



HAL
open science

Interaction collaborative et multimodalité pour la formation médicale en réalité virtuelle

Cassandre Simon

► **To cite this version:**

Cassandre Simon. Interaction collaborative et multimodalité pour la formation médicale en réalité virtuelle. Interface homme-machine [cs.HC]. Université Paris-Saclay, 2024. Français. NNT : 2024UP-ASG073 . tel-04901121

HAL Id: tel-04901121

<https://theses.hal.science/tel-04901121v1>

Submitted on 20 Jan 2025

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

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

Interaction collaborative et multimodalité pour la formation médicale en réalité virtuelle

*Collaborative interaction and multimodality for medical training in virtual
reality*

Thèse de doctorat de l'université Paris-Saclay

École doctorale n° 580, Sciences et Technologies de l'Information et de la
Communication (STIC)

Spécialité de doctorat : Informatique

Graduate School : Informatique et Sciences du Numérique

Référent : Université d'Evry Val d'Essonne

Thèse préparée dans l'unité de recherche **IBISC (Université Evry Paris-Saclay)**, sous la direction de **Samir OTMANE**, Professeur, le co-encadrement de **Amine CHELLALI**, Maître de Conférences.

Thèse soutenue à Paris-Saclay, le 17 décembre 2024, par

Cassandra SIMON

Composition du Jury

Membres du jury avec voix délibérative

Gilles BAILLY

Directeur de Recherche, CNRS, Sorbonne Université, Président

Dominique BECHMANN

Professeure, Université de Strasbourg, Rapporteuse

Thierry DUVAL

Professeur, IMT atlantique, Rapporteur

Stéphanie FLECK

Maîtresse de Conférences HDR, Université de Lorraine, Examinatrice

Titre : Interaction collaborative et multimodalité pour la formation médicale en réalité virtuelle

Mots clés : Compagnonnage, EVC, Interaction Collaboratives, Multimodalité, Formation médicale

Résumé : Le compagnonnage, modèle traditionnel de la formation médicale, soulève des enjeux éthiques et de sécurité car les novices s'exercent sur de vrais patients. Pour y remédier, la Haute Autorité de Santé (HAS) a instauré la directive « jamais la première fois sur un patient », encourageant l'usage de la simulation. La réalité virtuelle (RV) s'impose alors comme un outil prometteur, offrant un environnement immersif où les étudiants peuvent s'exercer sans risque pour les patients. Cependant, les simulateurs actuels sont majoritairement centrés sur l'apprentissage autonome, limitant ainsi la présence d'un instructeur pour guider les apprenants. Cette absence soulève la question de comment réintégrer un instructeur dans les simulateurs immersifs pour optimiser la formation.

Dans cette thèse, nous explorons la conception d'interactions multimodales et collaboratives dans des environnements virtuels collaboratifs (EVCs), afin de permettre à un instructeur de superviser et d'accompagner un apprenant dans l'apprentissage de gestes techniques. Nous avons étudié les interactions entre instructeur et apprenant à la fois dans le monde réel et le virtuel, en adaptant une approche centrée sur l'humain. Sur la base de l'analyse de terrain, nous avons modélisé ces interactions et conçu plusieurs environnements virtuels collaboratifs pour tester différentes modalités de communication.

Trois études expérimentales ont été réalisées pour évaluer l'impact des modalités de communications sur le transfert des compétences techniques. Les résultats des deux premières études montrent que les instructions visuo-haptiques offrent les meilleures performances en termes de rapidité et de précision, tandis que l'ajout de la modalité verbale améliore l'expérience utilisateur. Dans la troisième étude, les feedbacks visuels ont accéléré l'exécution des tâches, tandis que les feedbacks visuo-haptiques ont optimisé l'expérience utilisateur en réduisant la charge cognitive et en renforçant la collaboration.

Nos travaux fournissent des recommandations pour la conception d'EVCs destinés à la formation aux gestes techniques. Ils montrent que l'intégration d'une communication multimodale améliore significativement les interactions entre l'instructeur et l'apprenant, en optimisant la communication et la collaboration. Ces résultats offrent des pistes prometteuses pour réintégrer efficacement l'instructeur dans les environnements virtuels de formation.

Title: Collaborative interaction and multimodality for medical training in virtual reality

Keywords: Mentorship, CVE, Collaborative Interactions, Multimodality, Medical training

Abstract: The traditional mentorship model in medical training raises ethical and safety concerns because novices often practice on real patients. In response to this, the Haut Autorité de Santé (HAS) established the directive "never the first time on a patient," encouraging the use of simulation as an alternative. Virtual reality (VR) has emerged as a promising solution, offering an immersive environment for students to practice without posing any risk to patients. However, current simulators primarily emphasize autonomous learning, which limits the presence of an instructor to guide learners. This raises the important question of reintroducing instructors into immersive simulators to enhance the effectiveness of training.

In this thesis, we explore the design of multimodal and collaborative interactions in collaborative virtual environments (CVEs), enabling an instructor to supervise and support a learner in acquiring technical skills. We studied the interactions between instructor and learner in both real and virtual worlds, adapting a human-centered approach. Based on field analysis, we modeled these interactions and designed several collaborative virtual environments to test different communication modalities.

Three experimental studies were conducted to evaluate the impact of communication modalities on the transfer of technical skills. The results of the first two studies show that visuo-haptic instructions yield the best performance in terms of speed and accuracy, while the addition of verbal modality enhances the user experience. In the third study, visual feedback accelerated task execution, while visuo-haptic feedback optimized the user experience by reducing cognitive load and enhancing collaboration.

Our work provides recommendations for the design of CVEs intended for training in technical skills. It demonstrates that integrating multimodal communication significantly improves interactions between the instructor and learner, optimizing both communication and collaboration. These results provide promising avenues for effectively reintroducing instructors into virtual training environments.

Remerciements

Je tiens dans un premier temps à remercier Thierry DUVAL, Dominique BECHMANN, Gilles BAILLY ainsi que Stéphanie FLECK qui ont accepté d'être les membres de mon jury de thèse. Je suis honorée.

Je tiens à remercier chaleureusement mon directeur de thèse Samir OTMANE pour son soutien pendant ce travail. Ses retours et conseils ont su m'éclairer et orienter mes réflexions dans des moments clés. Sa relecture a permis d'apporter des ajustements nécessaires contribuant à l'amélioration de qualité finale de ce travail.

Mes vifs remerciement vont également à mon co-encadrant Amine CHELLALI, dont l'accompagnement a été un véritable pilier tout au long de cette thèse. Son soutien indéfectible, m'a permis de traverser les moments les plus exigeants avec confiance. Par son écoute attentive, ses conseils éclairés et sa disponibilité infaillible, il m'a guidée avec rigueur et bienveillance. Il a su créer un cadre de travail stimulant, où je me suis sentie à la fois soutenue et encouragée à prendre des initiatives. Sa persévérance et son expertise ont grandement façonné la direction de ce projet et je lui en suis profondément reconnaissante.

Je tiens également à exprimer toute ma gratitude à Elsa BROCA et à tout son équipe d'anesthésiste du Centre Hospitalier Sud Francilien (CHSF). Leur accueil chaleureux et leur générosité dans le partage de leur savoir-faire ont été inestimables pour l'avancée de mes recherches. Cette immersion a été essentielle pour approfondir ma compréhension des défis et subtilités liés à la procédure de l'anesthésie locorégionale échoguidée. Je leur suis reconnaissante pour leur disponibilité, leur patience et leur engagement dans cette collaboration.

Je souhaite également exprimer ma profonde gratitude à Isabelle MILLEVILLE, dont les précieux conseils ont joué un rôle crucial dans l'élaboration de mon modèle d'interaction. Son expertise m'a permis de mieux structurer et affiner ce modèle, tout en m'orientant dans sa conception. Je la remercie sincèrement pour son soutien et pour avoir contribué de manière significative à l'avancée de ce travail.

Je souhaite également remercier toutes les personnes qui ont contribué à la mise en place des études expérimentales. Je pense tout particulièrement aux stagiaires, qui ont travaillé avec rigueur et créativité sur les environnements virtuels collaboratifs. Leur capacité à relever des défis techniques complexes ont été cruciaux pour mener à bien ces expériences. Je remercie aussi l'ensemble des étudiants et personnel de l'Université qui ont participé à ces études expérimentales.

Je n'oublie pas mes collègues de l'équipe IRA2, avec qui j'ai eu la chance de travailler dans un environnement aussi chaleureux. Leur bienveillance et les échanges enrichissants que nous avons eu tout au long de ces années ont été d'un grand soutien.

Enfin, je souhaite adresser mes remerciements les plus sincères à ma famille et mes amis. Leur soutien indéfectible a été, tout au long de cette aventure, une source de réconfort et de force. Leur présence à mes côtés, leurs encouragements constants et leurs conseils avisés ont été des piliers sur lesquels j'ai pu m'appuyer. Leur confiance en moi m'a permis d'avancer avec détermination.

Tables des matières

1	Introduction	15
1.1	Contexte	15
1.2	Motivation et enjeux	16
1.3	Problématique	18
1.4	Démarche	19
1.5	Structure du manuscrit.....	20
1.6	Liste des publications	21
2	Chapitre 1 : L'apprentissage en médecine.....	24
2.1	Modèle de compagnonnage	24
2.2	Élaboration d'un référentiel commun	27
2.3	Types d'interaction et modalités de communication	29
2.3.1	Instruction vs Feedback	29
2.3.2	Instruction, Feedback et compagnonnage	33
2.3.3	Interactions et modalités de communication	37
2.4	Apprentissage par simulation	45
2.4.1	Définition de la simulation	46
2.4.2	Différents types de simulateurs.....	47
2.4.3	Apprentissage et réalité virtuelle	49
3	Chapitre 2 : Environnement Virtuel de Collaboration (EVC) et apprentissage.	54
3.1	Environnement Virtuel Collaboratif (EVC)	54
3.1.1	Définition	54
3.1.2	La collaboration au sein des Environnements Virtuels Collaboratifs.....	56
3.1.3	Exemples d'Environnements Virtuels Collaboratifs pour l'apprentissage humain	61
3.1.4	Problématiques liées aux Environnements Virtuels Collaboratifs.....	66
3.2	Communication multimodale dans les Environnements Virtuels Collaboratifs	71
3.2.1	La combinaison des modalités verbales et visuelles	71
3.2.2	La combinaison des modalités verbales et haptiques.....	73
3.2.3	La combinaison des modalités visuelles et haptiques.....	75
3.2.4	La combinaison des modalités verbales, visuelles et haptiques.....	76
3.2.5	La combinaison des modalités visuelles et non verbales.....	77
3.2.6	La combinaison des modalités verbales et non verbales.....	78
3.2.7	La combinaison des modalités verbales, non verbales et visuelles.....	79
3.2.8	Synthèse	80
3.3	Multimodalité et apprentissage par compagnonnage dans les EVCs	81
4	Chapitre 3 : Études observationnelles.....	87
4.1	Objectif et approche méthodologique.....	87
4.2	Présentation du terrain d'observation	88
4.3	Analyse de la tâche.....	90
4.3.1	Méthodologie	90
4.3.2	Validation du modèle	91
4.3.3	Résultats : modèle de tâches	92
4.4	Analyse des compétences.....	94
4.4.1	Méthodologie	94
4.5	Analyse des communications et modèle d'interaction	97

4.5.1	Participants	97
4.5.2	Procédure observationnelle	98
4.5.3	Mesures et analyse des données	99
4.5.4	Résultats	104
4.5.5	Discussion	124
4.5.6	Conclusion	131
4.5.7	Applications du modèle d'interaction.....	132
4.5.8	Implications pour la conception des techniques d'interaction dans les environnements virtuels collaboratifs.....	135
5	Chapitre 4 : Techniques d'interaction pour transmettre des instructions pendant l'apprentissage d'un geste technique en environnement virtuel	138
5.1	Expérience 1 : exploration des instructions unimodales pour l'apprentissage d'un geste de manipulation d'outil	141
5.1.1	Méthodologie	141
5.1.2	Résultats	155
5.1.3	Discussion	162
5.1.4	Conclusion	167
5.2	Expérience 2 : exploration des instructions multimodales pour l'apprentissage d'un geste de manipulation d'outil	169
5.2.1	Objectifs de l'étude et hypothèses.....	169
5.2.2	Méthodologie	170
5.2.3	Résultats	178
5.2.4	Discussion	186
5.2.5	Conclusion	191
6	Chapitre 5 : Techniques d'interaction pour transmettre des feedbacks pendant l'apprentissage d'un geste technique en environnement virtuel.....	194
6.1	Expérience 3 : exploration de l'impact de feedbacks unimodaux et multimodaux pendant l'apprentissage d'un geste de manipulation d'outil	195
6.1.1	Objectif de l'étude et hypothèses.....	195
6.1.2	Méthodologie	197
6.1.3	Résultats	206
6.1.4	Discussion	216
6.1.5	Conclusion	222
7	Conclusion générale	225
7.1	Bilan	225
7.2	Contributions	227
7.3	Recommandations.....	228
7.3.1	Pour les instructions :.....	229
7.3.2	Pour les feedbacks :.....	229
7.3.3	Pour la multimodalité :.....	230
7.4	Limites	230
7.5	Perspectives de recherche	233
8	Références.....	236
9	Annexes.....	268

Table des figures

Figure 1 : Exemple de compagnonnage pendant la phase "see one". L'instructeur (à gauche de l'image) enseigne les gestes de base de l'anesthésie locorégionale échoguidée à l'apprenant (à droite) qui l'observe.....	26
Figure 2 : Illustration de l'élaboration d'un référentiel commun entre un instructeur et un apprenant lors d'un apprentissage par compagnonnage.	29
Figure 3 : Exemples d'instructions et de feedback donnés par un instructeur à un apprenant. Dans le cas de l'instruction, l'instructeur réalise le geste pendant que l'apprenant l'observe. Dans le cas du feedback, l'apprenant réalise le geste pendant qu'il reçoit des corrections de l'instructeur.	37
Figure 4 : Exemple d'instruction (I) et de feedback (F) unimodaux et multimodaux entre un instructeur et un apprenant. La flèche bleue représente la modalité verbale, la flèche rouge représente la modalité visuelle et le cercle vert clair représente la modalité haptique.	44
Figure 5 : Classification de la simulation selon Chiniara (Chiniara, 2007).	48
Figure 6 : Simulateur UlTRASim pour l'apprentissage des gestes d'anesthésie locorégionale échoguidée (Simon, et al., 2024).	50
Figure 7 : ImmerTai, un apprenant avec un casque de réalité virtuelle suit les mouvements de Tai Chi de l'instructeur (He, et al., 2017)	62
Figure 8 : Vue de la VR Classroom (Oiwake, Komiya, Akasaki, & Nakajima, 2018).	63
Figure 9 : Exemple de salle de cours interactif VirBELA [https://www.virbela.com/solutions/remote-learning].	64
Figure 10 : Représentation virtuelle des structures anatomiques (a : cœur virtuelle, b : cerveau virtuelle) (Fairén, Moyés, & Insa, 2020)....	65
Figure 11 : Représentation de l'équipe médicale dans l'environnement virtuel : l'anesthésiste au fond à gauche, le chirurgien à droite et l'infirmier de dos (Paiva, Machado, Valença, Batista, & Moraes, 2018).	66
Figure 12 : Session de collaboration avec retour haptique lors d'un geste de manipulation d'objet. Le superviseur (à gauche) guide l'agent actif (à droite) à travers des instructions verbales et haptiques afin qu'il atteigne la cible que seul le superviseur peut voir sur son écran (Wang, Chellali, & Cao, 2016).....	73

Figure 13 : Emojis d'interaction non-verbale au sein d'un EVC (Gruber & Kaplan-Rakowski, 2022).	80
Figure 14 : Modèle d'interaction générique.....	85
Figure 15 : Modèle d'interaction de l'instructeur lors de l'apprentissage de compétences techniques en médecine.	86
Figure 16 : Illustration d'une procédure d'anesthésie locorégionale échoguidée.....	89
Figure 17 : Modèle de tâches (MAD) de la procédure de l'anesthésie locorégionale échoguidée. Les étapes sont représentées par des cadres en violet, les tâches par des cadres en orange, les sous-tâches par des cadres en bleu ciel et les actions élémentaires par des cadres rose clair. L'arbre se lit du haut vers le bas, en suivant la hiérarchie parent-enfant. Les relations temporelles sont également indiquées : certaines étapes, tâches et sous-tâches peuvent être exécutées en parallèle (//) ou de manière itératif ((().....	93
Figure 18 : Focus sur l'étape "Réaliser l'ALE".....	94
Figure 19 : Schéma du contexte d'observation. Le triangle rouge marqué "I" désigne l'instructeur, le triangle bleu marqué "A" désigne l'apprenant. Le logo caméra représente l'observateur filmant l'interaction instructeur-apprenant.....	99
Figure 20 : L'instructeur (à gauche) co-manipule la sonde tenue par l'apprenant (à droite) pour guider le geste de ce dernier.....	105
Figure 21 : Démonstration visuelle de l'instructeur (à gauche) sous le regard de l'apprenant (à droite).....	111
Figure 22 : Geste de pointage de l'instructeur sur l'écran d'échographie accompagné d'explications verbales.....	114
Figure 23 : Représentation graphique indiquant le pourcentage d'utilisation de chaque modalité par l'instructeur lors de l'instruction de la sous-tâche ST6. Maîtriser la progression de l'aiguille.....	117
Figure 24 : Représentation graphique indiquant le pourcentage d'utilisation de chaque modalité par l'instructeur lors de l'instruction de la sous-tâche ST7. Injecter l'anesthésiant.....	118
Figure 25 : Représentation graphique indiquant le pourcentage d'utilisation de chaque modalité par l'instructeur lors de l'interaction feedback de la sous-tâche ST2. (Orienter la sonde).	119
Figure 26 : Représentation graphique indiquant le pourcentage d'utilisation de chaque modalité par l'instructeur lors de l'interaction feedback de la sous-tâche ST.3 (Repérer les structures anatomiques).	

.....	120
Figure 27 : Représentation graphique indiquant le pourcentage d'utilisation de chaque modalité par l'instructeur lors de l'interaction feedback de la sous-tâche ST.4 (Planifier la trajectoire de l'aiguille).	121
.....	121
Figure 28 : graphique indiquant le pourcentage d'utilisation de chaque modalité par l'instructeur lors de l'interaction feedback de la sous-tâche ST.5 (Insérer l'aiguille).	122
Figure 29 : Représentation graphique indiquant le pourcentage d'utilisation de chaque modalité par l'instructeur lors de l'interaction feedback de la sous-tâche ST.6 (Maîtriser la progression de l'aiguille).	123
.....	123
Figure 30 : Représentation graphique indiquant le pourcentage d'utilisation de chaque modalité par l'instructeur lors de l'interaction feedback de la sous-tâche ST.7 (Injecter l'anesthésiant).	124
Figure 31 : Modèle d'interaction de l'instructeur pour l'apprentissage de l'étape "Réalisé une ALE". Les couleurs représentent les modalités utilisées : le rouge (verbale), le bleu (visuelle), le violet (verbale-visuelle) et l'orange (verbale, visuelle et non-verbale). Les symboles « ** » et « *** » indiquent la significativité (valeur de p au test de Friedman) selon les résultats présentés dans le Tableau 5 (p.116) et le Tableau 6 (p.119). Enfin, les pourcentages indiquent la fréquence d'utilisation de chaque modalité ou combinaison de modalités selon chaque sous-tâches.	134
Figure 32 : Tâche expérimentale.	143
Figure 33 : Projection de l'expérience 1 sur le modèle d'interaction.	144
.....	144
Figure 34 : Dispositif expérimental composé d'un casque de réalité virtuelle (1), de deux bras haptiques (3,4), Vive Tracker (2), écran de supervision de l'expérimentateur (5) et une planche jaune utilisée pour améliorer l'estimation des distances (6).	145
Figure 35 : L'environnement virtuel comprend un plan jaune et d'un plan rouge (A). Les participants voyaient également une sphère bleue et la main virtuelle de l'instructeur (uniquement dans la condition visuelle, B) ou leur propre main virtuelle (seulement pendant la phase de manipulation, C) tenant un outil. L'outil correspondait à la position, à la forme et à la taille du style du dispositif haptique. La planche en bois jaune correspondait au plan virtuel jaune en position et taille. La	

scène (D) indiquait la modalité à utiliser pour les essais suivants. Dans la première scène de transition (E), les participants indiquaient quand ils étaient prêts à recevoir les instructions. Dans la deuxième scène de transition (F), ils pouvaient répéter l'instruction ou commencer la phase de manipulation.....147

Figure 36 : Condition expérimentale visuelle.....149

Figure 37 : Condition expérimentale haptique.....150

Figure 38 : Condition expérimentale verbale.....151

Figure 39 : Protocole expérimental.....152

Figure 40 : Erreur moyenne d'estimation de l'amplitude pour chaque modalité.....156

Figure 41 : Temps moyen de manipulation pour chaque modalité.157

Figure 42 : Scores bruts du NASA-TLX.....158

Figure 43 : Scores du questionnaire sur la qualité de la collaboration.159

Figure 44 : Modalités préférées (pourcentage de participants ayant choisi la modalité comme la plus préférée) pour chaque question. 162

Figure 45 : Illustration de l'étude expérimentale. Croyant qu'il interagissait en temps réel avec un instructeur à distance, l'apprenant reçoit des instructions préenregistrées sur l'amplitude d'un mouvement à reproduire. Ces instructions sont fournies via quatre combinaisons différentes de modalités : verbale-visuelle, verbale-haptique, visuelle-haptique et verbale-visuelle-haptique. L'apprenant tente ensuite de reproduire ce mouvement le plus fidèlement possible.....172

Figure 46 : Projection de la situation d'apprentissage explorée dans l'expérience 2 à travers notre modèle d'interaction.....172

Figure 47 : Dispositif expérimental : un casque de réalité virtuelle, une interface haptique (équipé d'un stylet), et un Vive Tracker pour l'étalonnage.....173

Figure 48 : Environnement virtuel : il est constitué d'un plan jaune et rouge. La scène de gauche montre l'étape avant de commencer un essai. Les participants peuvent voir les prochaines modalités qui seront utilisées. On observe également la capsule verte qui permet de démarrer l'essai. La scène de droite montre la phase d'instruction où les participants voient une sphère bleue clore et la main virtuelle de l'instructeur seulement lorsque la modalité visuelle est impliquée..173

Figure 49 : Erreurs moyennes d'estimation de l'amplitude. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard (*= $p < 0.05$, **= $p < 0.01$).179

Figure 50 : Temps de manipulation moyens. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard (*= $p < 0.05$, **= $p < 0.01$).	180
Figure 51 : Distance DTD moyenne. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard (*= $p < 0.05$, **= $p < 0.01$).	181
Figure 52 : Scores bruts du NASA-TLX.....	182
Figure 53 : Scores moyens pour les quatre dimensions du questionnaire subjectif (*= $p < 0.05$, **= $p < 0.01$).	183
Figure 54 : Pourcentage de participants ayant choisi chaque combinaison de modalités comme mode préféré par critère (Q1 : facile à comprendre ; Q2 : adapté ; Q3 : précis ; Q4 : agréable ; Q5 : déstabilisant ; Q6 : facile à mémoriser ; Q7 : facile à reproduire ; Q8 : facilitant ; Q9 : engageant ; Q10 : efficace ; Q11 : mode préféré).....	185
Figure 55 : Projection de la situation d'apprentissage explorée dans l'expérience 3 à travers notre modèle d'interaction.	198
Figure 56 : Dispositif expérimental comprenant un casque VR, un contrôleur, deux dispositifs haptiques et un support pour les bras.	199
Figure 57 : Illustration de l'étude expérimentale. Pendant la réalisation de la tâche bimanuelle, l'expert supervise la performance de l'apprenant sur une vue personnalisée. En cas d'erreur, l'expert fournit des corrections à l'apprenant en utilisant un feedback augmenté en temps réel. Le feedback peut être visuel : la main virtuelle de l'expert apparaît dans la vue de l'apprenant pour montrer le chemin correct à suivre. Le retour peut également être visuel et haptique : l'apprenant voit la main de l'expert et ressent une force corrective l'orientant vers le bon chemin.	201
Figure 58 : Vue de l'expert pendant l'expérience. Les participants ne voyaient pas la trajectoire de référence (en vert), ni les marges d'erreur (en bleu). Ils ne voyaient que la main de l'expert lorsque le retour visuel était fourni.....	201
Figure 59 : Nombre moyen de cibles touchées pendant la phase d'apprentissage.....	207
Figure 60 : Qualité de la trajectoire calculée sur la base des distances DTD moyennes entre les trajectoires des participants et celles de référence pendant la phase d'apprentissage.	208
Figure 61 : Temps moyen de réalisation de la trajectoire pendant la phase d'apprentissage.....	209
Figure 62 : Nombre d'intervention de l'expert pendant la phase d'apprentissage.....	210

Figure 63 : Boxplots avec médianes montrant les résultats (le plus élevé est le meilleur) des sous-échelles du questionnaire de la qualité de la collaboration (échelle de 1 à 7) : Présence sociale (PrS), Coprésence (CoP), Compréhension perçue (CpP), Interdépendance comportementale perçue (ICP), Expérience d'apprentissage perçue (EAP).....211

Figure 64 : Boîtes à moustaches avec médianes montrant les scores des sous-dimensions du NASA-TLX (échelle de 0 à 100, un score plus bas est mieux) : demande mentale, demande physique, demande temporelle, performance personnelle, effort et niveau de frustration (*= $p < .05$, ***= $p < .001$).....213

Figure 65 : Nombre moyen de cible touchées entre le pré et le post-test.214

Figure 66 : Qualité de la trajectoire calculée à partir des distances DTD moyennes (entre la trajectoire du participant et celle de référence) entre le pré-test et le post-test.215

Figure 67 : Temps moyen de réalisation de la tâche entre le pré et le post-test.....216

Liste des tableaux

Tableau 1 : Distinction entre interaction par instruction et interaction par feedback dans le processus d'apprentissage par compagnonnage.	45
Tableau 2 : Associations des compétences et des sous-tâches pour l'étape "Réaliser l'ALE".	95
Tableau 3 : Catégories pour l'analyse des interactions multimodales entre instructeur et apprenant.	101
Tableau 4 : Définitions de chacune des modalités.	102
Tableau 5 : Résultat du Test de Friedman pour l'utilisation des modalités par sous-tâches lors des situations d'instructions (** : $p < 0.01$).	116
Tableau 6 : Résultat du Test de Friedman par sous-tâches lors de l'interaction sous forme de feedback.	119
Tableau 7 : Éléments du questionnaire sur la qualité de la collaboration.	153
Tableau 8 : Éléments du questionnaire de comparaison.	154
Tableau 9 : Les tests de Friedman pour le questionnaire sur la qualité de la collaboration (QCQ) et le questionnaire de comparaison (CQ).	159
Tableau 10 : Éléments du questionnaire subjectif sur la présence, la présence sociale, la coprésence et l'expérience d'apprentissage. Les échelles de notation vont de 1 à 7.	177
Tableau 11 : Tests de corrélation de Spearman entre les quatre dimensions du questionnaire subjectif (*= $p < 0.05$, **= $p < 0.01$, ***= $p < 0.001$).	184
Tableau 12 : Tests de Friedman pour le questionnaire de comparaison (***= $p < 0.001$).	185
Tableau 13 : Tests de Mann-Whitney U pour le questionnaire de la qualité de collaboration.	211

1 INTRODUCTION

1.1 CONTEXTE

Cette thèse s'inscrit dans le domaine de l'Interaction Humain-Machine appliquée à l'apprentissage des gestes techniques dans les environnements virtuels collaboratifs. Son objectif est d'approfondir notre compréhension des interactions entre l'instructeur et apprenant lors du transfert de compétences techniques en médecine, afin d'optimiser la conception des environnements virtuels collaboratifs dédiées à la formation médicale par compagnonnage.

Ce travail a été réalisé au sein du laboratoire d'Informatique, BioInformatique et Système Complexes (IBISC) dans un cadre pluridisciplinaire incluant quatre domaines : l'ergonomie, l'apprentissage, la conception d'interface utilisateur, et l'informatique.

La thèse a été financée par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) dans le cadre du projet Show-Me (Projet-ANR-20-CE33-0010). Le projet **Show-Me** se consacre à l'amélioration de la formation médicale à travers le développement d'environnement collaboratifs et immersifs en réalité virtuelle. En partenariat avec le Laboratoire des Sciences du Numérique de Nantes (LS2N), le Laboratoire Interdisciplinaire des Sciences du Numérique (LISN), le Centre Hospitalier Sud-Francilien (CHSF) et le LabForSims, le projet cherche à concevoir des interactions multimodales et collaboratives au sein des environnements virtuels collaboratifs dédiée à la formation. L'objectif principal est de permettre aux instructeurs de transmettre leurs compétences à des apprenants dans un cadre immersif, intégrant la multimodalité, afin de remplacer l'entraînement traditionnel sur patients et répondre ainsi aux directives de la Haute Autorité de Santé. Le projet se concentre sur deux axes de recherche : l'étude approfondie de l'interaction entre l'instructeur et l'apprenant pour optimiser le transfert des compétences et la communication, et la création d'interactions multimodales. Les impacts attendus à long terme incluent une amélioration significative de la formation médicale, avec des apprenants mieux préparés et la création de méthodes de formation innovantes pouvant être adaptées à d'autres domaines professionnels. Enfin, cette recherche permettra à

court terme une meilleure conception d'environnements virtuels pédagogiques et collaboratifs, et donc à un développement plus efficace des outils de formation.

1.2 MOTIVATION ET ENJEUX

En médecine, le compagnonnage est un modèle pédagogique bien établi qui permet aux novices d'interagir avec des instructeurs dès les premières années de leur formation. Ce modèle repose sur un approche collaborative, combinant observation et pratique sous la supervision de pairs plus expérimentés. Si ce modèle est efficace pour l'acquisition des compétences techniques, il soulève des préoccupations majeures lorsqu'il s'agit d'exercices pratiques sur de vrais patients, en raison des risques de sécurité et des questions éthiques. En réponse à ces préoccupations, la Haute Autorité de Santé a émis en 2012 la directive suivante "**jamais la première fois sur un patient**". Celle-ci a été motivée par un rapport de 2011 indiquant qu'en France environ 500 000 incidents indésirables graves/an et 10 000 décès étaient dus aux risques liés aux soins (Michel, MINODIER, & ROBERTS, 2011). L'intention à travers cette directive était de protéger les patients en ne permettant plus aux apprenants de s'exercer directement sur eux avant d'avoir acquis une expérience suffisante. Dans ce contexte, une révision des modèles traditionnels d'enseignement en médecine a été conduite, intégrant de plus en plus des outils de simulations pour remplacer les pratiques traditionnelles. Parmi ces outils, la réalité virtuelle est perçue comme une technologie prometteuse pour la formation par simulation.

La réalité virtuelle offre aux étudiants un environnement d'apprentissage immersif où ils peuvent pratiquer sans les contraintes habituelles liées à la formation clinique sur des patients réels. Grâce à cette technologie, il est possible de créer des scénarios cliniques réalistes, permettant aux apprenants de s'exercer à leur rythme, et de répéter des gestes techniques complexes sans risque pour la sécurité du patient. Cette opportunité est particulièrement précieuse dans le contexte médical, où l'acquisition de compétences pratiques demande une précision et une maîtrise irréprochable. Cependant, malgré ces avantages évidents, la conception et la mise en œuvre des technologies de réalité virtuelle pour la formation médicale restent un

défi de taille. Non seulement les coûts de développement sont considérables mais la réalité virtuelle doit également répondre à des exigences pédagogiques spécifiques, notamment la capacité à reproduire fidèlement le modèle de compagnonnage, qui est au cœur de l'apprentissage médical. Le compagnonnage repose sur l'interaction directe entre l'apprenant et l'instructeur, avec une transmission des compétences en temps réel, par l'observation, la pratique guidée et le retour immédiat de l'instructeur. Or, dans les environnements immersifs actuels, cet aspect collaboratif et interactif est souvent réduit, voire absent. Les technologies de réalité virtuelle, telles qu'elles sont conçues aujourd'hui, offrent essentiellement un apprentissage autonome, où l'étudiant est isolé et laissé seul face à la simulation, sans bénéficier de l'accompagnement et des retours constant d'un instructeur, rompant ainsi le modèle de compagnonnage. Cette limitation soulève la question de l'efficacité de ces outils pour l'apprentissage des compétences techniques complexes. Ainsi, l'un des grands défis est de développer des environnements virtuels immersifs capables de recréer cet échange pédagogique dynamique entre instructeurs et apprenants, tout en intégrant les avantages de la réalité virtuelle. Cela nécessite de nouvelles approches pour améliorer la communication et la collaboration au sein de ces simulations.

En conséquence, pour surmonter les défis posés par l'isolation des apprenants dans les environnements virtuels actuels, l'une des solutions prometteuses est l'utilisation des environnements virtuels collaboratifs, qui offrent la possibilité à plusieurs utilisateurs de travailler simultanément dans un espace partagé. Ces environnements peuvent reproduire certaines dynamiques du compagnonnage en soutenant les interactions collaboratives entre apprenants et instructeurs. Cependant, malgré leur potentiel, les environnements virtuels collaboratifs rencontrent des limitations importantes en termes de communication, affectant ainsi la fluidité des échanges mais également la qualité de l'apprentissage. Pour pallier ces lacunes, l'intégration de la multimodalité dans les environnements virtuels collaboratifs apparaît comme une solution potentielle. Néanmoins, bien que la multimodalité montre des promesses pour enrichir les interactions collaboratives et la communication, son application dans

les environnements virtuels collaboratifs dédiés à l'apprentissage des compétences techniques reste encore largement sous-explorée. Des questions demeurent quant aux combinaisons optimales de modalités à utiliser dans les différents contextes de formation et aux impacts réels sur la performance des apprenants.

C'est pourquoi, l'enjeu de cette thèse est d'explorer, de concevoir, et d'évaluer des techniques d'interaction multimodales et collaboratives, ainsi que des interfaces utilisateurs, qui permettent à un instructeur de transmettre ses compétences, de superviser et d'accompagner un apprenant dans un environnement de formation collaboratif en réalité virtuelle immersive.

1.3 PROBLEMATIQUE

Les environnements virtuels collaboratifs immersifs sont souvent associés avec des défis en matière de communication interpersonnelle, ce qui complique les activités collaboratives et limite leur utilisation pour la formation par compagnonnage. La problématique de cette thèse est la suivante : comment réintroduire l'instructeur au sein des simulateurs virtuels immersifs dédiés à la formation aux gestes techniques ? L'objectif est donc de concevoir des environnements virtuels collaboratifs immersifs, centrés sur les utilisateurs (instructeur et apprenant), afin de réintégrer l'instructeur dans le processus d'apprentissage tout en améliorant la communication instructeur-apprenant. Dans notre travail de thèse, nous nous intéresserons particulièrement à la **communication multimodale** entre **l'instructeur et l'apprenant** lors de l'apprentissage de **compétences techniques**. Nous étudierons d'abord comment cette communication se manifeste dans le monde réel, en identifiant les modalités utilisées par l'instructeur pour transmettre ses compétences. Ensuite, nous explorerons leur intégration dans des environnements virtuels collaboratifs pour tester et évaluer leur efficacité et leur impact sur l'expérience d'apprentissage. Cette analyse nous permettra de comprendre comment ces modalités impactent le processus d'enseignement des gestes techniques une fois la communication médiatisée, et de proposer des recommandations pour la conception de futurs environnements virtuels collaboratifs dédiés à la formation.

1.4 DEMARCHE

Notre démarche consiste à :

- **Identifier les concepts fondamentaux liés à la notion de communication multimodale** : cela nous permettra de mieux comprendre les interactions entre un instructeur et un apprenant. Effectivement, les instructeurs utilisent diverses modalités de communication pour transmettre leurs connaissances aux apprenants lors de l'apprentissage de compétences techniques. L'objectif est d'optimiser cette communication multimodale afin d'enrichir les interactions instructeurs-apprenant.
- **Étudier la communication multimodale dans le monde réel** : nous nous intéresserons à la communication instructeurs-apprenantes lors de l'apprentissage d'une procédure médicale réelle. L'objectif est de comprendre quelles modalités de communication sont employées par un instructeur lors de la transmission d'une compétence technique.
- **Étudier l'utilisation des modalités identifiées dans le monde réel au sein des environnements virtuels** : l'objectif est de comprendre comment les environnements virtuels immersifs influencent la communication interpersonnelle. Ces études permettent de formuler des hypothèses sur les moyens d'améliorer les interactions dans les environnements virtuels collaboratifs pour l'apprentissage des gestes techniques.
- **Réaliser des études expérimentales** : en se basant sur des situations identifiées et sur les possibilités technologiques des environnements virtuels immersifs, nous proposons de concevoir des techniques d'interaction entre instructeurs et apprenant afin d'améliorer la communication dans les environnements virtuels collaboratifs. Ces solutions sont évaluées à travers des études expérimentales, permettant de valider certaines des hypothèses formulées.

- **Recommandations pour la conception des environnements virtuels collaboratifs** : différentes combinaisons de modalités ont été évaluées lors d'un apprentissage collaboratif. L'étude de ces modalités permet de fournir des recommandations pour la conception des environnements virtuels collaboratifs dédiés à la formation des gestes techniques.

1.5 STRUCTURE DU MANUSCRIT

Ce manuscrit de thèse est organisé en 5 principaux chapitres :

Le chapitre 1 définit notre domaine d'étude : l'apprentissage en médecine. Nous y aborderons le modèle d'apprentissage par compagnonnage et expliquerons comment l'instructeur transmet son savoir à l'apprenant en introduisant différents concepts. Enfin, nous aborderons l'intégration des simulateurs de réalité virtuelle dans la formation médicale et le besoin d'une approche plus collaborative.

Le chapitre 2 présente les environnements virtuels collaboratifs (EVCs) et la communication multimodale. Nous définissons les EVCs et leurs défis actuels, puis nous expliquons la multimodalité et ses différentes formes, en examinant leurs avantages et inconvénients. Nous discutons des bénéfices des EVCs multimodaux pour l'apprentissage, tout en soulignant que l'impact de la communication multimodale sur l'acquisition des compétences techniques mérite encore des recherches approfondies.

Le chapitre 3 présente une étude terrain réalisée pour analyser l'apprentissage de la procédure de l'anesthésie locorégionale échoguidée. L'objectif principal est de comprendre les interactions entre instructeurs et apprenants lors de l'acquisition des compétences techniques nécessaires à la réalisation de cette procédure. Nous avons d'abord analysé les tâches et compétences associées à cette procédure, puis nous avons examiné les interactions entre instructeurs et apprenants lors de la transmission des compétences. Les données recueillies ont permis de développer un modèle d'interaction instructeur-apprenant utilisé par la suite pour guider nos choix de conception des interactions dans les environnements immersifs.

Le chapitre 4 présente deux études expérimentales qui se focalisent sur les modalités d'instructions. Ces études explorent l'impact des instructions unimodales et multimodales sur l'apprentissage par compagnonnage des compétences de manipulations d'outil dans un environnement immersif. Nous avons montré que la communication multimodale supportant les modalités visuelle et haptique était la plus adaptée pour améliorer la performance des apprenants. L'ajout de la modalité verbale permet d'améliorer l'expérience utilisateur mais cela risque d'interférer avec les deux autres modalités.

Le chapitre 5 présente une étude expérimentale qui se focalise sur les modalités de feedback. Cette étude examine l'impact des feedbacks augmentés unimodaux et multimodaux sur l'apprentissage des compétences de manipulations d'outil dans un environnement immersif. Nous avons montré que pour une tâche à dominance spatiale, le feedback augmenté visuel était suffisant pour apprendre le geste technique. Néanmoins, une approche multimodale permet d'améliorer l'expérience utilisateur en réduisant la charge cognitive de l'apprenant.

La conclusion récapitule les contributions de cette thèse, évalue l'impact de la multimodalité dans les environnements virtuels collaboratifs dédiés à la formation par compagnonnage, et propose des perspectives pour les futures recherches dans ce domaine.

1.6 LISTE DES PUBLICATIONS

Journaux internationaux avec comité de lecture

[1] Simon, C., Herfort, L., Lebrun, F., Brocas, E., Otmame, S., & Chellali, A. (2024). Design and evaluation of UlTRASim: An immersive simulator for learning ultrasound-guided regional anesthesia basic skills. *Computers & Graphics*, 119, 103878.

