **Discussion**

L'intégration d'un retour haptique à intensité optimisée dans les simulateurs de formation pour opérateurs de machinerie lourde représente une avancée majeure pour le secteur industriel et de la formation d'opérateurs en machinerie lourde. Les bénéfices en termes de performance, de sécurité et de productivité sont clairs. En optimisant les simulateurs en fonction des besoins spécifiques des opérateurs et des tâches, les entreprises peuvent non seulement réduire les coûts liés aux accidents et aux inefficacités, mais aussi augmenter leur compétitivité sur le marché.

Il est essentiel que les gestionnaires, concepteurs de simulateurs et formateurs d'opérateurs travaillent ensemble pour mettre en place des programmes de formation innovants et efficaces. Les investissements réalisés aujourd'hui dans des technologies haptiques avancées se traduiront par des gains significatifs à long terme, tant sur le plan humain qu'économique.

En conclusion, un retour haptique optimisé dans les simulateurs de formation s'avère être une composante essentielle pour la formation des opérateurs de machinerie lourde. En tenant compte des recommandations présentées, les acteurs du secteur peuvent relever les défis actuels en matière de sécurité et de performance, tout en préparant leurs équipes aux exigences futures de l'industrie.

## Chapitre 4 : Conclusion

Cette étude avait pour objectif de déterminer dans quelle mesure le retour haptique—plus précisément son intensité et sa richesse—dans les simulateurs d’entraînement de machinerie lourde, dans le secteur industriel, influence les performances objectives et subjectives des opérateurs apprenants, en considérant le sentiment de présence et la charge cognitive comme médiateurs potentiels de cette relation. Les résultats de notre recherche indiquent que l’intensité du retour haptique a un effet positif significatif sur plusieurs métriques de performance objective des opérateurs. Plus précisément, une intensité haptique accrue améliore le taux de remplissage moyen des seaux, le score de qualité des tranchées, le nombre de seaux remplis, ainsi que le volume total rempli lors des tâches de chargement de camions-bennes. Ces résultats confirment notre première hypothèse (H1) et soulignent l’importance de l’intensité du retour haptique pour optimiser les performances lors de la formation par simulation. Concernant la richesse du retour haptique, les résultats montrent un impact positif mais plus limité. En effet, la richesse haptique a eu un effet significatif uniquement sur le score de qualité de tranchées, suggérant qu’elle joue un rôle moins déterminant dans la performance globale des opérateurs en simulation. Cela confirme notre deuxième hypothèse (H2), mais indique que la richesse du retour haptique pourrait être plus pertinente pour des tâches nécessitant une précision motrice plus fine.

En ce qui concerne le rôle médiateur du sentiment de présence et de la charge cognitive, les analyses n’ont pas confirmé les hypothèses H3 à H6. Malgré le fait que le sentiment de présence et la charge cognitive aient une influence directe significative sur les performances--la première positive et la deuxième négative--ils ne semblent pas médier la relation entre le retour haptique et la performance. Cela suggère que d’autres mécanismes ou facteurs non explorés dans cette étude pourraient expliquer ce mécanisme.

Sur le plan théorique, cette recherche étend le cadre conceptuel existant en intégrant de nouvelles perspectives sur le rôle du retour haptique dans les contextes d’apprentissage professionnels par simulation, et ce dans des contextes comme le secteur industriel, les simulateurs d’entraînement avec retour haptique et la machinerie lourde. Elle met en

évidence l'importance de la fidélité haptique, en particulier l'intensité du retour haptique, dans l'amélioration des performances des apprenants en contexte d'apprentissage par simulation avec retour haptique. Malgré que les rôles médiateurs du sentiment de présence et de la charge cognitive n'aient pas été confirmés, l'étude révèle que ces variables ont un impact direct sur la performance lors de l'entraînement sur simulateur. Ces résultats enrichissent notamment les modèles théoriques tels que le modèle Immersion, Présence et Performance (IPP) de Bystrom (1999) et la théorie de la charge cognitive (Sweller, 1988) en contexte de formation par environnements immersifs simulés.