[2] Simon, C., Hacene, M. B., Otmame, S., & Chellali, A. (2023). Study of communication modalities to support teaching tool manipulation skills in a shared immersive environment. *Computers & Graphics*, 117, 31-41.

Conférences internationales et nationales avec comité de lecture

[3] Simon, C., Boukli-Hacene, M., Lebrun, F., Otmane, S., & Chellali, A. (2024, March). Impact of Multimodal Instructions for Tool Manipulation Skills on Performance and User Experience in an Immersive Environment. In 2024 IEEE Conference Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR) (pp. 670-680). IEEE.

[4] Simon, C., Hacene, M. B., Lebrun, F., Otmane, S., & Chellali, A. (2024, March). Influence of multimodal instructions on learning tool manipulation skills through mentoring in an immersive environment: Influence des instructions multimodales sur l'apprentissage par compagnonnage des compétences de manipulation d'outil dans un environnement immersif. In Proceedings of the 35th Conference on Interaction Humain-Machine (pp. 1-13).

[5] Simon, C., Brocas, E., Otmane, S., & Chellali, A. (2023, July). Analyse de la tâche pour la conception d'un simulateur virtuel pour l'anesthésie locorégionale échoguidée. In 12ème colloque EPIQUE (pp. 233-241).

[6] Simon, C., Otmane, S., & Chellali, A. (2022, November). Comparing modalities to communicate movement amplitude during tool manipulation in a shared learning virtual environment. In International Conference on Artificial Reality and Telexistence and Eurographics Symposium on Virtual Environments (ICAT-EGVE 2022). The Eurographics Association

Autres communications (posters, séminaires, RJs, workshops)

[7] Simon, C. (2022) Conception d'interactions collaboratives multimodales pour la formation médicale par mentorat. Rencontres doctorales, Conférence Francophone de l'interaction humain machine (IHM).

[8] Simon, C., Otmane, S., Chellali A. (2022) Amélioration de la communication dans les environnements virtuels éducatifs à travers les interactions multimodales. Atelier sur l'Expérience Utilisateur dans le cadre de l'Interaction Multisensorielle, Conférence Francophone de l'interaction humain machine (IHM).

[9] Simon, C. (2022) Interaction collaborative & multimodalité pour la formation médicale en réalité virtuelle. Rencontres jeunes chercheurs Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain (EIAH).

[10] Fastelli, F., Simon, C., Ricca, A., Chellali, A. (2022). Study of communication modalities for teaching distance information. Proceedings of the 2022 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces Abstracts and Workshops (VRW) (pp. 706-707).

[11] Simon, C., Herfort, L., Brocas, E., Otmane S., Chellali, A. (2023). Formation par compagnonnage en réalité virtuelle : multimodalité et collaboration à distance. Colloque Évry-Sénart Science et Innovation (ESSI).

Travaux en cours

[12] Lebrun, F., Simon, C., Boukezzi, A., Otmane S., Chellali, A. (accepté à IEEEVR 2025 et IEEE TVCG). Learning a tool manipulation task with an expert in an immersive environment through multimodal augmented feedback.

[13] Simon, C., Otmane S., Chellali, A. (en cours). Developing an Interaction Model based on real practices: An observational study of expert-learner dynamics in medical skills acquisition.

2 CHAPITRE 1 : L'APPRENTISSAGE EN MEDECINE

Ce chapitre est consacré à la définition du contexte général de notre travail de thèse : l'apprentissage en médecine.

Avant d'aborder les nouvelles méthodes d'apprentissage en médecine, nous commencerons par expliquer les méthodes traditionnelles afin de mettre en évidence l'évolution des pratiques pédagogiques dans ce domaine et les défis associés.

Pour ce faire, la première partie de ce chapitre est dédiée à la définition du modèle d'apprentissage par compagnonnage. Dans la seconde partie, nous aborderons le concept de « référentiel commun » et son importance dans l'apprentissage. Dans la suite, nous présentons les types d'interaction instructeur-apprenant lors d'une situation d'apprentissage ainsi que les modalités de communication utilisées pour les transmettre. Puis, nous examinerons l'utilisation de la simulation, notamment en réalité virtuelle, comme l'approche préconisée actuellement pour l'apprentissage en médecine, en mettant en lumière les avantages et les inconvénients de celle-ci. Enfin, ce chapitre sera conclu par une synthèse visant à identifier les défis actuels associés aux simulateurs de réalité virtuelle utilisés dans l'apprentissage en médecine.

2.1 MODELE DE COMPAGNONNAGE

L'apprentissage en médecine est un processus qui intègre à la fois des cours théoriques et une formation pratique visant à garantir que les futurs médecins possèdent les compétences nécessaires pour offrir des soins de qualité. Après l'acquisition de connaissances théoriques fondamentales, les étudiants interagissent directement avec les instructeurs dès les premières étapes de leur formation pratique afin d'acquérir les compétences techniques nécessaires à la réalisation d'une procédure médicale. Ce modèle, connu sous le nom de compagnonnage, repose sur l'apprentissage par l'observation puis par la pratique comme l'illustre le concept bien connu en chirurgie "see one, do one, teach one" (Kotsis & Chung, 2013).

Une compétence technique est définie comme « toute action psychomotrice ou faculté mentale associée, acquise par la pratique et l'apprentissage se rapportant à un métier ou une profession particulière » (Agha, Fowler, & Sevdalis, 2015). Pour maîtriser ces compétences, l'apprenant commence par observer le médecin expérimenté (instructeur) qui montre les techniques médicales pendant la pratique à travers des instructions. Cette phase d'observation, aussi appelée "see one" permet aux apprenants d'acquérir une compréhension théorique et pratique de la procédure. Selon la théorie de Fitts et Posner (Fitts & Posner, 1967) sur l'acquisition des compétences motrices, cette phase correspond à la phase cognitive, où l'apprentissage débute par une compréhension théorique et une observation active, l'apprenant joue alors un rôle passif.

Ensuite, l'apprenant participe de manière progressive et sous supervision aux procédures. Cette phase pratique appelée "do one", permet à l'apprenant d'appliquer les compétences acquises dans des situations réelles en effectuant la procédure sur un patient sous la supervision directe d'un instructeur. L'instructeur offre des feedbacks pour guider et corriger l'apprenant, favorisant ainsi l'amélioration de sa performance. À ce stade, l'apprenant joue un rôle actif, correspondant à la phase associative de la théorie de Fitts-Posner, où les compétences commencent à être intégrées et automatisées. Enfin, dans la phase "teach one", l'apprenant enseigne à son tour la procédure à d'autres, consolidant sa compréhension en expliquant et démontrant ce qu'il a appris, tout en renforçant ses propres compétences (Reznick & MacRae, 2006).

Tout au long de ce processus de compagnonnage, les rôles de l'instructeur et de l'apprenant évoluent. L'instructeur agit d'abord en tant que guide pour faciliter l'acquisition des compétences en fournissant des démonstrations détaillées et des conseils pendant la phase d'observation. Ainsi, c'est l'instructeur qui pratique et l'apprenant qui observe. Lors de la phase pratique, l'apprenant devient actif en pratiquant sous la supervision attentive de l'instructeur, qui observe activement et fournit des feedbacks, si nécessaire.

Cette collaboration structurée entre l'instructeur et l'apprenant tout au long du processus d'apprentissage assure un développement progressif et la maîtrise des compétences techniques. En résumé, l'acquisition des compétences techniques en médecine repose sur le modèle traditionnel du compagnonnage, favorisant un apprentissage collaboratif ou l'instructeur partage ses connaissances et ses compétences avec l'apprenant. Ce modèle renforce ainsi l'acquisition des compétences techniques et diminue les erreurs médicales (Lovell, 2018).

Au cours de cette recherche et en nous appuyant sur la littérature, nous définissons le compagnonnage comme **une approche pédagogique collaborative qui combine observations et pratiques sous la supervision de pairs lors de l'apprentissage de compétences techniques.**

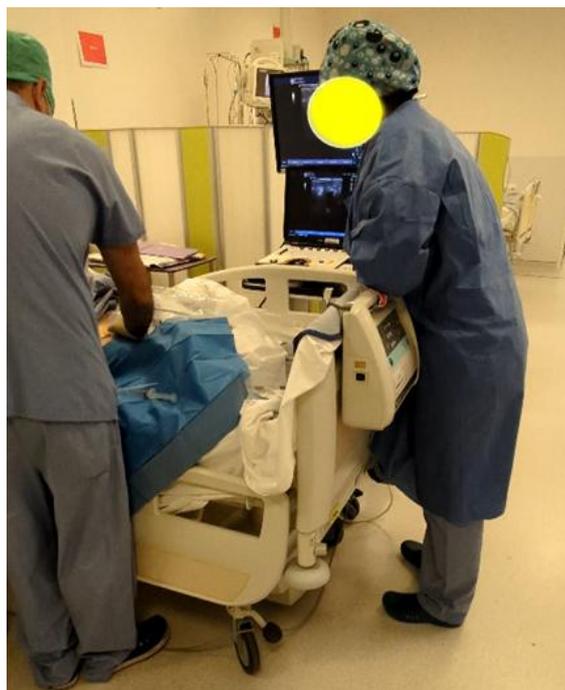


Figure 1 : Exemple de compagnonnage pendant la phase "see one". L'instructeur (à gauche de l'image) enseigne les gestes de base de l'anesthésie locorégionale échoguidée à l'apprenant (à droite) qui l'observe.

2.2 ÉLABORATION D'UN REFERENTIEL COMMUN

Le compagnonnage est une relation fondée sur le partage entre l'instructeur et l'apprenant qui se construit au fil du temps qu'ils passent ensemble et de leurs connaissances mutuelles. Cette relation est caractérisée par une collaboration étroite, où l'instructeur et l'apprenant travaillent ensemble pour atteindre un objectif commun, comme la réalisation d'une tâche ou l'acquisition d'une compétence (Lai, 2011). Dans ce contexte collaboratif, l'établissement d'un "référentiel commun" entre eux joue un rôle crucial.

Le concept de "référentiel commun" a été initialement introduit par De Terssac et Chabaud (1990) qui le définissent comme : "La mise en commun des compétences pour préparer et réaliser une action ; cette mise en commun des compétences, en même temps qu'elle complète la représentation que chacun se fait de la tâche à réaliser, constitue un référentiel commun permettant d'ajuster les décisions de chacun en fonction des connaissances de l'autre". Ce concept est lié au concept de "terrain d'entente", développé par Clark et Brennan (1991), qui fait référence à la base de connaissances partagées nécessaire pour établir une communication efficace. Le terrain d'entente constitue donc le socle sur lequel le référentiel commun peut être construit. Dans le contexte du compagnonnage, lors de la phase d'observation, l'apprenant doit d'abord partager un terrain d'entente avec l'instructeur, c'est-à-dire une compréhension mutuelle des termes, des références et des concepts utilisés. L'instructeur va recourir à des démonstrations et instructions afin d'établir ce terrain d'entente. Ce terrain d'entente est indispensable pour éviter les malentendus et permettre une interprétation correcte des démonstrations de l'instructeur, comme l'ont souligné Clark et al. (1983). Par la suite, ce terrain d'entente évolue et s'enrichit au fur et à mesure de l'apprentissage, menant à la construction d'un référentiel commun plus complexe. Ce référentiel comprend non seulement les connaissances partagées, mais aussi une représentation plus approfondie des objectifs, des actions à mener et de la manière dont ces actions se coordonnent dans la pratique. C'est pourquoi, lors de la phase pratique, le référentiel commun permet à l'instructeur de guider l'apprenant de façon plus précise et ajustée, facilitant une transmission

efficace des compétences. L'établissement de ce référentiel au travers des échanges sous formes d'instructions (phase d'observation) et de feedbacks (phase de pratique) favorise une meilleure compréhension et réduit les erreurs, car l'instructeur et l'apprenant partagent désormais une représentation commune des techniques enseignées. L'établissement du référentiel commun repose également sur la capacité de l'instructeur et de l'apprenant à se comprendre mutuellement lors de la situation d'apprentissage. Ce processus de compréhension, appelé "grounding", est essentiel pour aligner les connaissances entre l'instructeur et l'apprenant. Le grounding se définit comme un processus interactif par lequel les apprenants dans une conversation ou une tâche collaborative s'assurent qu'ils se comprennent mutuellement (Baker, Hansen, Joiner, & Traum, 1999). Ce mécanisme permet aux apprenants d'actualiser leurs représentations individuelles de la situation, favorisant ainsi l'acquisition de nouvelles connaissances. Cela implique un ajustement constant de leurs représentations personnelles pour réduire les écarts entre celles-ci, pouvant mener à une réévaluation partielle, voire totale, des perspectives individuelles des participants (Giboin, 2004).

En conséquence, le grounding implique des échanges de confirmations, des reformulations et des questions pour établir et maintenir une compréhension commune. La production de ce grounding implique ainsi l'utilisation du langage, qu'il soit verbal ou non. Cependant, le choix du langage dans les interactions dépendra du terrain d'entente préexistant (Baker, Hansen, Joiner, & Traum, 1999). L'utilisation du langage verbal permet une clarification directe et immédiate des intentions ou interprétations. Néanmoins, elle peut être limitée dans certaines situations d'apprentissage nécessitant l'utilisation d'autres moyens de communication comme les gestes non-verbaux pour obtenir le référentiel commun. Ainsi, lors d'une co-construction entre un instructeur et un apprenant, l'instructeur peut utiliser des gestes s'il juge que sa description verbale ne permet pas un ancrage optimal avec l'apprenant (Cope, Bezemer, Kneebone, & Lingard, 2015). Ainsi, le terrain d'entente initial, consolidé par le processus de grounding, sert de base pour l'élaboration de ce référentiel commun, garantissant une communication et une coordination optimale tout au long de l'apprentissage.

Voici un exemple plus concret de mise en situation nécessitant un "grounding" : lors d'un apprentissage de la manipulation d'un instrument tel qu'une aiguille, un instructeur peut expliquer verbalement à un apprenant comment faire progresser l'aiguille une fois insérée dans le patient. Si l'apprenant ne saisit pas complètement les instructions verbales, l'instructeur peut utiliser ses propres mains afin d'illustrer la trajectoire que doit prendre l'aiguille en complément de ces explications verbales. Ce processus d'échanges verbaux et de démonstrations visuelle aide les participants à ajuster leur compréhension et participe à établir un référentiel commun.

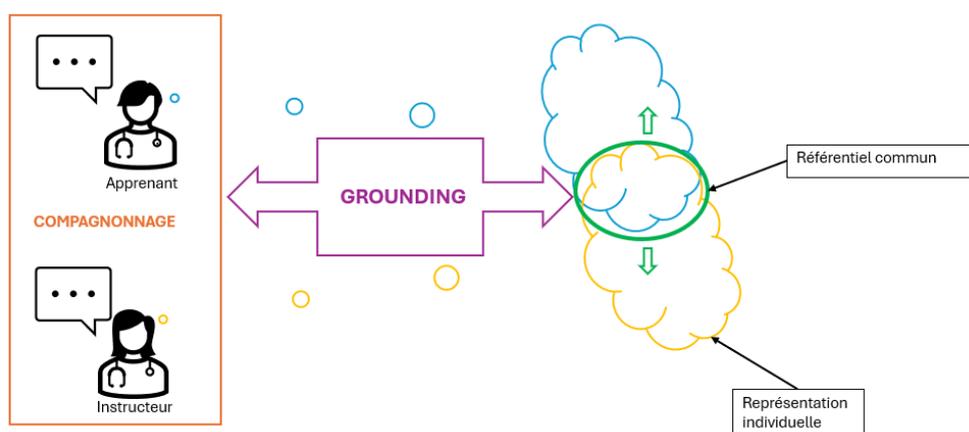


Figure 2 : Illustration de l'élaboration d'un référentiel commun entre un instructeur et un apprenant lors d'un apprentissage par compagnonnage.

2.3 TYPES D'INTERACTION ET MODALITES DE COMMUNICATION

L'acquisition des compétences techniques par l'apprenant dépend de ses échanges avec l'instructeur. Dans ce processus, l'instructeur utilise des interactions sous forme d'instruction ou de feedback, adaptées aux différentes phases d'apprentissage et aux besoins spécifiques de l'apprenant. L'objectif est de maintenir un référentiel commun tout au long du processus d'apprentissage.

2.3.1 Instruction vs Feedback

Dans la littérature, la distinction entre les termes "instruction" et "feedback" est importante dans le domaine de l'apprentissage. Cette

distinction est essentielle étant donné que ces deux formes d'interactions jouent des rôles différents lors de l'acquisition de compétences.

2.3.1.1 Instruction

L'instruction joue un rôle fondamental dans le processus d'apprentissage en fournissant aux apprenants les informations et les stratégies nécessaires pour maîtriser de nouvelles compétences et connaissances.

Selon Hodges (2001), les instructions sont essentielles dans l'apprentissage moteur car elles complètent la pratique physique en offrant à l'apprenant des informations sur la manière d'exécuter une action spécifique et/ou sur l'objectif de cette action. Ces instructions peuvent être délivrées sous différentes formes, telles que des démonstrations, et selon diverses modalités de communication à des moments particuliers. Il ajoute que la nature temporelle des instructions peut varier. Elles peuvent être données avant toute pratique physique de la compétence ou à un stade ultérieur de l'acquisition des compétences tandis que les feedbacks sont fournis pendant ou après la performance (Hodges & Franks, 2001; Hodges N. J., 2001).

Schmidt et Wrisberg (2008) ajoutent que les instructions servent à souligner certains aspects du mouvement et à rappeler des principes déjà expliqués, ce qui est crucial pour renforcer la compréhension et la mémorisation des mouvements appris. Leur étude montre l'importance de l'instruction pour la performance motrice, en soulignant comment des directives claires et précises peuvent améliorer l'efficacité de l'apprentissage (Schmidt & Wrisberg, 2008).

Clark (2009) va plus loin en définissant les instructions comme l'acte de transmettre de nouvelles connaissances ou des informations aux apprenants par divers moyens (cours magistraux, démonstrations, discussion). Ses travaux mettent en évidence l'importance de guider, d'expliquer et de démontrer pour aider les apprenants à comprendre de nouveaux concepts et à développer des compétences (Clark R. E., 2009).

Enfin, Rosenshine (2012) décrit l'instruction comme un ensemble de pratiques et de stratégies qui incluent des démonstrations, des explications, et des activités guidées et indépendantes pour faciliter l'apprentissage. Il souligne l'importance d'utiliser une variété de méthodes pour faciliter la transmission des compétences (Rosenshine, 2012).

En conclusion, l'instruction est un élément clé de l'apprentissage qui peut être délivré sous différentes formes et à différents moments du processus d'acquisition des compétences. Que ce soit par des démonstrations, des explications ou des rappels de principes, l'instruction guide les apprenants vers une meilleure compréhension et maîtrise des compétences nouvelles.

2.3.1.2 Feedback

Tout comme l'instruction, le feedback joue également un rôle important dans le processus d'apprentissage.

Hattie et Timperley (2007) définissent le feedback comme une information fournie par un agent (un enseignant, un pair, un instructeur) concernant les aspects de la performance par rapport à un objectif ou une norme. Ils peuvent être donnés pendant ou après les performances de l'apprenant. Leur rôle consiste à réduire l'écart entre ce qui est compris et ce qui est attendu, en aidant les élèves à corriger leurs erreurs et à améliorer leur performance. Un feedback efficace joue un rôle crucial dans l'apprentissage en guidant les étudiants vers une meilleure compréhension et application des connaissances (Hattie & Timperley, 2007).

Van de Ridder et al. (2008) précisent que le feedback dans un contexte d'apprentissage clinique fournit des informations spécifiques sur la comparaison entre la performance observée d'un apprenant et une norme établie, dans le but d'identifier et de corriger les écarts pour améliorer la performance globale de l'apprenant (Van De Ridder, Stokking, McGaghie, & Ten Cate, 2008).

Newell et al. (1985) ainsi que Sigrist et al. (2013) précisent que lorsque les feedbacks sont donnés de manière extérieure à un individu, ceux-ci sont appelés feedbacks augmentés. Les feedbacks augmentés

donnés sont alors définis comme des feedbacks provenant d'éléments externes à l'individu comme un instructeur, visant à soutenir, guider et améliorer le processus d'apprentissage par divers moyens de communication verbale, visuelle, haptique ou leur combinaison (Newell, Moris, & SCULLY, 1985; Sigrist, Rauter, Riener, & Wolf, 2013).

Sunaryadi (2016) ajoute que les feedbacks sont des informations liées au mouvement qui sont "retournées" à l'apprenant pendant et après une tentative de réalisation d'une tâche afin de permettre des modifications pour l'action suivante. Il distingue les feedbacks intrinsèques provenant de la production du mouvement à l'intérieur du corps, et les feedbacks extrinsèques (feedback augmenté) fournis par des sources extérieures au corps qui complètent le feedback intrinsèque (Sunaryadi, 2016).

Enfin, Cecilio-Fernandes et al. (2020) mettent en avant l'importance du feedback pour corriger et guider les actions des apprenants vers une meilleure performance globale, en complément des instructions qui elles aident l'apprenant à intégrer les connaissances et les compétences nécessaires (Cecilio-Fernandes, Crossen, Coster, Jaarsma, & Tio, 2020; Hattie & Timperley, 2007).

En conclusion, les feedbacks jouent un rôle central dans le processus d'apprentissage en fournissant aux apprenants des informations précieuses pour ajuster, corriger et améliorer leurs actions afin d'atteindre leurs objectifs.

2.3.1.3 Synthèse

Pour résumer, l'instruction et le feedback sont deux formes d'interaction instructeur-apprenant jouant des rôles distincts dans le processus d'apprentissage. L'instruction se concentre sur la transmission de connaissances et stratégies aux apprenants, souvent par le biais de démonstrations et d'explications, pour faciliter la compréhension et la maîtrise de nouvelles compétences. Elles sont données en amont de la pratique (Hodges N. J., 2001; Clark R. E., 2009; Rosenshine, 2012). En revanche, les feedbacks sont des informations spécifiques sur la performance par rapport à des objectifs ou normes, fournies après ou pendant la pratique, dans le but d'aider les

apprenants à corriger leurs erreurs et à améliorer leurs actions (Hattie & Timperley, 2007; Van De Ridder, Stokking, McGaghie, & Ten Cate, 2008; Sunaryadi, 2016). L'instruction et le feedback jouent donc des rôles complémentaires mais distincts en termes d'objectif, avec des temporalités différentes dans le processus d'acquisition de compétences et de connaissances.

Dans le contexte de notre recherche et en s'appuyant sur la littérature, nous allons définir ces termes comme suit :

- **Les instructions sont des directives fournies par un instructeur en amont de la pratique dans l'objectif d'aider l'apprenant à intégrer les connaissances et les compétences nécessaires.**
- **Les feedbacks sont des informations fournies par un instructeur aux apprenants pendant ou après la pratique afin de les guider et de corriger leurs actions.**

2.3.2 Instruction, Feedback et compagnonnage

2.3.2.1 Phase d'observation

Le modèle de compagnonnage repose initialement sur l'apprentissage par observation ("see one"), où l'apprenant observe attentivement et écoute les instructions fournies par un instructeur lors de l'acquisition de compétences techniques. L'apprentissage par observation permet à un individu d'acquérir de nouvelles compétences et comportements en observant les actions des autres (Cordovani & Cordovani, 2016). Cet apprentissage permet à l'observateur de ressentir et de comprendre les instructions de l'individu observé, facilitant ainsi l'apprentissage des gestes observés grâce notamment aux neurones miroirs. Ces neurones miroirs s'activent à la fois lorsque l'individu exécute une action spécifique et lorsqu'il observe un autre individu exécuter la même action (Rizzolatti & others, 2006; Lago-Rodriguez, Lopez-Alonso, & Fernández-del-Olmo, 2013). Ils permettent aux apprenants de comprendre et d'intégrer plus rapidement des compétences motrices complexes. En observant des démonstrations précises et répétées, les apprenants peuvent internaliser les mouvements nécessaires à la réalisation de tâches spécifiques (Cordovani & Cordovani, 2016). Ainsi,

l'apprentissage par observation joue un rôle crucial dans le développement des compétences médicales, en permettant aux apprenants d'acquérir des techniques complexes simplement en regardant des instructeurs exécuter des procédures spécifiques (Rao, Arora, Singh, Dange, & Nagarkar, 2023). De plus, l'efficacité de l'apprentissage par observation pour acquérir des compétences motrices simples ou complexes est déjà bien établie (Wulf, Shea, & Lewthwaite, 2010).

L'une des stratégies employées dans l'apprentissage par observations repose sur l'instruction par démonstration. La démonstration est définie comme "l'exécution d'une activité de type tâche en dehors de son contexte fonctionnel habituel afin de permettre à quelqu'un qui n'est pas l'exécutant d'obtenir une image précise de l'activité en cours" (Goffman, 1974). Desmurget (2006) indique que la démonstration est une méthode d'apprentissage efficace pour une nouvelle compétence motrice complexe (Desmurget, 2006). Elle permet à l'apprenant de comprendre l'ordre des tâches et la précision des gestes de l'instructeur en offrant ainsi une représentation visuelle de ce qu'il faut réaliser ("le quoi") après avoir exploré par lui-même "le comment" (Ammirati, Amsallem, Gignon, BERTRAND, & PELACCIA, 2011). Swinner (1996) indique que les instructions par démonstrations, fournies avant la pratique, peuvent aider à développer une référence de correction ou un modèle de mouvement, avec lequel la performance ultérieure peut être comparée (Swinnen, 1996). Barić et Busko soulignent que l'apprentissage par des instructions visuelles est efficace, néanmoins, l'ajout d'instructions verbales permet aux participants d'apprendre plus rapidement, surtout au début de l'apprentissage (Barić & Buško, 2008). Ehmer (2021) ajoute que la synchronisation des démonstrations joue un rôle clé. En coordonnant les démonstrations visuelles avec des instructions verbales claires, les instructeurs peuvent améliorer la compréhension et la rétention chez les apprenants (Ehmer, 2021). Schmidt et al. (2008) ajoutent que les instructions verbales permettent à l'instructeur de diriger l'attention des apprenants vers les objectifs de la compétence et le résultat de la performance attendue (Schmidt & Wrisberg, 2008).

2.3.2.2 Phase de pratique

Une fois l'apprentissage par observation terminé, l'apprenant passe à la pratique ("do one") et imite ce qu'il a observé des démonstrations de l'instructeur. Lago-Rodriguez et al. (2013) expliquent que l'exécution des tâches active les mêmes régions cérébrales que celles impliquées dans l'observation de ces tâches, fournissant une base neurophysiologique solide à l'apprenant. Les neurones miroirs jouent un rôle crucial en aidant l'apprenant à comprendre et à reproduire les tâches observées (Lago-Rodriguez, Lopez-Alonso, & Fernández-del-Olmo, 2013).

Bien que les instructions reçues lors de la phase d'observation aident l'apprenant à obtenir une base solide pour comprendre la tâche, le recours aux feedbacks pendant la phase de pratique est crucial pour ajuster et améliorer leur performance. Hodges et Francks (2001) ont montré que les instructions et les feedbacks sont complémentaires dans le processus d'apprentissage (Hodges & Franks, 2001).

Pendant la phase pratique, l'instructeur utilise des feedbacks augmentés pour fournir une évaluation précise de la performance en termes de mouvements techniques et de compétences (Lauber & Keller, 2014). Ces feedbacks peuvent donner deux types d'informations à l'apprenant : le feedback de performance (knowledge of performance, KP) sur les caractéristiques du mouvement et de sa qualité, et le feedback de résultat (knowledge of result, KR) qui informe sur le succès ou l'échec de l'exécution de la tâche (Sunaryadi, 2016).

Le feedback de performance permet une évaluation immédiate et précise de la qualité de l'exécution du geste et aide l'apprenant à ajuster et améliorer ses compétences techniques. Il permet également de corriger les erreurs rapidement afin d'éviter à l'apprenant de répéter les erreurs (Lauber & Keller, 2014). Le feedback de résultat quant à lui, se concentre sur le résultat après l'exécution de la tâche ou d'une série de tâches/sous-tâche par l'apprenant en incluant les informations sur les conséquences ou les résultats finaux de leurs actions. Ce type de feedback peut renforcer la motivation des apprenants en montrant les progrès réalisés ou en identifiant les points particuliers nécessitant des efforts. Il peut également aider l'apprenant à savoir si les objectifs

fixés ont été atteints afin d'ajuster les stratégies en conséquence (Moinuddin, Goel, & Sethi, 2021). Cependant, la quantité optimale de feedback nécessaire dépend de la complexité de la compétence (Wulf & Shea, 2002). Sigrist et al. (2013) soulignent qu'il existe une relation entre la complexité de la tâche et l'efficacité du feedback augmenté. Ainsi, plus la compétence technique est complexe, plus le feedback doit être fréquent (Sigrist, Rauter, Riener, & Wolf, 2013). Néanmoins, des études suggèrent que la fréquence de feedback doit diminuer au fur et à mesure que le niveau des compétences des apprenants augmente (Guadagnoli & Lee, 2004; Wulf & Shea, 2002).

2.3.2.3 Synthèse

Dans le modèle de compagnonnage, l'utilisation des instructions lors de l'enseignement par observation à travers la démonstration permet à l'apprenant d'observer et de comprendre visuellement et verbalement les compétences techniques à acquérir, facilitant ainsi leur assimilation initiale. Le feedback, quant à lui intervient lors de la pratique effective de l'apprenant, lui permettant d'ajuster et d'améliorer ses compétences. Cette interaction entre les instructions et les feedbacks favorise un apprentissage progressif et efficace, adapté au niveau d'expertise de l'apprenant et à la complexité des compétences liées à la tâche. L'utilisation de ces deux types d'interaction est donc indispensable pendant l'apprentissage par compagnonnage.

Instruction



Feedback



Figure 3 : Exemples d'instructions et de feedback donnés par un instructeur à un apprenant. Dans le cas de l'instruction, l'instructeur réalise le geste pendant que l'apprenant l'observe. Dans le cas du feedback, l'apprenant réalise le geste pendant qu'il reçoit des corrections de l'instructeur.

2.3.3 Interactions et modalités de communication

2.3.3.1 Unimodalité

Pour construire un référentiel commun et fournir des instructions et des feedbacks dans le cadre de l'apprentissage par compagnonnage, l'instructeur communique avec l'apprenant à travers différentes modalités de communication (Hodges N. J., 2001). Une modalité de communication se définit comme une forme particulière d'un mode de communication (Bellik & Teil, 1992). La littérature montre qu'il existe trois formes de communication lors de l'apprentissage de nouvelles compétences techniques en médecine : la forme verbale, visuelle et haptique (Chellali, Dumas, & Milleville-Pennel, 2012).

La modalité verbale permet de fournir des informations explicites sur les exigences de la tâche, les objectifs du mouvement et les stratégies

d'exécution, tout en renforçant la motivation, l'auto-efficacité et l'engagement des apprenants (Sigrist, Rauter, Riener, & Wolf, 2013). Par exemple, dans le contexte de la formation chirurgicale, les instructions verbales des experts peuvent guider et corriger les apprenants pendant des procédures complexes en offrant des conseils en temps réel (Sutkin, Littleton, & Kanter, 2015). Marta (2020) souligne l'effet bénéfique du feedback verbal lors de l'apprentissage de compétences motrices complexes (Marta, 2020). De plus, Bloom et al. (2007) ont analysé la communication verbale pendant l'enseignement en salle d'opération, mettant en lumière qu'une communication verbale claire et précise peut influencer positivement la compréhension des techniques chirurgicales, et la performance des apprenants (Blom, et al., 2007). Roberts et al. (2012) indiquent également l'importance des interactions verbales comme "moment enseignable" pour la transmission des connaissances pratiques et des compétences techniques. Elles permettent aux instructeurs de guider, de partager, d'expliquer des procédures complexes et de fournir des conseils en temps réel aux apprenants (Roberts, Brenner, Williams, Kim, & Dunnington, 2012). Cependant, malgré ces avantages, la communication verbale présente des limites. Magill et Anderson (2010) expliquent que les instructions verbales peuvent être parfois trop détaillées ou au contraire insuffisantes, ce qui ne permet pas à l'apprenant d'obtenir les informations nécessaires pour réaliser correctement le geste moteur (Magill & Anderson, 2010). De plus, les compétences techniques impliquent souvent des sensations haptiques difficiles à transmettre uniquement par des mots (Rasmussen, 1983). En conséquence, il est essentiel de compléter la communication verbale par d'autres formes de communication telle que la forme visuelle ou encore haptique.

La communication visuelle dans l'apprentissage en médecine, se base sur des aides visuelles telles que des démonstrations de mouvements ainsi que divers supports tels que des images médicales, des schémas, des vidéos ou des simulations pour faciliter la transmission d'expertise. L'utilisation d'informations visuelles permet aux étudiants de visualiser des procédures complexes et des techniques spécifiques, ce qui favorise une meilleure compréhension et une mémorisation accrue des informations (Cope, Bezemer, Kneebone, & Lingard, 2015;

Thilakumara, Jayasinghe, Rasnayaka, Jayasinghe, & Abeysundara, 2018; Lago-Rodriguez, Lopez-Alonso, & Fernández-del-Olmo, 2013). Magill et al. (2010) ajoutent que les feedbacks visuels peuvent communiquer des informations sur les mouvements et les actions des apprenants facilitant l'ajustement et l'amélioration de la performance (Magill & Anderson, 2010). Cependant, il existe des variations individuelles dans la capacité à interpréter et à assimiler les informations visuelles (Conati & Maclaren, 2008). Ainsi, bien que la communication visuelle soit précieuse dans l'éducation médicale, tout comme pour la communication verbale, il est essentiel de compléter cette modalité par d'autres modes de communication afin de garantir une compréhension complète entre l'instructeur et l'apprenant (Ehmer & Brône, 2021; Kirk, Mininger, & Laird, 2016).

La communication haptique quant à elle, implique l'utilisation du sens du toucher pour transmettre des informations. Selon Sutkin et al. (2015), les instructeurs chirurgicaux utilisent des gestes avec du contact physique pour enseigner et corriger les techniques chirurgicales en temps réel, ce qui renforce la compréhension et l'acquisition des compétences pratiques (Sutkin, Littleton, & Kanter, 2015). Feng et al. (2016) soulignent également l'importance d'instructions tactiles dans le guidage des apprenants lors de procédures complexes (Feng, Wong, Park, & Mentis, 2016). De plus, Hurstel (2019) souligne également que les contraintes d'asepsie en bloc opératoire, peuvent limiter les interactions tactiles entre les membres de l'équipe chirurgicale (Hurstel, 2019), ce qui peut nuire à la communication ou à la coordination. Cependant, tout comme pour la modalité visuelle, l'efficacité des informations haptiques varie en fonction de la perception individuelle, de la sensibilité et de l'adaptation, ce qui peut influencer l'interprétation et la performance des apprenants (Chellali, Dumas, & Milleville-Pennel, 2012; Chellali, Dumas, & Milleville-Pennel, 2011). Ainsi bien que la communication haptique soit importante dans l'apprentissage tout comme les modalités visuelles et verbales, il est essentiel de compléter cette modalité avec d'autres pour garantir l'apprentissage.

Enfin, en médecine, une autre forme de communication est utilisée en plus des trois précédentes lors de l'apprentissage des compétences techniques. Il s'agit de la communication non-verbale. La

communication non-verbale englobe un large éventail de comportements tels que les gestes (ex : pointage), les expressions faciales, la posture et les mouvements corporels, qui transmettent des informations en l'absence de mots (Sebeok, 2005). Elle joue un rôle crucial dans l'apprentissage chirurgical où les gestes peuvent compléter et renforcer les instructions verbales. Goldin-Meadow (1999) souligne que les gestes ne servent pas seulement à communiquer mais aussi à structurer et à faciliter la pensée (Goldin-Meadow, 1999). Cela est particulièrement pertinent dans l'apprentissage chirurgical où la précision et la clarté sont essentielles. Sutkin et al. (2015) indiquent que les instructeurs utilisent des gestes comme le pointage pour orienter et corriger les actions des apprenants en temps réel (Sutkin, Littleton, & Kanter, 2015). Cette approche est appuyée par l'étude de Mentis et al. (2014) qui montre comment le soutien visuel et gestuel dans les procédures laparoscopiques améliore la compréhension des apprenants (Mentis, Chellali, & Schwaitzberg, 2014). Cependant, la communication non-verbale présente également quelques limites, car elle peut être sujet à des malentendus, surtout lorsque les gestes ne sont pas standardisés ou lorsque les apprenants viennent de cultures différentes avec des interprétations variées de signaux non-verbaux (Anu, Babitha, & Muthukumaravel, 2013).

Ainsi, la communication non-verbale est importante dans l'apprentissage mais nécessite notamment qu'on la complète avec d'autres modalités lorsque celle-ci ne permet pas une compréhension optimale de l'apprenant. De plus, elle est régulièrement confondue avec la modalité visuelle. Nous tenterons de lever cette ambiguïté entre les deux termes dans le chapitre 3 de cette thèse.

Par ailleurs, lorsque l'utilisation d'une seule modalité limite la transmission de compétences, l'instructeur peut recourir à l'utilisation d'une combinaison de modalités aussi appelée multimodalité pour transmettre les compétences aux apprenants (Sigrist, 2014). Cette notion est discutée dans la section suivante.

2.3.3.2 Multimodalité

La multimodalité se définit comme l'usage de plusieurs modalités pour

la réalisation d'une même tâche (Bellik & Teil, 1992). Dans le contexte de ce travail, nous allons plus particulièrement nous focaliser sur l'utilisation de la multimodalité comme mode de communication en situation d'apprentissage. Dans ce contexte, elle démontre un impact significatif sur l'apprentissage à travers diverses combinaisons de modalités. Par exemple, la combinaison visuelle et haptique améliore l'engagement et la compréhension des apprenants. Koritnik et al. (2010) ont comparé l'efficacité de feedbacks visuels et haptiques lors d'entraînement des membres inférieurs. Ils ont montré que les feedbacks haptiques peuvent compléter les feedbacks visuels en fournissant des informations kinesthésiques qui aident à mieux comprendre et maîtriser les mouvements complexes (Koritnik, Koenig, Bajd, Riener, & Munih, 2010). Yuksel et al. (2019) ont ajouté que la combinaison visuo-haptique permettait d'améliorer la compréhension des concepts physiques en permettant aux étudiants de ressentir les forces et les interactions en plus de voir, rendant ainsi l'apprentissage plus tangible et intuitif (Yuksel, et al., 2019).

Pour l'acquisition de compétences motrices, la combinaison verbale et haptique se révèle particulièrement efficace. Selon Frikha et al. (2019), l'intégration des feedbacks verbaux et haptiques favorise une meilleure acquisition et rétention des compétences motrices par rapport à l'utilisation d'un seul de ces deux feedbacks. Les apprenants comprennent et mémorisent mieux les mouvements lorsqu'ils reçoivent des instructions verbales accompagnées de feedbacks tactiles. Cette combinaison permet également d'influencer la perception des apprenants concernant la difficulté de la tâche et leurs propres compétences. Ainsi, cela permet aux apprenants d'améliorer leur motivation et leur engagement dans le processus d'apprentissage (Frikha, Chaâri, Elghoul, Mohamed-Ali, & Zinkovsky, 2019).

De manière similaire, l'intégration des modalités verbales et non-verbales enrichit la communication instructeur-apprenant en clarifiant les concepts enseignés et en renforçant l'engagement et la rétention des apprenants. Wahyuni (2018) souligne que l'intégration d'éléments verbaux et non verbaux permet de renforcer le message éducatif, augmentant ainsi l'engagement et la rétention des apprenants. Les langages corporels comme les gestes complètent les mots en apportant une dimension supplémentaire qui aide à clarifier les idées

complexes et à maintenir l'attention des apprenants (Wahyuni, 2018). Jacob et al. (2016) approfondissent cette perspective en montrant que les éléments non-verbaux peuvent modifier l'interprétation et l'impact des messages verbaux. Leur recherche indique que la synchronisation entre le verbal et le non-verbal est essentielle pour éviter les incompréhensions (Jackob, Roessing, & Petersen, 2016). Par exemple, un instructeur qui utilise des gestes et un contact visuel direct en plus de ses explications verbales, peut créer un environnement d'apprentissage plus interactif et stimulant favorisant une meilleure assimilation des connaissances (Jackob, Roessing, & Petersen, 2016).