Au niveau pratique, les résultats offrent des recommandations importantes pour les entreprises du secteur industriel, les centres de formation en machinerie lourde et les concepteurs de simulateurs avec retour haptique. L'intensité du retour haptique est un facteur clé pour améliorer la performance des opérateurs, ce qui est crucial pour les développeurs et designers de simulateurs et technologie haptique. En accentuant adéquatement l'intensité du retour haptique, les opérateurs peuvent mieux ressentir les mouvements et vibrations de la machinerie, ce qui se traduit par une maîtrise plus efficace des équipements lors de la formation. Cela peut réduire le temps nécessaire pour acquérir les compétences opérationnelles, générant ainsi des économies pour les entreprises en termes de temps et de ressources de formation. Pour les formations ciblant des tâches complexes nécessitant une manipulation fine et des mouvements moteurs plus précis, comme le creusage de tranchées, intégrer un retour haptique riche et détaillé peut améliorer la qualité du travail effectué par les opérateurs. Les simulateurs doivent également être conçus pour renforcer le sentiment de présence, tout en contrôlant la charge cognitive et évitant de surcharger cognitivement les utilisateurs. Cela se traduit par des opérateurs plus compétents, performants et engagés, ce qui améliore notamment la productivité et réduit les coûts liés à la formation prolongée ou aux erreurs opérationnelles.

Sur le plan méthodologique, cette étude innove en décomposant la variable du retour haptique en deux dimensions distinctes : l'intensité et la richesse. Cette approche permet une analyse plus raffinée de l'impact de ces facettes qui composent le retour haptique sur la performance des opérateurs lors de simulations formatives. De plus, cette

décomposition méthodologique offre un cadre pour de futures recherches. Cela pourra aussi permettre de mettre l'accent sur le potentiel avantage d'adapter les simulateurs en fonction du contexte d'utilisation (nature des tâches) et du niveau d'expertise des utilisateurs. Elle prépare aussi le terrain pour des études plus approfondies sur l'impact de la richesse haptique dans divers contextes opérationnels, et plus particulièrement dans le secteur industriel, contribuant ainsi à l'amélioration continue des outils de formation par simulation.

En se basant sur les résultats et les limites de cette étude, les recherches futures devront d'abord augmenter la taille de leur échantillon pour renforcer la puissance statistique des conclusions. Cela permet notamment d'améliorer la généralisation des résultats. En outre, il serait pertinent d'explorer l'effet du retour haptique et de reproduire cette expérience avec des opérateurs plus expérimentés qui seraient en mesure de mieux bénéficier de la richesse haptique que les novices. Il serait d'autant plus enrichissant, nonobstant l'utilisation d'experts, de reproduire la même étude en intégrant le facteur de d'exposition répétée (facteur de répétition, familiarité...). Ensuite, pour minimiser les variations involontaires, il serait idéal d'utiliser des simulateurs identiques, à l'exception des actuateurs haptiques, pour assurer que seule la variable haptique influence les résultats. D'autre part, l'utilisation de mesures psychophysiologiques permettrait d'évaluer de manière plus fiable le sentiment de présence et la charge cognitive en temps réel, de manière objective. Cela atténuerait les biais potentiels associés aux données auto-reportées. Les futures études pourraient aussi se concentrer sur des questions spécifiques telles que la pertinence de la richesse haptique dans des tâches industrielles complexes de machinerie lourde, l'influence de la richesse haptique sur différents types de tâches, l'effet de la durée d'exposition à la richesse haptique sur les performances à l'entraînement et l'apprentissage, effets du retour haptique sur la rétention des compétences à long terme dans des contextes de formation sur simulateurs avec retour haptique, etc.

En guise de conclusion, cette recherche met en lumière l'impact fondamental du retour haptique dans la formation des opérateurs de machinerie lourde, notamment en soulignant comment l'intensité et la richesse du retour haptique contribuent à des performances accrues à l'entraînement par simulation (sur simulateur avec retour haptique) et une

expérience immersive. En intégrant un retour haptique claire, prononcé, bien calibré et parfois plus riche, les simulateurs offrent aux apprenants un environnement d'apprentissage réaliste et engageant, favorisant la performance et l'acquisition de compétences essentielles dans des contextes sécurisés et contrôlés. Cette étude se pose donc comme pilier important pour une meilleure compréhension de l'utilisation de la technologie haptique pour la formation immersive dans le secteur industriel. Finalement, les contributions futures de cette recherche pourraient non seulement affiner les approches de conception des simulateurs, mais aussi améliorer la sécurité et l'efficacité opérationnelle dans des secteurs à haut risque.



## Bibliographie

- Abiri, A., Pensa, J., Tao, A., Ma, J., Juo, Y.-Y., Askari, S. J., Bisley, J., Rosen, J., Dutson, E. P., & Grundfest, W. S. (2019). Multi-modal haptic feedback for grip force reduction in robotic surgery. *Scientific reports*, *9*(1), 5016.
- Asadi, H., Lim, C. P., Mohammadi, A., Mohamed, S., Nahavandi, S., & Shanmugam, L. (2018). A genetic algorithm–based nonlinear scaling method for optimal motion cueing algorithm in driving simulator. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, *232*(8), 1025-1038. <https://doi.org/10.1177/0959651818772940>
- Baron, R. M., & Kenny, D. A. (1986). The moderator–mediator variable distinction in social psychological research : Conceptual, strategic, and statistical considerations. *Journal of personality and social psychology*, *51*(6), 1173.
- Bell, F. G. (2004). *Engineering geology and construction*. CRC Press. <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/9781482264661/engineering-geology-construction-fred-bell>
- Bergholz, M., Ferle, M., & Weber, B. M. (2023). The benefits of haptic feedback in robot assisted surgery and their moderators : A meta-analysis. *Scientific Reports*, *13*(1), 19215. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-46641-8>
- Bouchareb, M., Bouaziz, M., Djebien, M., & Saidani, M. (2020). Formation de résidents en anesthésie-réanimation à la gestion des voies aériennes. Évaluation d'un dispositif pédagogique recourant à la simulation dans une faculté de médecine en

Algérie. *Pédagogie Médicale*, 21(2), Article 2.  
<https://doi.org/10.1051/pmed/2020030>

Burgoon, J. K., Bonito, J. A., Bengtsson, B., Cederberg, C., Lundeberg, M., & Allspach, L. (2000). Interactivity in human–computer interaction : A study of credibility, understanding, and influence. *Computers in human behavior*, 16(6), 553-574.

Burk, E. (2022). *Simulator-based training for logging equipment operators* [PhD Thesis, Northern Arizona University].  
[https://search.proquest.com/openview/fbc4b487a0d22373a77796730678d254/1?pq-origsite=gscholar&cbl=18750&diss=y&casa\\_token=5ZEaTXMbmXkAAAAA:BqHhza5OEzk3R63QQL7uTme5oHQepDb4u5HLM7e-vrDpZHQaMFpbos1tFk4SJ4pM1G8rtkebGwo](https://search.proquest.com/openview/fbc4b487a0d22373a77796730678d254/1?pq-origsite=gscholar&cbl=18750&diss=y&casa_token=5ZEaTXMbmXkAAAAA:BqHhza5OEzk3R63QQL7uTme5oHQepDb4u5HLM7e-vrDpZHQaMFpbos1tFk4SJ4pM1G8rtkebGwo)

Burlet-Vienney, D., Chinniah, Y. A., Aucourt, B., & Belmekki, T. (2016). *Maintenance des équipements mobiles : Bilan des accidents mortels au Québec*. 20e Congrès de maîtrise des risques et de sûreté de fonctionnement (Lambda Mu 20), Saint-Malo, France. <https://doi.org/10.4267/2042/61746>

Bystrom, K.-E., Barfield, W., & Hendrix, C. (1999). A conceptual model of the sense of presence in virtual environments. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 8(2), 241-244.

Campbell, D. T., & Fiske, D. W. (1959). Convergent and discriminant validation by the multitrait-multimethod matrix. *Psychological bulletin*, 56(2), 81.

Casas, S., Coma, I., Portalés, C., & Fernández, M. (2017). Optimization of 3-DOF parallel motion devices for low-cost vehicle simulators. *Journal of Advanced Mechanical*

*Design, Systems, and Manufacturing*, 11(2), JAMDSM0023-JAMDSM0023.  
<https://doi.org/10.1299/jamdsm.2017jamdsm0023>

Cuppone, A. V., Squeri, V., Sempriani, M., Masia, L., & Konczak, J. (2016). Robot-Assisted Proprioceptive Training with Added Vibro-Tactile Feedback Enhances Somatosensory and Motor Performance. *PLOS ONE*, 11(10), e0164511.  
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0164511>

Dixon, M. (1992). Training simulators. *IEE Colloquium on Operator Training Simulators*, 1/1-1/6. <https://ieeexplore.ieee.org/document/168408/>

Feygin, D., Keehner, M., & Tendick, R. (2002). Haptic guidance: Experimental evaluation of a haptic training method for a perceptual motor skill. *Proceedings 10th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems. HAPTICS 2002*, 40-47.  
<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/998939/>

Fitts, P. M. (1967). Human performance. *Brooks/Cole*.