La combinaison verbale et visuelle permet d'améliorer la compréhension et la rétention des informations chez les apprenants. Huang (2020) souligne que la combinaison des feedbacks verbales et visuelles améliore la perception et la correction des mouvements (Huang Q. , 2020). Konukman et Petrakis (2001) ont soutenu cette idée en montrant que la combinaison des indices verbaux et visuels peut faciliter l'apprentissage des gestes techniques au tennis en offrant des repères clairs et précis aux apprenants permettant une meilleure assimilation des compétences (Konukman & Petrakis, 2001). De même, Jaszczur-Nowicki et al. (2021) explore l'apprentissage moteur de tâches complexes avec des feedbacks augmentés et soulignent que l'efficacité des feedbacks dépend de la modalité utilisée. Leur recherche explique que l'utilisation de la combinaison des feedbacks verbales-visuelles est plus efficace que l'utilisation d'une seule des deux, en raison de l'intégration de différents types de stimuli qui facilitent une compréhension plus profonde et une exécution plus précise des tâches (Jaszczur-Nowicki, et al., 2021). Ces résultats sont en cohérence avec la théorie de Mayer (2005) qui explique que lorsque l'un des canaux sensoriels est submergé, l'apprenant peut avoir recours à d'autres canaux pour compenser. Par exemple, si la capacité de traitement verbal est saturée, les informations visuelles peuvent prendre le relais pour assurer une compréhension continue. Cette capacité à alterner entre les canaux permet une meilleure gestion cognitive et évite la surcharge, facilitant l'apprentissage (Mayer, 2005).

Enfin, la combinaison verbal-visuel-haptique joue un rôle complémentaire dans l'amélioration de l'apprentissage. Köpsel et al.

(2016) ont examiné les effets des feedbacks auditifs, haptiques et visuelles sur la performance des gestes effectués. Leurs résultats indiquent que la combinaison de ces modalités peut améliorer la précision et la performance des utilisateurs, mettant en évidence l'importance du feedback multimodal dans l'apprentissage et la performance des tâches gestuelles. Ils ont constaté que chaque modalité de feedback apportait des informations uniques qui, lorsqu'elles sont combinées, fournissent une image plus complète et précise de la tâche à accomplir, améliorant ainsi l'efficacité de l'apprentissage (Köpsel, Majaranta, Isokoski, & Huckauf, 2016). Sigrist et al. (2015) soutiennent ces résultats et indiquent que l'intégration des différentes formes de feedback peut offrir une expérience d'apprentissage plus riche et efficace (Sigrist, Rauter, Marchal-Crespo, Riener, & Wolf, 2015).

L'utilisation de la multimodalité dans l'apprentissage joue un rôle essentiel en combinant différentes modalités sensorielles. Cette approche permet d'améliorer l'engagement, la compréhension et la rétention des apprenants en offrant une diversité de stimuli qui assurent une meilleure assimilation des connaissances. En intégrant ces modalités, les environnements d'apprentissage deviennent plus interactifs et adaptés et peuvent favoriser ainsi une expérience d'apprentissage plus efficace.



Figure 4 : Exemple d'instruction (I) et de feedback (F) unimodaux et multimodaux entre un instructeur et un apprenant. La flèche bleue représente la modalité verbale, la flèche rouge représente la modalité visuelle et le cercle vert clair représente la modalité haptique.

2.3.3.3 Synthèse

La communication pendant l'apprentissage des gestes techniques en médecine fait appel à diverses modalités telles que le verbal, le visuel, l'haptique et le non-verbal pour transmettre des instructions et des feedbacks. Chacune de ces modalités offrent des avantages uniques. Néanmoins, lorsqu'une seule modalité ne suffit pas à assurer un apprentissage optimal, les instructeurs peuvent combiner ces modalités pour fournir des informations complémentaires. Cette approche permet d'enrichir la transmission des connaissances en adaptant le recours à certaines modalités ou combinaison en fonction des besoins des apprenants, favorisant ainsi une meilleure compréhension et rétention des compétences enseignées.

Le tableau suivant résume les différentes formes d'interactions instructeur-apprenant discutées dans notre revue de la littérature.

Tableau 1 : Distinction entre interaction par instruction et interaction par feedback dans le processus d'apprentissage par compagnonnage.

Type d'interaction	Instruction	Feedback
Objectif	Fournir des connaissances et stratégies pour maîtriser de nouvelles compétences	Fournir des informations sur la performance et le résultat par rapport à un objectif ou une norme
Émetteur	Instructeur	Instructeur
Récepteur	Apprenant	Apprenant
Temporalité	Avant	Pendant et Après
Rôle	Instructeur : Actif Apprenant : Passif	Instructeur : Pseudo-passif Apprenant : Actif
Communication	Unimodale et Multimodale	Unimodale et Multimodale

2.4 APPRENTISSAGE PAR SIMULATION

Le modèle classique d'apprentissage des compétences médicales, qui repose sur le compagnonnage, a connu une transformation majeure avec l'essor croissant des simulations. Dans le modèle de compagnonnage, les étudiants apprenaient principalement en pratiquant directement sur des patients réels. Bien que cette méthode soit enrichissante, elle comporte des risques pour les patients et ne permet pas aux apprenants de s'entraîner autant de fois qu'ils le souhaitent, ni de commettre des erreurs sans conséquences graves (Chang, 2013). Aujourd'hui, notamment à la suite de la directive de la Haute Autorité de Santé "jamais la première fois sur un patient" (Grany & Moll, 2012), ce modèle traditionnel évolue grâce aux nouvelles méthodes d'apprentissage basées sur la simulation (Al-Elq, 2010).

2.4.1 Définition de la simulation

Selon le Robert [<https://dictionnaire.lerobert.com/definition/simulation>], la simulation a trois significations : 1. Fait de simuler, 2. Action de simuler, 3. Représentation simulée d'un fonctionnement, d'un processus.

Pastré et al. (2006) définissent la simulation comme une démarche d'apprentissage, qui met en scène, grâce à un objet, le simulateur, des situations qui vont servir à l'acquisition des compétences professionnelles mobilisées dans l'activité (Pastré, Mayen, & Vergnaud, 2006).

Dans le domaine médical, Gaba (2007) définit la simulation comme une technique, pas une technologie, visant à remplacer ou amplifier les expériences réelles par des expériences guidées qui évoquent ou reproduisent des aspects substantiels du monde réel de manière entièrement interactive (Gaba, 2007).

En 2008, Cooper et Taqueti ont défini la simulation comme une référence aux applications des simulateurs à des fins d'éducation ou de formation (Cooper & Taqueti, 2008).

La Haute Autorité de Santé explique que la simulation en santé correspond à l'utilisation d'un matériel, de réalité virtuelle ou d'un patient standardisé pour reproduire des situations ou des environnements de soin, dans le but d'enseigner des procédures diagnostiques et thérapeutiques et de répéter des processus, des concepts médicaux ou des prises de décision par un professionnel de santé ou une équipe de professionnel (Granry & Moll, 2012).

En 2013, Benhamou et al. (2013) indiquent que la simulation permet de donner à l'apprenant un environnement sécuritaire pour l'apprentissage, afin que l'instructeur puisse lui enseigner les compétences techniques et non techniques ou encore les procédures (Benhamou, Roulleau, & Trabold, 2013). Enfin, en 2014, dans leur état des lieux sur la simulation en pédagogie médicale, Betz et D'Orio définissent la simulation comme un mode d'enseignement de savoir-être et d'habiletés utilisés dans des tâches pour lesquelles un apprentissage direct s'avère impossible pour des raisons déontologiques (sécurité et risques), économiques (coûts du matériel)

ou techniques (très faible probabilité d'occurrence des incidents ou accidents à étudier) (Romain, Ghuysen, & D'Orio, 2014).

En somme, la simulation pour l'apprentissage en médecine englobe divers définitions et perspectives. Dans notre contexte d'étude, nous définirons la simulation comme **“une méthode d'apprentissage utilisant des simulateurs et des techniques interactives pour la transmission de compétences spécifiques entre un instructeur et un apprenant”**.

2.4.2 Différents types de simulateurs

Selon la classification de Chiniara, les simulateurs se divisent en deux grandes catégories : organique et non-organique (Chiniara, 2007) (**Figure 5**).

Les simulateurs organiques visent à reproduire de manière réaliste des situations cliniques pour la formation des étudiants et des professionnels de santé. Ils se répartissent en deux sous-catégories : les simulateurs procéduraux sur des cadavres humains ou animaux permettant aux apprenants de pratiquer des interventions chirurgicales et des procédures médicales sur des corps réels, offrant une expérience tactile et visuelle très proche de la réalité ; et les simulations humaines où des acteurs jouent le rôle de patients selon des scénarios détaillés permettant aux étudiant de s'exercer à des compétences comme la communication ou encore l'examen physique (Ducros & Céphalées, 2011).

Les simulateurs non-organiques regroupent l'ensemble des dispositifs et technologies qui ne reproduisent pas directement les structures humaines, permettant ainsi de simuler des situations cliniques sans les contraintes biologiques et offrant une flexibilité pédagogique (Ziv, Wolpe, Small, & Glick, 2006). Ces simulations fournissent un environnement contrôlé et répétitif où les apprenants peuvent pratiquer et perfectionner leurs compétences techniques, procéder à des interventions chirurgicales et gérer divers scénarios cliniques sans risque pour les patients réels (Ducros & Céphalées, 2011). Parmi ces simulateurs, on trouve les simulateurs procéduraux, utilisés pour les interventions chirurgicales ou les techniques invasives, permettant aux

apprenants de répéter des gestes précis sans risque pour le patient. (Granry & Moll, 2012). Betz et D'orio (2014) mentionnent également des simulations basées sur ordinateur, qui offrent une accessibilité et permettent des répétitions infinies de scénarios variés (Romain, Ghuyssen, & D'Orion, 2014). Parmi, les simulateurs basés sur ordinateurs, il existe les technologies de réalité virtuelle (RV) qui apportent une dimension supplémentaire à la simulation médicale. So et al. (2019) notent que les simulateurs de réalité virtuelle créent des environnements immersifs où les apprenants peuvent interagir avec des scénarios cliniques complexes en temps réel (So, Chen, Wong, & Chan, 2019). Ces simulateurs permettent aux apprenants une pratique immersive et répétitive sans limitation dans le temps, tout en offrant une gestion du suivi et ça en temps réel (Jiang, et al., 2022).

Dans le cadre de notre travail de thèse, nous nous intéresserons plus particulièrement aux simulateurs en réalité virtuelle et à leurs contributions dans la formation médicale.

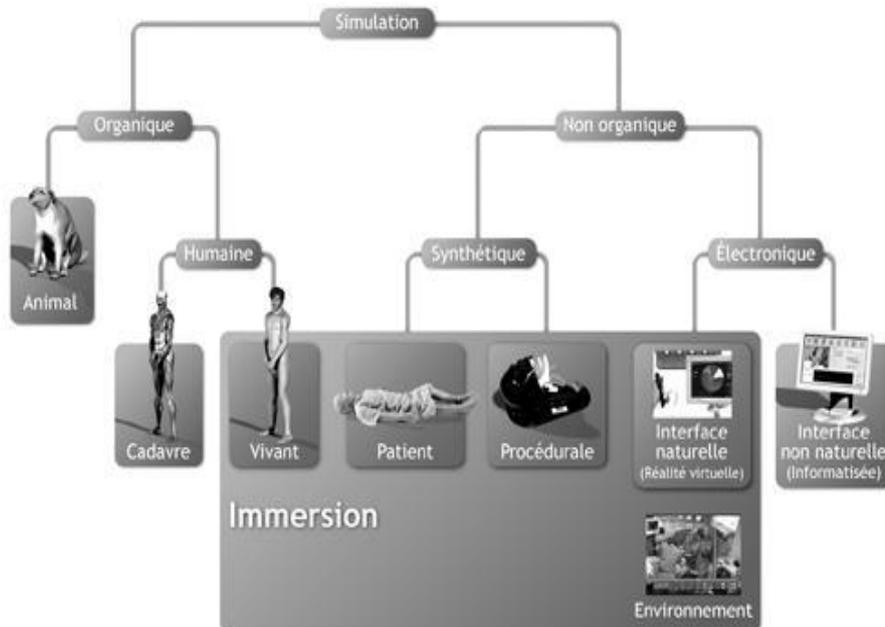


Figure 5 : Classification de la simulation selon Chiniara (Chiniara, 2007).

2.4.3 Apprentissage et réalité virtuelle

2.4.3.1 Simulation en réalité virtuelle et apprentissage

La réalité virtuelle est une simulation interactive et immersive d'environnements réels ou imaginaires, où l'utilisateur peut interagir de manière sensorielle (Fuchs, 2006). Cette technologie trouve une application significative dans l'éducation en permettant la création d'environnements simulés réalistes où les apprenants peuvent s'entraîner de manière sûre et répétée à des tâches et compétences spécifiques (Benabbou & Lelong, 2023). Selon Perot (2022) et Jiang et al. (2022), la réalité virtuelle offre un cadre d'apprentissage immersif et engageant permettant aux étudiants de simuler des situations complexes et de recevoir des feedbacks immédiats contribuant ainsi à une meilleure rétention des connaissances et à l'acquisition de compétences pratiques (Perot, 2022; Jiang, et al., 2022). Ainsi, dans le domaine de l'éducation, la réalité virtuelle joue un rôle crucial en permettant l'apprentissage de compétences techniques complexes à travers des simulateurs interactifs.

En médecine, l'utilisation de la réalité virtuelle pour la formation est particulièrement prometteuse. Les simulateurs médicaux basés sur cette technologie permettent aux professionnels de santé en formation de pratiquer des procédures complexes dans un environnement contrôlé et sûr. Par exemple, Correa et al. (2017) ont développé un simulateur de réalité virtuelle spécifique pour la formation à l'anesthésie dentaire, permettant aux étudiants de pratiquer cette procédure complète de manière sécurisée et efficace (Correa, Machado, Ranzini, Tori, & Nunes, 2017). De même, le simulateur UlTRASim a été conçu pour l'apprentissage de l'anesthésie locorégionale échoguidée afin d'aider les apprenants à améliorer leur précision lors de la manipulation d'outil (Simon, et al., 2024) (**Figure 6**).



Figure 6 : Simulateur UltrASim pour l'apprentissage des gestes d'anesthésie locorégionale échoguidée (Simon, et al., 2024).

Yiannakopoulo et al. (2015) ont exploré l'utilisation des simulateurs virtuels dans la formation à la chirurgie laparoscopique. Leur étude montre que les simulateurs virtuels aident les chirurgiens apprenants à acquérir des compétences techniques comme la coordination œil-main (Yiannakopoulou, Nikiteas, Perrea, & Tsigris, 2015). Ces résultats sont en accord avec l'étude de Palter et Grantcharov (2010) qui souligne l'efficacité des simulateurs virtuels dans l'entraînement aux compétences chirurgicales permettant aux chirurgiens de pratiquer des gestes précis et complexes dans un environnement sécurisé (Palter & Grantcharov, 2010). L'étude de Kim & Kim (2023) confirme que ces environnements immersifs virtuels améliorent l'efficacité des programmes éducatifs médicaux en augmentant la performance des apprenants lors de la mise en pratique des compétences cliniques acquises (Kim & Kim, 2023).

En conclusion, la réalité virtuelle joue un rôle essentiel dans l'éducation médicale en permettant aux apprenants de s'entraîner efficacement à des procédures et techniques complexes sans compromettre la sécurité des patients. Grâce à cette technologie, les apprenants peuvent acquérir des compétences pratiques de manière immersive et sécurisée, contribuant ainsi à l'amélioration globale de la formation médicale.

2.4.3.2 Place du compagnonnage dans les simulateurs de réalité virtuelle

Comme discuté plus haut, le modèle de compagnonnage joue un rôle crucial dans l'apprentissage médical. Toutefois, la plupart des simulateurs immersifs existants basés sur les technologies de réalité virtuelle sont conçus pour un apprentissage individuel, où l'apprenant se retrouve isolé du monde réel, rompant ainsi le fameux modèle de compagnonnage. La littérature souligne souvent ce défi, car l'apprentissage collaboratif est un aspect crucial de la formation médicale (Amber, Benkhaled, Pincemail, Verebi, & Claude, 2021). En effet, plusieurs études mettent en évidence la nécessité de la présence d'instructeurs dans l'apprentissage des compétences médicales. Par exemple, Porte et al. (2007) démontrent que les feedbacks verbaux d'un instructeur sont plus efficaces que l'auto-évaluation pour l'apprentissage de nouvelles compétences chirurgicales, permettant aux apprenants d'accélérer leur courbe d'apprentissage et d'améliorer leur maîtrise des compétences (Porte, Xeroulis, Reznick, & Dubrowski, 2007). De même, Cecilio-Fernandes et al. (2020) ont exploré les effets des feedbacks d'un instructeur sur l'apprentissage de compétences médicales complexes montrant que des feedbacks détaillés et spécifiques améliorent les résultats des apprenants tout en réduisant leur charge mentale (Cecilio-Fernandes, Cnossen, Coster, Jaarsma, & Tio, 2020). Borst et al. (2018) ont évalué l'impact des enseignants dans les environnements éducatifs en réalité virtuelle. Ils ont comparé les visites guidées en direct par des enseignants à celles préenregistrées. Leur étude révèle que les élèves apprennent mieux avec une guidance en direct par l'enseignant, soulignant l'importance de l'interaction humaine et de la possibilité d'interagir directement avec l'enseignant pour poser des questions et obtenir des clarifications en temps réel (Borst, Lipari, & Woodworth, 2018). Barrington et al. (2012) ont examiné la compétence des apprenants dans le geste de l'anesthésie locorégionale échoguidée concluant que les apprenants avaient un besoin de pratique considérable sous la supervision d'instructeurs pour atteindre un niveau de compétence acceptable. Ils soulignent l'importance des conseils et de la présence des instructeurs pour maîtriser des compétences techniques complexes (Barrington, Wong, Slater, Ivanusic, & Ovens, 2012). Ojala et al. (2022) ont confirmé cette idée dans leur étude qui explore l'impact de la présence d'un

enseignant sur l'apprentissage de tâches chirurgicales de base à l'aide de casques de réalité virtuelle. Les résultats indiquent que les apprenants qui recevaient des feedbacks directs de la part d'un enseignant montraient une amélioration significative par rapport à ceux qui utilisaient la réalité virtuelle sans supervision (Ojala, Sirola, Nykopp, Kröger, & Nuutinen, 2022). Enfin, Danion et al. (2020) ont conclu que l'utilisation de technologies immersives et interactives, combinée à l'intervention et aux conseils des instructeurs enrichit considérablement le processus de formation en chirurgie, démontrant que la technologie seule ne suffit pas (Danion, Breque, Oriot, Faure, & Richer, 2020).

En somme, ces études convergent vers la conclusion que l'intervention d'instructeurs est indispensable dans l'apprentissage des compétences complexes notamment au sein d'environnements virtuels. Pour mieux bénéficier des apports de la réalité virtuelle dans ce contexte, il est nécessaire de développer davantage les aspects collaboratifs et interactifs qui sont fondamentaux dans le compagnonnage (Chellali, et al., 2015; Chellali, et al., 2016). L'intégration de ces aspects au sein des environnements virtuels permettrait aux apprenants non seulement de bénéficier d'une formation technique, mais aussi de recevoir un soutien essentiel à leur apprentissage dès les premières phases de la formation (Chellali, Dumas, & Milleville-Pennel, 2012; Mentis, Chellali, & Schwaitzberg, 2014).

2.4.3.3 Synthèse

Cette dernière partie du chapitre a exploré l'évolution du modèle traditionnel de compagnonnage vers l'utilisation des techniques de simulations telles que la réalité virtuelle. Le modèle de compagnonnage, bien qu'efficace, présente des limitations significatives, notamment en termes de sécurité pour les patients. Dans ce contexte, les techniques de simulation ont émergé comme solution innovante et efficace notamment dans l'acquisition des compétences techniques complexes en médecine. La réalité virtuelle offre des environnements d'apprentissage sécurisés, interactifs et immersifs, permettant aux apprenants de développer et perfectionner leurs compétences de manière efficace et durable. Néanmoins, actuellement, les simulateurs de réalité virtuelle permettent

majoritairement un apprentissage individuel rompant le modèle de compagnonnage traditionnel. En conséquence, les apprenants se retrouvent isolés et perdent l'accès aux conseils et au soutien de l'instructeur qui sont indispensables notamment dans les premières étapes de la formation. Ainsi, bien que la réalité virtuelle immersive présente des avantages, son évolution vers des environnements plus collaboratifs pourrait transformer la formation médicale en procurant aux apprenants une expérience plus authentique et plus fidèle à la réalité clinique.

Conclusion du chapitre

Ce chapitre a été consacré à la définition de notre domaine d'étude : l'apprentissage en médecine. Nous avons commencé par définir le modèle d'apprentissage par compagnonnage. Ensuite, nous avons expliqué comment un instructeur transmet son savoir à un apprenant, en détaillant des concepts tels que le référentiel commun, le grounding, les interactions par instructions et feedback ainsi que l'utilisation de diverses modalités de communication. Enfin, nous avons discuté de l'évolution du modèle traditionnel d'apprentissage vers l'utilisation de la simulation.

Cette vue d'ensemble nous a permis de mettre en évidence l'évolution de l'apprentissage en médecine et les défis qui y sont associés.

L'utilisation de la réalité virtuelle immersive comme moyen d'apprentissage a montré ses avantages. Néanmoins, pour un apprentissage optimal, il est indispensable de faire évoluer cette technologie vers une approche collaborative permettant de supporter les interactions entre apprenant et instructeur.

Ainsi, dans le chapitre suivant, nous aborderons les technologies virtuelles permettant un travail collaboratif.

3 CHAPITRE 2 : ENVIRONNEMENT VIRTUEL DE COLLABORATION (EVC) ET APPRENTISSAGE

Après avoir défini le contexte de notre travail de thèse axé sur l'apprentissage en médecine, nous nous intéresserons dans ce chapitre, aux technologies virtuelles connues sous le nom d'environnements virtuels collaboratifs. Nous donnerons une définition de ces environnements, et détaillerons leurs avantages et inconvénients dans le cadre de l'apprentissage.

3.1 ENVIRONNEMENT VIRTUEL COLLABORATIF (EVC)

3.1.1 Définition

Les Environnements Virtuels Collaboratifs (EVCs) sont des espaces immersifs partagés où plusieurs utilisateurs peuvent interagir et travailler ensemble. Ils sont capables de prendre en charge des activités synchrones ou asynchrones (Churchill & Snowdon, 1998). Les activités synchrones se déroulent en temps réel, où les participants interagissent simultanément, comme dans les réunions virtuelles, les conférences vidéo ou les discussions en direct (Marjanovic, 1999). Ces interactions synchrones favorisent une communication immédiate qui permet aux utilisateurs de discuter, de partager des idées et de prendre des décisions ensemble de manière efficace. D'un autre côté, les activités asynchrones permettent aux utilisateurs de contribuer à leur propre rythme, sans être présents en même temps. Dewiyanti et al. (2007) expliquent que les interactions asynchrones sont particulièrement avantageuses pour les utilisateurs situés dans différents fuseaux horaires ou ayant des horaires différents. Dans ce mode, les utilisateurs peuvent participer via des forums de discussion, des commentaires différés sur des documents partagés, etc. (Dewiyanti, Brand-Gruwel, Jochems, & Broers, 2007). Huang (2018) ajoute qu'une combinaison de ces deux modes de collaboration permettrait non seulement une gestion flexible du temps, mais aussi une amélioration significative de la compétence communicative et de la collaboration entre les utilisateurs (Huang X. , 2018). Ces études montrent que les EVCs offrent un cadre flexible pour la collaboration,

enrichissant ainsi l'expérience d'apprentissage et le travail collaboratif à distance.

Hindmarsh et al. (1998) indiquent également que les EVCs facilitent les interactions immersives avec des objets et des artefacts virtuels permettant ainsi aux utilisateurs d'explorer, de manipuler et d'expérimenter avec des simulations et des représentations numériques d'équipements et d'autres éléments techniques (Hindmarsh, Fraser, Heath, Benford, & Greenhalgh, 1998). Ainsi, dans un contexte d'apprentissage, les apprenants peuvent interagir avec des outils virtuels pour pratiquer des procédures techniques sans risques de sécurité. Cette approche permet aux étudiants de pouvoir acquérir des compétences pratiques. En effet, l'étude de Glaser et Schmidt (2020) explique que les EVCs permettent le transfert des connaissances et des compétences vers des contextes réels (Glaser & Schmidt, 2020). Leur étude souligne que les EVCs permettent aux utilisateurs d'acquérir des compétences techniques à travers des simulations interactives et favorisent également le transfert des compétences acquises dans des contextes virtuels vers des situations réelles. Liebrecht (2005) souligne que les EVCs dans l'éducation permettent de créer des scénarios immersifs où les étudiants collaborent sur des projets complexes, partagent des idées et bénéficient d'un apprentissage actif. De plus, ces environnements permettent aux enseignants de concevoir des espaces d'apprentissage personnalisés et adaptatifs, en fonction des besoins des étudiants (Liebrecht, 2005).

En conclusion, les EVCs offrent un cadre flexible et enrichissant pour l'apprentissage et la collaboration en temps réel, en présentiel ou à distance. Ils favorisent le travail collaboratif et enrichissent l'expérience d'apprentissage en offrant aux apprenants la possibilité d'utiliser des outils virtuels pour pratiquer des compétences techniques en toute sécurité. Ces environnements virtuels facilitent ainsi l'apprentissage et le transfert des connaissances et compétences acquises vers le réel en offrant des opportunités d'apprentissage pratique et adaptable aux différents contextes professionnels et éducatifs.

3.1.2 La collaboration au sein des Environnements Virtuels Collaboratifs

La collaboration est un élément essentiel dans les environnements virtuels collaboratifs, en particulier pour l'apprentissage comme le soulignent Jackson et Fagan (2000) (Jackson & Fagan, 2000). Pour l'optimiser, surtout lorsque les utilisateurs souhaitent travailler ensemble en temps réel malgré la distance qui les sépare, des notions clés telles que le référentiel commun, la communication, la présence, la co-présence, la présence sociale, la charge mentale ou encore le recours à des avatar y jouent un rôle important.

3.1.2.1 *Construction du référentiel commun*

La notion de **référentiel commun**, discutée dans le chapitre précédent, est essentielle pour une collaboration réussie. En effet, elle permet de réduire les malentendus et améliore la collaboration entre les participants en s'assurant que tous ont la même compréhension des objectifs, des tâches et du contexte (Convertino, Mentis, Slavkovic, Rosson, & Carroll, 2011). Liu et Kaplan (2018) soulignent l'importance d'utiliser des outils de communication efficaces et des interfaces immersives pour établir une base commune dans les EVCs. Ces outils facilitent une interaction fluide et continue, aidant au partage d'informations et à la clarification des ambiguïtés. Les interfaces telles que celles utilisées en réalité virtuelle, permettent de visualiser et de manipuler des objets de manière interactive, renforçant ainsi la compréhension partagée (Liu & Kaplan, 2018).

3.1.2.2 *La communication*

Une communication efficace est fondamentale dans les environnements virtuels collaboratifs pour assurer une collaboration harmonieuse et une compréhension partagée entre les participants. Sallnäs (2005) souligne que les modes de communication utilisés influencent significativement la qualité des interactions entre les participants. Une communication claire favorise une meilleure intégration des participants dans l'environnement virtuel, ce qui améliore leur performance collaborative (Sallnäs, 2005). Nguyen et Duval (2014) ajoutent que des systèmes de communication bien

conçus augmentent la transparence des actions des utilisateurs et renforcent leur coordination, permettant à chacun de rester informé des activités des autres (Nguyen & Duval, 2014). Cette notion de communication sera explorée en détail dans la partie suivante.

3.1.2.3 *Le sentiment de présence, co-présence et présence sociale*

La présence, la co-présence et la présence sociale sont des concepts interconnectés qui jouent un rôle crucial dans les environnements virtuels collaboratifs. **La présence** se définit comme « un état psychologique dans lequel un utilisateur a le sentiment d'être dans un environnement virtuel plutôt que dans le monde réel » (Slater, Sadagic, Usoh, & Schroeder, 2000). Cette notion est fondamentale pour l'engagement des participants et leur interaction avec l'environnement. La présence affecte les performances des groupes dans des environnements virtuels, suggérant que plus la présence est élevée, plus les participants se sentent connectés à l'environnement et aux autres membres du groupe. Une présence accrue permet une meilleure immersion et une interaction plus naturelle, ce qui peut améliorer la qualité de la collaboration et la satisfaction des utilisateurs (Casanueva & Blake, 2000). Steed et Schroeder (2015) ajoutent que la présence est renforcée par des éléments tels que la qualité des graphismes, le réalisme des interactions et la fluidité des mouvements dans l'environnement virtuel (Steed & Schroeder, 2015). **La co-présence** se définit comme « l'expérience partagée de la présence dans un environnement virtuel, où les utilisateurs peuvent interagir et collaborer simultanément » (Bulu, 2012). Elle permet une interaction fluide et coordonnée, essentielle pour une collaboration réussie (Casanueva, 2001). Dans une première étude Wang et Wang (2008) ont montré que l'expérience de la co-présence dans des systèmes de conception collaborative en réalité mixte permet aux participants de ressentir une présence simultanée ici et ailleurs, enrichissant ainsi leur collaboration (Wang & Wang, 2008). Ils ajoutent en 2011 que la co-présence dans les environnements de réalité mixte favorise une meilleure synchronisation et coordination des équipes (Wang & Wang, 2011). Enfin, **la présence sociale** se définit comme « le sentiment de proximité et de connexion qui émerge des interactions sociales dans un environnement virtuel » (Oh, Bailenson, & Welch, 2018). Une forte présence sociale peut favoriser une meilleure collaboration entre les

participants. En effet, l'étude de Hauber et al. (2012) montre que les participants qui interagissent dans un cadre collaboratif engageant, avec des éléments visuels dynamiques, ressentent une présence sociale accrue, ce qui favorise des échanges plus fluides et authentiques (Hauber, Regenbrecht, Cockburn, & Billinghurst, 2012).

Afin de mesurer ces notions, des outils ont été développés tel que le questionnaire de Nowak et Biocca (2003) qui permet de mesurer la présence, la co-présence et la présence sociale dans les environnements virtuels qui souligne l'importance de ses dimensions pour la qualité de l'expérience utilisateur (Nowak & Biocca, 2003). Les études de Bulu (2012) et Slater et al. (2000) mettent en avant le lien étroit qui existe entre ces trois notions. Bulu (2012) expliquent qu'une présence élevée favorise la co-présence. Lorsque les participants ressentent un plus grand degré de présence, ils développent une conscience accrue des autres utilisateurs présents dans l'espace virtuel (Bulu, 2012). Il ajoute également que lorsque la co-présence est élevée, elle favorise un environnement où la présence sociale est également renforcée. Slater et al. (2000) confirment en indiquant que la co-présence joue un rôle essentiel dans l'établissement de la présence sociale (Slater, Sadagic, Usoh, & Schroeder, 2000).

En conclusion, la présence, la co-présence et la présence sociale sont liées et contribuent dans l'expérience collaborative dans les environnements virtuels. Leur interconnexion est essentielle pour créer des interactions efficaces, favorisant ainsi un cadre essentiel à la collaboration. Comprendre et mesurer ces dimensions peut améliorer les expériences des utilisateurs dans un contexte d'interaction virtuelle.

3.1.2.4 Charge cognitive

La charge mentale se définit comme le volume de ressources cognitives nécessaire pour accomplir une tâche (Paas, Tuovinen, Tabbers, & Van Gerven, 2016). La charge mentale joue un rôle crucial dans la collaboration entre participants, en particulier dans des environnements virtuels. Khojasteh et Won (2021) indiquent que des niveaux élevés de charge mentale peuvent entraver l'engagement et la communication entre les participants, rendant la collaboration plus difficile dans les environnements virtuels collaboratifs (Khojasteh &

Won, 2021). Pour éviter cette situation, les études de Funke et Galster (2009) et de Nguyen et Bednarz (2020) mettent en avant l'importance d'une conception réfléchie des environnements collaboratifs afin de gérer efficacement la charge mentale. En effet, Funke et Galster expliquent que les technologies de collaboration influencent le traitement cognitif des participants. Ils expliquent que la conception de ces technologies doit minimiser les exigences cognitives liées à la communication et à la collaboration permettant aussi d'améliorer les performances individuelles et de favoriser une dynamique de groupe, ce qui aide les membres à agir plus efficacement et à s'engager davantage dans leurs tâches (Funke & Galster, 2009). L'étude de Verhulst (2018) abonde dans ce sens, en montrant comment la gestion de la charge mentale dans les environnements virtuels influence non seulement l'interaction entre utilisateurs, mais aussi leur performance globale dans ces environnements (Verhulst, 2018). Cette idée est renforcée par l'étude de De Back et al. (2023) indiquant que ces environnements influencent la charge mentale et, par conséquent, l'apprentissage des participants (De Back, Tinga, & Louwerse, 2023). Effectivement, selon Pouliquen-Lardy et al. (2016), la distribution asymétrique des tâches lors de situations de collaboration virtuelle peut engendrer des variations significatives dans la charge cognitive des membres d'une équipe, ce qui affecte leur performance et leur capacité à collaborer efficacement (Pouliquen-Lardy, Milleville-Pennel, Guillaume, & Mars, 2016). Grandi et al. (2019) ajoutent également que des interactions collaboratives asymétriques influencent la charge de travail en créant des déséquilibres dans la répartition des responsabilités entre les participants (Grandi, Debarba, & Maciel, 2019). Enfin, l'étude de Nguyen et Bednarz (2020) fournit un aperçu des expériences utilisateurs dans des contextes de réalité virtuelle, soulignant l'importance d'une gestion adéquate de la charge cognitive pour améliorer l'expérience utilisateur (Nguyen & Bednarz, 2020).

Les exigences cognitives dans les environnements virtuels collaboratifs sont souvent mesurées à l'aide de l'indice de charge de travail NASA-TLX, développé par Hart & Staveland (1988), qui évalue plusieurs dimensions comme l'effort mental, la frustration ou encore la demande temporelle (Hart & Staveland, 1988). Ce questionnaire est le plus utilisé pour mesurer la charge mentale (de Winter, 2014).

En résumé, lors de la conception d'environnement collaboratif, il est important d'assurer une gestion appropriée de la charge mentale pour optimiser les interactions collaboratives, garantissant ainsi une meilleure performance et une communication fluide entre les participants.

3.1.2.5 *Avatars virtuels*

Un avatar est défini comme la représentation visuelle d'un utilisateur dans un environnement virtuel (Benford, et al., 1995). L'utilisation d'avatars dans les environnements virtuels offre un potentiel pour améliorer la collaboration, notamment en apportant une représentation visuelle des participants. Cette représentation, bien qu'intangible, favorise un sentiment de présence et renforce la communication. En effet, l'étude de Garau (2003) met en évidence que la fidélité comportementale, c'est-à-dire le réalisme dans les interactions et réaction des avatars, est un facteur déterminant dans la qualité des échanges dans les environnements virtuels. Les résultats suggèrent que des avatars dotés de comportements cohérents, permettent de renforcer la compréhension mutuelle et l'engagement entre les participants. En revanche, une incohérence dans le comportement des avatars peut nuire à l'expérience collaborative (Garau, 2003). Ces résultats sont confirmés par l'étude de Mathis et al. (2021) et Gamelin et al. (2021) ont mis en avant l'importance de la fidélité des interactions des avatars, c'est-à-dire le degré de réalisme dans leurs comportements. Plus les avatars sont fidèles aux mouvements des utilisateurs réels, mieux les interactions peuvent être interprétées par les autres, permettant une meilleure collaboration (Gamelin, et al., 2021; Mathis, Vaniea, & Khamis, 2021). De même, l'étude de Wu et al. (2021) montrent qu'un avatar doté d'expressions faciaux ou corporels réalistes, améliore la performance des utilisateurs dans les tâches collaboratives et renforce le sentiment de présence (Wu, Wang, Jung, Hoermann, & Lindeman, 2021). Kyrilitsias et Michael-Grigoriou (2022) indiquent également que le réalisme comportemental des avatars favorise une interaction sociale authentique dans des environnements immersifs en renforçant le sentiment de présence sociale et en améliorant la qualité des interactions (Kyrilitsias & Michael-Grigoriou, 2022). L'étude de Katsumata et al. (2023) se penche sur l'utilisation d'avatars de mains

pour des tâches d'imitation de mouvements. Ces avatars facilitent la collaboration en permettant aux participants de voir et d'imiter les mouvements en temps réel, améliorant ainsi leur perception de la coopération. Toutefois, des limites ont été identifiées, notamment dans un décalage entre la perception subjective de la collaboration et la performance réelle (Katsumata, et al., 2023). Cela souligne les défis techniques liés à la fidélité des interactions des avatars et à la précision des mouvements reproduits. Ainsi, les avatars apportent des avantages significatifs pour la collaboration, néanmoins, des défis principalement liés à la fidélité des représentations et des interactions gestuelles restent encore à être surmontés.

3.1.2.6 Conclusion

En résumé, la réussite de la collaboration dans les EVCs repose sur différents concepts comme l'établissement du référentiel commun, à travers la communication, les sentiments de présence, de co-présence, et de présence sociale, la gestion efficace de la charge cognitive ou encore la représentation fidèle des interactions entre les utilisateurs à travers des avatars. En intégrant ces éléments de manière cohérente, les EVCs peuvent offrir une plateforme puissante pour soutenir une collaboration efficace et enrichissante, même dans des contextes où les participants sont géographiquement dispersés.

3.1.3 Exemples d'Environnements Virtuels Collaboratifs pour l'apprentissage humain

Les environnements virtuels collaboratifs permettent à plusieurs utilisateurs de collaborer de manière interactive. Bien que ces systèmes soient utilisés dans divers secteurs, nous nous concentrerons ici sur les EVCs dédiés à l'apprentissage humain. Ces environnements offrent aux apprenants des opportunités uniques pour apprendre de nouvelles compétences de manière collaborative.

3.1.3.1 Plateformes dédiés à l'apprentissage humain

- ImmerTai (He, et al., 2017) (**Figure 7**) : Immersive and collaborative Taichi learning system "ImmerTai" est un système immersif et collaboratif dédié à l'apprentissage du Tai Chi, permettant aux participants de pratiquer ensemble malgré la

distance géographique. La plateforme recrée une expérience de cours de Tai Chi en groupe. Les utilisateurs, représentés par des avatars 3D animés, peuvent observer et copier les mouvements en temps réel, facilitant ainsi l'apprentissage par observation. Les apprenants suivent l'avatar de l'instructeur, dont les mouvements sont animés, ce qui leur permet de corriger et d'affiner leur propre technique en fonction des démonstrations observées. Pour enrichir l'expérience d'apprentissage, ImmerTai intègre des outils de communication qui permettent aux participants d'échanger pendant la session pratique. La plateforme comprend également des outils d'analyse de mouvements, offrant un retour aux apprenants sur la précision de leurs techniques et les aidant à améliorer leur pratique du Tai Chi.

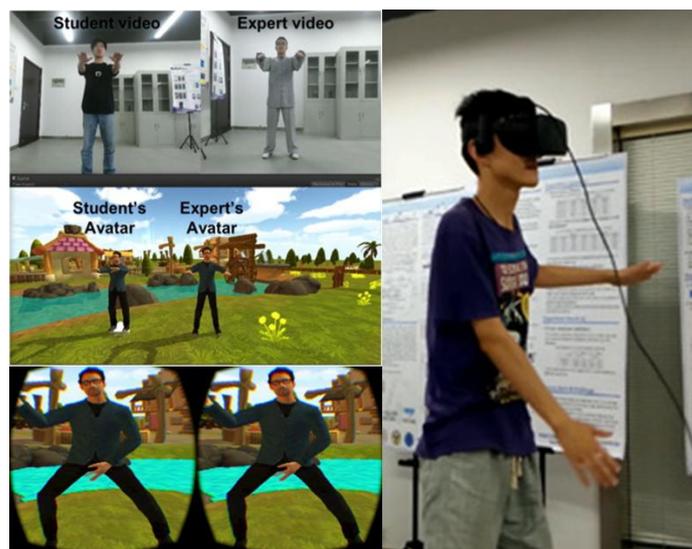


Figure 7 : ImmerTai, un apprenant avec un casque de réalité virtuelle suit les mouvements de Tai Chi de l'instructeur (He, et al., 2017)

- VR Classroom (Oiwake, Komiya, Akasaki, & Nakajima, 2018) (**Figure 8**) : VR Classroom est un environnement virtuel multi-utilisateur conçu pour reproduire l'expérience d'une salle de classe physique dans un environnement virtuel. Son objectif est de favoriser un apprentissage interactif et engageant en offrant un cadre immersif. Les utilisateurs de VR Classroom sont

représentés par des avatars 3D, qui permettent des interactions visuelles et verbales en temps réel. Ces avatars peuvent interagir avec des objets virtuels et participer à des discussions en direct rendant ainsi les échanges entre l'enseignant et les apprenants plus dynamiques et immersifs.