Friedman, Z., Siddiqui, N., Katznelson, R., Devito, I., Bould, M. D., & Naik, V. (2009). Clinical impact of epidural anesthesia simulation on short-and long-term learning curve: High-versus low-fidelity model training. *Regional Anesthesia & Pain Medicine*, 34(3), 229-232.

Haghighi, N., Vladis, N., Liu, Y., & Satyanarayan, A. (2020). *The Effectiveness of Haptic Properties Under Cognitive Load: An Exploratory Study* (arXiv:2006.00372). arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2006.00372>

Herfort, L., Brocas, E., Amelon, F.-X., Ricca, A., & Chellali, A. (2022). Validation de l'aspect et du contenu d'un simulateur immersif pour la formation des opérateurs

- en anesthésie locorégionale échoguidée : Face and content validity of an immersive simulator for training ultrasound-guided locoregional anesthesia operators. *Proceedings of the 33rd Conference on l'Interaction Humain-Machine*, 1-15. <https://doi.org/10.1145/3500866.3516376>
- Hodge, S. J., Perfect, P., Padfield, G. D., & White, M. D. (2015). Optimising the roll-sway motion cues available from a short stroke hexapod motion platform. *The Aeronautical Journal*, 119(1211), 23-44. <https://doi.org/10.1017/S000192400001023X>
- Jones, M. A. (2022). *Fidelity in simulation-based training in diverse professions : A proposed taxonomy*. <https://ir.library.ontariotechu.ca/handle/10155/1575>
- Kappers, A. M. L., & Bergmann Tiest, W. M. (2013). Haptic perception. *WIREs Cognitive Science*, 4(4), 357-374. <https://doi.org/10.1002/wcs.1238>
- Lee, T. D., & Schmidt, R. A. (2008). Motor Learning and Memory. In *Learning and Memory : A Comprehensive Reference* (p. 645-662). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-012370509-9.00163-7>
- Lelevé, A., McDaniel, T., & Rossa, C. (2020). Haptic Training Simulation. *Frontiers in Virtual Reality*, 1. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/frvir.2020.00003>
- Li, J., Sun, C., Xanat, V. M., & Ochiai, Y. (2022). Electroencephalography and Self-assessment Evaluation of Engagement with Online Exhibitions : Case Study of Google Arts and Culture. In M. Rauterberg (Éd.), *Culture and Computing* (Vol. 13324, p. 316-331). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-05434-1\\_21](https://doi.org/10.1007/978-3-031-05434-1_21)

- Lustosa, E. B. S., de Macedo, D. V., & Rodrigues, M. A. F. (2018). Virtual simulator for forklift training. *2018 20th Symposium on Virtual and Augmented Reality (SVR)*, 18-26. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8802419/>
- Malik, H. A., Rasool, S., Maqsood, A., & Riaz, R. (2020). Effect of haptic feedback on pilot/operator performance during flight simulation. *Applied Sciences*, *10*(11), 3877.
- Mohammed, M. R., Maizia, A., Seddiki, M. M. S., & Mokhtari, L. (2020). Les effets de l'intégration de la simulation sur l'apprentissage des gestes procéduraux de base et de l'examen physique en stage hospitalier dans le cursus pré-gradué des études médicales d'une faculté de médecine en Algérie. *Pédagogie Médicale*, *21*(2), Article 2. <https://doi.org/10.1051/pmed/2020034>
- Nadj, M., Rissler, R., Adam, M. T., Knierim, M. T., Li, M. X., Maedche, A., & Riedl, R. (2023). What disrupts flow in office work? The impact of frequency and relevance of IT-mediated interruptions. *MIS QUARTERLY*, *47*(4), 1615-1646.
- Paul, N. (2023). *An Experimental Comparison of the Effectiveness of Various Levels of Simulator Fidelity on Ab Initio Pilot Training* [Master's Thesis, University of Waterloo]. <https://uwspace.uwaterloo.ca/handle/10012/19456>
- Potvin-Rosselet, E., Stockless, A., & Leduc, D. (2023). L'apprentissage immersif peut-il améliorer la compréhension de la théorie de l'évolution? *Médiations et médiatisations*, *15*, Article 15. <https://doi.org/10.52358/mm.vi15.355>
- Poupart, A., Delavary, M., Faye, C., Castellucci, H. I., Tremblay, M., & Lavallière, M. (2021). Analyse des accidents de travail mortels survenus au Québec comprenant un véhicule roulant de 2013 à 2017 : Perspectives et avenues d'intervention. *Revue*

- Organisations & territoires*, 30(3), Article 3.  
<https://doi.org/10.1522/revueot.v30n3.1376>
- Riera, J. V., Casas, S., Alonso, F., & Fernández, M. (2022). A Case Study on Vestibular Sensations in Driving Simulators. *Sensors*, 22(15), Article 15.  
<https://doi.org/10.3390/s22155837>
- Sallnäs, E.-L., Rasmus-Gröhn, K., & Sjöström, C. (2000). Supporting presence in collaborative environments by haptic force feedback. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, 7(4), 461-476.  
<https://doi.org/10.1145/365058.365086>
- Sigrist, R., Rauter, G., Riener, R., & Wolf, P. (2013). Augmented visual, auditory, haptic, and multimodal feedback in motor learning : A review. *Psychonomic Bulletin & Review*, 20(1), 21-53. <https://doi.org/10.3758/s13423-012-0333-8>
- Stanney, K., & Salvendy, G. (1998). Aftereffects and Sense of Presence in Virtual Environments : Formulation of a Research and Development Agenda. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 10(2), 135-187.  
[https://doi.org/10.1207/s15327590ijhc1002\\_3](https://doi.org/10.1207/s15327590ijhc1002_3)
- Stevens, J. A., & Kincaid, J. P. (2015). The relationship between presence and performance in virtual simulation training. *Open Journal of Modelling and Simulation*, 3(02), 41.
- Sweller, J. (1988). Cognitive load during problem solving : Effects on learning. *Cognitive science*, 12(2), 257-285.
- Sweller, J., Ayres, P., & Kalyuga, S. (2011). *Cognitive Load Theory*. Springer.  
<https://doi.org/10.1007/978-1-4419-8126-4>

- Sweller, J., Van Merriënboer, J. J., & Paas, F. G. (1998). Cognitive architecture and instructional design. *Educational psychology review*, *10*, 251-296.
- Tavakol, M., & Dennick, R. (2011). Making sense of Cronbach's alpha. *International Journal of Medical Education*, *2*, 53-55. <https://doi.org/10.5116/ijme.4dfb.8dfd>
- Tessier, D., Léger, P.-M., Demazure, T., & HEC Montréal. (2024). *Améliorer le réalisme en simulation de course : Les effets médiateurs des états psychologiques optimaux sur la performance grâce à la technologie haptique* [HEC Montréal]. [https://biblos.hec.ca/biblio/memoires/tessier\\_david\\_m2024.pdf](https://biblos.hec.ca/biblio/memoires/tessier_david_m2024.pdf)
- Turcotte, S., Gaudreau, L., Otis, J., & Desbiens, J.-F. (2010). Les pratiques pédagogiques d'éducateurs physiques du primaire en éducation à la santé Health education practices of elementary school physical educators Las prácticas pedagógicas de los educadores físicos de la. *Revue des sciences de l'éducation*, *36*(3), 717-738.
- Vassallo, M. (2023). *The Role of Force Feedback and Vibrotactile Feedback in Learning and Retaining Procedural and Factual Knowledge in an Immersive Virtual Training Simulation* [Master's Thesis]. <https://studenttheses.uu.nl/handle/20.500.12932/45514>
- Volkaner, B., Sozen, S. N., & Omurlu, V. E. (2016). Realization of a Desktop Flight Simulation System for Motion-Cueing Studies. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, *13*(3), 85. <https://doi.org/10.5772/63239>
- Warren, A. D., Proctor, R. W., & Dunston, P. S. (2023). Effect of Motion Feedback on Skill Acquisition: Training Performance using an Excavator Simulator. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, *67*(1), 1329-1330. <https://doi.org/10.1177/21695067231192701>