Figure 8 : Vue de la VR Classroom (Oiwake, Komiya, Akasaki, & Nakajima, 2018).

- VirBELA (Howland, 2021) (**Figure 9**) : Virtual business environment for learning and assessment (VirBELA) a été initié par Alex Howland en 2012 et appartient aujourd'hui à eXp World Holdings, Inc. Cette plateforme permet de fournir des environnements virtuels pour l'éducation, la collaboration et les événements professionnels. Dans un contexte éducatif VirBELA recrée des salles de classes dans un environnement virtuel, où les enseignants peuvent dispenser des cours de manière interactive, partager des documents, des présentations, et utiliser des outils interactifs tels que des pointeurs laser pour enrichir l'enseignement. Des salles de travail sont également mises à disposition pour des projets de groupe, des discussions et des ateliers permettant une collaboration en temps réel. Accessible de n'importe où dans le monde et à tout moment, VirBELA rend possible une expérience éducative flexible et engageante, adaptée aux besoins modernes de l'apprentissage à distance. Virbela a été utilisé comme plateforme

expérimentale dans plusieurs études sur les EVC. Des études, comme celles de Moreira et al. (2022) et Garcia (2024), montrent que cette plateforme améliore significativement l'engagement et l'interaction sociale, permettant aux participants de se sentir plus connectés et d'interagir de manière plus dynamique, tout en offrant une plus grande accessibilité et des outils favorisant des interactions enrichissantes (Garcia, 2024; Moreira, et al., 2022).



Figure 9 : Exemple de salle de cours interactif VirBELA [<https://www.virbela.com/solutions/remote-learning>].

3.1.3.2 Plateformes pour l'apprentissage en médecine

- VR4Health (Fairén, Moyés, & Insa, 2020) (**Figure 10**) : VR4Health est une plateforme visant à améliorer la compréhension des structures anatomiques en permettant aux utilisateurs d'explorer des modèles détaillés de manière interactive. Cette plateforme permet aux instructeurs d'interagir avec les apprenants. Ils peuvent faire des démonstrations précises des structures anatomiques, expliquer leurs fonctions et fournir des commentaires, tout en engageant une discussion avec les apprenants. Ces derniers peuvent également interagir avec les modèles anatomiques en les manipulant. Cette interaction directe permet aux apprenants d'avoir une compréhension approfondie des structures et leurs relations tout en recevant des retours et des conseils de la part des instructeurs.

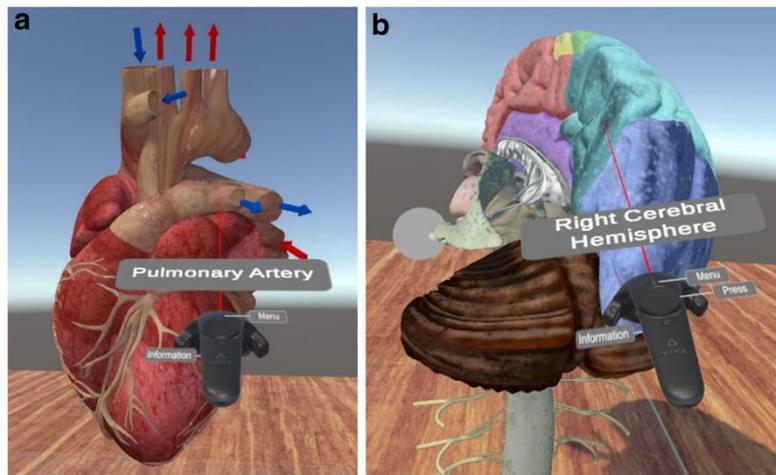


Figure 10 : Représentation virtuelle des structures anatomiques (a : cœur virtuelle, b : cerveau virtuelle) (Fairén, Moyés, & Insa, 2020).

- SimCEC (Paiva, Machado, Valença, Batista, & Moraes, 2018) (**Figure 11**) : SimCEC est un environnement immersif et collaboratif destiné à l'éducation et à la formation en travail d'équipe chirurgicale. L'environnement permet de pratiquer des procédures chirurgicales complexes dans un cadre sûr et contrôlé, favorisant le développement des compétences techniques et non techniques de base. Les utilisateurs peuvent interagir entre eux ainsi qu'avec des objets virtuels. Ils sont représentés par des avatars 3D animés et personnalisables en fonction de leur rôle (chirurgien, anesthésiste, infirmier). L'animation des avatars permet une communication et une interaction en temps réel avec l'environnement. De plus, certaines interactions incluent des retours haptiques, augmentant le réalisme de la simulation en fournissant un retour haptique lors de la manipulation des instruments et des tissus virtuels.



Figure 11 : Représentation de l'équipe médicale dans l'environnement virtuel : l'anesthésiste au fond à gauche, le chirurgien à droite et l'infirmier de dos (Paiva, Machado, Valença, Batista, & Moraes, 2018).

3.1.4 Problématiques liées aux Environnements Virtuels Collaboratifs

Les exemples précédents illustrent l'application des EVCs dans le domaine de l'apprentissage humain. Néanmoins, leur usage soulève encore des défis en matière de collaboration et de communication (Aguerreche, Duval, & Arnaldi, 2009; Schäfer, Reis, & Stricker, 2022; Ghamandi, et al., 2024). En effet, bien que les EVCs offrent un cadre riche pour la collaboration, ils ne sont pas exempts de problèmes. La revue de littérature de Derouech (Derouech, Hrimech, Lachgar, & Hanine, 2024) met en lumière plusieurs obstacles liés à l'expérience utilisateur et aux interactions sociales dans ces environnements virtuels. Surmonter ces défis, qu'il s'agisse de la gestion des dynamiques de groupe, de communication ou encore des limitations technologiques est nécessaire pour optimiser l'efficacité des EVCs.

3.1.4.1 Problèmes de communication

Les environnements virtuels de collaboration présentent des défis uniques en matière de communication, influençant significativement les interactions entre les utilisateurs. Contrairement aux interactions en

face-à-face, où les participants bénéficient d'un riche choix de signaux sensoriels, les EVCs limitent souvent ces éléments essentiels. Par exemple, la réduction de signaux non-verbaux rend difficile la transmission et la réception des gestes, expressions faciales, et des intentions des utilisateurs (Tanenbaum, El-Nasr, & Nixon, 2014). Malgré leurs avantages, les avatars dans les environnements de réalité virtuelle peuvent ne pas retransmettre fidèlement les émotions ou les intentions des utilisateurs, conduisant à des malentendus ou des conflits (Gamelin, et al., 2021). Eaves & Leathers (2017) soulignent que cette absence de communication non-verbale peut entraver la capacité des participants à établir et maintenir un référentiel commun, ce qui est crucial pour une collaboration efficace (Eaves & Leathers, 2017). En parallèle, des problématiques liées aux échanges verbaux compliquent également la communication dans ces environnements. En effet, Merz et al. (2024) mettent en évidence que des asymétries dans les échanges verbaux peuvent nuire à l'expérience utilisateur, introduisant une complexité supplémentaire dans les interactions entre les participants (Merz, Wienrich, & Latoschik, 2024). Ainsi, l'absence d'indices non-verbaux, combinés aux défis de communication verbale, peut conduire à des malentendus et rendre la communication moins fluide, compliquant encore davantage les interactions dans ces environnements virtuels (Dzardanova, et al., 2024). Ce manque de transmission de signaux, tant verbaux que non-verbaux, pose un problème particulier dans le contexte de l'apprentissage médical, où la compréhension des nuances et des intentions derrière les instructions et les feedbacks de l'instructeur est cruciale pour l'apprenant. Les utilisateurs doivent ainsi développer des stratégies spécifiques pour compenser ces limitations, telles que l'amélioration des outils de communication pour faciliter une meilleure compréhension mutuelle et améliorer la collaboration dans les environnements virtuels multi-utilisateurs (Forens, Bonnardel, & Barbier, 2015).

3.1.4.2 La coordination des actions

En plus des défis de communication, la coordination dans les EVCs pose également des problèmes importants. Douroudian (2023) souligne que ces environnements sont confrontés à des défis de coordination importants principalement dus aux limitations

techniques des technologies utilisées. Ces limitations perturbent la communication en temps réel entre les utilisateurs, rendant la synchronisation des tâches et l'alignement des efforts particulièrement difficiles (Doroudian & Wartell, 2023). Cette complexité dans la coordination peut avoir des répercussions significatives sur l'efficacité du travail collaboratif. En effet, l'étude de Hoppe et al. (2018) indiquent que les utilisateurs distants rencontrent des difficultés accrues pour comprendre les actions et les intentions des autres comparés aux utilisateurs locaux (Hoppe, Reeb, van de Camp, & Stiefelhagen, 2018). L'étude de Chénéchal et al. (2019) confirme que le manque de visibilité et la communication entravée compliquent davantage la coordination des tâches pour les utilisateurs éloignés (Le Chénéchal, Duval, Gouranton, Royan, & Arnaldi, 2019). Ces obstacles peuvent exacerber les problèmes de coordination et de partage de l'information, augmentant ainsi la complexité de la collaboration virtuelle (Hoppe, Reeb, van de Camp, & Stiefelhagen, 2018). Rugelj (2018) rapporte que les EVCs peuvent offrir des opportunités uniques pour la collaboration dans un contexte d'apprentissage mais qu'ils sont aussi confrontés à des défis spécifiques en matière de communication et de coordination. Ces défis incluent des difficultés dans la gestion des ressources, la synchronisation des activités, et l'alignement des objectifs entre les participants (Rugelj, 2018). Dans le cadre de l'enseignement des compétences en médecine, ces problèmes de coordination sont particulièrement préoccupants. Une mauvaise synchronisation entre l'instructeur et l'apprenant peut nuire à la transmission de la compétence et nuire à l'apprentissage pratique. Par exemple, lorsqu'un apprenant tente de réaliser des gestes techniques sans une coordination adéquate avec un instructeur, il risque de développer de mauvaises habitudes ou de commettre des erreurs critiques qui pourraient compromettre la sécurité des patients. En conclusion, pour garantir une formation efficace et sécuritaire, il est impératif de résoudre ces défis de coordination afin d'améliorer les résultats d'apprentissage dans les environnements collaboratifs.

3.1.4.3 La vision partagée

Dans les environnements virtuels collaboratifs, le manque de visibilité sur les actions et l'état des autres participants constitue un défi, entraînant des erreurs et une mauvaise synchronisation des efforts

(Convertino, Mentis, Slavkovic, Rosson, & Carroll, 2011). Selon Nguyen et Duval (2014) et Jing et al. (2022), l'absence d'indices sensoriels comme des indices visuels ou verbaux clairs rend difficile le maintien d'une vision partagée des objectifs et des actions entre les participants (Nguyen & Duval, 2014; Jing, May, Matthews, Lee, & Billingham, 2022). Cela est particulièrement problématique dans des contextes d'apprentissage, comme l'enseignement médical, où la difficulté à interpréter les instructions et feedbacks visuels ou verbaux d'un instructeur peut compromettre l'acquisition des compétences pour l'apprenant. Pour adresser ces défis, plusieurs études proposent des solutions. Kütt et al. (2019) montrent que le partage du regard peut offrir des repères visuels cruciaux qui facilitent la collaboration (Kütt, Lee, Hardacre, & Papoutsaki, 2019). D'Angelo et Schneider (2021) soulignent que la visualisation de regard partagé renforce les interactions en fournissant une représentation visuelle des attentions des participants (D'angelo & Schneider, 2021). Sung et al. (2021) mettent en évidence que le partage en temps réel du regard favorise l'engagement des participants et permet aux instructeurs de suivre plus efficacement les progrès des apprenants (Sung, Feng, & Schneider, 2021). En outre, Kütt et al. (2020) ajoutent que la modalité de communication utilisée peut influencer significativement la dynamique de l'interaction dans les collaborations à distance, soulignant ainsi l'importance d'adapter les moyens de communication pour maximiser l'efficacité (Kütt, et al., 2020). En conclusion, bien que des solutions commencent à émerger, des problématiques restent encore présentes. En effet, Liu, Zhao et Cheng (2024) soulignent que des défis techniques persistent dans les environnements virtuels. La synchronisation et l'interaction, qui sont essentielles pour maintenir une vision partagée, sont souvent compromises par divers facteurs techniques et humains (Liu, Zhao, & Cheng, 2024). Par conséquent, l'amélioration de la visibilité des interactions dans ces environnements est essentielle pour optimiser la collaboration entre les participants.

3.1.4.4 Communication haptique

L'intégration des interactions haptiques dans les environnements virtuels collaboratifs soulève des problématiques tant sur le plan technologique que pédagogique. Dans le cadre de l'enseignement à distance, la difficulté à reproduire des sensations tactiles réalistes

soulève des questions sur l'utilisation de cette modalité dans l'apprentissage. Bien que des progrès aient été réalisés dans le développement de dispositifs haptiques, la technologie actuelle demeure limitée dans sa capacité à simuler efficacement ces sensations à distance. Adilkinov et al. (2022) soulignent que les systèmes haptiques exigent une intégration soignée de la conception et de la fonctionnalité pour offrir une interaction tactile réaliste (Adilkhanov, Rubagotti, & Kappassov, 2022). Les dispositifs actuels peinent à reproduire avec précision des sensations complexes à distance, ce qui limite leur pertinence dans le cadre de l'enseignement comme l'illustre l'étude de Zhu et al. (2020) sur les gants haptiques. Ils montrent que ce dispositif a du potentiel dans les environnements immersifs mais que leur capacité à simuler des interactions réalistes est encore limitée notamment dans le cadre de l'enseignement à distance (Zhu, et al., 2020). En effet, Crandall et Kardogan (2021) mettent en lumière la nécessité de développer des systèmes haptiques pédagogiques efficaces, capables de renforcer l'apprentissage par le toucher tout en restant adaptés aux contraintes de l'enseignement à distance (Crandall & Karadoğan, 2021). L'étude de Cosentino & Giannakos (2023) explique l'utilisation d'interactions tactiles en plus d'autres stimuli multisensoriels sont cruciaux pour renforcer la compréhension et l'engagement des apprenants et que leur absence peut limiter l'immersion ou l'efficacité des méthodes d'enseignement, nuisant par conséquent au processus d'apprentissage (Cosentino & Giannakos, 2023). En médecine, ces interactions tactiles sont pourtant cruciales pour l'apprentissage comme le montre l'étude Escobar-Castillejos et al. (2016) sur les simulateurs médicaux. Ils soulignent que dans la formation médicale, les apprenants doivent non seulement visualiser les procédures, mais aussi ressentir des textures, des résistances et des pressions spécifiques, comme lors de certaines procédures médicales (Escobar-Castillejos, Noguez, Neri, Magana, & Benes, 2016). Néanmoins, comme le montre Melo et al. (2020) dans leur revue des stimuli multisensoriels en réalité virtuelle, la reproduction réaliste de sensations haptiques reste insuffisante (Melo, et al., 2020). Cette limitation technologique peut remettre en question l'intégration des interactions haptiques dans des contextes d'apprentissage collaboratif à distance, car sans une expérience tactile convaincante, l'engagement des apprenants risque de diminuer,

compromettant ainsi l'efficacité des environnements virtuels collaboratif pour l'enseignement. Il est donc important d'explorer la conception et l'usage des technologies haptiques afin de mieux supporter la communication à travers cette modalité dans les EVCs.

3.1.4.5 Conclusion

Bien que les EVCs offrent des opportunités pour supporter les interactions entre un instructeur et un apprenant, ils posent des défis en termes de communication impactant la collaboration entre les utilisateurs. Pour remédier à ces problématiques, les concepteurs doivent améliorer les outils de communication en utilisant des stratégies comme le recours à la multimodalité. L'intégration de plusieurs modes de communication peut enrichir les interactions et réduire les ambiguïtés (Moll, 2013). En intégrant des fonctionnalités multimodales, les environnements virtuels peuvent mieux soutenir la coordination et la clarté des échanges entre les utilisateurs (Philippe, et al., 2020).

3.2 COMMUNICATION MULTIMODALE DANS LES ENVIRONNEMENTS VIRTUELS COLLABORATIFS

L'intégration de la multimodalité, combinant plusieurs modalités sensorielles, est essentielle pour améliorer l'expérience utilisateur, la compréhension mutuelle et l'efficacité des interactions collaboratives au sein des EVCs. En intégrant des retours sensoriels visuels, verbaux ou haptiques, ces environnements deviennent plus intuitifs, améliorant la coordination, la collaboration et la communication entre les participants (Duval T. , et al., 2014). Cette partie explore en profondeur l'utilisation des principales combinaisons de modalités et de leur impact.

3.2.1 La combinaison des modalités verbales et visuelles

Dans les EVCs, la communication verbale fournit des informations explicites et directes, telles que des instructions, des descriptions ou des échanges d'idées. Cependant, elle peut parfois manquer de nuance ou de contexte, particulièrement dans des situations complexes ou ambiguës. C'est dans ce cadre que les éléments visuels

sous forme d'images, avatars, objets 2D/3D, schéma, deviennent essentiels en ajoutant une dimension contextuelle au discours. La communication verbale dans les EVCs renforcée par des indices visuels offre des représentations concrètes pour des concepts abstraits. Par exemple, lors de réunions virtuelles, des graphiques, des images ou des modèles 3D peuvent être utilisés pour illustrer des données ou des idées. Goebbels, Lalioti et Göbel (2003) ont démontré que les visualisations (modèles 3D, schémas) en temps réel, sont particulièrement efficaces pour aider les équipes à partager une vue commune des projets complexes. Ces outils visuels permettent aux équipes de partager une vue commune des projets, réduisant les ambiguïtés et facilitant une meilleure coordination des tâches (Goebbels, Lalioti, & Göbel, 2003). Kim et al. (2020) confirment ces résultats en montrant que l'utilisation de repères visuels dans la collaboration à distance améliore la clarté des échanges verbaux en fournissant des références visuelles partagées, ce qui est essentiel pour une communication efficace (Kim, Lee, Billinghamurst, & Huang, 2020). De plus, l'intégration de repères visuels dans les discussions verbales contribue à ancrer les informations discutées dans un contexte visuel partagé (Chellali, Milleville-Pennel, & Dumas, 2013). Cela est particulièrement utile lorsque les participants doivent s'assurer qu'ils parlent des mêmes éléments présents dans leur espace virtuel partagé. Kim et al. (2019) ont constaté que la combinaison verbale-visuelle aidait les équipes à mieux comprendre les intentions des autres et à coordonner leurs efforts (Kim, et al., 2019). Yang et al. (2020) confirment en indiquant que l'ajout de repères visuels et auditifs améliore la perception de l'espace partagé et la coordination des actions, ce qui est essentiel pour une collaboration fluide et efficace dans les EVCs (Yang, et al., 2020). Ullah et al. (2009) ajoutent que l'utilisation d'aides visuelles en complément des explications verbales réduit les erreurs et augmente la rapidité d'exécution des tâches complexes. Cela s'explique par le fait que les éléments visuels fournissent des points de référence clairs et facilitent la rétention d'informations, ce qui est crucial pour une performance optimale dans les EVCs (Ullah, Richard, Otmane, Naud, & Mallem, 2009). Enfin la combinaison verbale-visuelle aide à améliorer le sentiment de présence et de co-présence dans les EVCs aidant à renforcer les interactions entre les utilisateurs et par conséquent leur collaboration

(Sallnäs, 2005; Kim & Park, 2024). En résumé, l'utilisation de cette combinaison au sein des EVCs enrichit les échanges et aide à établir une meilleure collaboration entre les participants.

3.2.2 La combinaison des modalités verbales et haptiques

L'intégration du feedback haptique avec la communication verbale enrichit les interactions en fournissant des informations sensorielles supplémentaires qui renforcent la communication verbale. Les retours haptiques complètent et clarifient les directives données verbalement. Par exemple, dans des simulations chirurgicales, les retours haptiques peuvent simuler la résistance des tissus, aidant ainsi les utilisateurs à comprendre et à suivre les instructions verbales de manières plus précise (Erfanian & Hu, 2020; Chellali, Dumas, & Milleville-Pennel, 2011). Cela permet une communication plus riche, surtout dans des tâches nécessitant une précision fine. De plus, la combinaison des modalités verbale et haptique améliore la collaboration en facilitant la coordination et la compréhension entre les participants. Les retours haptiques peuvent synchroniser les actions des utilisateurs en fournissant des signaux tactiles lorsque des objets sont manipulés ou déplacés, ce qui complète les instructions verbales (Wang, Chellali, & Cao, 2016) (**Figure 12**).

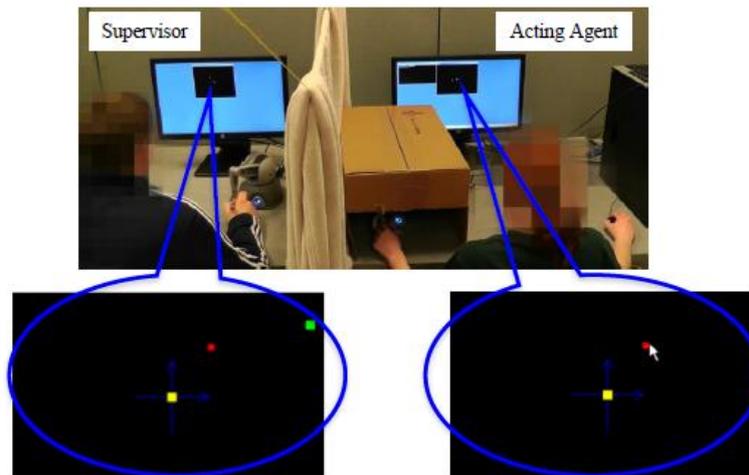


Figure 12 : Session de collaboration avec retour haptique lors d'un geste de manipulation d'objet. Le superviseur (à gauche) guide l'agent actif (à droite) à travers des instructions verbales et haptiques afin qu'il atteigne la cible que seul le superviseur peut voir sur son écran (Wang, Chellali, & Cao, 2016).

Les études montrent que les rétroactions haptiques dans les EVCs renforcent la coopération en rendant les interactions plus intuitives et en réduisant les erreurs dues à une mauvaise communication (Huang, Moll, Sallnäs, & Sundblad, 2012; Moll, Pysander, Eklundh, & Hellström, 2014). En termes de performance, la rétroaction haptique améliore l'exécution des tâches en fournissant des informations immédiates sur l'état des objets ou des actions en cours. Par exemple, lorsque les utilisateurs effectuent des tâches de co-manipulation dans des environnements virtuels, les retours haptiques peuvent les aider à ajuster leurs actions conjointes pour atteindre une précision plus grande (Basdogan, Ho, Srinivasan, & Slater, 2000). Cette précision accrue est particulièrement bénéfique dans les simulations où des manipulations délicates sont nécessaires. Les performances globales augmentent lorsque les utilisateurs reçoivent des retours haptiques qui complètent les instructions verbales, car cela réduit le besoin de vérification visuelles ou des corrections postérieures (Chellali, Dumas, & Milleville-Pennel, 2010). Enfin, la combinaison des modalités verbale et haptique contribue significativement à améliorer les sentiments de présence et de co-présence dans les environnements virtuels partagés.

En effet, l'ajout de rétroaction haptique permet aux utilisateurs de sentir des interactions physiques avec les objets virtuels, renforçant ainsi le sentiment d'immersion et de présence dans ces environnements (Bailenson & Yee, 2008). Les retours haptiques rendent les interactions entre les utilisateurs plus tangibles, ce qui améliore la co-présence en permettant aux participants de sentir les actions des autres de manière plus concrète (Groten, Feth, Klatzky, & Peer, 2012). Cela aide à créer un environnement où les utilisateurs peuvent mieux percevoir les gestes et les intentions des autres, améliorant ainsi la sensation de collaboration et d'interaction directe.

En conclusion, l'intégration d'indices haptiques en plus des indices verbaux permet une interaction plus précise, coordonnée et immersive, essentielles pour des tâches complexes et des environnements de travail collaboratif.

3.2.3 La combinaison des modalités visuelles et haptiques

Dans les tâches collaboratives, la combinaison des modalités haptique et visuelle est particulièrement bénéfique pour la coordination et la précision des actions. Les retours haptiques permettent aux utilisateurs de ressentir les objets comme s'ils étaient réels, ce qui est crucial lorsqu'ils manipulent des outils ensembles. Wang et al. (2013) et Ansar et al. (2001) indiquent que cette amélioration de la coordination des gestes est particulièrement utile dans des tâches collaboratives où la précision des mouvements est essentielle. En particulier, les retours haptiques enrichissent les informations visuelles en fournissant des indices tactiles sur les interactions avec les objets, améliorant la précision et la fluidité des manipulations (Wang, Chellali, & Cao, 2016; Ansar, et al., 2001). Les utilisateurs peuvent donc mieux synchroniser leurs actions lorsqu'ils reçoivent un retour haptique en complément des informations visuelles, ce qui rend la collaboration plus efficace. Les avantages de la combinaison haptique-visuelle sont particulièrement évidents dans les tâches nécessitant une manipulation précise. Hutchins et al. (2006) confirment ce constat en expliquant que les retours haptiques et visuels permettent aux apprenants de pratiquer des gestes complexes avec une précision accrue et renforcent la communication entre les utilisateurs en fournissant des indications immédiates (Hutchins, et al., 2006). Chellali et al. (2012) ajoutent que dans les environnements virtuels de formations pour des procédures spécifiques, la rétroaction haptique est importante pour acquérir des compétences pratiques en simulant les sensations tactiles réelles (Chellali, Dumas, & Milleville-Pennel, 2012). De plus, Triantafyllidis et al. (2020) soulignent que les interfaces multimodales, qui combinent les retours haptiques et visuels, améliorent les performances des utilisateurs en permettant un contrôle précis des tâches à distance (Triantafyllidis, Mcgreavy, Gu, & Li, 2020). Cette combinaison est particulièrement bénéfique, notamment dans les contextes de formations, comme suggèrent Chellali et al. (2012), où les environnements virtuels doivent simuler des conditions réelles de manière efficace pour améliorer les compétences des apprenants (Chellali, Dumas, & Milleville-Pennel, 2012).

3.2.4 La combinaison des modalités verbales, visuelles et haptiques

La combinaison verbale, visuelle et haptique améliore considérablement la communication dans les EVCs. Les signaux verbaux permettent d'échanger des instructions et des informations, tandis que les retours haptiques ajoutent une dimension physique, renforçant la compréhension des interactions et des manipulations de l'environnement virtuel. Les éléments visuels quant à eux, vont aider à clarifier et contextualiser les échanges verbaux et haptiques. Selon les recherches de Sallnäs (2002), la combinaison de la voix, du toucher et des éléments visuels améliore la qualité des interactions sociales dans les EVCs en fournissant des canaux de communication diversifiés et complémentaires (Sallnäs, 2002). Shih (2014) explique que les stratégies de communication multimodales permettent une meilleure coordination et une compréhension accrue des intentions dans les EVCs multimodaux (Shih, 2014). Les travaux de Kim et Park (2024) démontrent que l'utilisation de signaux multimodaux, tels que des indices visuels combinés avec des informations verbales et haptiques, améliore la manipulation collaborative dans les environnements virtuels. Cette approche offre aux utilisateurs une conscience partagée des actions et de celles des autres, cruciale dans des tâches collaboratives complexes (Kim & Park, 2024). Les études de Dodds (2009) et Nam, Shu, et Chung (2008) soulignent également que la combinaison des modalités verbales, visuelles, et haptiques dans les EVCs permet une meilleure synchronisation des efforts et une résolution plus efficace des tâches collaboratives. En effet, ces modalités permettent de coordonner les actions de manière à éviter les malentendus, garantissant ainsi une meilleure collaboration (Dodds, 2009; Nam, Shu, & Chung, 2008). De plus, l'intégration de cette trimodalité contribue à améliorer la performance des utilisateurs dans les EVCs. Les interactions haptiques fournissent un retour immédiat sur les actions, renforçant l'apprentissage par la pratique et améliorant la précision des tâches. Les indices visuels et les instructions verbales aident les utilisateurs à naviguer et à effectuer des tâches de manière plus efficace. Doumanis et Economou (2020) montrent que les EVC multimodaux augmentent la performance des utilisateurs en offrant des informations plus riches et en facilitant l'apprentissage par la simulation (Doumanis & Economou, 2020). Les sentiments de

présence et de co-présence dans les EVCs sont également améliorés par cette tri-combinaison. Ces modalités créent une sensation de présence accrue en fournissant des indices variés qui renforcent l'illusion d'être physiquement présent dans l'environnement virtuel. Les recherches de Rakkolainen et al. (2021) et de Martin et al. (2022) indiquent que la multimodalité dans les environnements immersifs améliore la perception de la présence et de la co-présence car les utilisateurs ressentent une interaction plus naturelle et engageante avec l'environnement et les autres participants (Rakkolainen, et al., 2021; Martin, Malpica, Gutierrez, Masia, & Serrano, 2022). En somme, la combinaison verbale, haptique et visuelle dans les EVCs joue un rôle crucial en améliorant la communication, la collaboration, la performance et la présence des utilisateurs.

3.2.5 La combinaison des modalités visuelles et non verbales

Les signaux non verbaux tels que les mouvements oculaires, les postures corporelles et les gestes de pointage sont essentiels dans les EVCs pour indiquer l'attention, l'intention et l'état émotionnel des participants. Par exemple, les gestes de pointage, lorsqu'ils sont associés à des éléments visuels, permettent aux utilisateurs de diriger l'attention de manière précise. Dans un EVC, un utilisateur peut pointer un objet ou une zone spécifique d'une image pour indiquer un point d'intérêt. Ce geste non-verbal est souvent renforcé par des représentations visuelles comme une surbrillance ou une annotation de l'objet facilitant ainsi la communication des intentions (Pretto & Poiesi, 2017; Roberts, et al., 2009). Ces gestes de pointage renforcent également la précision de la communication en fournissant des repères visuels explicites réduisant les ambiguïtés. Ainsi, lorsqu'un utilisateur pointe une partie d'une image ou d'un graphique, les autres participants peuvent se concentrer immédiatement sur cet élément, facilitant une discussion plus ciblée et une prise de décision plus efficace (Kim, Lee, Billingham, & Huang, 2020). De plus, la combinaison des indices visuels avec des signaux non verbaux aide aussi à transmettre des signaux d'approbation ou de désaccord, essentiels pour la prise de décision collective (Maloney, Freeman, & Wohn, 2020). Cette combinaison contribue notamment à la synchronisation des actions entre les utilisateurs (Peña Pérez Negrón, Muñoz, & Lara López, 2020). Elle améliore également la performance

des utilisateurs. Les éléments visuels, comme la visualisation des données, objets, images, combinés à des indices non verbaux tels que le suivi du regard ou les gestes de manipulation, permettent une analyse et une manipulation plus précise des informations (Kim, et al., 2023). Cela est particulièrement pertinent dans des environnements professionnels où la précision et la rapidité des échanges sont cruciales. Enfin, cette combinaison aide à avoir un meilleur sentiment de présence et de co-présence, rendant l'expérience plus immersive et engageante (Cruz, Paredes, Morgado, & Martins, 2021). En résumé, la combinaison des modalités visuelles et non verbales dans les EVCs améliore significativement les interactions en fournissant des indices visuels et gestuels pour une communication et une collaboration plus efficace.

3.2.6 La combinaison des modalités verbales et non verbales

Au sein des EVCs, la combinaison de la communication verbale et non verbale a pour but de créer des interactions plus fluides et plus efficaces. Les explications verbales offrent des détails précis que les gestes seuls ne peuvent pas fournir, comme des descriptions de l'objet ou du contexte. Ainsi, ces descriptions accompagnées de gestes non verbaux facilitent la visualisation et la conceptualisation de l'information (Tagkas, 2020). L'utilisation de gestes non verbaux, comme le pointage, permet de diriger l'attention des utilisateurs, facilitant ainsi l'accentuation verbale sur des éléments spécifiques (Gruber & Kaplan-Rakowski, 2022) (**Figure 13**). De plus, ces indices non verbaux vont également ajouter une dimension émotionnelle au discours verbal. Cela est particulièrement important dans les environnements d'apprentissage, où l'expression non verbale contribue à enrichir l'expérience d'apprentissage des apprenants (Wigham & Chanier, 2013). Par exemple, le ton et l'intonation de la voix véhiculent des émotions qui sont renforcées par les gestes et les expressions faciales, créant une communication plus immersive et engageante notamment lors de tâches collaboratives complexes (Parikh, Esposito, & Searock, 2014). Dans ce contexte, l'étude de Ghamandi (2024) a exploré ces dynamiques dans les environnements virtuels démontrant que la combinaison de la communication verbale et non-verbale améliore significativement l'efficacité des interactions et la compréhension partagée entre les participants. Ils ont constaté

que l'intégration de gestes et de signaux verbaux dans les échanges virtuels peut augmenter la satisfaction des utilisateurs et réduire les malentendus soulignant l'importance de cette approche multimodale dans les environnements virtuels collaboratifs (Ghamandi, et al., 2024). De plus, l'étude de Negrón ajoute que les questions verbales peuvent inviter des réponses non verbales, comme des hochements de têtes ou des gestes, confirmant ainsi la compréhension ou la participation des interlocuteurs (Negrón, Vera, & de Antonio Jiménez, 2010). Les gestes peuvent aussi organiser la communication, par exemple, en indiquant qui doit parler ou en guidant le flux de la discussion. Cela est essentiel dans les tâches nécessitant une coordination étroite, comme dans les manipulations coopératives où les signaux non verbaux aident à synchroniser les actions des partenaires (Parikh, Esposito, & Searock, 2014). Enfin, les instructions verbales fournissent une structure et des détails que les gestes et actions viennent ensuite renforcer ou clarifier, assurant ainsi que tous les participants sont alignés sur les objectifs et les actions à entreprendre (Wang, Laffey, Xing, Galyen, & Stichter, 2017). En résumé, ces études montrent comment les indices non-verbaux renforcent le discours verbal et améliorent la communication entre les utilisateurs.

3.2.7 La combinaison des modalités verbales, non verbales et visuelles

En s'appuyant sur les deux paragraphes précédents, nous pouvons dire que l'ajout de la modalité visuelle à la combinaison verbale-non verbale enrichit l'interaction entre les utilisateurs en offrant une dimension supplémentaire. En effet, lorsque les éléments visuels et les indices non verbaux sont associés, ils captivent l'attention de l'utilisateur, clarifient les points d'intérêt et réduisent les ambiguïtés, ce qui améliore la précision des échanges. Parallèlement, la communication verbale fournit des détails explicites que les indices non verbaux ne peuvent transmettre, mais ces derniers enrichissent le discours en ajoutant une dimension émotionnelle et en guidant les discussions. Cette synergie entre les modalités visuelle, verbale, et non verbale favorise une meilleure compréhension et coordination dans les tâches collaboratives complexes. En somme, l'intégration de ces trois aspects améliore la fluidité, la précision et l'engagement des

interactions dans les EVC (Montoya, Massey, & Lockwood, 2011; Noël, et al., 2022).



Figure 13 : Emojis d'interaction non-verbale au sein d'un EVC (Gruber & Kaplan-Rakowski, 2022).

3.2.8 Synthèse

Les modalités multiples offrent des canaux d'interaction et de communication variés et complémentaires, renforçant l'expérience immersive et facilitant l'accomplissement des tâches collaboratives complexes. La combinaison verbale-visuelle aide à clarifier les échanges, réduit les ambiguïtés et facilite une meilleure coordination des tâches. La combinaison verbale-haptique améliore la précision des tâches délicates et la coordination des actions, rendant les tâches collaboratives plus intuitives et réduisant les erreurs. La combinaison visuelle-haptique optimise également la précision des manipulations et la coordination des gestes dans les tâches collaboratives. La combinaison verbale-visuelle-haptique maximise la qualité de la communication dans les EVCs et améliore la performance globale des utilisateurs. Enfin l'ajout d'indices non verbaux affinent la communication en dirigeant l'attention, en clarifiant les intentions tout en enrichissant la communication avec des dimensions émotionnelles et contextuelles. En soi, la multimodalité dans les EVCs joue un rôle crucial en offrant une meilleure communication, une meilleure

coordination et une plus grande immersion, ce qui optimise la collaboration et la performance des utilisateurs dans ces environnements virtuels.

3.3 MULTIMODALITE ET APPRENTISSAGE PAR COMPAGNONNAGE DANS LES EVCs

L'utilisation d'environnements virtuels collaboratifs multimodaux pour le compagnonnage et l'acquisition de nouvelles compétences gagne en popularité, car de nombreuses études tendent à montrer l'importance des interactions entre les instructeurs et les apprenants dans ces environnements pour améliorer l'apprentissage, en particulier dans le domaine médical. Fong et al. (2012) mettent en avant le rôle crucial des mentors au sein des EVCs pour faciliter l'apprentissage collaboratif, en soulignant que le soutien et l'interaction entre l'instructeur et l'apprenant sont essentiels pour un apprentissage efficace (Fong, Mansor, Zakaria, Sharif, & Nordin, 2012). L'étude de Bani-Salameh et al. (2017) met également en évidence l'importance de la présence des instructeurs dans les EVCs et indique que ces interactions directes et soutenues avec les instructeurs permettent aux apprenants de maintenir un haut niveau de motivation et d'engagement favorisant l'assimilation des connaissances et des compétences (Bani-Salameh, Al-Gharaibeh, Jeffery, & Al-Sharif, 2017). Ojala et al. (2022) confirment ce constat et indiquent que la présence physique ou virtuelle de l'enseignant améliore les performances des étudiants dans l'apprentissage de tâches chirurgicales de base (Ojala, Sirola, Nykopp, Kröger, & Nuutinen, 2022). Cecilio-Fernandes et al. (2020) ajoutent que les retours de l'instructeur pendant l'apprentissage de compétences complexes en médecine sont importants et expliquent que la présence d'un instructeur aide à réduire la charge cognitive des apprenants et facilite une meilleure rétention des compétences par les apprenants (Cecilio-Fernandes, Clossen, Coster, Jaarsma, & Tio, 2020). Strandbygaard et al. (2013) ont montré que les participants qui ont bénéficié de rétroactions verbales et visuelles de la part d'un instructeur dans un simulateur virtuel ont maîtrisé plus rapidement les compétences nécessaires pour réaliser une procédure laparoscopique que ceux qui n'en n'ont pas reçu (Strandbygaard, et al., 2013). Porte et al. (2007) ont révélé que les feedbacks verbaux d'un instructeur sont plus efficaces que les retours d'un système

automatique et améliorent durablement les performances lors de l'apprentissage d'un geste de suture en chirurgie (Porte, Xeroulis, Reznick, & Dubrowski, 2007). Chellali et al. (2012) ont également souligné l'importance des feedbacks haptiques dans les EVCs, notant que ces retours, combinés aux instructions visuelles et verbales, améliorent les performances des apprenants dans des tâches complexes, telles que la manipulation d'aiguille pour la biopsie (Chellali, Dumas, & Milleville-Pennel, 2012). Les recherches menées par Lu et al. (2013) montrent que la combinaison de feedbacks haptiques et visuels est plus efficace pour des tâches motrices simples, comme le déplacement d'une sphère dans un tube, comparé à l'utilisation de retours visuels seuls (Lu, Liu, & Liu, 2013). Enfin, l'étude de Fögen (2005) ajoute que l'utilisation des retours verbaux couplés à des retours non verbaux permettent aux enseignants d'adapter leur message selon les réactions de leurs élèves assurant ainsi une meilleure rétention de l'information et une plus grande clarté dans la transmission des compétences pratiques en médecine (Fögen, 2005).

En résumé, diverses études mettent en lumière les avantages de chaque combinaison de modalités de communication, soulignant que leur utilisation peut favoriser l'acquisition de compétences motrices et améliorer l'expérience utilisateur dans les EVCs multimodaux dédiés à l'apprentissage. Toutefois, l'efficacité de ces modalités dépend non seulement des compétences enseignées (Chellali, Dumas, & Milleville-Pennel, 2012) mais aussi de la disponibilité de celles-ci (Sallnäs, 2004). Enfin, plusieurs méta-analyses, telles que celles de Sigrist et al. (2013), Philippe et al. (2020) et Martin et al. (2022) insistent sur la nécessité d'approfondir la compréhension de l'impact de la communication multimodale en réalité virtuelle pour optimiser l'expérience utilisateur et faciliter l'apprentissage des compétences motrices, tant pour des tâches simples que complexes (Sigrist, Rauter, Riener, & Wolf, 2013; Philippe, et al., 2020; Martin, Malpica, Gutierrez, Masia, & Serrano, 2022). Ainsi, bien que les EVCs montrent un potentiel significatif pour améliorer les interactions instructeurs-apprenants, il est crucial d'évaluer leurs caractéristiques pour prévenir les ruptures de communications et surmonter les défis d'apprentissage.

Conclusion du chapitre

Les environnements virtuels collaboratifs permettent de soutenir les interactions collaboratives que cela soit pour des activités synchrones ou asynchrones. Néanmoins, leur utilisation pose encore des défis en matière de communication. En effet, il est encore difficile pour plusieurs utilisateurs, de communiquer, de se coordonner ou encore de partager la même vision lors d'une tâche collaborative. Pour surmonter ces obstacles, l'intégration de la multimodalité représente une solution prometteuse. En combinant divers modes de communications tels que le visuel, le verbal, l'haptique et le non-verbal, la multimodalité améliore la qualité des échanges et la collaboration au sein des EVCs. De plus, les EVCs multimodaux semblent offrir des opportunités pour l'apprentissage, en facilitant les interactions entre les instructeurs et les apprenants, ce qui permet une meilleure compréhension, une coordination plus efficace et une acquisition plus approfondie des compétences. Toutefois, il est essentiel d'explorer davantage l'impact de la communication multimodale en réalité virtuelle pour optimiser l'expérience utilisateur et améliorer l'apprentissage des compétences motrices afin d'éviter des ruptures de communication et continuer à surmonter des défis liés à l'apprentissage.

Bilan

L'apprentissage par compagnonnage est essentiel pour la formation médicale, facilitant le développement des compétences techniques à travers les deux formes principales d'interaction : les instructions et les feedbacks. Ces interactions nécessitent l'utilisation de diverses modalités de communication pour transmettre efficacement les connaissances et les compétences aux apprenants. Cependant, le compagnonnage traditionnel peut présenter des risques en termes de sécurité des patients. Ceci a conduit au recours croissant aux simulateurs, notamment en de réalité virtuelle, pour offrir un environnement d'apprentissage plus sécurisé. Néanmoins, la majorité des simulateurs virtuels actuels sont conçus pour un apprentissage en autonomie, où l'apprenant s'entraîne seul pour améliorer ses performances. Bien que cette approche soit utile dans les stades avancés de l'apprentissage, elle est moins adaptée aux phases initiales qui nécessitent des interactions avec l'instructeur. Pour remédier à

cette problématique, le recours aux Environnements Virtuels Collaboratifs (EVC) est une solution potentielle, car ils permettent des interactions collaboratives pour préserver les bénéfices de l'apprentissage par compagnonnage, tout en permettant de s'entraîner dans des environnements virtuels à la fois immersifs et sécurisés. Toutefois, la communication dans les EVCs diffère de celle en face à face, compromettant ainsi la collaboration instructeur-apprenant. Face à ce constat, l'utilisation de la communication multimodale serait prometteuse. Ainsi, en adoptant une approche multimodale, il serait possible de surmonter les obstacles actuels de communication dans les EVCs et de rendre l'apprentissage en réalité virtuelle plus efficace et collaboratif.

Pour reproduire la méthode de formation par compagnonnage dans les EVCs, il est important de réfléchir à comment réintroduire l'instructeur au sein des simulateurs virtuels immersifs dédiés à la formation. La question qui se pose alors est : **Quelles sont les modalités de communication à utiliser au sein des simulateurs virtuels immersifs dédiés à la formation pour assurer une interaction instructeur-apprenant efficace ?**

Aborder cette problématique nécessite une compréhension approfondie des échanges multimodaux entre instructeurs et apprenants dans les environnements réels, afin de pouvoir les adapter aux spécificités des environnements virtuels collaboratifs et immersifs, et de formuler ainsi des recommandations pour la conception de simulateurs immersifs basés sur cette approche de compagnonnage. Dans cette optique, nous proposons un modèle d'interaction instructeur-apprenant pour faciliter l'analyse des interactions multimodales entre instructeur et apprenant pendant l'enseignement des compétences techniques par compagnonnage dans le monde réel, et pour guider la conception et l'évaluation de nouvelles interactions multimodales adaptées au contexte des EVCs immersif (**Figure 14**). Ce modèle proposé ici sera affiné et validé dans le chapitre suivant.



Figure 14 : Modèle d'interaction générique.

Le modèle se constitue de quatre composants distincts. Le premier composant, intitulé "Rôle", est essentiel car il permet de distinguer les différents acteurs impliqués dans l'interaction, en l'occurrence l'instructeur ou l'apprenant. Le deuxième composant "Type d'interaction", clarifie la nature de la communication entre les acteurs : dans notre contexte, les interactions peuvent prendre la forme d'instruction ou de feedback. Cette distinction permet de structurer la communication selon l'objectif recherché. Le troisième composant, "Tâche", correspond aux actions spécifiques réalisées par l'acteur spécifié par le composant "Rôle". Il fait donc référence à l'ensemble des sous-tâches et compétences nécessaires pour réaliser correctement la procédure complète (procédure médicale, par exemple). Enfin, le quatrième composant décrit les modalités de communication employées par l'acteur ("Rôle") pour transmettre la compétence liée à la "Tâche" en fonction du "Type d'interaction". Ce composant est crucial pour définir les moyens par lesquels une tâche et donc une compétence est communiquée. Ensemble, ces quatre composants apportent une clarification sur chaque aspect de l'interaction entre un instructeur et un apprenant lors de l'apprentissage d'une compétence (**Figure 15**).

Ainsi, en s'appuyant sur ces concepts, le modèle proposé appliqué à l'apprentissage d'une compétence technique en médecine se présente comme suit :

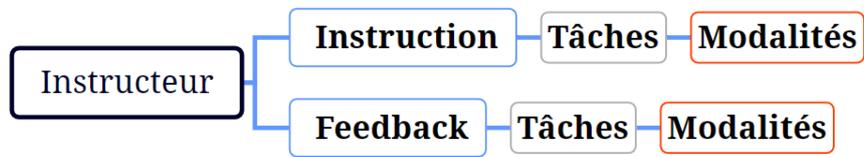


Figure 15 : Modèle d'interaction de l'instructeur lors de l'apprentissage de compétences techniques en médecine.

Ce modèle sera déployé dans les prochains chapitres afin de guider nos études des interactions multimodales et collaboratives entre un instructeur et un apprenant pour l'apprentissage des compétences techniques par compagnonnage, aussi bien dans le monde réel que dans les EVCs immersifs qui seront développés.

4 CHAPITRE 3 : ÉTUDES OBSERVATIONNELLES

Dans les deux chapitres précédents, nous avons présenté le modèle de compagnonnage pour l'apprentissage des gestes techniques en médecine et les problématiques associées, notamment les risques liés à la sécurité des patients. Nous avons également abordé l'utilisation de la simulation en réalité virtuelle immersive, qui permet de limiter ces risques, mais qui introduit à son tour une nouvelle problématique liée aux interactions limitées entre les apprenants et les instructeurs. Pour résoudre cette problématique, les environnements virtuels collaboratifs apparaissent comme une solution technologique adaptée. Cependant, la communication dans ces environnements est différente de la communication en face à face dans le monde réel. Il paraît donc important d'explorer de nouvelles formes de communication médiatisées à travers ces environnements pour assurer le transfert des compétences techniques entre l'instructeur et l'apprenant. Dans ce cadre, les interactions multimodales et collaboratives nous semblent être la forme de communication la plus adaptée. Notre objectif est donc d'explorer comment ces interactions peuvent-elle aider à améliorer la communication apprenant-instructeur pendant l'apprentissage par compagnonnage dans les environnements immersifs.

En conclusion du chapitre précédent, nous avons proposé un premier modèle d'interaction instructeur-apprenant. Il s'agira donc dans ce chapitre d'utiliser ce modèle afin de décrire des interactions instructeur-apprenant issues du monde réel à travers des observations terrain. Les résultats de ces travaux exploratoires serviront ensuite comme base afin de concevoir les interactions qui seront utilisées cette fois pour soutenir la formation par compagnonnage dans des environnements immersifs partagés.

4.1 OBJECTIF ET APPROCHE METHODOLOGIQUE

L'objectif de cette partie de notre travail est d'explorer comment les gestes techniques en médecine sont enseignés à travers le modèle de compagnonnage. Ceci nous permettra de mieux comprendre la dynamique des interactions instructeur-apprenant pendant

l'enseignement de ces gestes et servira comme base de réflexion pour la conception des techniques d'interaction à utiliser dans les environnements immersifs. Pour ce faire, nous avons choisi comme cadre applicatif l'anesthésie locorégionale échoguidée.

Notre démarche est basée sur une approche ergonomique centrée sur l'humain. La première étape a consisté à réaliser une analyse hiérarchique des tâches afin d'acquérir une description complète des tâches nécessaires à la réalisation de cette procédure. Nous nous sommes ensuite intéressés à l'analyse des compétences techniques enseignées et leur association avec les tâches définies dans l'étape précédente. Enfin, nous nous sommes penchés sur l'analyse des interactions entre instructeurs et apprenants. Pour ce faire, nous avons suivi des instructeurs pendant qu'ils encadraient des apprenants lors de l'enseignement de cette procédure. Nous avons plus particulièrement concentré notre attention sur les moments d'échange pour comprendre comment les instructeurs guident les apprenants pour effectuer correctement les gestes techniques et quelles modalités de communication ils utilisent. Notre objectif était de documenter les méthodes d'enseignement existantes et d'enrichir notre modèle d'interactions en identifiant les modalités de communication actuellement utilisées par les instructeurs pour enseigner ces compétences.

4.2 PRESENTATION DU TERRAIN D'OBSERVATION

L'anesthésie locorégionale échoguidée (ALE) (**Figure 16**) est une technique médicale utilisée pour anesthésier sélectivement une partie du corps, facilitant ainsi les interventions chirurgicales sans douleur. Cette méthode repose sur l'injection d'anesthésiant autour des nerfs ciblés, avec l'aide de l'échographe pour guider l'aiguille et assurer une distribution précise de l'anesthésiant. L'échoguidage permet de visualiser les structures nerveuses et périmébrales en temps réel, améliorant ainsi la sécurité et l'efficacité de la procédure.



Figure 16 : Illustration d'une procédure d'anesthésie locorégionale échoguidée.

L'un des défis majeurs de l'ALE réside dans la nécessité de maîtriser des compétences spécialisées pour manipuler simultanément l'échographe et l'aiguille, particulièrement en raison de la proximité des nerfs avec d'autres structures critiques comme les artères et les veines (Bouaziz & Jochum, 2010). La formation actuelle pour cette procédure repose sur le modèle de compagnonnage (Chang, 2013). Cependant, cette méthode comporte des risques, notamment lorsque les apprenants pratiquent directement sur des patients. Au début de leur apprentissage, les apprenants commettent fréquemment des erreurs importantes, notamment lors de la réalisation de gestes techniques comme l'insertion et la visualisation de l'aiguille, le repérage anatomique, l'injection de l'anesthésiant ou encore sur la coordination œil-main (Sites, et al., 2007). Barrington et al. (2012) ont constaté qu'environ 28 essais supervisés par un instructeur avec feedbacks étaient nécessaires pour développer la compétence de la visualisation de l'aiguille par ultrason en ALE (Barrington, Wong, Slater,

Ivanusic, & Ovens, 2012). Ceci nous offre donc un terrain riche pour observer les interactions instructeur-apprenant pendant l'apprentissage de cette procédure.

4.3 ANALYSE DE LA TACHE

4.3.1 Méthodologie

L'analyse des tâches vise à approfondir la compréhension de la manière dont les opérateurs passent des objectifs aux tâches, puis aux actions. Cette démarche permet d'identifier toutes les tâches exécutées, afin de mieux appréhender le déroulement global de la procédure. A cette fin, plusieurs modèles d'analyse de tâches sont disponibles, parmi lesquels la Méthode Analytique de Description des Tâches (MAD) développée par Scapin et Pierret-Golbreich (Scapin & Pierret-Golbreich, 1989). Cette méthode facilite la décomposition des tâches en sous-tâches, mettant en évidence les relations d'ordonnance temporelle entre les tâches et les sous-tâches et recensant les objets utilisés dans l'accomplissement de la tâche. De plus, la formalisation simple des tâches facilite la compréhension et les échanges au sein d'une équipe pluridisciplinaire.

Dans cette analyse, la procédure de l'anesthésie locorégionale échoguidée est décomposée en étapes, tâches et sous-tâches. L'objectif principal de la procédure est atteint en combinant toutes les étapes qui se déroulent une seule fois. Les tâches, qui sont des actions regroupées pour atteindre l'objectif de l'étape, peuvent se produire plusieurs fois au cours de la même étape. Chaque tâche se compose de sous-tâches, des actions plus spécifiques, qui peuvent aussi se répéter au sein d'une même tâche et être décomposées en actions plus élémentaires. Ces étapes, tâches, sous-tâches et actions sont hiérarchisées et leur ordre ainsi que leur structure peuvent être représentés par des diagrammes en arbre. Ainsi, un arbre de décomposition hiérarchique décrivant l'Analyse Hiérarchique des Tâches (HTA) de la procédure d'ALE à différents niveaux de détail, a été élaboré à l'aide du logiciel de cartographie mentale Xmind (XMIND LTD, version 22.093168). Ce modèle de tâche a été généré en se basant sur l'analyse de données issues de la littérature, de la visualisation de 10 vidéos éducatives totalisant 49 minutes de visionnage et

d'observations macroscopiques sur le terrain. Ces vidéos présentent la réalisation de l'ALE sur le nerf sciatique et le nerf fémoral. L'analyse de ces vidéos a permis d'obtenir une première compréhension de l'ALE et d'identifier les étapes fondamentales que le praticien doit suivre pour l'effectuer. La deuxième étape a impliqué la consultation d'un document destiné aux internes en anesthésie, contenant des instructions détaillées pour la réalisation de blocs nerveux échoguidés, se concentrant particulièrement sur le nerf sciatique, le nerf fémoral et le plexus brachial (Chan & Dabu, 2006). Les informations extraites de ce document complètent les notes prises à partir des vidéos. Enfin, l'observation de 42 cas réalisés par des anesthésistes instructeurs, avec une méthode de réflexion à haute voix (Bisseret, Sebillotte, & Falzon, 1999), a fourni des détails supplémentaires sur les tâches exécutées. Une fois toutes les données recueillies, le modèle de tâche a été élaboré en utilisant Xmind.

4.3.2 Validation du modèle

La première étape de validation s'est déroulée lors de la réunion hebdomadaire du service d'anesthésie du Centre Hospitalier Sud Francilien (CHSF), regroupant une dizaine d'anesthésistes instructeurs. Pendant cette session de validation d'une durée d'une heure, le schéma sous forme d'arbre a été projeté sur un grand écran aux anesthésistes, qui ont été encouragés à fournir des commentaires sans restriction sur la conformité du modèle à leur pratique. Ces retours en temps réel ont permis de comparer les pratiques entre instructeurs, soulignant l'importance de cette approche dans la création d'un modèle générique pour la procédure d'ALE. Pour donner suite à cette première phase de validation, le modèle de tâches a été affiné en fonction des retours des instructeurs, principalement en ce qui concerne la terminologie et l'ordre des sous-tâches. La validation finale s'est déroulée à distance en raison de l'emploi du temps chargé des anesthésistes. Pour ce faire, le schéma a été transmis par courrier électronique, accompagné d'un questionnaire de validation en ligne et de données démographiques, permettant de préciser le profil des répondants ainsi que leur opinion sur la validité du modèle.

4.3.3 Résultats : modèle de tâches

4.3.3.1 Participants

Sur les dix anesthésistes présents lors de la première séance de validation, seuls huit ont répondu au questionnaire de validation finale (6 hommes et 2 femmes, avec 13.12 ± 8.33 pour le nombre moyen d'années de pratique et 675 ± 353 cas d'ALE réalisés en moyenne).

4.3.3.2 Décomposition hiérarchique des tâches

Notre analyse révèle que l'ALE se compose de trois étapes principales, chacune étant décomposée en tâches et sous-tâches. La première étape consiste à préparer le patient en l'installant et en préparant la zone à anesthésier tout en s'assurant du respect des règles d'hygiène. Cette étape inclut également la préparation du matériel à utiliser tel que l'échographe avec une sonde linéaire et une aiguille. La seconde étape implique de réaliser l'ALE. Elle inclut la manipulation de la sonde à la surface de la peau du patient pour observer et repérer les structures anatomiques tout en insérant l'aiguille. Lorsque l'aiguille atteint la zone cible, le praticien injecte l'anesthésiant puis observe sa distribution autour du nerf. La décomposition hiérarchique de la procédure d'ALE est présentée sur la (**Figure 17**). Tous les instructeurs participants ont validé l'arbre de décomposition hiérarchique proposé.

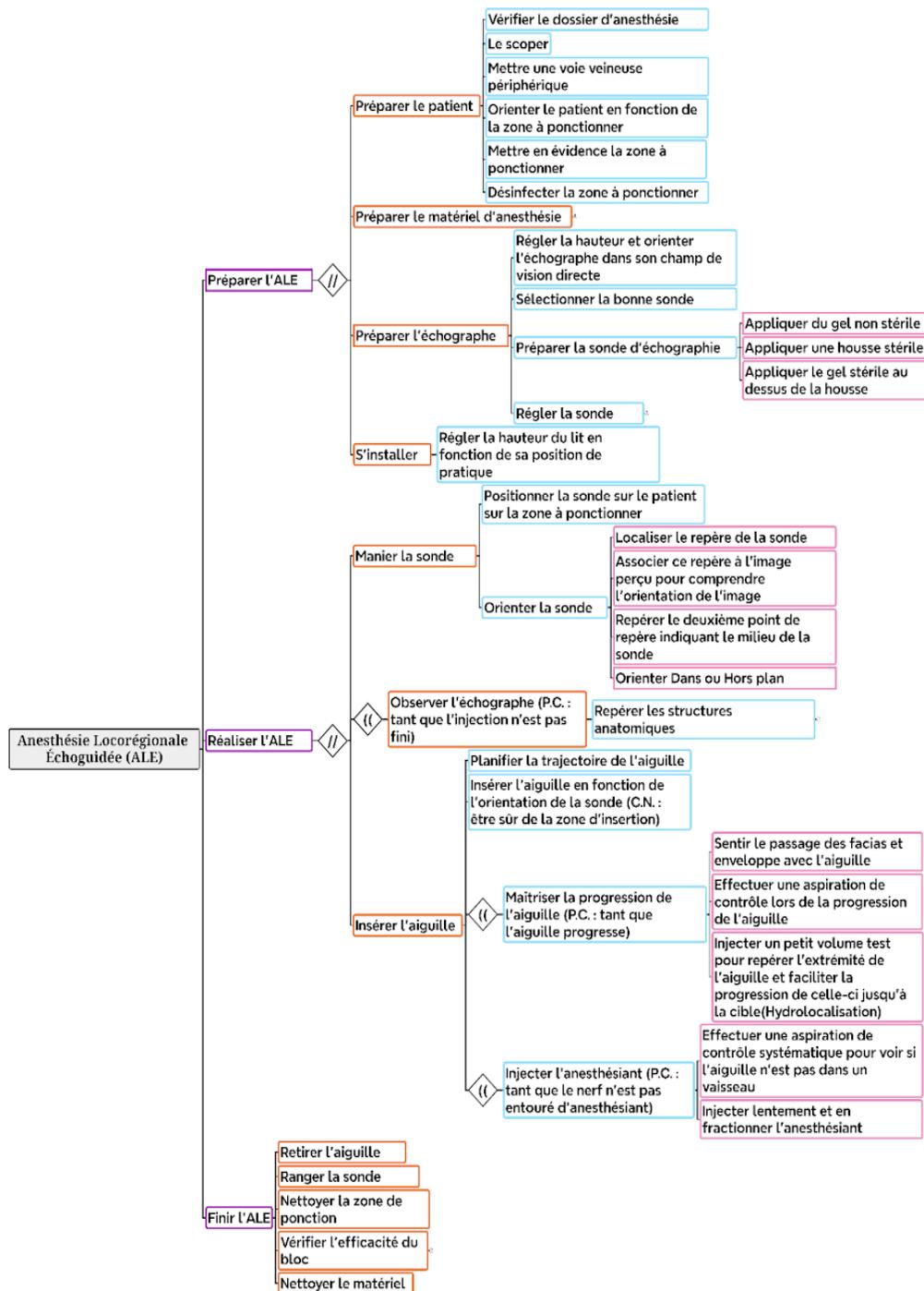


Figure 17 : Modèle de tâches (MAD) de la procédure de l'anesthésie locorégionale échoguidée. Les étapes sont représentées par des cadres en violet, les tâches par des cadres en orange, les sous-tâches par des cadres en bleu ciel et les actions élémentaires par des cadres rose clair. L'arbre se lit du haut vers

Tableau 2 : Associations des compétences et des sous-tâches pour l'étape "Réaliser l'ALE".

Sous-tâches	Groupe de Compétences	Compétences associées
ST.1 Positionner la sonde sur le patient	Optimisation de l'image	Maîtriser les conséquences d'une pression plus ou moins importante exercée par la sonde
ST.2 Orienter la sonde		<ul style="list-style-type: none"> - Comprendre et savoir utiliser l'alignement de la sonde - Comprendre et savoir utiliser la rotation de la sonde - Comprendre et savoir utiliser le mouvement d'inclinaison de la sonde en direction caudale et crâniale - Contrôler d'une manière coordonnée les mouvements des yeux et des mains
ST.3 Repérer les structures anatomiques	Interprétation de l'image	<ul style="list-style-type: none"> - Identifier les nerfs - Identifier les muscles et les fascias - Identifier les vaisseaux, et être capable de distinguer artères et veines - Identifier les os et la plèvre - Connaître et reconnaître les images construites - Connaître et identifier les pièges anatomiques - Repérer les structures vasculaires situées sur le trajet de l'aiguille

ST.4 Planifier la trajectoire de l'aiguille	Introduction de l'aiguille et injection de la solution	Apprendre à éviter les traumatismes tissulaires inutiles
ST.5 Insérer l'aiguille		<ul style="list-style-type: none"> - Maîtriser l'approche <i>dans le plan</i> - Maîtriser l'approche <i>hors plan</i> - Maîtriser les avantages et les limites de chacune des approches
ST.6 Maîtriser la progression de l'aiguille		<ul style="list-style-type: none"> - Savoir reconnaître la position intramusculaire de l'aiguille - Optimiser l'ergonomie - Contrôler d'une manière coordonnée les mouvements des yeux et des mains - Minimiser les mouvements non intentionnels
ST.7 Injecter l'anesthésiant		<ul style="list-style-type: none"> - Savoir reconnaître une position intra vasculaire de l'aiguille - Apprendre à reconnaître une diffusion optimale de la solution

Ce travail constitue une première tentative de modélisation des tâches et d'association tâches-compétences pour l'ALE. Nous avons impliqué des experts du domaine dans le processus de conception de ce modèle pour une meilleure compréhension de leurs pratiques. En collaboration avec eux, nous avons identifié toutes les tâches nécessaires à la réalisation d'une ALE et proposé des associations entre certaines sous-tâches et les compétences requises pour les accomplir. Bien que différentes approches puissent exister, la validation par huit experts différents confirme que notre modèle est assez générique pour décrire la procédure d'ALE. Cependant, comme notre étude a été menée dans un seul service où les membres ont l'habitude de travailler

ensemble, il est nécessaire dans le futur de faire valider ce modèle par d'autres instructeurs externes pour en confirmer la généralisabilité.

Après avoir obtenu le modèle de tâches et associé les compétences aux sous-tâches, nous avons exploré comment ces compétences sont enseignées par les instructeurs. Pour ce faire, nous avons réalisé une nouvelle étude observationnelle.

4.5 ANALYSE DES COMMUNICATIONS ET MODELE D'INTERACTION

Cette nouvelle étude observationnelle vise à comprendre comment les instructeurs transmettent les compétences nécessaires pour réaliser une anesthésie locorégionale échoguidée aux apprenants, en se concentrant sur leurs interactions pendant l'apprentissage par compagnonnage. La phase d'observation se déroule pendant l'étape pratique par l'apprenant sous la supervision d'un instructeur. Dans la continuité de notre précédente étude, nous nous concentrerons spécifiquement sur l'étape "Réaliser l'ALE". Les résultats des observations permettront d'enrichir notre modèle d'interaction et de fournir des premières pistes pour concevoir des techniques d'interaction instructeur-apprenant destinées à la formation par compagnonnage dans les environnements virtuels immersifs.

4.5.1 Participants

Cette étude a impliqué au total 12 participants, 7 hommes et 5 femmes. Leur âge moyen était de 35,9 ans ($\sigma = 5.68$, min = 28, max = 46). Parmi eux, il y avait 9 médecins-anesthésistes (6 hommes et 3 femmes) exerçant au sein du CHSF et 3 internes (1 homme et 2 femmes) réalisant un FFI d'anesthésie (FFI = faisant fonction d'interne). Le nombre d'année de pratique en moyenne chez les médecins-anesthésistes étaient de 9,22 ans ($\sigma = 5,38$, min = 4, max = 20) avec un nombre de cas d'ALE réalisé en moyenne de 722,22 cas ($\sigma = 330,82$, min = 250, max = 1000). Le nombre de cas d'ALE réalisé par les internes en moyenne est de 45 cas ($\sigma = 8,66$, min = 35, max = 50). Les internes observés n'étaient pas au début de leur apprentissage mais au milieu de celui-ci.

4.5.2 Procédure observationnelle

L'étude observationnelle a été approuvée par les comités d'éthique de l'Université Paris-Saclay et du CHSF. Les premières procédures d'anesthésie locorégionale échoguidée commencent vers 8h du matin au sein du CHSF. À son arrivée, l'expérimentateur demande un consentement oral de l'instructeur (médecin-anesthésiste) et de l'apprenant (interne) pour filmer les échanges instructeurs-apprenant pendant l'apprentissage de la procédure. Ce consentement oral vise à simplifier la procédure en raison du rush intense que subissent les participants dès leur arrivée. Pour la vidéo, le cadrage inclut uniquement les échanges multimodaux liés à l'apprentissage de la procédure (échanges verbaux, gestes de démonstration, prises de main pour guidage, pointage sur l'échographe), les gestes réalisés par chacun pour effectuer la procédure (manipulation de l'aiguille/sonde échographique), l'image échographique, ainsi que la zone anesthésiée du patient (membres inférieurs ou supérieurs) et les bras des praticiens. Un consentement oral est par conséquent demandé au patient avant de procéder aux enregistrements.

Les enregistrements vidéo réalisés à l'aide d'un smartphone Google Pixel 7 et audio réalisés à l'aide des micro-cravates Rode Wireless Go II commencent une fois la procédure d'identification du patient terminée et se terminent à la fin de l'ALE, c'est-à-dire, une fois l'aiguille d'anesthésie retirée du patient et jetée et la sonde échographique rangée. À la fin de la procédure, une notice d'information détaillant les informations relatives à l'étude, son objectif, les coordonnées de contact et les bénéfices/risques est remise à chaque patient ainsi qu'un consentement de droit à l'image à remplir. En fin de journée, après la conclusion de toutes les procédures, les apprenants et les instructeurs remplissent un questionnaire démographique. Un consentement de droit à l'image leur est également demandé, ainsi qu'une notice d'information reprenant les détails de l'étude, son objectif, les coordonnées de contact, ainsi que les bénéfices/risques.

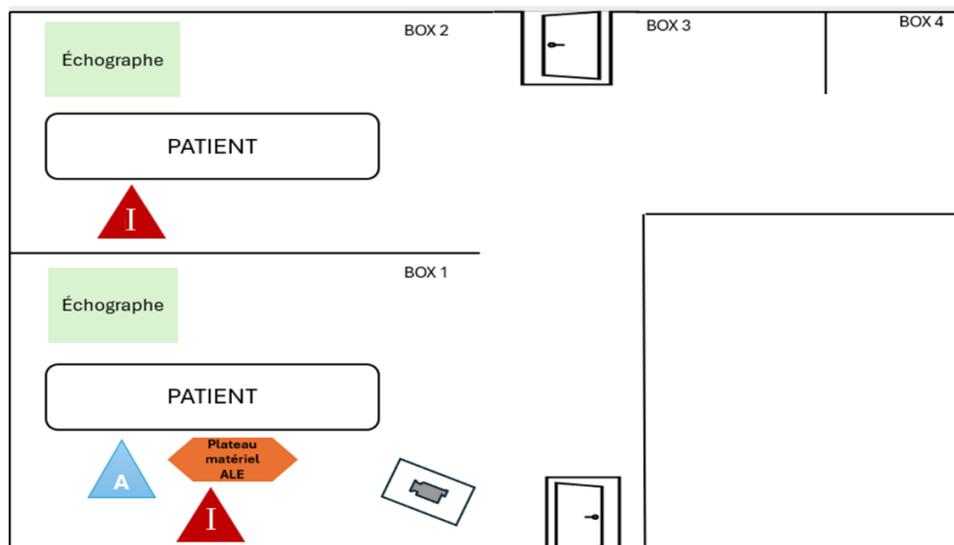


Figure 19 : Schéma du contexte d'observation. Le triangle rouge marqué "I" désigne l'instructeur, le triangle bleu marqué "A" désigne l'apprenant. Le logo caméra représente l'observateur filmant l'interaction instructeur-apprenant.

4.5.3 Mesures et analyse des données

Pendant les observations, nous avons dû nous adapter aux conditions du terrain. Les procédures d'ALE ne se déroulaient pas au sein d'un bloc opératoire mais dans une salle de réveil (**Figure 19**). Cette salle accueillait non seulement les patients en attente ou revenant de leur opération, mais également le personnel médical (médecin, interne, infirmier, aide-soignant et brancardier), ainsi que les machines de monitoring. En raison de l'étroitesse des box et des va-et-vient constants des brancardiers dans les couloirs, les angles de caméra changeaient fréquemment.

Nous avons observé au total 22 procédures d'ALE. La moyenne de durée des vidéos est de 9,99 min ($\sigma = 4.40$, min = 4.41 min, max = 21,28) pour un total de 226 minutes de vidéo filmé. Ces écarts de temps de vidéo dépendaient de la complexité du bloc d'ALE à réaliser, de l'expérience précédente des apprenants sur les blocs locorégionaux, mais également de la disponibilité de l'instructeur car l'apprenant ne pouvait pratiquer sans sa présence.

Pour alimenter notre modèle d'interaction sur la communication multimodale entre un instructeur et un apprenant, il est essentiel de comprendre quelles modalités sont utilisées par l'instructeur pour enseigner les compétences ciblées. Dans cette optique, nous avons analysé les occurrences de chaque modalité en fonction de la compétence enseignée, correspondant à des sous-tâches spécifiques. Pour réaliser cette analyse, nous nous sommes appuyés sur la théorie ancrée (grounded theory) de (Glaser A. , 1967). La théorie ancrée est une approche qualitative permettant de développer des théories substantielles à partir d'une analyse systématique des données, sans préconception théorique ou hypothèses préalables. Cette méthode privilégie plutôt l'émergence de modèles et de catégories à travers un processus de codage continu qui se déroule pendant la collecte des données sur le terrain, permettant ainsi d'affiner et de modifier les catégories en fonction des nouvelles données collectées.

Puis, nous avons regroupé l'ensemble des données obtenues en thèmes selon une approche inspirée de l'analyse thématique (Braun & Clarke, 2012). Nous avons déterminé cinq thèmes (**Tableau 3**) en nous appuyant sur le modèle d'interaction que nous avons proposé :

1. **"Sous-tâche"**, regroupant l'ensemble des sous-tâches identifiées pendant la phase d'analyse de l'activité.
2. **"Groupes de Compétences"**, définis pendant la phase d'analyse des compétences précédentes.
3. **"Modalité"**, définie en nous appuyant sur la littérature (**Tableau 4**).
4. **"Rôle"**, défini afin de connaître l'auteur des interactions : instructeur ou apprenant.
5. **"Interaction"**, défini pour classifier le type d'interaction : instruction ou feedback.

Pour réaliser cette analyse, nous avons utilisé le logiciel ATLAS.ti (version 24.1.0.30612). En adoptant cette approche combinée, nous avons pu identifier les modalités d'interaction utilisées pour transmettre les compétences, tout en restant ouverts à l'émergence de

nouvelles catégories, conformément aux principes de la théorie ancrée. Une transcription des données audios a été réalisée. Ces transcriptions ont apporté des données supplémentaires dans la conception des thèmes, ainsi que pour comprendre comment l'instructeur transmet les compétences à l'apprenant en fonction du type d'interaction (instruction ou feedback).

Tableau 3 : Catégories pour l'analyse des interactions multimodales entre instructeur et apprenant.

Rôle (2)	Sous-tâche (7)	Groupe de compétence (4)	Modalité (11)	Interaction (2)
Instructeur	ST.1 : Positionner la sonde sur le patient	1. Compréhension des bases physiques des ultrasons et manipulation de l'équipement	M1.Visuelle	Instruction
Apprenant	ST.2 : Orienter la sonde	2. Optimisation de l'image	M2.Verbale	Feedback
	ST.3 : Repérer les structures anatomiques		M3.Haptique	
	ST.4 : Planifier la trajectoire de l'aiguille	3. Interprétation de l'image	M4.Non-verbale	
	ST.5 : Insérer l'aiguille	4. Introduction et injection de la solution	M5.VERB-VIS	
	ST.6 : Maîtrise la progression de l'aiguille		M6.VIS-HAP	
	ST.7 : Injecter l'anesthésiant		M7.VERB-HAP	
			M8.VIS-NV	
		M9.VERB-NV		
		M10.VERB-VIS-NV		
		M11.VIS-VERB-HAP		

Tableau 4 : Définitions de chacune des modalités.

Modalité	Définition
M1. Visuelle	<p>La modalité visuelle fait référence à l'utilisation de l'information visuelle pour faciliter l'apprentissage entre un instructeur et un apprenant. Elle comprend l'utilisation de divers supports visuels comme des images médicales, schéma, vidéos, démonstrations visuelles.</p> <p><i>Ex : Démonstration visuelle d'un geste par l'instructeur, utilisation de support visuel comme l'image échographique ou instruments médicaux.</i></p>
M2. Verbale	<p>La modalité verbale implique l'utilisation du langage parlé pour communiquer des informations, concepts médicaux, procédure entre un instructeur et un apprenant.</p> <p><i>Ex : Utilisation d'un langage parlé pour expliquer, commenter, décrire.</i></p>
M3. Haptique	<p>La modalité haptique fait référence à l'utilisation du sens du toucher pour l'apprentissage. Cela implique des simulations tactiles, des pratiques guidées par le toucher et d'autres expériences tactiles.</p> <p><i>Ex : L'instructeur prend la main de l'apprenant pour guider son geste.</i></p>
M4. Non-verbale	<p>Cette modalité englobe l'ensemble des aspects de la communication qui ne sont pas basés sur les mots parlés qui ont pour objectif de compléter, modifier ou contredire un message donné dans une autre modalité. Elle comprend le langage corporel (langage des main, hochement de la tête), la posture, le contact visuel, et d'autres formes de communication non-verbale. Elle est utilisée pour clarifier ou ajuster le sens du message.</p> <p><i>Ex : Utilisation du geste de pointage par l'instructeur pour montrer une structure sur l'écran.</i></p>

<p>M5.Verbale-Visuelle</p>	<p>Cette modalité combine l'utilisation du langage parlé avec des éléments visuels.</p> <p><i>Ex : Démonstration d'un geste technique accompagnée par des explications parlées.</i></p>
<p>M6.Visuelle-Haptique</p>	<p>Cette modalité combine des éléments visuels (geste, image, vidéo) avec le sens du toucher.</p> <p><i>Ex : L'instructeur montre les structures anatomiques sur l'échographe et guide la main de l'apprenant qui se trouve sur la sonde.</i></p>
<p>M7.Verbale-Haptique</p>	<p>Cette modalité combine le langage parlé avec le sens du toucher. Cette combinaison vise à transmettre des informations en utilisant à la fois des explications verbales et des sensations tactiles.</p> <p><i>Ex : Explication verbale accompagné de guidage tactile lors de l'insertion de l'aiguille.</i></p>
<p>M8.Visuelle-Non Verbale</p>	<p>Cette modalité se réfère à l'utilisation simultanée de signaux visuels et de communication non verbale pour transmettre des messages ou des informations. Cela inclut les expressions faciales, la posture, le contact visuel, ainsi que des éléments visuels tels que les démonstrations gestuelles, graphiques, les images, les couleurs et les symboles. En combinant ces différents éléments, les individus peuvent enrichir leur expression et leur compréhension mutuelle, rendant la communication plus efficace et engageante.</p> <p><i>Ex : L'apprenant qui pointe l'écran d'échographie.</i></p>
<p>M9.Verbale-Non Verbale</p>	<p>Cette modalité implique l'utilisation du langage parlé et de divers moyens de communication non verbale.</p> <p><i>Ex : L'instructeur explique verbalement un concept tout en utilisant des gestes de pointage pour renforcer son discours.</i></p>
<p>M10.Verbale-Visuelle-Non</p>	<p>Cette modalité combine l'utilisation d'un langage parlé, d'éléments visuels et des signaux non verbaux.</p>

Verbale	<i>Ex : L'utilisation de gestes de pointage dirigé vers l'écran échographique accompagné d'information verbale, pour diriger l'attention sur un point particulier.</i>
M11 .Visuelle- Verbale- Haptique	<p>Cette modalité combine des explications verbales avec des éléments visuels et des sensations tactiles.</p> <p><i>Ex : L'instructeur maintient une communication verbale constante, expliquant les ajustements à effectuer en fonction des images échographiques et guidant l'apprenant sur les sensations tactiles à anticiper lors de l'insertion de l'aiguille.</i></p>

Une fois les 22 vidéos codées, nous avons réalisé des tests statistiques à l'aide du logiciel Jamovi (version 2.3.28) pour comparer les occurrences des modalités employées pour chaque sous-tâche liée, en fonction du groupe de compétences et du type d'interaction. Dans ce contexte, une occurrence se définit comme le nombre de fois qu'un codage a été appliqué. Puisque l'objectif de cette recherche est de repenser la formation par compagnonnage en environnement virtuel en (ré)intégrant l'instructeur dans la boucle, les analyses des données ainsi que le modèle se concentrent ici uniquement sur le rôle "instructeur".

4.5.4 Résultats

4.5.4.1 Analyse qualitative des transcriptions

La réalisation de l'anesthésie locorégionale échoguidée nécessite une visualisation constante de l'anatomie et de l'aiguille à l'intérieur du corps. Une coordination œil-main est donc indispensable pour manipuler les instruments (aiguille et sonde) tout en s'appuyant sur une image 2D du corps humain afin de trouver et anesthésier la zone cible. Nous allons voir comment les instructeurs aident les apprenants à acquérir les compétences telles que la reconnaissance des structures anatomiques ou encore la manipulation des outils. Les situations présentées illustrent des moments de formation, mais elles ne sont en aucun cas les seuls événements observés.

De nombreux moments d'interaction consistaient dans un premier temps à identifier les structures anatomiques afin de repérer la zone cible et de planifier la trajectoire de l'aiguille. Il est donc crucial pour les instructeurs de guider les apprenants pour qu'ils commencent à déterminer comment bien positionner (ST.1) et orienter (ST.2) leur sonde sur le patient afin d'obtenir une bonne image.