- Wildenbeest, J. (2020). *The effect of haptic feedback on operator control behaviour in telemanipulation* [PhD Thesis, Delft University of Technology].  
[https://pure.tudelft.nl/ws/files/73437166/dissertation\\_JGW\\_Wildenbeest.pdf](https://pure.tudelft.nl/ws/files/73437166/dissertation_JGW_Wildenbeest.pdf)
- Witmer, B. G., & Singer, M. J. (1998). Measuring presence in virtual environments : A presence questionnaire. *Presence*, 7(3), 225-240.
- Wong, L. T. (2014). *Self-evaluation vs. objective performance measures : Evaluation of fidelity, presence and training transfer in two helicopter simulator tasks* [PhD Thesis, University of Liverpool]. <https://livrepository.liverpool.ac.uk/2008671/>
- Yurko, Y. Y., Scerbo, M. W., Prabhu, A. S., Acker, C. E., & Stefanidis, D. (2010). Higher mental workload is associated with poorer laparoscopic performance as measured by the NASA-TLX tool. *Simulation in healthcare*, 5(5), 267-271.
- Zhang, X., Sun, Y., Yan, C., & Mao, H. (2025). Effects of Task Proficiency and Automation Reliability on Pilot-ePilot Teaming in Intelligent Aircraft Cockpits. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 41(4), 2394-2409.  
<https://doi.org/10.1080/10447318.2024.2323276>

# Annexes

## Annexe 1 – Table de corrélation

### Statistiques descriptives et corrélations

Variable	<i>n</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.	13.	14.	15.	16.	17.	18.	19.
1. Intensité	34	0.24	0.07	—																		
2. Richesse	34	0.01	0.00	-0.51	—																	
3. Performance perçue	34	5.03	0.92	-0.23	0.10	—																
4. Performance anticipée	34	5.63	1.12	0.26	-0.20	0.54	—															
5. Taux de succès (TL)	34	0.68	0.47	0.23	0.03	0.02	0.11	—														
6. Collisions (TL)	34	1.88	2.80	0.09	-0.10	-0.20	-0.02	0.06	—													
7. Volume rempli (TL)	34	0.99	0.41	0.32	0.04	0.18	0.22	0.79	-0.14	—												
8. Vitesse de remplissage (TL)	34	9.73	5.78	-0.30	-0.12	-0.21	-0.31	-0.75	0.13	-0.86	—											
9. Nb de buckets remplis (TL)	34	10.35	4.18	0.42	-0.25	0.10	0.30	0.66	0.09	0.82	-0.60	—										
10. Tx remplissage moyen bucket (TL)	34	0.90	0.19	0.25	0.19	0.29	0.28	0.66	-0.02	0.72	-0.77	0.42	—									
11. Taux succès (trenching)	34	0.44	0.50	0.25	0.23	0.15	-0.11	0.36	-0.07	0.38	-0.42	0.27	0.46	—								
12. Nb de collisions (trenching)	34	0.21	0.55	-0.19	0.17	-0.11	-0.09	0.28	0.49	-0.05	-0.07	-0.11	-0.03	-0.22	—							
13. Score de qualité (trenching)	34	2.78	0.87	0.18	0.28	0.21	-0.02	0.34	-0.12	0.41	-0.54	0.22	0.55	0.86	-0.22	—						
14. Durée de la tâche	34	448.54	88.44	-0.32	-0.09	-0.38	-0.30	-0.62	0.18	-0.73	0.64	-0.59	-0.63	-0.31	0.01	-0.35	—					
15. Facteur de contrôle (CF)	34	5.93	0.79	0.04	-0.22	0.37	0.55	0.25	0.02	0.11	-0.14	0.21	0.13	0.02	-0.06	-0.03	-0.13	—				
16. Facteur de distraction (DF)	34	4.16	2.08	-0.05	0.27	-0.05	-0.17	-0.21	-0.27	-0.03	0.03	-0.13	-0.07	0.15	-0.31	0.15	-0.08	-0.08	0.13	—		
17. Facteur sensoriel (SF)	34	5.57	0.99	0.15	-0.32	0.22	0.50	0.24	0.08	0.05	0.01	0.24	0.00	-0.12	-0.04	-0.14	-0.08	0.85	0.22	—		
18. Facteur de réalisme (RF)	34	5.52	1.06	0.11	-0.31	0.19	0.39	0.21	0.04	0.02	0.05	0.21	-0.02	0.01	-0.14	-0.05	-0.07	0.83	-	0.94	—	
19. Présence globale	34	5.65	0.69	0.09	-0.23	0.33	0.54	0.22	-0.02	0.10	-0.07	0.22	0.07	-0.01	-0.13	-0.03	-0.17	0.94	0.03	0.92	0.89	—