Situation d'instruction : 54765

E : "Le côté pour moi, côté externe ça sera vers la gauche, le côté interne, il est là, ça veut dire en principe la veine sera, là, tu as vu". [L'instructeur désigne le côté externe sur le patient en le pointant du doigt puis le côté gauche de la sonde et montre le côté gauche de l'échographe. Ensuite, il pointe le côté droit de la sonde ainsi que le côté interne sur l'écran d'échographie avant de poser la sonde sur le patient]

A : "Oui" [L'apprenant regarde les mouvements de l'instructeur puis répond]

Situation de feedback (Figure 20) : 38043

E : "Non, tu dois être comme ça, tu vois, tu vois mieux" [L'instructeur guide avec sa main la sonde tenue par l'apprenant]

E : " Là comme ça tu vois bien"



Figure 20 : L'instructeur (à gauche) co-manipule la sonde tenue par l'apprenant (à droite) pour guider le geste de ce dernier.

Comme le souligne un des instructeurs, l'anesthésie locorégionale échoguidée consiste d'abord à savoir positionner et orienter la sonde

correctement sur le patient afin d'avoir une bonne image. Dans la situation d'**instruction**, l'instructeur explique à l'apprenant comment orienter la sonde et identifier les côtés internes et externes. Il désigne physiquement ces côtés sur le patient, sur la sonde et sur l'écran d'échographie pour clarifier ses instructions. L'apprenant suit les gestes de l'instructeur et confirme sa compréhension. Dans la situation de **feedback**, l'instructeur corrige la position de l'apprenant en ajustant la sonde tenue par l'apprenant avec sa main pour améliorer la visibilité de l'image (**Figure 20**). L'instructeur souligne l'importance de la position correcte. Ces deux situations mettent en évidence l'importance de l'interaction directe et du guidage physique dans la formation des apprenants. Dans la situation d'**instruction**, l'instructeur utilise des démonstrations visuelles (**modalité visuelle**) ainsi que des explications détaillées sur les bases de l'orientation de la sonde (**modalité verbale**), tout en utilisant des gestes de pointage pour appuyer son discours (**modalité non-verbale**). Dans la situation de **feedback**, l'instructeur corrige le geste technique de l'apprenant en ajustant manuellement l'outil (**modalité haptique**).

Une fois la sonde bien positionnée et orientée sur le patient, les apprenants obtiennent une image qu'ils doivent savoir décrypter afin d'identifier chaque structure anatomique et notamment le nerf cible (ST.3). Pour cela, les structures anatomiques ont des propriétés physiques et un ordre (position relative) connu par les apprenants, souvent désigné par le terme VAN (Veine, Artère, Nerf).

Situation d'instruction : 54765

E : "Tu as vu, donc, tu as vu l'artère comment elle est battante" [*L'instructeur regarde l'écran d'échographie tout en manipulant la sonde*]

A : "Oui, on peut déjà voir l'artère" [*L'apprenant regarde l'écran d'échographie*]

E : "Tu as vu, après ici, voilà, ici on a deux artères, tu as vu ?"

A : "Oui"

E : "Tu as vu ce qui est au bon ordre à côté de là" [*L'instructeur pointe l'image de l'échographe*]

A : [*L'apprenant pointe également l'image de l'échographe*]

E : "En fait, c'est toujours la veine à l'intérieur"

A : "VAN en fait, c'est ça ?" [*L'apprenant fait un mouvement de main de la droite vers la gauche*]

E : "Voilà"

A : "C'est VAN"

E : "VAN : veine, artère, nerf, ok ?"

A : "Ok" [*L'apprenant pointe l'image de l'échographe*]

E : "Voilà, en principe c'est ça"

Situations de feedback : 0575

E : "On est pas mal ici, tu dois voir l'image, c'est l'artère et le reste, c'est ça l'image comme ça, même l'artère y sera, là tu le vois" [*L'instructeur fait des mouvements avec ses mains pour expliquer comment doit être l'image, puis pointe l'image en voyant l'artère*]

A : "Là ?, là ?" [*L'apprenant pointe l'image en retour*]

E : "Oui c'est bon. Après tu vois là arriver tout au bout, il y a le musculo-cutané, les branches superficielles et tout, ils sont tous là, on va essayer de les entourer" [*L'instructeur pointe l'écran de nouveau pour montrer les structures*]

A : [*L'apprenant pointe l'écran du doigt également pour repérer les structures*]

E : "La veine, l'artère et" [*L'instructeur repointe l'écran pour montrer les structures*]

A : "Le nerf" [*L'apprenant pointe l'écran*]

E : "Oui il est là le nerf"

Savoir reconnaître les structures anatomiques est essentiel pour réaliser la procédure, afin d'éviter d'effectuer des erreurs significatives lors de la progression de l'aiguille et la diffusion de l'anesthésiant. Cette capacité à identifier les structures permet à l'apprenant de pouvoir planifier la trajectoire de l'aiguille et de déterminer l'emplacement optimal pour son insertion. Dans la situation d'**instruction**, l'instructeur guide l'apprenant en identifiant et expliquant les structures visibles sur l'écran. Afin de partager son point de vue, l'instructeur va observer avec l'apprenant les structures tout en

discutant de leur emplacement et de l'ordre anatomique de ces structures. Pour clarifier ces explications, l'instructeur va utiliser des gestes de pointage sur l'image échographique afin d'être sûr que l'apprenant comprend clairement ses explications (**modalité non verbale**). L'apprenant va d'ailleurs répondre avec la même modalité, il va pointer l'écran pour confirmer sa compréhension. Dans la situation **feedback**, l'instructeur va corriger la technique de l'apprenant en ajustant la visualisation des structures anatomiques sur l'écran d'échographie. L'instructeur va également pointer les structures cibles (**modalité non verbale**) afin de renforcer la compréhension. L'apprenant va également pointer l'écran (**modalité non verbale**) pour confirmer sa compréhension et recevoir un feedback direct de l'instructeur. Ces deux situations démontrent que pour partager son point de vue avec l'apprenant et le guider, l'instructeur utilise des gestes de pointage pour diriger l'attention de l'apprenant vers les structures cibles, tout en accompagnant ces gestes par des explications verbales (**modalité verbale**).

Une fois les structures repérées, les apprenants doivent savoir planifier la trajectoire (ST.4) de l'aiguille et l'insérer (ST.5).

Situation d'instruction : 54765

E : " Tu as vu sous l'artère, sous l'artère, voilà, sous, il y a une structure osseuse, le blanc là, le blanc là" [*L'instructeur pointe l'écran avec son doigt*]

A : [*L'apprenant pointe l'écran avec son doigt également*]

A : "Là ?"

E : ""Euh non en dessous, voilà ça, tu as vu, c'est ça le pain block"

A : " Le pain block" ¹

A : [*L'apprenant pointe l'écran*]

E : "Tu peux venir directement, jusqu'à cette...,voilà, c'est, non non jusqu'à l'os"

¹ Pain block : blocage nerveux

[L'instructeur pointe l'écran]

E : "Et une fois que tu as touché l'os, tu recules de 1 millimètre et tu injectes"

A : "D'accord"

Situation de feedback : 34248

E : "Tu vas aller en latérale ou en médiale ?"

A : "En latérale"

E : "En extérieur"

A : "En latérale"

E : "Et du coup tu vas infiltrer ici là ? " [L'instructeur pointe l'image échographique]

A : " Oui c'est ça"

E : "Super"

Dans la situation d'**instruction**, l'instructeur oriente l'apprenant en s'appuyant sur les structures anatomiques identifiées afin de planifier la trajectoire de l'aiguille. Pour cela, il indique les structures et la trajectoire que doit suivre l'aiguille avec son doigt sur l'image échographique (**modalité visuelle et modalité non-verbale**). Il accompagne ces explications avec des descriptions verbales pour préciser l'endroit exact où l'anesthésiant doit être injecté (**modalité verbale**). Dans la situation **feedback**, l'instructeur va questionner l'apprenant sur le choix de la direction de la trajectoire de l'aiguille. Une fois la réponse de l'apprenant, l'instructeur confirme la bonne direction et souligne l'emplacement exact où l'anesthésiant va être propagé. L'apprenant confirme cet emplacement, permettant ainsi à l'instructeur d'être sûr que l'apprenant connaît la trajectoire de l'aiguille et l'emplacement de la zone cible. Ces deux situations montrent que l'instructeur insiste sur l'importance de bien reconnaître les structures anatomiques et de correctement planifier la trajectoire de l'aiguille avant de commencer à réaliser le geste. L'instructeur guide l'apprenant en utilisant des repères visuels et des explications verbales pour assurer une compréhension claire de chaque étape. De plus, dans

le cadre du feedback, l'interaction continue semble renforcer la confiance de l'apprenant dans l'acquisition de ses compétences.

Une fois la trajectoire déterminée et l'aiguille insérée, l'apprenant doit maîtriser la progression de l'aiguille (ST.6) vers la zone cible sans faire bouger l'image échographique, perdre de vue l'aiguille, ni la faire progresser dans les mauvaises structures. Cela nécessite une coordination précise entre la manipulation des instruments et l'observation de l'image échographique. Le guidage de l'aiguille sous échographie est l'une des compétences avec le plus de risque pour la sécurité du patient. L'instructeur doit donc enseigner cette compétence en soulignant l'importance d'une vision continue et claire de l'aiguille à tout moment de la procédure.

Situation d'instruction (Figure 21) : 54765

E : "Tu as vu le bout de l'aiguille, il est là, voilà. C'est possible que je la perde, tu viens là" [L'instructeur montre sur le patient]

A : [L'apprenant regarde l'instructeur]

E : "Tu as vu ?" [L'instructeur regarde l'image échographique]

A : "Oui" [L'apprenant regarde l'image échographique]

E : "Voilà tu as vu"

E : "Toujours on aspire, toujours l'aspiration, n'oublie pas d'aspirer"

A : [L'apprenant regarde la main de l'instructeur tenant la seringue qui est en train d'aspirer]

A : "Chaque fois qu'on bouge l'aiguille on aspire ?" [L'apprenant accompagne sa question de mouvement de la main faisant le geste du mouvement de l'aiguille et de l'aspiration]

E : "Oui, ah oui, ah oui. "

E : "Si tu vois pas l'aiguille, ne progresse pas, ou bien surtout n'injecte pas" [L'instructeur regarde l'image échographique]

A : [L'apprenant regarde l'image échographique]

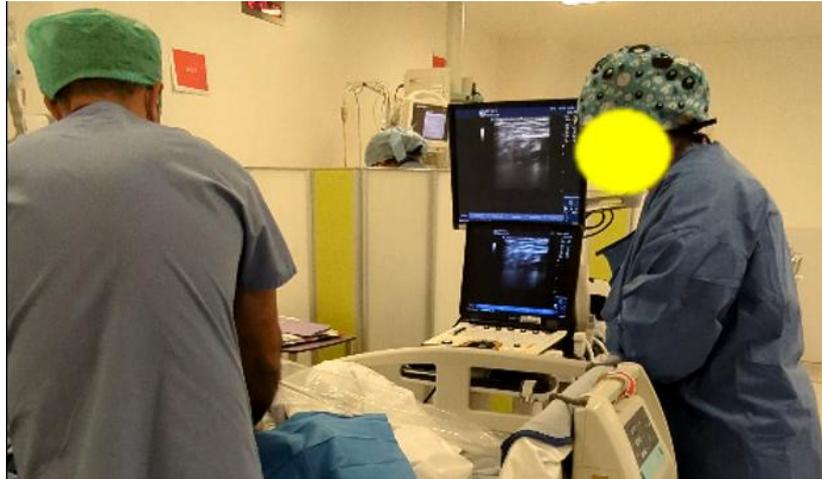


Figure 21 : Démonstration visuelle de l'instructeur (à gauche) sous le regard de l'apprenant (à droite).

Situation de feedback : 7144

E : "Recule un petit peu, recule un petit peu, et tu vas en profondeur, recule un petit peu, faut pas perdre l'image" [*L'instructeur regarde l'image de l'écran d'échographie*]

A : "Hum" [*L'apprenant regarde l'image de l'écran d'échographie*]

E : "Une fois que tu as l'aiguille, voilà recule un petit peu et va un peu en profondeur, légèrement en profondeur"

A : "Hum"

E : "Ah non là tu es trop loin, tu recules là, reviens ici encore, encore, pénètre là, pénètre en profondeur, bravo ! bravo, bravo, maintenant hop, tu as vu" [*L'instructeur explique en pointant sur l'écran d'échographie*]

Lors de la situations d'**instruction**, l'instructeur guide l'apprenant à travers les défis de la manipulation de l'aiguille sous échographie. Il insiste sur la nécessité de maintenir une visualisation claire et constante de l'aiguille, en utilisant à la fois des indications visuelles et des rappels verbaux sur l'aspiration régulière afin de se repérer sur l'image 2D mais aussi pour éviter l'injection involontaire. Il explique clairement que l'aiguille ne doit pas progresser si elle n'est pas clairement visible sur l'écran. Dans la situation de **feedback**, l'instructeur continue de souligner les difficultés rencontrées lors de la

progression de l'aiguille. Il tente de corriger la position de l'apprenant pour retrouver une meilleure visualisation échographique de l'aiguille en encourageant l'apprenant à ajuster la profondeur et la direction de l'aiguille. L'instructeur indique une fois de plus de ne pas perdre l'image de l'aiguille pendant la procédure, ce qui peut compromettre la précision et la sécurité de l'intervention. Ces deux situations montrent que l'apprentissage de cette compétence demande une attention particulière afin d'éviter des conséquences sur la sécurité du patient. Pour enseigner cette compétence, l'instructeur adopte une approche combinant des **démonstrations visuelles** et des **explications verbales** ainsi que des feedbacks immédiats. En insistant sur la visualisation constante et claire ainsi que sur la précision du geste, l'instructeur guide l'apprenant à la manipulation des deux outils (sonde et aiguille) de manière coordonnée avec sa visualisation de l'image.

Enfin, une fois la zone du nerf cible atteinte, l'apprenant doit être en capacité d'injecter l'anesthésiant (ST.7) autour du nerf sans faire bouger l'aiguille ou la sonde et observer la diffusion du produit autour du nerf.

Situation d'instruction : 24675

E : "Regarde hop, attend juste donne-moi ça, tu as ça dans ta main, tu la mets entre ce doigt là et celui-là, d'accord, comme ça" [*L'instructeur fait une démonstration visuelle à l'apprenant*]

A : "Oui, oui"

E : " Et t'appuis sur le bouton avec le pouce, l'avantage ça te permet de contrôler ton aiguille et d'injecter en même temps"

E : "Parce que du coup ce que tu fais toi, tu te positionnes et comme tu lâches ton aiguille, ton aiguille elle bouge un petit peu donc elle est plus bien positionnée, tu vois là du coup j'avance, j'injecte, j'avance encore un tout petit peu, j'injecte"

E : "Ok, j'avance un petit peu, j'injecte un petit peu et en fait ça évite de lâcher ton aiguille parce qu'à chaque fois elle bouge "

A : "Oui"

E : "Tu vois, j'étais au-dessus, j'ai lâché et elle descend ce qui fait que tu dois te

positionner à chaque fois"

E : ""Ok, que cela soit sur un bloc fémoral ou sciatique c'est facile, en gros tu tiens ton aiguille comme une cigarette, la seringue comme ça pour bien la tenir et tu appuies sur le piston et comme ça tu peux bouger et appuyer et éventuellement tu peux aspirer un petit peu, ok ?"

A : "C'est comme ça ?] [*L'apprenant essaie à son tour*]

E : "Tu tends tes doigts pour que tu puisses désolidariser, voilà exactement, non le pouce ici" [*L'instructeur replace les doigts de l'apprenant sur la seringue*]

E : "Voilà et comme ça, tu peux vraiment faire ton geste et injecter sans que ton aiguille bouge entre le moment où tu la positionnes et le moment où tu injectes, ok ?"

A : "Oui"

Situation de feedbacks (Figure 22) : 49914

A : "Je vais injecter encore"

E : " On voit pas bien le produit hein ?" [*L'instructeur regarde l'écran d'échographie*]

A : "Oui"

E : "Oui là c'est, c'est entouré un, très bien" [*L'instructeur pointe l'image de l'écran échographique*]

A : "Ok"

E : " Ça à décoller le psoas donc c'est bon" ²

² psoas : muscle épais et profond, situé entre la colonne vertébrale et le fémur



Figure 22 : Geste de pointage de l'instructeur sur l'écran d'échographie accompagné d'explications verbales.

Dans la situation d'**instruction**, l'instructeur enseigne à l'apprenant comment manipuler correctement l'aiguille et la seringue pour injecter l'anesthésiant sans perturber la position de l'aiguille. Il commence avec une **démonstration visuelle**, montrant comment tenir l'aiguille tout en sur le piston de la seringue. Cette méthode a pour objectif de montrer à l'apprenant comment contrôler l'aiguille et injecter simultanément, en évitant tous mouvements involontaires de l'aiguille. Il guide ensuite l'apprenant en ajustant la position de ses doigts sur la seringue pour assurer une manipulation stable et précise (**modalité haptique**). Lors de la situation de **feedback**, l'instructeur évalue la performance de l'apprenant en observant l'écran d'échographie. Lorsque l'apprenant annonce qu'il va injecter, l'instructeur observe mais ne voit pas le produit dans un premier temps, puis l'apprenant injecte le produit et l'instructeur confirme que l'apprenant à bien entouré le nerf, indiquant la réussite de l'apprenant. Ces deux situations montrent que l'instructeur utilise des **démonstrations visuelles** accompagnées de **retours verbaux** afin d'enseigner la

compétence de l'injection de l'anesthésie. Le **retour haptique** est également utilisé pour corriger la posture (des doigts) de l'apprenant.

Notre travail a pour but de montrer comment les instructeurs enseignent les compétences en anesthésie locorégionale échoguidée. Tout d'abord, l'instructeur a mis l'accent sur la reconnaissance des structures anatomiques, guidant l'apprenant dans l'identification des zones cibles et la planification de la trajectoire de l'aiguille. Ensuite, il a enseigné les techniques de manipulation de l'aiguille et de la seringue en insistant sur l'importance d'une visualisation claire et constante tout au long de la procédure. Pour ce faire, l'instructeur a utilisé des démonstrations visuelles ainsi que des explications verbales détaillées pour illustrer chaque étape, tout en fournissant un feedback immédiat pour corriger les erreurs et renforcer les bonnes pratiques.

L'analyse de ces situations semblent donc montrer que l'instructeur va utiliser des modalités d'interaction visuelles, haptiques, verbales et non-verbales pour enseigner les compétences de l'anesthésie locorégionale échoguidée. Afin de confirmer ces premières observations, nous avons réalisé une analyse quantitative des données obtenues pendant ces observations.

4.5.4.2 Analyse quantitative

4.5.4.2.1 Descriptions des données analysées

Pour les 22 vidéos, nous avons calculé l'occurrence de chaque modalité utilisée par l'instructeur en fonction de la sous-tâche et du type d'interaction, pour un total de 3388 valeurs à renseigner (22 vidéos x 11 modalités x 7 sous-tâche x 2 type d'interaction).

Au total, il y a eu 839 occurrences dont 766 pour les feedbacks (91%) et 73 (8%) pour les instructions. Sur les 91% des feedbacks, il y a 83 % occurrences pour les sous-tâches : ST.6 Maîtriser la progression de l'aiguille (404 occurrences, 53%), ST.7 Injecter l'anesthésiant (145 occurrences, 19%), ST.2 Orienter la sonde (88 occurrences, 11%) et 17 % pour les sous-tâches : ST.3 Repérer les structures anatomiques (73 occurrences, 10%), ST.4 Planifier la trajectoire de l'aiguille (46 occurrences, 6%), ST.5 Insérer l'aiguille (8 occurrences, 2%), ST.1 : Positionner la sonde sur le patient (2 occurrences, 0.4%). Sur les 8%

d'instruction, il y a 66 % occurrences pour les sous-tâches : ST.6 Maîtriser la progression de l'aiguille (23 occurrences, 32%), ST.7 Injecter l'anesthésiant (20 occurrences, 27%), ST.2 Orienter la sonde (5 occurrences, 7%) et 34 % pour les sous-tâches : ST.3 Repérer les structures anatomiques (15 occurrences, 21%), ST.5 Insérer l'aiguille (2 occurrences, 3%), ST.4 Planifier la trajectoire de l'aiguille (3 occurrences, 4%), ST.1 Positionner la sonde sur le patient (5 occurrences, 7%).

4.5.4.2.2 Modalités de communication employées par l'instructeur lors des situations d'instruction

Des tests statistiques non-paramétriques de Friedman ont été utilisés pour déterminer s'il existe des différences significatives entre les occurrences des différentes formes de modalités de communication utilisées par l'instructeur pour fournir des instructions par sous-tâche.

Tableau 5 : Résultat du Test de Friedman pour l'utilisation des modalités par sous-tâches lors des situations d'instructions (** : $p < 0.01$).

Sous-tâche	Test de Friedman (χ^2)	Valeur de p
ST.1 Positionner la sonde sur le patient	12.6	0.246
ST.2 Orienter la sonde	7.38	0.689
ST.3 Repérer les structures anatomiques	16.1	0.095
ST.4 Planifier la trajectoire de l'aiguille	16.4	0.088
ST.5 Insérer l'aiguille	9.0	0.532
ST.6 Maîtriser la progression de l'aiguille	26.6	0.003**
ST.7 Injecter l'anesthésiant	23.9	0.008**

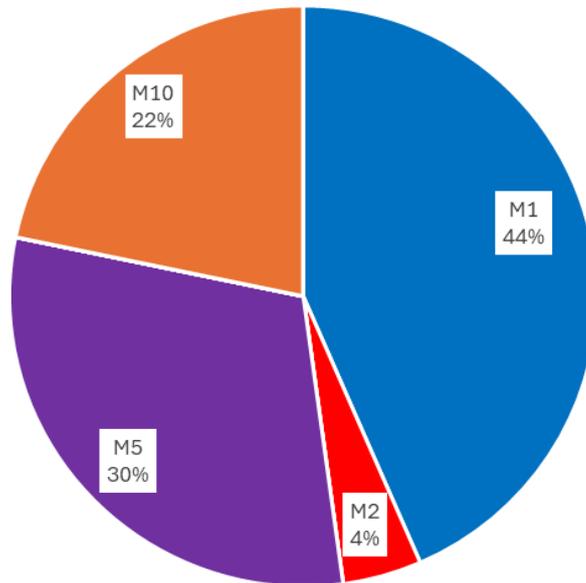


Figure 23 : Représentation graphique indiquant le pourcentage d'utilisation de chaque modalité par l'instructeur lors de l'instruction de la sous-tâche ST6. Maîtriser la progression de l'aiguille.

Pour la sous-tâche ST.6 (Maîtriser la progression de l'aiguille), le test de Friedman (**Tableau 5**) montre un effet significatif de l'utilisation des modalités par l'instructeur lors de l'interaction "instruction". L'utilisation de la modalités VISUELLE (M1) et VERBALE-VISUELLE (M5) semblent dominer les autres modalités avec respectivement 44% et 30% d'utilisation (**Figure 23**). Les comparaisons par paires indiquent que la modalité VISUELLE (M1) a été utilisée davantage que les modalités M3, M4, M5, M6, M7, M8, M9, M11 ($p=0.001$) et M2($p=0.009$). La modalité VERBALE-VISUELLE (M5) a été utilisée davantage que les 7 autres modalités M3, M4, M6, M7, M8, M9, M11 ($p=0.017$).

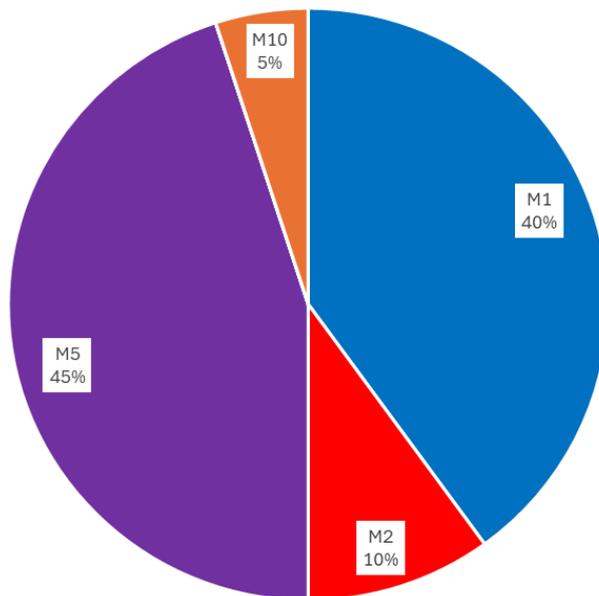


Figure 24 : Représentation graphique indiquant le pourcentage d'utilisation de chaque modalité par l'instructeur lors de l'instruction de la sous-tâche ST7. Injecter l'anesthésiant.

Pour la sous-tâche ST.7 (Injecter l'anesthésiant), le test de Friedman montre un effet significatif (**Tableau 5**) de l'utilisation des modalités par l'instructeur lors de l'interaction "instruction". L'utilisation de la modalités VISUELLE (M1) et VERBALE-VISUELLE (M5) semble dominer les autres modalités avec respectivement 40% et 45% d'utilisation (**Figure 24**). Les comparaisons par paires indiquent que la modalité M1 a été utilisée davantage que les modalités M3, M4, M5, M6, M7, M8, M9, M11 ($p=0.005$), M2 ($p=0.048$), et M10 ($p=0.039$). La modalité VERBALE-VISUELLE (M5) a été utilisée davantage que les 7 autres modalités M3, M4, M6, M7, M8, M9, M11 ($p=0.004$), M2 ($p=0.039$) et M10 ($p=0.032$).

4.5.4.2.3 Occurrence des modalités employées par l'instructeur par sous-tâche lors de l'interaction feedback

Tableau 6 : Résultat du Test de Friedman par sous-tâches lors de l'interaction sous forme de feedback.

Sous-tâche	Test de Friedman (χ^2)	Valeur de p
ST.1 Positionner la sonde sur le patient	10.0	0.440
ST.2 Orienter la sonde	57.0	<0.001***
ST.3 Repérer les structures anatomiques	86.7	<0.001***
ST.4 Planifier la trajectoire de l'aiguille	113	<0.001***
ST.5 Insérer l'aiguille	36.5	<0.001***
ST.6 Maîtriser la progression de l'aiguille	131	<0.001***
ST.7 Injecter l'anesthésiant	129	<0.001***

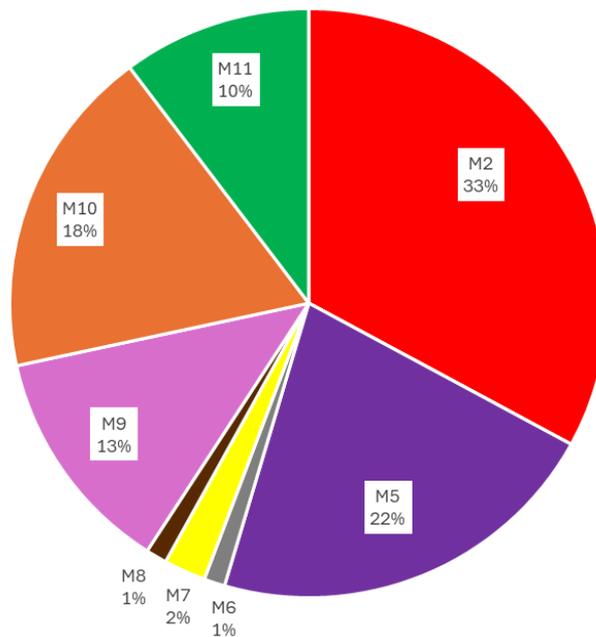


Figure 25 : Représentation graphique indiquant le pourcentage d'utilisation de chaque modalité par l'instructeur lors de l'interaction feedback de la sous-tâche ST2. (Orienter la sonde).

Pour la sous-tâche ST.2 (Orienter la sonde), le test de Friedman montre un effet significatif (**Tableau 6**) de l'utilisation des modalités par l'instructeur lors de l'interaction "feedback". Les modalités VERBALE (M2), VERBALE-VISUELLE (M5), VERBALE-VISUELLE-NON VERBALE (M10) semblent être les plus utilisées, avec respectivement 33 %, 22 % et 18 % d'utilisation (**Figure 25**). Les comparaisons par paires indiquent que la modalité VERBALE (M2) a été utilisée davantage que les modalités M1, M3, M4, M6, M8, M11 ($p < 0.001$), M5 ($p = 0.006$), et M9 ($p = 0.012$). De même, la modalité VERBALE-VISUELLE (M5) a été utilisée davantage que les modalités M1, M3, M4 ($p = 0.004$), M6 ($p = 0.012$), M7 ($p = 0.042$) et M8 ($p = 0.009$). Enfin, la modalité VERBALE-VISUELLE-NON VERBALE (M10) a été utilisée davantage que les modalités M1, M3, M4, M8 ($p < 0.001$), M6 ($p = 0.001$) et M7 ($p = 0.005$).

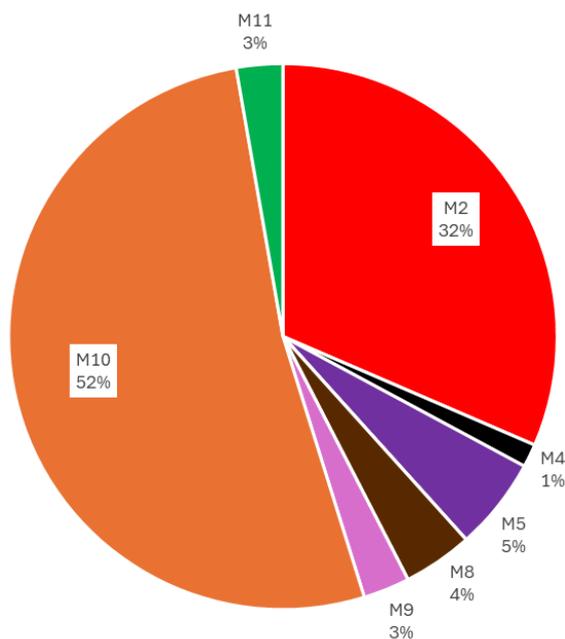


Figure 26 : Représentation graphique indiquant le pourcentage d'utilisation de chaque modalité par l'instructeur lors de l'interaction feedback de la sous-tâche ST.3 (Repérer les structures anatomiques).

Pour la sous-tâche ST.3 (Repérer les structures anatomiques), le test de Friedman montre un effet significatif (**Tableau 6**) de l'utilisation des modalités par l'instructeur lors de l'interaction "feedback". La modalité VERBALE-VISUELLE-NON VERBALE (M10) semble dominer les autres

modalités avec 52 % d'utilisation (**Figure 26**). Les comparaisons par paires indiquent que la modalité VERBALE-VISUELLE-NON VERBALE(M10) a été utilisée davantage que les modalités M1, M3, M4, M5, M6, M7, M8, M9, M11 ($p<0.001$) et M2 ($p=0.031$).

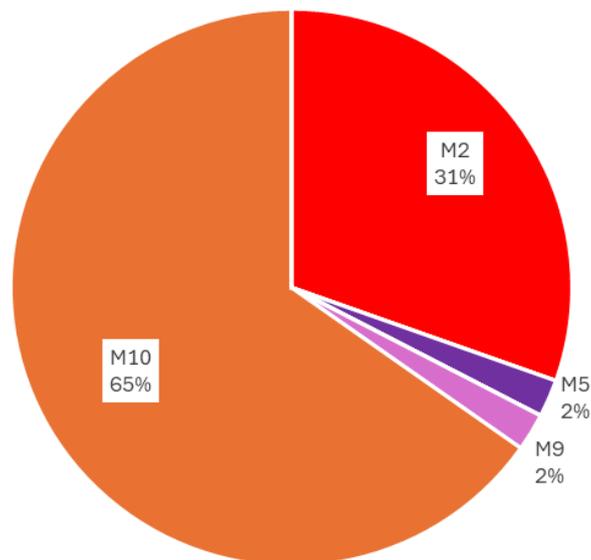


Figure 27 : Représentation graphique indiquant le pourcentage d'utilisation de chaque modalité par l'instructeur lors de l'interaction feedback de la sous-tâche ST.4 (Planifier la trajectoire de l'aiguille).

Pour la sous-tâche ST.4 (Planifier la trajectoire de l'aiguille), le test de Friedman montre un effet significatif (**Tableau 6**) de l'utilisation des modalités par l'instructeur lors de l'interaction "feedback". La modalité VERBALE-VISUELLE-NON VERBALE (M10) domine les autres modalités avec 65 % d'utilisation (**Figure 27**). Les comparaisons par paires indiquent que la modalité VERBALE-VISUELLE-NON VERBALE (M10) a été utilisée davantage que les modalités M1, M2, M3, M4, M5, M6, M7, M8, M9, M11 ($p<0.001$).

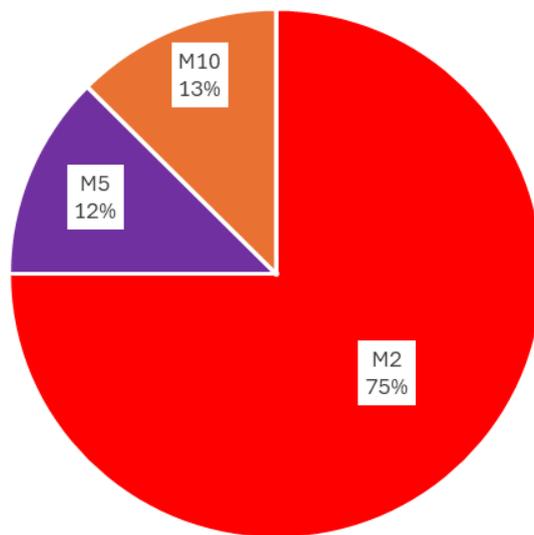


Figure 28 : graphique indiquant le pourcentage d'utilisation de chaque modalité par l'instructeur lors de l'interaction feedback de la sous-tâche ST.5 (Insérer l'aiguille).

Pour la sous-tâche ST.5 (Insérer l'aiguille), le test de Friedman montre un effet significatif (**Tableau 6**) de l'utilisation des modalités par l'instructeur lors de l'interaction "feedback". La modalité VERBALE (M2) domine les autres modalités avec 75 % d'utilisation (**Figure 28**). Les comparaisons par paires indiquent que la modalité VERBALE (M2) a été utilisée davantage que les modalités M1, M3, M4, M5, M6, M7, M8, M9, M10, M11 ($p < 0.001$).

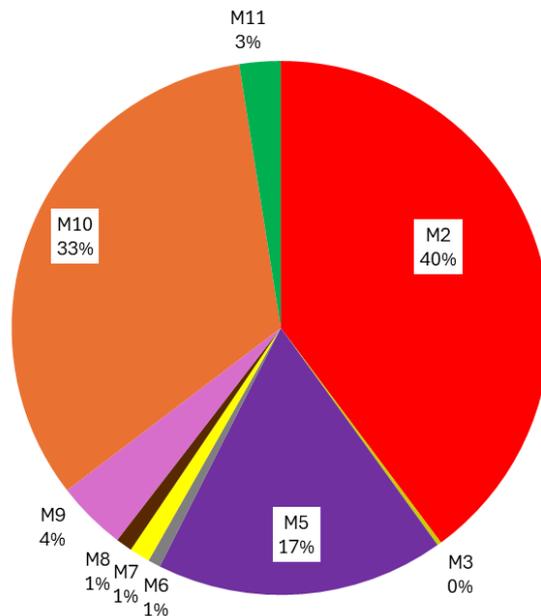


Figure 29 : Représentation graphique indiquant le pourcentage d'utilisation de chaque modalité par l'instructeur lors de l'interaction feedback de la sous-tâche ST.6 (Maîtriser la progression de l'aiguille).

Pour la sous-tâche ST.6 (Maîtriser la progression de l'aiguille) le test de Friedman montre un effet significatif (**Tableau 6**) de l'utilisation des modalités par l'instructeur lors de l'interaction "feedback". Les modalités VERBALE (M2) et VERBALE-VISUELLE-NON VERBALE (M10) semblent être les plus utilisées, avec respectivement 40 % et 33 % d'utilisation (**Figure 29**). Les comparaisons par paires indiquent que la modalité VERBALE (M2) a été utilisée davantage que les modalités M1, M3, M4, M5, M6, M7, M8, M9, M11 ($p < 0.001$). La modalité VERBALE-VISUELLE-NON VERBALE (M10) a été utilisée davantage que les modalités M1, M3, M4, M5, M6, M7, M8, M9, M11 ($p < 0.001$).

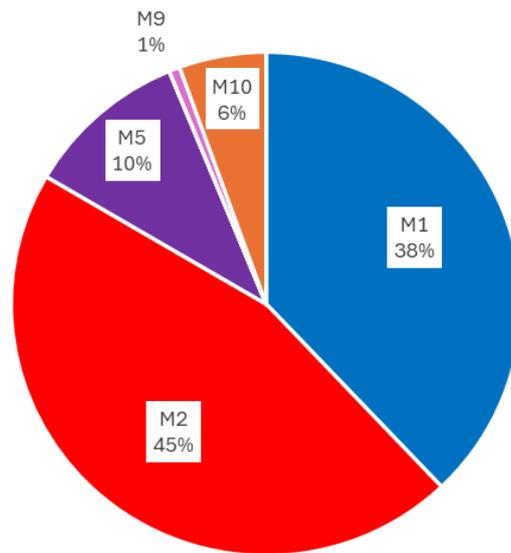


Figure 30 : Représentation graphique indiquant le pourcentage d'utilisation de chaque modalité par l'instructeur lors de l'interaction feedback de la sous-tâche ST.7 (Injecter l'anesthésiant).

Pour la sous-tâche ST.7 (Injecter l'anesthésiant) le test de Friedman montre un effet significatif (**Tableau 6**) de l'utilisation des modalités par l'instructeur lors de l'interaction "feedback". Les modalités VISUELLE (M1) et VERBALE (M2) semblent être les plus utilisées, avec respectivement 38 % et 45 % d'utilisation (**Figure 30**). Les comparaisons par paires indiquent que la modalité VISUELLE (M1) a été utilisée davantage que les modalités M3, M4, M5, M6, M7, M8, M9, M10, M11 ($p < 0.001$). La modalité VERBALE (M2) a été utilisée davantage que les modalités M3, M4, M5, M6, M7, M8, M9, M10, M11 ($p < 0.001$) et M1 ($p = 0.009$).

4.5.5 Discussion

Cette étude observationnelle avait pour objectif de comprendre le processus de transmission des compétences pour l'étape "Réaliser une ALE" entre un instructeur et un apprenant. Pour ce faire, nous avons analysé les interactions multimodales entre les instructeurs et les apprenants durant les phases d'apprentissage par compagnonnage. L'étude révèle de nombreux résultats intéressants.

Les résultats de l'analyse des vidéos indiquent que la majorité (91%) des interactions de l'instructeur ont été employées dans le cadre d'interactions de type feedback plutôt que les instructions (8%). L'apprentissage en médecine suit un concept bien établi dans la littérature nommé : "see one, do one, teach one" (Kotsis & Chung, 2013). Selon ce modèle, l'apprentissage se déroule en trois phases : 1. l'observation, 2. la pratique sous la supervision d'un pair et 3. l'enseignement. Au moment des observations, nous nous trouvons pendant la phase "do one" correspondant à la pratique sous la supervision d'un pair. Cette phase leur permet de mettre en pratique leurs compétences tout en bénéficiant de feedbacks immédiats de la part des instructeurs. Néanmoins, dans certaines situations, les instructeurs ont repris la main sur la réalisation des blocs, en particulier lorsque les apprenants étaient en grande difficulté face à des blocs complexes et potentiellement dangereux, comme ceux situés au niveau du cou. Cela s'est produit à deux reprises sur les 22 vidéos d'observation, lorsque les instructeurs ont estimé que ces interventions étaient nécessaires pour assurer la sécurité du patient et la bonne exécution des gestes. Les apprenants devenaient alors observateurs pendant ces procédures. Ainsi, certaines observations s'intègrent dans la partie "see one" au sein de laquelle les instructeurs donnaient des instructions aux apprenants. Ceci explique donc le faible nombre d'instructions observées dans notre étude.

4.5.5.1 Instructions

Les résultats concernant l'occurrence des modalités pour les instructions émises par l'instructeur ont montré des différences significatives pour les sous-tâches ST.6 Maîtriser la progression de l'aiguille et ST.7 Injecter l'anesthésiant. Les comparaisons pair-à-pair (Durbin-Conver) pour la ST.6 ont montré que les instructeurs utilisent majoritairement la modalité visuelle pour enseigner les compétences liées à cette sous-tâche puis une combinaison de modalité visuelle-verbale. Les résultats pour la ST.7 ont montré l'inverse, les instructeurs utilisent en priorité la combinaison verbale-visuelle puis la modalité visuelle. Cette inversion peut être expliquée par la nature des sous-tâches. La maîtrise de la progression de l'aiguille (ST.6) est une compétence technique pour laquelle un contrôle précis de l'aiguille à travers différents tissus corporels nécessite une attention visuelle

constante pour éviter des structures anatomiques sensibles. Ainsi, l'observation visuelle est cruciale pour comprendre et reproduire le geste précis. Des instructions visuelles, notamment par démonstrations gestuelles, permettent de montrer directement la trajectoire correcte et les mouvements à exécuter, facilitant l'apprentissage par imitation visuelle. Ainsi, l'importance de la précision visuelle peut expliquer la prédominance des instructions visuelles pour cette sous-tâche.

En revanche, la nature de la sous-tâche ST.7 (injection de l'anesthésiant) nécessite non seulement une bonne compréhension de la technique d'injection mais aussi une gestion adéquate de la quantité et du rythme d'injection. Les instructions verbales accompagnées de démonstrations visuelles peuvent fournir des explications détaillées sur le dosage et la méthode de diffusion, offrant un cadre plus complet pour exécuter cette sous-tâche complexe. Ainsi, la combinaison des modalités verbales et visuelles permet à l'apprenant de mieux saisir les nuances de la tâche qui combine technique d'injection avec le rythme du dosage.

On observe également une absence d'instructions haptiques dans ces situations. En effet, ce type d'instruction semble être difficilement applicable dans la réalité. Concrètement, pour que cette modalité fonctionne, l'apprenant devrait poser sa main sur celle de l'instructeur pendant l'exécution du geste. Cependant, cette approche peut être source de gêne ou d'inconfort pour ce dernier. De plus, dans le contexte de ces interventions, l'étroitesse des boxes où se déroulaient les manipulations ajoute une contrainte supplémentaire. La manque d'espace réduisait la possibilité de mettre en œuvre des instructions haptique sans risquer de rendre l'interaction plus inconfortable.

Ainsi, les différences dans l'utilisation des modalités d'instructions pour ces deux sous-tâches peuvent être vues comme des adaptations aux exigences spécifiques des sous-tâches, optimisant ainsi le transfert des compétences. Une autre explication de ces choix de communication serait liée aux préférences et aux expériences antérieures des instructeurs qui ont pu constater que certains types d'instructions sont plus efficaces pour des tâches spécifiques basées sur leurs expériences passées et les retours des apprenants. Enfin,

l'étroitesse du lieu de pratique peut également être un facteur. Cependant, ces hypothèses seront à confirmer avec des entretiens-semi dirigés.

Ces résultats sont cohérents avec la littérature. En effet, Leff, et al. (Leff, et al., 2015) ont examiné l'impact du guidage visuel d'instructeurs sur la stratégie de recherche visuelle des apprenants, ainsi que sur leur compétences motrices. Les résultats indiquent que l'observation visuelle est cruciale pour apprendre des compétences motrices complexes. Ainsi, dans le cas de la ST.6, qui requiert une précision technique et une reproduction précise du geste, l'utilisation prédominante de la modalité visuelle par les instructeurs est cohérente. Les instructions visuelles permettent aux apprenants de visualiser clairement les étapes et comprendre visuellement les mouvements nécessaires. Ces résultats sont également cohérents avec l'étude de (Ehmer & Brône, 2021) qui souligne que les instructions visuelles jouent un rôle clé en aidant les apprenants à internaliser les actions motrices requises. Ils soulignent également qu'une approche multimodale dans l'instruction permettrait d'optimiser l'apprentissage dans différentes tâches. Les résultats de Hodges et Franks (Hodges & Franks, 2002) vont dans le même sens, en démontrant que l'ajout d'instructions verbales claires à des démonstrations visuelles peut clarifier les concepts abstraits et aider à éviter les erreurs critiques pendant l'exécution de la tâche expliquant ainsi le choix de cette combinaison pour la ST.7. Enfin, concernant les instructions haptiques, le recours aux environnements virtuels pourrait être un terrain d'expérimentation prometteur pour évaluer l'impact de cette modalité. Dans ce cadre, il devient possible de simuler des interactions haptiques sans les contraintes physiques du monde réel.

En résumé, ces résultats montrent que le choix entre des instructions unimodales ou multimodales dépend étroitement de la nature spécifique des sous-tâches et des compétences nécessaires à leur exécution. Ce choix est également conditionné par des contraintes humaines, telles que l'inconfort potentiel des instructeurs, et matérielles, comme l'espace restreint du lieu de pratique.

4.5.5.2 Feedbacks

Les résultats ont montré que sur les 766 occurrences de feedbacks, 645 concernent les sous-tâches ST.2, ST.5, ST.6 et ST.7, tandis que 121 concernent les sous-tâches ST.1, ST.3 et ST.4. Cette différence peut s'expliquer par la complexité variable des sous-tâches et les besoins des apprenants. Selon les travaux d'O'Connor et al. (O'Connor, Schwaitzberg, & Cao, 2008), il est essentiel de calibrer le niveau de feedback en fonction de la complexité de la tâche et des besoins des apprenants pour optimiser l'apprentissage et développer des compétences de manière efficace et autonome. Ces conclusions s'illustrent dans nos résultats qui montrent qu'il y a une absence d'effet significatif pour la sous-tâche ST.1, comme l'indique le (**Tableau 6**). Ceci peut s'expliquer par le faible nombre d'occurrences observées pour cette sous-tâche : seulement 2 sur 766. Ainsi, la faible complexité de ST.1 pour les apprenants réduit la nécessité de feedbacks fréquents de l'instructeur, ce qui illustre bien les conclusions d'O'Connor et al. (O'Connor, Schwaitzberg, & Cao, 2008) concernant le besoin de feedbacks moins fréquents pour les tâches simples.

On observe un total de 645 occurrences sur 766, indiquant une plus grande complexité pour les sous-tâches ST.2, ST.5, ST.6 et ST.7. La complexité de ces sous-tâches peut être expliquée par le fait qu'elles soient des sous-tâches de manipulation d'outils qui font intervenir des compétences techniques telles que la coordination œil-main.

Les résultats des sous-tâches *ST.2 Orienter la sonde*, *ST.5 Insérer l'aiguille*, *ST.6 Progression de l'aiguille* et *ST.7 Injection de l'anesthésiant* révèlent l'utilisation prédominante des feedbacks verbaux par l'instructeur. Ces sous-tâches, comme illustré dans la sous-partie sur les transcriptions, impliquent des actions délicates demandant une dextérité et une précision du geste. La manipulation d'outils tel que l'aiguille représente un risque pour les patients, d'où l'importance des feedbacks verbaux immédiats qui permettent à l'instructeur d'intervenir immédiatement pour corriger les erreurs de l'apprenant, pour le guider ou encore pour arrêter une action s'il le juge nécessaire. Ces feedbacks verbaux sont essentiels notamment pour des sous-tâches où la coordination œil-main et la précision sont nécessaires (Chang, 2013). Ces résultats sont en accord avec la littérature, comme

en témoignent les recherches de Blom, et al. (Blom, et al., 2007) et Sutkin et al. (Sutkin, Littleton, & Kanter, 2015) qui soulignent que les instructeurs recourent fréquemment aux retours verbaux pour guider et corriger les apprenants en fournissant des retours en temps réel lors de gestes chirurgicaux complexes.

On observe également pour les sous-tâches ST.2, ST.3, ST.4 et ST.6 un résultat significatif avec la combinaison des modalités verbale, visuelle et non-verbale (M10). L'utilisation d'informations non-verbales couplées à des informations visuelles et verbales permet à l'instructeur de mettre en valeur les indices visuelles comme les structures cibles ou encore la trajectoire que doit prendre l'aiguille. Ces résultats sont en accord avec l'étude de Cope et al. (Cope, Bezemer, Kneebone, & Lingard, 2015) qui souligne l'importance de cette combinaison pour l'enseignement et l'apprentissage de l'interprétation des indices visuels lors des interventions chirurgicales. De plus, l'emploi de feedbacks verbaux en plus de la combinaison de modalités visuelles et non-verbales pour enseigner ces compétences d'identification pourrait renforcer le référentiel commun entre l'instructeur et l'apprenant. Cette approche est soutenue par l'étude de (Baker, Hansen, Joiner, & Traum, 1999) indiquant l'importance de la communication verbale pour améliorer la compréhension mutuelle dans des contextes d'apprentissage complexes. Cette idée est également évoquée dans l'étude de Mentis et al. (Mentis, Chellali, & Schwaitzberg, 2014).

La sous-tâche ST.2 marque aussi une utilisation importante de la combinaison des modalités verbales et visuelles (M5). Ce résultat peut s'expliquer par le fait que cette sous-tâche requiert une compréhension spatiale de la manipulation de ces outils. Ainsi, comme l'indique l'étude de Mayer (2002), le recours à des combinaisons multimodales peut aider à renforcer la compréhension spatiale et à réduire la charge cognitive en fournissant des informations redondantes mais complémentaires (Mayer, 2002). La théorie du double codage de Paivio (Paivio, 1990) indique également que les informations verbales et visuelles peuvent interagir et se compléter afin de renforcer la mémorisation et la compréhension des concepts.

L'analyse des communications lors de la sous-tâche ST.7 indique une utilisation importante de la modalité visuelle (M1). L'utilisation de cette modalité par l'instructeur peut se justifier en raison du besoin de retours visuels sur la propagation de l'anesthésiant afin de savoir si le nerf est bien entouré. La nature de cette sous-tâche exige un bon contrôle de la technique d'injection mais aussi la gestion adéquate de la quantité et du rythme d'injection. Ainsi, l'étude de Kim, et al. (Kim, et al., 2023) indique que les retours visuels sont cruciaux pour la communication dans des tâches nécessitant une précision fine. De plus, l'étude de Magill et Anderson (Magill & Anderson, 2010) indique que les retours visuels sont importants particulièrement dans le contrôle et l'apprentissage moteur car ils communiquent des informations sur les mouvements facilitant un ajustement, si nécessaire.

Enfin, l'utilisation limitée et non significative de la modalité haptique, seule ou combinée avec d'autres modalités peut s'expliquer dans un premier temps par la limite de l'espace de travail. En effet, l'espace de travail réduit restreint la liberté de mouvement et la capacité à interagir de manière tactile. Cette limitation entrave non seulement la précision des gestes, mais elle peut également gêner la communication haptique entre l'instructeur et l'apprenant. Une deuxième explication serait que selon les conclusions de Heslin (1974), le toucher peut remplir plusieurs fonctions, telles que montrer de l'affection, offrir un soutien ou renforcer une directive, mais son interprétation varie fortement en fonction des individus et du contexte. Ainsi, la crainte de malentendus ou d'interprétations erronées pourrait également expliquer l'usage restreint du toucher dans des environnements professionnels, comme celui de l'enseignement médical (Heslin, 1974). La troisième explication est le désir des internes de maintenir leur indépendance en pratique. Ils redoutent que les instructeurs interviennent, par exemple, en prenant leur main ou en les remplaçant, ce qui les priverait des précieuses occasions de s'exercer. Comme souligné dans l'étude de (Popov, et al., 2024), les internes veulent accomplir les parties cruciales de l'opération de manière autonome et perçoivent les interventions des instructeurs responsables comme des échecs. Néanmoins, ces trois hypothèses seraient à confirmer avec des entretiens semi-dirigés.

En résumé, similairement aux instructions, l'utilisation de feedback unimodales ou multimodales dépend de la nature spécifique des sous-tâches et donc des compétences qu'elles impliquent.

4.5.6 Conclusion

Nos deux études observationnelles avaient pour objectif de comprendre comment la procédure d'anesthésie locorégionale échoguidée est réalisée et comment les instructeurs transmettent les compétences aux apprenants lors de l'apprentissage par compagnonnage de cette procédure. Pour cela, nous avons d'abord proposé un modèle des tâches qui a été validé par les experts du domaine. Nous avons également identifié les compétences nécessaires à la réalisation de la procédure d'anesthésie locorégionale échoguidée, et les avons associées aux différentes sous-tâches de la procédure. Enfin, nous avons étudié les communications instructeurs-apprenant pendant la phase d'apprentissage par compagnonnage. Les résultats de cette dernière étape ont montré l'importance des instructions et des feedbacks immédiats dans l'enseignement du geste de l'anesthésie locorégionale échoguidée. Les instructeurs utilisent différentes modalités de communication afin de transmettre leurs compétences. Ces modalités sont majoritairement verbales au travers d'explications verbales mais également visuelles au travers de démonstrations visuelles. Néanmoins afin de guider et corriger l'apprenant, l'instructeur emploie également des combinaisons de modalités. L'emploi d'instructions et de feedbacks multimodaux dépend de la nature de la sous-tâche et donc du type de compétences à enseigner. Cette constatation finale fait écho à l'étude de Chellali et al. (Chellali, Dumas, & Milleville-Pennel, 2012) qui en vient à la même conclusion. Les résultats de cette étude observationnelle apportent de premières pistes afin de consolider notre modèle d'interaction. Ce modèle sera une base pour guider la conception et l'évaluation des interactions unimodales et multimodales pour l'enseignement des compétences techniques au sein d'environnements virtuels collaboratifs immersifs.

4.5.6.1 *Limites et perspectives*

Bien que notre étude fournisse des informations sur l'emploi des modalités par l'instructeur lors de l'apprentissage des compétences à l'anesthésie locorégionale échoguidée, elles présentent certaines limites. Le nombre de vidéos analysées et la nature subjective de la codification des interactions peuvent influencer les résultats. Dans de prochaines études, il serait important de faire valider la codification par les instructeurs et de pouvoir observer un plus grand nombre de procédures d'anesthésie locorégionale échoguidée entre un instructeur et un apprenant et cela dès le début de leur apprentissage. De plus, les contraintes du terrain avec le manque de place et le bruit constant a peut-être également impacté les résultats et notamment sur l'emploi de certaines modalités par rapport à d'autres. C'est pourquoi, des analyses complémentaires comme des entretiens semi-dirigés devront être réalisées pour compléter le travail réalisé.

4.5.7 Applications du modèle d'interaction

L'étude observationnelle réalisée est un outil intéressant pour comprendre et modéliser les interactions complexes entre instructeurs et apprenants, particulièrement dans des contextes pratiques et techniques comme l'anesthésie locorégionale échoguidée. En observant les interactions réelles entre instructeurs et apprenants, l'étude met en lumière les dynamiques de l'apprentissage, révélant comment les instructeurs transmettent des compétences techniques. Contrairement aux méthodes théoriques ou simulées, l'observation sur le terrain permet d'étudier les interactions dans leur contexte naturel, offrant une vue précise des défis et des pratiques courantes. Les résultats obtenus fournissent une base empirique solide pour le modèle d'interaction (**Figure 31**), garantissant que celui-ci soit fondé sur des pratiques réelles plutôt que sur des hypothèses théoriques non testées. Cette étude a révélé comment les instructeurs adaptent leurs communications en fonction de la complexité des compétences à enseigner. Ce modèle servira de base pour guider la conception et l'évaluation des interactions multimodales pour l'enseignement des compétences techniques dans les EVC immersifs. Il est important de noter que notre objectif n'est pas nécessairement de reproduire ces mêmes formes de communication dans les environnements virtuels

immersifs. Notre démarche de conception vise plutôt à tirer profit du contexte des technologies de la réalité virtuelle pour imaginer de nouvelles formes de communication, plus adaptées aux environnements virtuels collaboratifs. Dans cette optique, le modèle proposé servira de cadre pour guider la conception tout en explorant les nouvelles possibilités que ces technologies peuvent offrir.

Dans la figure suivante, nous proposons donc un exemple concret de l'utilisation de notre modèle d'interaction afin de décrire la dynamique des communications multimodales entre l'instructeur et l'apprenant dans le cadre de l'anesthésie locorégionale. Ce modèle pourra être utilisé dans le futur pour étudier la communication multimodale pendant la formation par compagnonnage dans d'autres contextes.

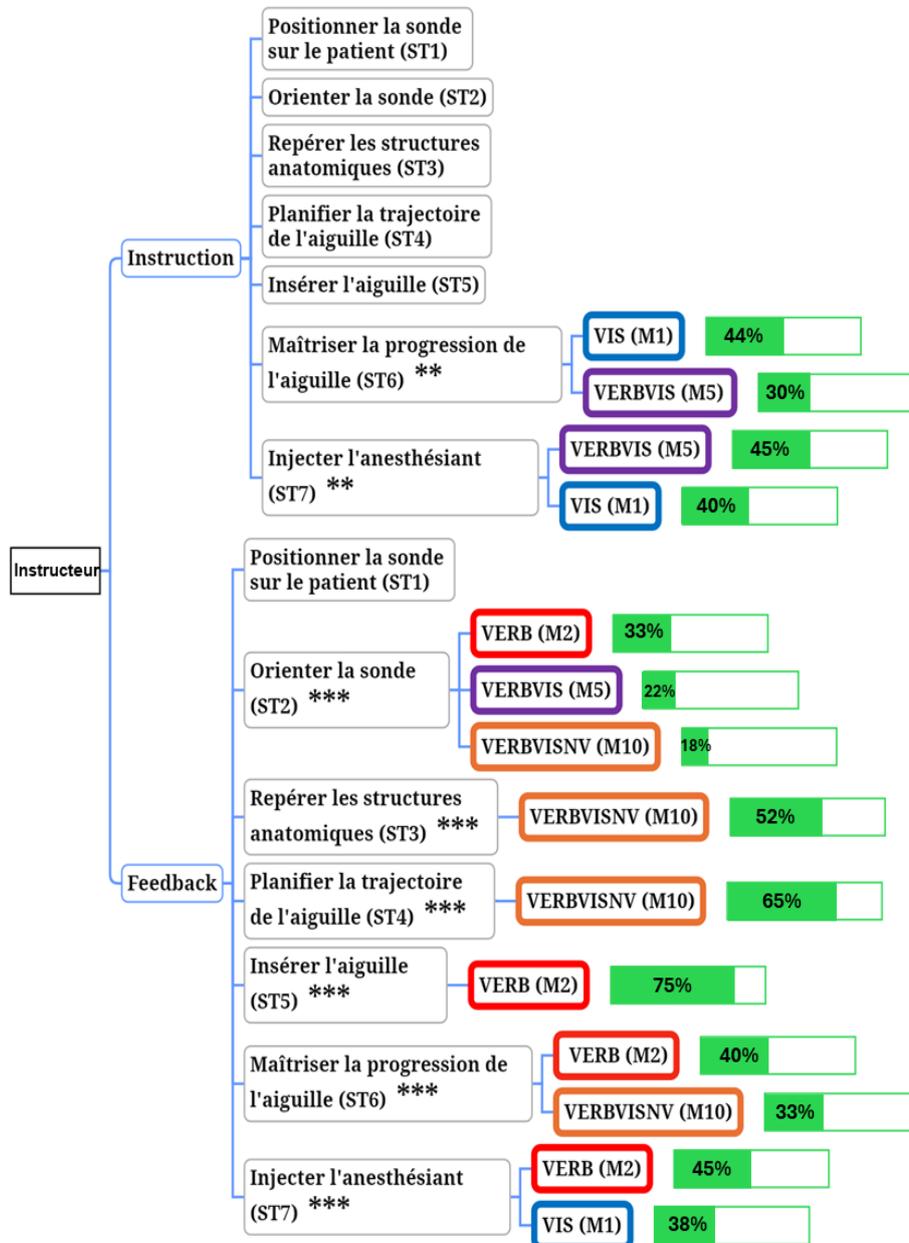


Figure 31 : Modèle d'interaction de l'instructeur pour l'apprentissage de l'étape "Réaliser une ALE". Les couleurs représentent les modalités utilisées : le rouge (verbale), le bleu (visuelle), le violet (verbale-visuelle) et l'orange (verbale, visuelle et non-verbale). Les symboles « ** » et « *** » indiquent la significativité (valeur de p au test de Friedman) selon les résultats présentés dans le Tableau 5 (p.116) et le Tableau 6 (p.119). Enfin, les pourcentages indiquent la fréquence d'utilisation de chaque modalité ou combinaison de modalités selon chaque sous-tâches.

4.5.8 Implications pour la conception des techniques d'interaction dans les environnements virtuels collaboratifs

L'intégration des techniques d'interaction dans les environnements virtuels collaboratifs doit tenir compte des différences modalités de communication employées dans le réel. Chacune présente des caractéristiques spécifiques qui peuvent enrichir l'expérience d'apprentissage tout en répondant aux besoins des apprenants.

4.5.8.1 *Communication verbale*

La communication verbale, largement employée pendant les interactions dans le réel, se distingue par sa facilité d'utilisation et son efficacité pour transmettre des informations complexes notamment sur des compétences qui demandent de la précision. Elle est donc essentielle pour guider, fournir des explications et donner des retours correctifs ou sur la performance des apprenants. Dans un environnement virtuel, la verbalisation peut être reproduite de manière efficace grâce à des outils de communication vocale en temps réel, permettant une interaction directe entre l'instructeur et l'apprenant dans l'environnement immersif. En intégrant des outils de communication verbale, il est possible de reproduire une expérience d'apprentissage proche de celle vécue en face à face, favorisant ainsi une meilleure assimilation des compétences.

4.5.8.2 *Communication non verbale*

Bien que la communication non verbale joue un rôle significatif dans les interactions humaines, sa reproduction dans un cadre virtuel représente un défi. Dans le monde réel, les gestes, les expressions faciales, la direction du regard et le langage corporel renforcent les messages verbaux et visuels et permettent une compréhension plus riche et plus nuancée. Cependant, ces éléments sont souvent difficiles à simuler de manière fidèle dans un environnement virtuel. Pour surmonter cette difficulté, il est crucial d'explorer des alternatives qui puissent compenser l'absence de communication non verbale directe.

4.5.8.3 *Communication visuelle*

La communication visuelle est une modalité omniprésente et essentielle pour l'apprentissage de compétences techniques. Dans le monde réel, les démonstrations visuelles et l'utilisation de supports visuels sont des outils pédagogiques efficaces qui facilitent la compréhension des concepts complexes. Dans un environnement virtuel, cette modalité peut être reproduite en intégrant des éléments visuels tels que les avatars des utilisateurs, les vidéos, ou encore les animations 3D. De plus, il est possible d'explorer d'autres possibilités offertes par les environnements immersifs. Nous pouvons permettre, par exemple, à l'apprenant d'observer le geste de l'instructeur à travers une perspective à la première personne lors des instructions ou encore afficher l'avatar de l'instructeur en transparence d'une manière colocalisée avec celui de l'apprenant pour donner des feedbacks sur les gestes techniques réalisés par ce dernier. Ces aides, difficilement imaginables dans le monde réel, permettraient de réduire la charge mentale des apprenants (en limitant par exemple le nombre de rotations mentales nécessaires pour projeter les informations visuelles dans le repère personnel de l'apprenant) et d'offrir ainsi une meilleure expérience d'apprentissage.

4.5.8.4 *Communication haptique*

La communication haptique, bien que rarement utilisée dans le monde réel en raison des risques de perturbation lors de la manipulation d'outils entre l'apprenant et l'instructeur ou encore des contraintes liées à l'environnement, présente un potentiel intéressant dans un contexte virtuel. Les informations fournies par cette modalité, comme les forces appliquées ou les propriétés mécaniques des tissus sont non négligeables lors de l'apprentissage des procédures médicales. Malgré les défis liés à la reproduction réaliste des sensations tactiles, cette modalité pourrait améliorer les interactions et la communication dans les environnements virtuels. Par exemple, dans un scénario de manipulation d'outils, des dispositifs haptiques connectés en mode maître-esclave permettraient à l'instructeur de superviser le geste de l'apprenant et d'intervenir en cas d'erreur, en simulant des sensations tactiles pertinentes, sans perturber la pratique ni gêner l'apprenant ou être limité par l'environnement physique. Cela créerait une expérience

d'apprentissage plus représentative de la pratique dans le monde réel sans être gêné par les contraintes présentes dans celui-ci.

En conclusion, l'intégration des techniques d'interaction dans les environnements virtuels collaboratifs doit s'inspirer des modes de communications du monde réel tout en exploitant les atouts offerts par les technologies de réalité virtuelle. Les études qui seront présentées dans les chapitres suivants visent donc à explorer de nouvelles méthodes d'interaction adaptées aux contraintes spécifiques et aux possibilités offertes par les environnements virtuels, tout en favorisant l'apprentissage.

5 CHAPITRE 4 : TECHNIQUES D'INTERACTION POUR TRANSMETTRE DES INSTRUCTIONS PENDANT L'APPRENTISSAGE D'UN GESTE TECHNIQUE EN ENVIRONNEMENT VIRTUEL

Nos observations sur le terrain ainsi que le modèle d'interaction proposé précédemment nous permettent d'avoir des premières pistes de réflexion pour concevoir les techniques d'interaction destinées à soutenir la formation par compagnonnage dans les environnements virtuels collaboratifs. Dans ce chapitre, nous présentons deux études exploratoires dont l'objectif est d'évaluer l'impact de différentes modalités de communication pour transmettre des instructions entre un instructeur et un apprenant pendant l'apprentissage d'un geste technique de manipulation d'outils dans un environnement virtuel collaboratif. Ces études nous permettront de comprendre l'impact de chaque modalité sur la communication et le transfert de compétences mais cette fois dans des environnements virtuels lors d'interactions différentes entre l'instructeur et l'apprenant.

Choix de conception

Comme discuté dans le chapitre précédent, l'intégration des techniques d'interaction dans les environnements virtuels collaboratifs doit à la fois s'inspirer des communications réelles tout en exploitant les avantages des technologies immersives. Dans cette optique, nous avons fait un certain nombre de choix de conception afin de tester les modalités de communication dans les environnements virtuels collaboratifs. Ceci nous permettra de prendre des décisions quant aux modalités d'interaction à privilégier afin de créer des expériences d'apprentissage optimisées.

La modalité non verbale représente un aspect crucial de la communication dans le monde réel. Cependant, son utilisation dans des environnements virtuels s'avère plus difficile à mettre en œuvre. Des technologies actuelles permettant d'intégrer le suivi oculaire ou l'analyse des expressions faciales peuvent offrir des solutions potentielles pour reproduire certains signaux non verbaux compenser

ces limitations. Néanmoins, elles ajoutent souvent des contraintes techniques. Pour cette raison, nous avons choisi de ne pas intégrer cette modalité dans nos études. Pour pallier ce manque, nous explorons des alternatives visant à compenser l'absence de communication non verbale, avec l'objectif de maintenir une interaction efficace sans recours direct à cette modalité.

Concernant la communication verbale, elle demeure une composante clé dans les interactions en face-à-face, particulièrement pour transmettre des informations complexes et guider les apprenants. Dans notre première étude, nous avons opté pour une communication verbale directe entre l'instructeur et l'apprenant. Ceci permettait de simplifier le dispositif expérimental tout en reproduisant une expérience d'apprentissage proche de celle que l'on retrouve dans le monde réel. Néanmoins, il est assez simple d'utiliser des casques audio pour permettre une interaction à distance.

Dans le monde réel, nous avons observé que la communication visuelle lors des instructions repose souvent sur des démonstrations visuelles de la part de l'instructeur. L'apprenant se positionne soit à côté, soit en face de l'instructeur, et son attention se porte principalement sur la main de ce dernier, qui manipule l'outil. Cette observation a orienté notre choix de conception vers une représentation virtuelle de la main qui se révèle être l'élément central pour la compréhension et le suivi du geste. L'étude menée par Katsumata et al. (2023) a notamment montré que l'utilisation d'avatars de mains pour des tâches d'imitation de mouvements facilite non seulement la collaboration mais permet également une meilleure reproduction des gestes observés (Katsumata, et al., 2023). De plus, nous avons opté pour une vue à la première personne, un point de vue qui n'est pas possible lors des interactions en face-à-face. En permettant à l'apprenant de voir directement les gestes de l'instructeur, cette perspective pourrait réduire la charge cognitive liées à la rotation mentale, souvent nécessaire pour reproduire un geste observé sous un angle différent. Nous postulons donc que ces choix de conception liés à la modalité visuelle pourraient améliorer l'expérience d'apprentissage

La modalité haptique, qui repose sur le contact physique, a soulevé plusieurs défis dans les interactions en face à face, notamment en

termes de confort et de proximité physique entre l'instructeur et l'apprenant. Dans un environnement virtuel, ces contraintes sont atténuées, ce qui offre de nouvelles possibilités. Nous avons choisi d'explorer cette modalité en utilisant des bras haptiques connectés à distance chacun représentant un outil. Cette configuration est basée sur le principe de maître-esclave. Ceci permet à l'instructeur de guider la main de l'apprenant via le bras haptique tout en réalisant le geste et à l'apprenant de suivre les gestes de l'instructeur sans interférer avec ses mouvements et sans perturber son espace de travail. Cette solution présente l'avantage de minimiser les risques d'intrusion physique, tout en ouvrant la voie à l'exploration de nouvelles façons d'intégrer les sensations haptiques dans les environnements d'apprentissage virtuels.

Enfin, dans notre étude, nous avons choisi de nous concentrer spécifiquement sur la tâche de manipulation d'outils, en lien direct avec nos observations sur le terrain. Ce choix ciblé permet d'examiner en profondeur comment les différentes modalités de communications, une fois médiatisées en environnement virtuel, peuvent influencer la performance des apprenants lors de l'apprentissage d'un geste de manipulation d'outil. Nous rappelons également que notre attention se porte principalement sur le rôle de l'instructeur avec des interactions destinées vers l'apprenant. Après avoir analysé les méthodes et techniques que l'instructeur emploie dans le cadre réel pour enseigner la manipulation d'outil, nous cherchons à adapter ces méthodes dans un cadre virtuel.

Afin d'évaluer l'impact de nos choix de conceptions, nous mettrons en place une série d'expériences. A l'issue de celles-ci, nous formulons des recommandations visant à guider la conception future d'environnements virtuels collaboratifs dédiés à l'apprentissage. Ces recommandations seront basées sur les résultats obtenus et pourront contribuer à l'amélioration des pratiques pédagogiques dans des contextes virtuels.

5.1 EXPERIENCE 1 : EXPLORATION DES INSTRUCTIONS UNIMODALES POUR L'APPRENTISSAGE D'UN GESTE DE MANIPULATION D'OUTIL

5.1.1 Méthodologie

Cette première étude exploratoire (Simon, Hacene, Otmane, & Chellali, 2023) vise à examiner l'impact de chaque modalité de communication employées par un instructeur pour instruire un apprenant sur la manipulation correcte d'un outil. Cette recherche se concentre sur les apprenants recevant des instructions du même instructeur tout en utilisant différentes modalités de communication. Les modalités visuelle, verbale et haptique seront utilisées. Dans cette première étude, chaque modalité de communication sera testée séparément pour transmettre les instructions aux apprenants sur l'exécution d'un mouvement d'outil avec l'amplitude correcte. Après chaque instruction, les apprenants seront invités à reproduire le mouvement aussi précisément et rapidement que possible. Les trois modalités de communication devraient influencer différemment la performance de l'utilisateur, la charge cognitive et l'expérience d'apprentissage. La performance de l'utilisateur sera évaluée en mesurant le temps nécessaire à l'apprenant pour reproduire le mouvement décrit et la précision de ce mouvement. Ceci permettra de mesurer l'efficacité de chaque modalité pour transmettre l'instruction et ainsi acquérir la nouvelle compétence. Un questionnaire standard (NASA-TLX) sera utilisé pour évaluer la charge cognitive. Une charge mentale moins élevée pourrait indiquer la possibilité pour l'apprenant de libérer des ressources pour réaliser d'autres tâches. Enfin, les apprenants évalueront subjectivement la qualité de leur collaboration avec l'instructeur et compareront les différentes modalités selon divers facteurs. Ceci nous donnera des indices sur l'expérience d'apprentissage vécue par chaque apprenant en fonction de la modalité utilisée et nous informera sur leurs préférences en termes de communication dans les environnements virtuels immersifs.

5.1.1.1 Participants

Nous avons recruté 21 participants pour cette étude (18 hommes et 3 femmes), parmi les étudiants et le personnel universitaire. Leur âge

moyen était de 29,23 ans ($\sigma = 8,94$, min = 20, max = 53). Dix-neuf d'entre eux étaient droitiers, et deux étaient gauchers (9,5 %). Tous avaient une vision normale ou corrigée et six portaient leurs lunettes correctrices pendant l'expérience. Seize d'entre eux avaient déjà une expérience préalable de l'utilisation de casques de réalité virtuelle, dont six étaient des utilisateurs réguliers (les utilisant au moins une fois par semaine). Six d'entre eux avaient déjà utilisé des dispositifs haptiques, essentiellement dans le cadre de démonstrations ou des études expérimentales précédentes. Le protocole expérimental a été approuvé à l'avance par le comité d'éthique institutionnel de l'Université Paris-Saclay (CER-PS), et tous les participants ont signé un formulaire de consentement éclairé écrit avant de participer.

5.1.1.2 *Tâche expérimentale*

Pour cette étude, nous avons conçu une tâche spécifique de saisie-transfert afin d'étudier l'impact des modalités de communication entre l'enseignant et l'apprenant sur l'acquisition des compétences en manipulation d'outils. La tâche visait à reproduire la manipulation d'un outil après la démonstration des mouvements par l'instructeur (**Figure 32**). Afin de simplifier la tâche, nous nous sommes uniquement concentrés sur la direction et l'amplitude des mouvements en 2D. Cette simplification était nécessaire pour limiter les biais associés à une tâche complexe, dont les instructions auraient été complexes à produire à travers les trois modalités. De plus, les bras utilisés pour fournir les instructions haptiques ne permettent pas d'avoir un retour de force que sur 3 degrés de liberté (uniquement en translation). Ceci nous empêchait de fournir des instructions avec des mouvements de rotation de l'outil (similaires aux rotations d'une aiguille, par exemple). Néanmoins, les instructions utilisées restent basées sur nos observations sur le terrain (par exemple, lorsque l'instructeur demande à l'apprenant de déplacer l'aiguille de quelques millimètres dans une direction donnée).

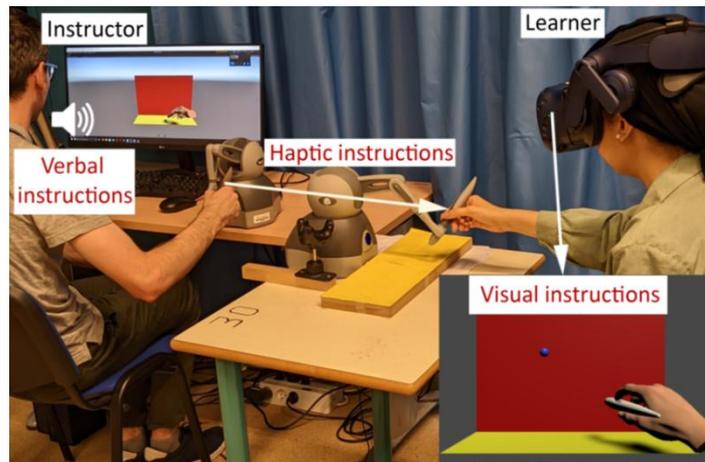


Figure 32 : Tâche expérimentale

Concrètement, la tâche (**Figure 32**) consistait à déplacer une sphère 3D de sa position initiale à une position finale le long d'un seul axe (axe X, Y ou Z). La **tâche** consistait à saisir à l'aide d'un outil virtuel, une petite sphère 3D située à une position de départ définie et à la déposer à une position finale désignée. L'amplitude du mouvement (**compétence à acquérir**) à effectuer pour accomplir cette tâche était inconnue pour le participant (**apprenant**), qui en recevait des **instructions** de la part de l'expérimentateur (**instructeur**) à l'aide de trois **modalités** différentes : verbale, visuelle et haptique. Par conséquent, la tâche était divisée en deux phases : (1) la phase d'instruction : pendant laquelle l'expérimentateur transmettait au participant l'amplitude et la direction du mouvement à effectuer via une modalité (selon la condition expérimentale), et (2) la phase de manipulation : pendant laquelle le participant devait reproduire de manière autonome le mouvement décrit avec l'amplitude correcte.

Cette situation d'apprentissage peut être décrite à travers notre modèle d'interaction comme suit (**Figure 33**) :

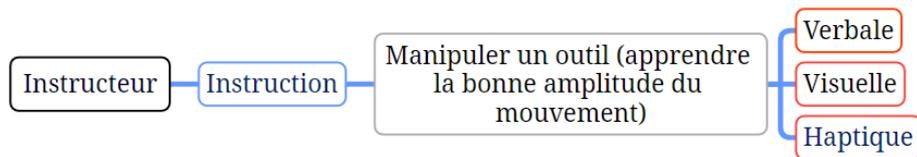


Figure 33 : Projection de l'expérience 1 sur le modèle d'interaction.

5.1.1.3 Dispositif expérimental et environnement virtuel

L'équipement utilisé comprenait un casque de réalité virtuelle Vive Pro pour visualiser l'environnement virtuel immersif (**Figure 34**). Ce casque offre une résolution de 2880 × 1600 pixels, avec un taux de rafraîchissement de 90 Hz et un champ de vision de 110 degrés. De plus, un dispositif haptique Geomagic Touch, avec un espace de travail de 160 mm x 120 mm x 70 mm, a été utilisé pour manipuler les objets virtuels et recevoir les instructions haptiques. Le point de vue de l'utilisateur ainsi que les positions du dispositif haptique et de la table étaient suivis à l'aide du système Lighthouse de Vive. Ainsi, un tracker Vive 3.0 (fixé à la table) a été utilisé pour l'étalonnage et pour assurer la correspondance entre les mondes physique et virtuel. En utilisant Unity 3D avec C# (version 2020.3.4) et le plugin SteamVR, un environnement virtuel de base a été créé. Il se composait de deux surfaces planes perpendiculaires, mesurant 44 cm x 15 cm, de couleur jaune (horizontale) et rouge (verticale) respectivement. Ces surfaces étaient affichées aux participants pendant la phase d'instruction dans toutes les conditions expérimentales (**Figure 35-A**). Dans la condition visuelle, l'environnement virtuel comprenait un outil virtuel, une sphère bleue, et la représentation virtuelle de la main de l'instructeur (**Figure 35-B**).

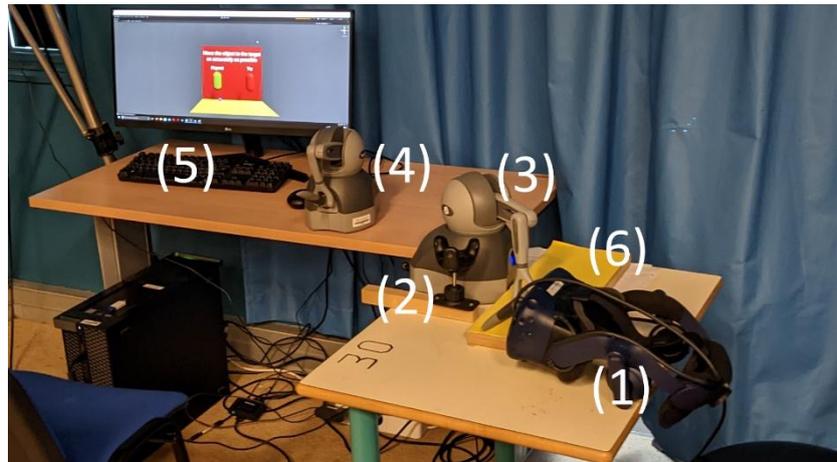


Figure 34 : Dispositif expérimental composé d'un casque de réalité virtuelle (1), de deux bras haptiques (3,4), Vive Tracker (2), écran de supervision de l'expérimentateur (5) et une planche jaune utilisée pour améliorer l'estimation des distances (6).