## Annexe 2 – Tableau des mesures et items

Construit	Acronyme	Type de mesure	Description	Source
<b>Intensité du retour haptique (HFI)</b>	Activity (act1s)	Physiologique	<p>Activity: Signal based on the accelerometer intensity vector. Source data: acceleration</p> <p>Method of calculation :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Highpass at 2.65 Hz on the 3 axis independently</li> <li>- Vector of acceleration. <math>(accX^2 + accY^2 + accZ^2)^{.5}</math></li> <li>- Averaged over the last second</li> <li>- Frequency: 1 Hz</li> <li>- Resolution 3.9 mG.</li> </ul> <p>Dynamic range +- 16G Unit = G Unit (binary download): G/256</p>	Hexoskin.com/datatype
<b>Richesse du retour haptique (HFR)</b>	Ratio PSD (HRI)	Physiologique	<p>HRI: Haptic Response Index = <math>\frac{PSD_{hf} + PSD_{mf}}{PSD_{lf}}</math></p> <p><i>PSD<sub>hf</sub></i> = power spectrum density high frequency <i>PSD<sub>mf</sub></i> = power spectrum density medium frequency <i>PSD<sub>lf</sub></i> = power spectrum density low frequency</p>	Alexander et al., 2024

Construit	Acronyme	Type de mesure	Description	Source
<b>Présence</b>	Pres	Self-reported	<p>PQ ; 24 items ; 7-point scale : 1 = pas du tout, à 7 = complètement</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Dans quelle mesure avez-vous pu contrôler les événements ?</li> <li>Dans quelle mesure l'environnement a-t-il réagi aux actions que vous avez initiées (ou effectuées) ?</li> <li>Dans quelle mesure vos interactions avec l'environnement semblaient-elles naturelles ?</li> <li>Dans quelle mesure les aspects visuels de l'environnement vous impliquaient-ils ?</li> <li>Dans quelle mesure les aspects auditifs de l'environnement vous impliquaient-ils ?</li> <li>Dans quelle mesure le mécanisme qui contrôlait les mouvements dans l'environnement était-il naturel ?</li> <li>Dans quelle mesure votre perception des objets se déplaçant dans l'espace était-elle convaincante ?</li> <li>Dans quelle mesure vos expériences dans l'environnement virtuel semblaient-elles cohérentes avec vos expériences réelles ?</li> <li>Dans quelle mesure étiez-vous capable d'anticiper ce qui se passerait ensuite en réponse aux actions que vous avez effectuées ?</li> <li>Dans quelle mesure avez-vous pu activement explorer ou rechercher l'environnement en utilisant la vision ?</li> <li>Dans quelle mesure pouviez-vous identifier les sons ?</li> <li>Dans quelle mesure pouviez-vous localiser les sons ?</li> <li>Dans quelle mesure les mouvements du simulateur vous ont permis de comprendre facilement l'environnement virtuel ?</li> <li>Dans quelle mesure votre perception du déplacement à l'intérieur de l'environnement virtuel était-elle convaincante ?</li> <li>Dans quelle mesure avez-vous pu examiner les objets de près ?</li> <li>Dans quelle mesure pouviez-vous examiner les objets sous plusieurs points de vue ?</li> <li>Dans quelle mesure pouviez-vous déplacer ou manipuler les objets dans l'environnement virtuel ?</li> <li>Dans quelle mesure étiez-vous impliqué dans l'expérience de l'environnement virtuel ?</li> <li>Dans quelle mesure les résultats escomptés suivaient rapidement vos actions ?</li> <li>Dans quelle mesure vous êtes-vous adapté rapidement à l'expérience de l'environnement virtuel ?</li> <li>Dans quelle mesure vous sentiez-vous compétent pour vous déplacer et interagir avec l'environnement virtuel ?</li> <li>Dans quelle mesure la qualité de l'affichage visuel interférait-elle ou vous distrairait-elle dans l'exécution des tâches assignées ou des activités requises ?</li> <li>Dans quelle mesure les dispositifs de contrôle (exemples: manettes, boutons) interféraient-ils avec la performance des tâches assignées ou avec d'autres activités ?</li> <li>Dans quelle mesure pouviez-vous vous concentrer sur les tâches assignées ou les activités requises plutôt que sur les mécanismes utilisés pour effectuer ces tâches ou activités ?</li> </ol>	(Witmer & Singer, 1998)

Construit	Acronyme	Type de mesure	Description	Source
<b>Charge cognitive</b>	TL	Self-reported	<p>NASA TLX ; 6 items ; slider (0 à 100 points)</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Dans quelle mesure la tâche a-t-elle été mentalement exigeante ?</li> <li>Dans quelle mesure la tâche a-t-elle été physiquement exigeante ?</li> <li>À quel point vous êtes-vous senti(e) pressé(e) durant la tâche ?</li> <li>Dans quelle mesure avez-vous réussi à accomplir ce qu'on vous a demandé ?</li> <li>À quel point avez-vous dû fournir des efforts pour atteindre votre niveau de performance ?</li> <li>À quel point vous êtes-vous senti(e) incertain(e), découragé(e), irrité(e), stressé(e) et agacé(e) ?</li> </ol>	Hart & Staveland (1988)

Construit	Acronyme	Type de mesure	Description	Source
<b>Performance (objective) à la tâche</b>	PO	Téléométrie et observations	<p>Métriques et mesures de performance analysées :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Taux de succès</li> <li>Nb Collisions</li> <li>Rapidité de remplissage</li> <li>Score de complétion (volume rempli)</li> <li>Temps de complétion</li> <li>Nb buckets remplis</li> <li>Taux de remplissage moyen d'un bucket</li> <li>Score de qualité (tranchée)</li> </ul>	Téléométrie & Observations

Construit	Acronyme	Type de mesure	Description	Source
<b>Performance perçue</b>	PP	Self-reported	PP ; 3 items ; 7-point-scale : 1 = extrêmement mauvaise, à 7 = extrêmement bonne <ol style="list-style-type: none"> <li>Comment évalueriez-vous votre performance dans la tâche sur le simulateur ?</li> <li>Si vous deviez noter votre performance dans la tâche sur le simulateur, quelle note vous donneriez-vous ?</li> <li>Par rapport à d'autres personnes, quelle est votre performance dans la tâche ?</li> </ol>	Nadj et al. (2023)
<b>Performance anticipée</b>	PA	Self-reported	PA ; 3 items ; 7-point-scale : 1 = extrêmement mauvaise, à 7 = extrêmement bonne Imaginez que vous utilisez ce simulateur de façon continue à partir de maintenant et répondez aux questions suivantes : <ol style="list-style-type: none"> <li>Dans quelle mesure pensez-vous obtenir une bonne performance lors des prochaines tâches sur ce simulateur ?</li> <li>Quel serait votre niveau de performance dans les prochaines tâches sur ce simulateur ?</li> </ol>	Xiang, P. et al. (2003)
<b>Expérience Jeux Vidéo</b>	EJV	Self-reported	<ol style="list-style-type: none"> <li>Combien d'heures par semaine pratiquez-vous des jeux vidéo (toutes plateformes confondues) ?</li> <li>Depuis combien d'années pratiquez-vous des jeux vidéo ?</li> </ol>	Tech3lab, Mtl (2024)
<b>Expérience Simulateurs</b>	ES	Self-reported	<ol style="list-style-type: none"> <li>Avez-vous déjà utilisé un simulateur de machinerie lourde ?</li> <li>Si oui, lequel ?</li> </ol>	Tech3lab, Mtl (2024)
<b>Expérience Machinerie lourde</b>	EML	Self-reported	<ol style="list-style-type: none"> <li>Avez-vous déjà conduit de la machinerie lourde ?</li> <li>Si oui, à combien d'occasions environ ?</li> </ol>	Tech3lab, Mt (2024)