Pendant la phase de manipulation, l'environnement virtuel incluait également la sphère bleue à déplacer, l'outil contrôlé par le participant via le dispositif haptique, et une main virtuelle représentant la main du participant (**Figure 35-C**). Pour améliorer la perception des distances dans l'environnement immersif, la main virtuelle était attachée à l'outil et positionnée pour être alignée avec la main réelle du participant, comme recommandé dans des études précédentes (Leyrer, Linkenauger, Bühlhoff, Kloos, & Mohler, 2011; Phillips, Ries, Kaeding, & Interrante, 2010; Ries, Interrante, Kaeding, & Anderson, 2008). Cependant, elle n'était pas animée, car des études récentes ont montré que cela n'affectait pas l'apprentissage des compétences motrices (Ricca, Chellali, & Otrnane, 2021).

Pour améliorer davantage l'estimation des distances, l'environnement virtuel a été conçu pour reproduire étroitement certains éléments de l'environnement réel. Par exemple, une planche en bois de couleur jaune, similaire au plan jaune du monde virtuel, a été placée sur la table (**Figure 34**). Les plans virtuels et physiques étaient de la même taille et étaient colocalisés du point de vue du participant. De plus, l'outil virtuel était positionné de manière à être aligné avec la poignée du bras haptique manipulé par l'appareil et avait la même taille, couleur et forme. De plus, le dispositif haptique était placé de telle manière que

lorsque le participant touchait le plan virtuel avec l'outil virtuel, il ressentait la résistance de la planche en bois avec le stylet du dispositif. Une phase d'étalonnage était nécessaire avant chaque session expérimentale pour garantir l'alignement correct entre les mondes réel et virtuel. À cette fin, le tracker Vive était fixé sur la table (**Figure 34**).

5.1.1.4 Phase expérimentale et Scène virtuelles

Chaque essai se composait d'une série de scènes virtuelles présentées aux participants selon la phase expérimentale. Dans la scène initiale (**Figure 35-D**), les participants devaient lire un message d'instruction expliquant comment les instructions leur seraient transmises en utilisant la modalité actuelle. Ils étaient ensuite placés dans une scène de transition (**Figure 35-E**) contenant une seule capsule 3D et on leur demandait s'ils étaient prêts à commencer l'essai suivant. Ils devaient déplacer le pointeur 3D à l'intérieur de la capsule en utilisant le dispositif haptique, puis appuyer sur le bouton du dispositif pour lancer la phase d'instruction. Seuls les deux plans colorés étaient affichés pendant cette phase, accompagnés d'un message textuel d'attente avertissant les participants que les instructions allaient être données sous peu. Après chaque instruction, une scène de transition (**Figure 35-F**), contenant deux capsules 3D, était affichée incitant les participants à répéter l'instruction si nécessaire. Ceci permettrait de s'assurer que tous les participants aient correctement reçu l'instruction. Dans ce cas, ils devaient choisir la bonne capsule pour réinitialiser la scène virtuelle. Ensuite, le message d'attente était à nouveau affiché avant de fournir l'instruction. Alternativement, les participants pouvaient passer à la phase de manipulation en choisissant la capsule de gauche, ce qui réinitialisait la scène virtuelle, affichant la sphère dans une nouvelle position aléatoire. Puis, les participants devaient utiliser le dispositif haptique pour saisir la sphère (en appuyant sur le bouton du dispositif) et la déplacer conformément à l'instruction reçue. Une fois la sphère arrivée à la position souhaitée, ils devaient appuyer à nouveau sur le bouton pour la déposer. Enfin, la dernière scène les incitait à démarrer l'essai suivant. Après la réalisation du dernier essai pour une condition donnée, les participants étaient invités à retirer le casque de réalité virtuelle et à remplir le questionnaire subjectif.

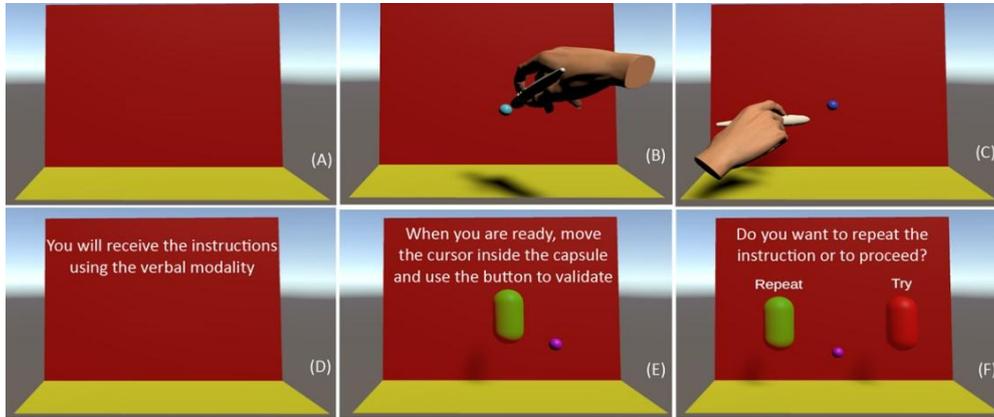


Figure 35 : L'environnement virtuel comprend un plan jaune et d'un plan rouge (A). Les participants voyaient également une sphère bleue et la main virtuelle de l'instructeur (uniquement dans la condition visuelle, B) ou leur propre main virtuelle (seulement pendant la phase de manipulation, C) tenant un outil. L'outil correspondait à la position, à la forme et à la taille du style du dispositif haptique. La planche en bois jaune correspondait au plan virtuel jaune en position et taille. La scène (D) indiquait la modalité à utiliser pour les essais suivants. Dans la première scène de transition (E), les participants indiquaient quand ils étaient prêts à recevoir les instructions. Dans la deuxième scène de transition (F), ils pouvaient répéter l'instruction ou commencer la phase de manipulation.

5.1.1.5 Plan expérimental et conditions

L'étude était basée sur un plan expérimental intra-sujets, avec un seul facteur (modalité d'instruction) comprenant trois conditions : verbale, visuelle et haptique. L'ordre de présentation des trois conditions a été contrebalancé pour éviter tout effet d'apprentissage potentiel. Chaque participant a réalisé 12 essais pour chaque condition, avec quatre mouvements dans chaque direction sur chacun des axes XYZ (gauche/droite ; haut/bas ; avant/arrière). Pour garantir que les mouvements restent dans l'espace de travail du dispositif haptique, les amplitudes des mouvements variaient de 3 à 13 centimètres et étaient sélectionnées de manière aléatoire pour chaque essai tout en étant équilibrées entre les conditions. Cela a donné lieu à un total de 756 essais enregistrés (12 essais x 3 conditions x 21 participants). Comme

discuté précédemment, les trois conditions expérimentales choisies étaient basées sur nos choix de conceptions présentés précédemment. Bien que chaque modalité fournisse aux participants la même information (amplitude et direction du mouvement), les informations étaient encodées différemment en fonction des caractéristiques de chaque modalité, comme décrit ci-après.

Enfin, il est important de noter que pour éliminer tout biais potentiel lié à l'expérimentateur agissant d'une manière différente avec chaque participant, les instructions n'étaient pas fournies en temps réel par l'expérimentateur. Au lieu de cela, elles étaient pré-enregistrées pour les conditions expérimentales visuelles et haptiques afin d'être mieux contrôlées. Cependant, afin de pouvoir évaluer l'expérience d'apprentissage collaborative, les participants n'étaient pas informés de ce choix. A la place, ils ont été informés que les instructions étaient fournies par l'instructeur qui était assis à côté d'eux. Pour ce faire, l'expérimentateur simulait les interactions à l'aide d'un deuxième dispositif haptique. Cette décision de masquer l'absence de l'instructeur s'appuyait sur des recherches montrant que plus les utilisateurs croient qu'une interaction virtuelle est contrôlée par une vraie personne, plus leur expérience est enrichie, et plus ils ressentent une présence sociale (Fox, et al., 2015; Oh, Bailenson, & Welch, 2018).

5.1.1.5.1 Condition visuelle

Comme indiqué précédemment, les mouvements de la main virtuelle étaient pré-enregistrés et non contrôlés en temps réel par l'expérimentateur dans la condition visuelle. Ainsi, les instructions étaient transmises à travers une animation 3D représentant une main virtuelle manipulant l'outil (**Figure 36**). La main virtuelle et l'outil étaient présentés du côté droit du participant pour chaque essai. Ils étaient ensuite déplacés pour saisir la sphère et la placer à une position finale qui variait pour chaque essai, imitant les mouvements de la main de l'expérimentateur pendant la tâche. Cette approche est basée sur le paradigme de démonstration visuelle précédemment observé. Comme expliqué dans nos choix de conception, le participant visualisait la démonstration depuis une perspective à la première personne correspondant à celle de l'instructeur réalisant le mouvement. Aucune instruction supplémentaire n'était fournie. La

sphère était placée dans différentes positions de départ pendant les phases d'instruction et de manipulation pour éviter l'influence potentielle de la mémorisation (visuelle) de la position de la sphère. Ainsi, les participants devaient mémoriser l'amplitude et la direction du mouvement plutôt que la position finale de la sphère.

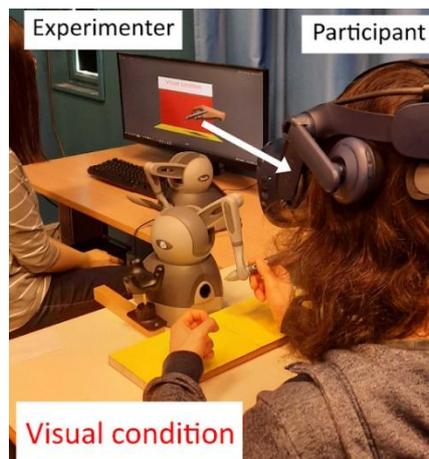


Figure 36 : Condition expérimentale visuelle.

5.1.1.5.2 Condition haptique

Dans la condition haptique, les participants devaient saisir le bras haptique avec leur main droite. Comme indiqué précédemment, les mouvements du bras haptique étaient pré-enregistrés et non contrôlés en temps réel par l'expérimentateur dans cette condition. Ainsi, le bras haptique était déplacé de la position de départ à la position finale, imitant l'exécution de la tâche par l'expérimentateur à l'aide du dispositif haptique (**Figure 37**). En suivant le mouvement du dispositif haptique, les apprenants recevaient à la fois l'amplitude et la direction du mouvement nécessaires pour accomplir la tâche. Comme mentionné dans les choix de conception, cette approche d'enseignement est comparable à la stratégie de main sur main où un enseignant guide la main de l'apprenant pendant l'exécution du mouvement avec l'avantage d'être moins intrusive que la situation réelle. Ainsi, les participants portaient le casque de réalité virtuelle et visualisaient une scène statique de base pendant que le dispositif haptique guidait leur main. Aucune autre information n'était fournie dans cette condition. Pour éviter la mémorisation (kinesthésique) de la

position de l'outil, les positions de départ pendant les phases de manipulation et d'instruction étaient différentes. Ainsi, les apprenants devaient mémoriser l'amplitude et la direction du mouvement plutôt que la position finale du bras.



Figure 37 : Condition expérimentale haptique.

5.1.1.5.3 Condition verbale

L'expérimentateur transmettait l'amplitude dans la condition verbale en fournissant des instructions vocales (**Figure 38**). Pour garantir que tous les participants recevaient exactement les mêmes instructions, l'expérimentateur devait les lire à partir d'un script pendant cette condition. Ainsi à chaque essai, le participant était guidé pour déplacer la sphère dans une direction spécifique (gauche/droite, haut/bas, avant/arrière) et était informé de l'amplitude du mouvement en centimètres. Un exemple d'instruction était : "Déplacez la sphère de cinq centimètres vers la gauche". Ceci reproduit simplement la communication à travers la modalité verbale observée dans les situations réelles. Tout comme dans la condition haptique, le participant portait le casque de réalité virtuelle et visualisait une scène statique simple sans information supplémentaire.



Figure 38 : Condition expérimentale verbale.

5.1.1.6 Procédure expérimentale

Le protocole expérimental est détaillé dans la (**Figure 39**). La première étape consistait à fournir aux participants des informations sur l'étude et l'équipement qu'ils allaient utiliser. Les participants devaient ensuite lire et signer le formulaire de consentement éclairé. Puis, nous leur fournissions une feuille d'instructions détaillant le fonctionnement du prototype, les actions à effectuer et ce qui était attendu d'eux. Ensuite, ils effectuaient un pré-test servant comme base pour contrôler les différences interindividuelles en termes d'estimation des distances du monde réel. Ce test était basé sur un questionnaire papier comprenant huit essais d'estimation de distance différents présentés sur une seule feuille (distances moyennes à estimer = 5,75 cm). Chaque essai comprenait une ligne avec un point de départ et des instructions écrites indiquant la distance et la direction pour positionner le point final à l'aide d'un crayon (par exemple, "placer une marque à 8 cm vers le bas"). Quatre lignes étaient positionnées horizontalement et quatre verticalement. Après ce pré test, les participants devaient compléter un questionnaire démographique. Les participants étaient ensuite confortablement installés sur une chaise et devaient mettre le casque de réalité virtuelle pour effectuer une tâche de familiarisation. Celle-ci visait à les aider à comprendre l'environnement virtuel et les différentes possibilités d'interaction en utilisant le dispositif haptique. Après avoir terminé les étapes pré-expérimentales, l'expérimentation proprement dite commençait. Une fois les douze essais pour une

condition donnée terminés, les participants devaient retirer le casque de réalité virtuelle et répondre au questionnaire NASA-TLX ainsi qu'à un questionnaire sur la qualité de la collaboration en lien avec la condition qui venaient juste de tester. Après, ils remettaient le casque de réalité virtuelle et effectuaient les douze essais pour la condition suivante. Ces étapes étaient répétées pour chaque modalité. Une fois les essais et les questionnaires de la dernière condition terminés, les participants devaient remplir un dernier questionnaire leur demandant de classer les trois modalités selon différents critères en fonction de leur préférence.

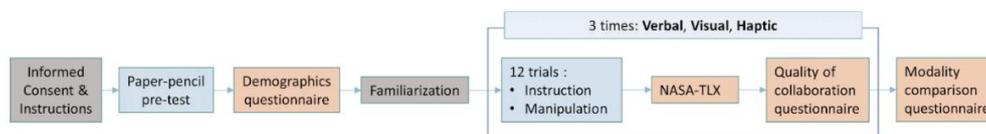


Figure 39 : Protocole expérimental.

5.1.1.7 Mesures et analyses des données

Pour cette expérience, nous avons utilisé à la fois des mesures objectives et subjectives. Les mesures objectives évaluaient la capacité des participants à reproduire le mouvement demandé et comprenaient deux métriques : le temps moyen de manipulation pour tous les essais et l'erreur moyenne d'estimation de distance. Le temps de manipulation pour chaque essai commençait lorsque les participants saisissaient la sphère et se terminait lorsqu'ils la plaçaient à la position finale. Des valeurs plus basses indiquent une meilleure performance. L'erreur d'estimation était basée sur la distance euclidienne moyenne, en centimètres, entre la position finale du centre de la sphère et la position désirée (basée sur l'amplitude indiquée) pour tous les essais. Des valeurs plus basses indiquent de meilleures performances. Les mesures subjectives comprenaient les réponses des participants aux différents questionnaires. Ceux-ci comprenaient un questionnaire sur la qualité de la collaboration sur une échelle de Likert à cinq points, qui évaluait le sentiment de présence, de coprésence et la qualité de la communication avec l'instructeur (**Tableau 7**). Les questions étaient inspirées par des questionnaires similaires utilisés dans la littérature (Nowak & Biocca, 2003; Latoschik, et al., 2017; Gratch, DeVault, Lucas,

& Marsella, 2015), et nous avons également inclus d'autres questions (Q9-Q11) spécifiques à notre étude. Un score plus élevé indiquait une meilleure expérience utilisateur. Le NASA TLX (Hart & Staveland, 1988) était utilisé pour évaluer la charge mentale des participants lors de l'exécution de la tâche. Le choix de ce questionnaire se justifie par sa validité, son applicabilité et sa popularité dans des recherches similaires (Hoppe, Reeb, van de Camp, & Stiefelhagen, 2018; Pouliquen-Lardy, Milleville-Pennel, Guillaume, & Mars, 2016; Vitense, Jacko, & Emery, 2003). Un score moins élevé du NASA TLX indique une charge mentale plus faible. Enfin, les participants répondaient à un questionnaire de comparaison où ils devaient classer les modalités selon onze critères de (**Tableau 8**), du plus préféré au moins préféré.

Le logiciel SPSS (IBM Corp., Armonk, NY, USA) a été utilisé pour effectuer toutes les analyses de données, en se basant sur les tests statistiques appropriés (indiqués lors de la présentation des résultats). Nos analyses statistiques ont été réalisées avec un niveau de confiance de 95 %, et dans les cas où des corrections ont été appliquées, nous avons rapporté les valeurs de p ajustées.

Tableau 7 : *Éléments du questionnaire sur la qualité de la collaboration.*

Q# Texte de la question : Dans quelle mesure...	
Q1	Vous êtes-vous senti immergé dans l'environnement que vous avez vu ?
Q2	L'instructeur a-t-il essayé de créer un sentiment de proximité avec vous ?
Q3	Était-ce comme être dans la même pièce que l'instructeur ?
Q4	Était-ce similaire à une réunion en face à face ? Vous êtes-vous senti isolé de l'instructeur dans l'environnement virtuel ?
Q5	Vous êtes-vous senti isolé de l'instructeur dans l'environnement virtuel ?
Q6	Vous êtes-vous senti connecté avec l'instructeur ?

Q7	L'instructeur a-t-il communiqué de la froideur plutôt que de la chaleur ?
Q8	Avez-vous eu l'impression que l'instructeur essayait de vous aider ?
Q9	Pensez-vous pouvoir apprendre de nouvelles compétences dans cette application ?
Q10	Avez-vous eu l'impression de comprendre correctement les instructions qui vous ont été données ?
Q11	Avez-vous eu l'impression de réaliser correctement vos tâches ?

Tableau 8 : *Éléments du questionnaire de comparaison.*

Q# Critères de classification	
Q1	Quelle était la modalité la plus facile pour comprendre les instructions ?
Q2	Quelle était la modalité la plus appropriée pour recevoir les instructions ?
Q3	Quelle était la modalité la plus précise pour recevoir les instructions ?
Q4	Quelle était la modalité la plus agréable pour recevoir les instructions ?
Q5	Quelle était la modalité la plus perturbante lors de la réception des instructions ?
Q6	Quelle était la modalité la plus facile pour mémoriser les instructions ?
Q7	Quelle était la modalité la plus facile pour reproduire les instructions ?
Q8	Quelle était la modalité la plus éducative pour apprendre les compétences spatiales ?

Q9	Quelle était la modalité la plus engageante pour apprendre les compétences spatiales ?
Q10	Quelle était la modalité la plus efficace pour apprendre les compétences spatiales ?
Q11	Dans l'ensemble, quelle était votre modalité préférée ?

5.1.2 Résultats

5.1.2.1 Mesures objectives

Pour chaque participant, nous avons calculé la moyenne de chaque mesure objective par modalité, ce qui a donné 63 valeurs par mesure (3 conditions x 21 participants).

5.1.2.1.1 Tests de normalité

Tout d'abord, le test de normalité de Shapiro-Wilk a été utilisé pour vérifier la distribution normale des données. Les résultats indiquent que toutes les données, sauf les erreurs d'estimation de distance moyenne pour la condition haptique, étaient normalement distribuées. De plus, le test indique que toutes les données des temps moyens de réalisation étaient normalement distribuées.

5.1.2.1.2 Tests de corrélation

Un test de corrélation a été utilisé pour comparer l'erreur moyenne d'estimation de distance entre le monde réel (en utilisant le test papier-crayon) et l'environnement immersif (mesuré dans chacune des trois conditions expérimentales). Ce test visait à vérifier s'il existait des différences interindividuelles entre les participants pour l'estimation de distance dans le monde réel et si cela était corrélé à leurs estimations dans l'environnement immersif. Suite aux résultats du test de normalité, le test de corrélation de Pearson a été utilisé pour l'erreur moyenne d'estimation de distance entre le pré-test et les conditions verbale et visuelle, tandis que le test de corrélation de Spearman a été

utilisé entre le pré-test et les données de la condition haptique. Les résultats montrent qu'il n'existe aucune corrélation significative entre les erreurs d'estimation de distance dans la condition visuelle ($p = 0,66$) et le pré-test. En revanche, une corrélation positive modérée a été trouvée entre le pré-test et la condition verbale ($r = 0,585$, $p = 0,005$). Enfin, la corrélation entre la condition haptique et les données du pré-test était marginale ($p = 0,055$).

5.1.2.1.3 Erreur d'estimation d'amplitude

Étant donné que les données n'étaient pas normalement distribuées pour la condition haptique, le test non paramétrique de Friedman a été utilisé pour les comparaisons de moyennes entre les conditions.

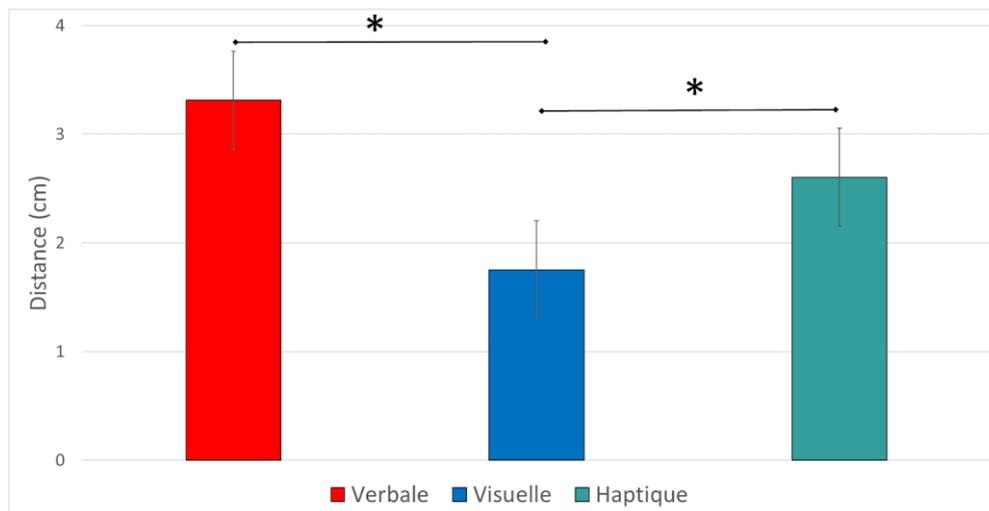


Figure 40 : Erreur moyenne d'estimation de l'amplitude pour chaque modalité.

Les résultats du test de Friedman montrent un effet principal significatif de la modalité sur les erreurs d'estimation de distance ($\chi^2 = 12,61$, $p = 0,002$; **Figure 40**). Les tests par paires des rangs signés de Wilcoxon avec correction de Bonferroni montrent que les erreurs moyennes d'estimation de distance étaient significativement plus faibles dans la condition visuelle par rapport aux conditions verbale ($p = 0,003$) et haptique ($p = 0,006$). La différence entre les conditions verbale et haptique était marginale ($p = 0,064$).

5.1.2.1.4 Temps de manipulation

Suite aux résultats du test de normalité des données, une ANOVA à mesures répétées à un facteur a été utilisée pour comparer les temps moyens de réalisation entre les trois conditions expérimentales. Les résultats du test (avec sphéricité supposée) montrent un effet principal significatif de la modalité sur les temps moyens de manipulation ($F(2,40) = 11,26, p < 0,001$; **Figure 41**). Les tests post-hoc avec correction de Bonferroni montrent que les temps moyens de manipulation étaient significativement plus courts dans la condition haptique que dans la condition visuelle ($p = 0,018$) et la condition verbale ($p = 0,003$). La différence entre les conditions verbale et visuelle était marginale ($p = 0,07$).

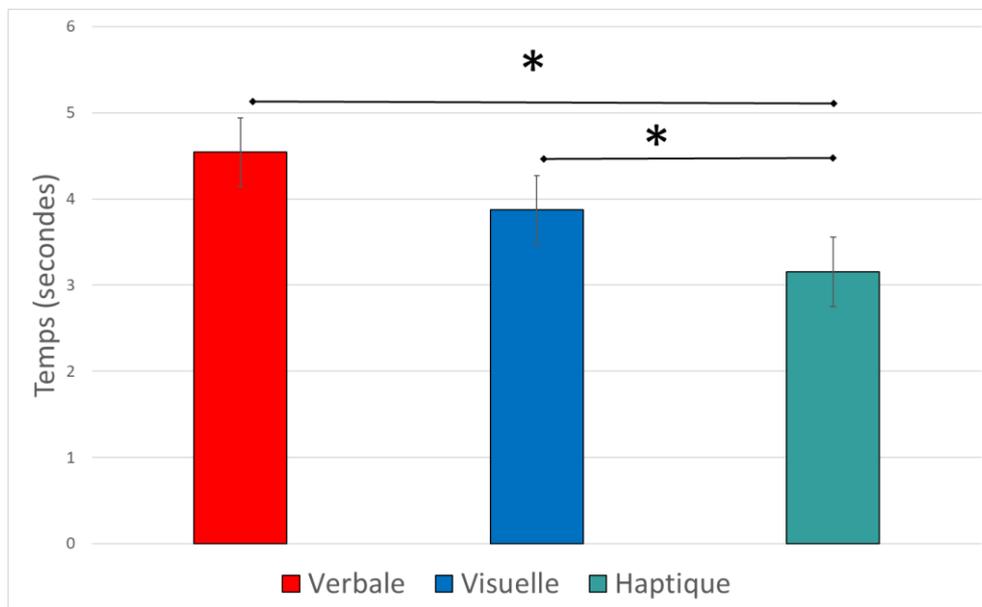


Figure 41 : Temps moyen de manipulation pour chaque modalité.

5.1.2.2 Mesures subjectives

5.1.2.2.1 NASA-TLX

Nous avons comparé à la fois les scores bruts du NASA-TLX et les sous-échelles individuelles, ce qui est une pratique courante avec le NASA-TLX (Hart, 2006). Le test de Friedman indique qu'il n'y a pas d'effet

principal de la modalité d'instruction sur les scores bruts du NASA TLX ($\chi^2 = 0,5$, $p = 0,77$; **Figure 42**) ni sur aucune des sous dimensions.

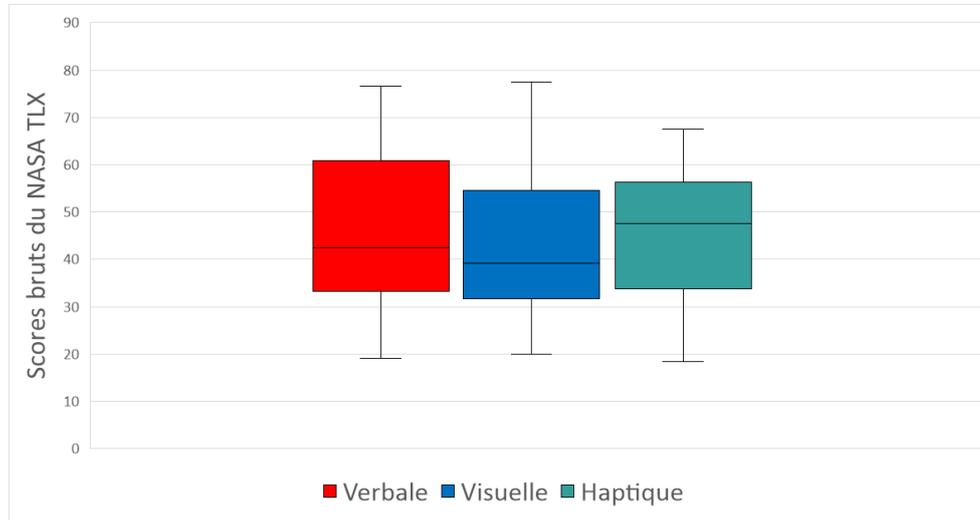


Figure 42 : Scores bruts du NASA-TLX.

5.1.2.2.2 Questionnaire sur la qualité de la collaboration

Pour le questionnaire sur la qualité de la collaboration, chaque question a été examinée séparément. Les résultats des tests de Friedman sont rapportés dans le (**Tableau 9**) et les valeurs significatives sont indiquées dans la (**Figure 43**). Les tests de Wilcoxon signés par paires pour les questions avec des effets principaux significatifs sont rapportés ci-après. Les participants ont trouvé que leurs interactions avec l'instructeur étaient plus proches d'une réunion en face à face (Q4) dans la condition verbale que dans les conditions haptiques ($p = 0,03$). Aucune différence significative n'a été trouvée entre ces deux conditions et la condition visuelle. De plus, les participants ont ressenti moins de connexion avec l'instructeur (Q6) dans la condition visuelle par rapport aux conditions haptiques ($p = 0,045$) et verbales ($p = 0,006$). Aucune différence significative n'a été trouvée entre les conditions verbale et haptique. Les participants ont également ressenti que l'instructeur communiquait plus de la chaleur plutôt que de la froideur (Q7) dans la condition verbale que dans la condition visuelle ($p = 0,012$). Aucune différence significative n'a été trouvée entre ces deux conditions et la condition haptique. De plus, les

participants ont ressenti que l'instructeur essayait de les aider (Q8) plus dans la condition verbale que dans la condition visuelle ($p = 0,021$). Aucune différence significative n'a été trouvée entre ces deux conditions et la condition haptique. Enfin, les participants ont estimé qu'ils comprenaient mieux les instructions transmises (Q10) dans la condition verbale que dans la condition haptique ($p = 0,024$). Aucune différence significative n'a été trouvée entre ces deux conditions et la condition visuelle.

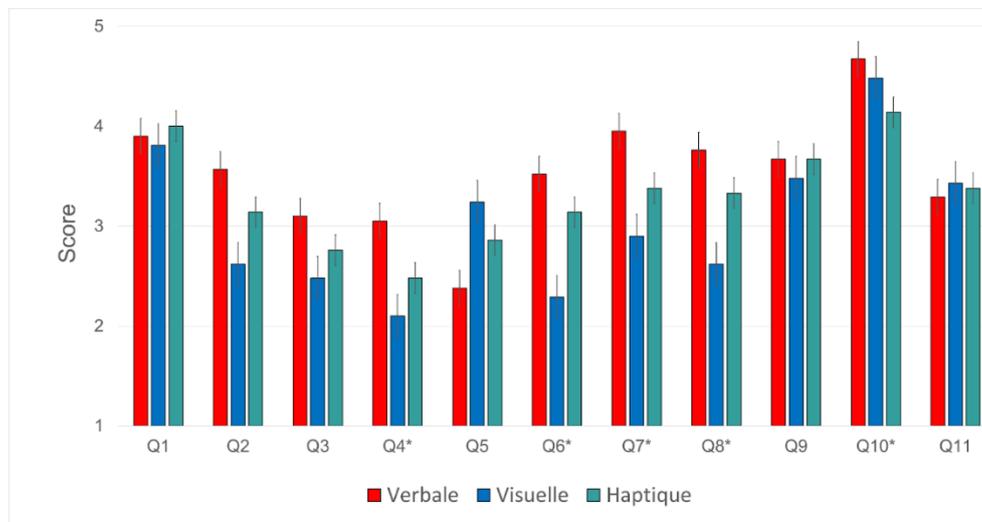


Figure 43 : Scores du questionnaire sur la qualité de la collaboration.

Tableau 9 : Les tests de Friedman pour le questionnaire sur la qualité de la collaboration (QCQ) et le questionnaire de comparaison (CQ).

Q#	QCQ		CQ	
	χ^2	p-value	χ^2	p-value
Q1	2.0	0.36	1.81	0.40
Q2	2.98	0.22	2.0	0.36
Q3	3.22	0.19	6.0	0.05*

Q4	7.89	0.019*	0.095	0.95
Q5	3.36	0.18	14.38	0.001**
Q6	12.23	0.002**	19.23	0.01*
Q7	7.96	0.019*	5.42	0.066
Q8	10.14	0.006**	16.1	0.001**
Q9	0.17	0.91	6.0	0.05*
Q10	9.48	0.009**	10.66	0.005**
Q11	2.0	0.36	3.71	0.15

Aucune différence significative n'a été trouvée entre les conditions verbale et haptique. Les participants ont également ressenti que l'instructeur communiquait plus de la chaleur plutôt que de la froideur (Q7) dans la condition verbale que dans la condition visuelle ($p = 0,012$). Aucune différence significative n'a été trouvée entre ces deux conditions et la condition haptique. De plus, les participants ont ressenti que l'instructeur essayait de les aider (Q8) plus dans la condition verbale que dans la condition visuelle ($p = 0,021$). Aucune différence significative n'a été trouvée entre ces deux conditions et la condition haptique. Enfin, les participants ont estimé qu'ils comprenaient mieux les instructions transmises (Q10) dans la condition verbale que dans la condition haptique ($p = 0,024$). Aucune différence significative n'a été trouvée entre ces deux conditions et la condition visuelle.

5.1.2.2.3 Le questionnaire de comparaison

Pour le questionnaire de comparaison, chaque critère de comparaison

a été étudié séparément. Les modalités préférées pour chaque critère sont présentées dans la (**Figure 44**) et les tests de Friedman sont rapportés dans le (**Tableau 9**). Les tests par paires des rangs signés de Wilcoxon avec correction de Bonferroni pour les questions avec des effets principaux significatifs sont rapportés ci-après.

La modalité visuelle a été évaluée par 42,8% des participants comme étant la plus facile à comprendre pour recevoir des instructions (Q3). En revanche, seulement 19% des participants ont classé la modalité verbale comme la plus facile à comprendre pour recevoir des instructions. La différence entre ces modalités était marginale ($p = 0,069$). Aucune différence significative n'est observée entre la modalité haptique et les deux autres modalités. La modalité haptique a été classée comme la plus perturbante pour recevoir des instructions (Q5) par 71,4% des participants, contre 9,5% pour la modalité visuelle et 19% pour la modalité verbale. En revanche, 52% et 43% des participants ont trouvé respectivement les modalités visuelle et verbale comme les moins perturbantes, contre seulement 5% pour la modalité verbale. Ces différences sont statistiquement significatives entre les modalités haptique et visuelle ($p = 0,003$) et entre les modalités haptique et verbale ($p = 0,018$). La modalité haptique a été classée comme la plus facile pour mémoriser les instructions (Q6) par seulement 9,5% des participants. Elle a été classée deuxième et troisième, respectivement, par 28,6% et 61,9% des participants. Ces valeurs sont significativement inférieures à celles de la modalité verbale ($p = 0,021$) qui a été classée comme la plus facile à mémoriser par 57% des participants. De plus, 33% des participants ont classé la modalité visuelle comme la plus facile à mémoriser. La différence entre les modalités haptique et visuelle était marginale ($p = 0,066$). Aucun participant n'a classé la modalité verbale comme la plus éducative pour apprendre des compétences spatiales (Q8). De plus, 71,4% des participants l'ont classée troisième. Le classement était significativement inférieur aux modalités visuelle ($p = 0,001$) et haptique ($p = 0,003$) qui ont été classées comme les plus éducatives par 48% et 52% des participants, respectivement. Aucune différence significative n'a été trouvée entre ces deux modalités. Chacune des modalités visuelle et haptique a été classée comme la plus engageante pour apprendre des compétences spatiales (Q9) par 42,9% des

participants. En revanche, la modalité verbale a été classée comme la plus engageante par seulement 14,3% d'entre eux. La différence entre la modalité verbale et la modalité visuelle était marginale ($p = 0,069$) tandis que la différence entre les modalités haptique et verbale n'était pas significative. Enfin, seulement 4,7% des participants ont classé la modalité verbale comme la plus efficace pour apprendre des compétences spatiales (Q10). Ce classement était significativement inférieur aux modalités visuelle ($p = 0,009$) et haptique ($p = 0,027$) qui ont été classées en première position par 57% et 38% des participants, respectivement. Aucune différence significative n'a été trouvée entre ces deux modalités.

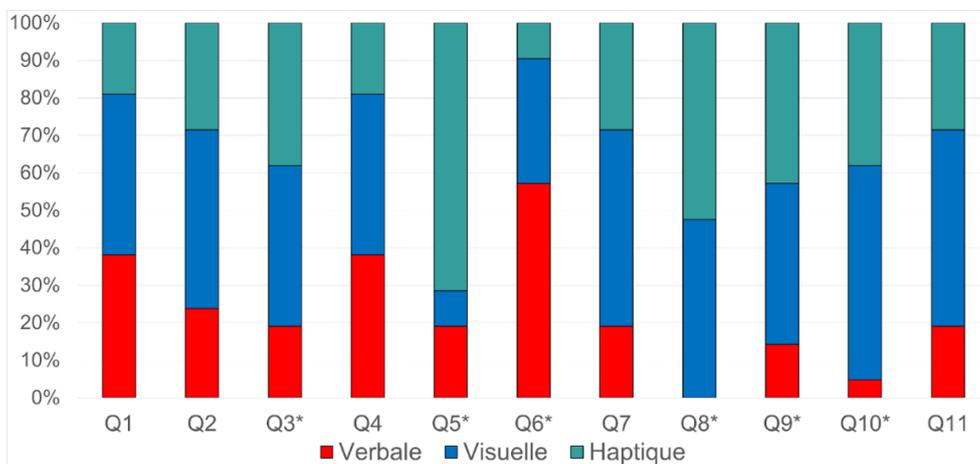


Figure 44 : Modalités préférées (pourcentage de participants ayant choisi la modalité comme la plus préférée) pour chaque question.

5.1.3 Discussion

5.1.3.1 Performance des apprenants

L'estimation de l'amplitude était le principal facteur pour évaluer la performance des apprenants après avoir reçu les instructions. Tout d'abord, les analyses de corrélation indiquent une corrélation modérée significative entre les erreurs d'estimation d'amplitude observées dans la condition verbale et celles mesurées lors du pré-test papier-crayon où les participants lisaient les instructions. Ce résultat suggère que les instructions pour l'estimation d'amplitude sont traitées de manière similaire lorsqu'elles sont transmises verbalement et par écrit.

Cependant, cela n'est pas vrai pour les instructions haptiques et visuelles, car leurs valeurs respectives ne sont pas corrélées avec les résultats du pré-test. Cela implique qu'il existe des divergences dans la manière dont les informations reçues par ces différentes modalités sont traitées. Ces variations peuvent être attribuées aux différences dans le type d'informations pouvant être transmises par chaque modalité. Les instructions verbales et écrites peuvent communiquer des informations identiques concernant l'amplitude du mouvement, telles que "3 cm vers la droite". En revanche, les modalités haptiques et visuelles permettent de transmettre des informations supplémentaires, telles que la dynamique des mouvements et les forces. Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour mieux comprendre quelles informations sont transmises et comment elles sont traitées par chaque modalité.

De plus, les résultats suggèrent que la modalité visuelle est la plus précise pour transmettre l'amplitude du mouvement, car elle a conduit à une réduction significative des erreurs d'estimation d'amplitude. Cela est corroboré par le questionnaire de comparaison, où les participants ont considéré la modalité visuelle comme la plus précise, bien que la différence soit marginale.

Ces résultats sont cohérents avec des recherches antérieures montrant que le retour visuel augmenté est une stratégie d'apprentissage plus efficace (Sigrist, Rauter, Riener, & Wolf, 2013). Notre étude terrain avait mis en évidence l'usage fréquent de la modalité visuelle dans l'instruction de compétences techniques, soulignant ainsi la pertinence de la communication visuelle comme source de transmission des instructions. En effet, la vision est considérée comme un sens spatial et permettant d'interpréter les informations spatiales (Freides, 1974). Cela a peut-être joué un rôle crucial dans l'amélioration de la performance des participants en estimation d'amplitude. En revanche, l'haptique est particulièrement efficace pour ressentir les mouvements (Freides, 1974). La stratégie de guidage haptique utilisée dans notre recherche repose sur le contrôle de la position, où l'apprenant suit passivement le mouvement. Cette approche a déjà été démontrée comme étant efficace pour l'apprentissage de l'information temporelle d'un mouvement (Rauter, Sigrist, Riener, & Wolf, 2015; Sigrist, Rauter, Marchal-Crespo, Riener, & Wolf, 2015). Cependant, elle semble être

moins efficace pour acquérir les aspects spatiaux du mouvement par rapport au guidage visuel (Sallnäs, Rasmus-Gröhn, & Sjöström, 2000; Sigrist, Rauter, Marchal-Crespo, Riener, & Wolf, 2015) et au guidage haptique, où les mouvements de l'apprenant sont corrigés chaque fois que des erreurs spatiales se produisent lors du trajet du mouvement (Sallnäs, Rasmus-Gröhn, & Sjöström, 2000). Cette dernière stratégie haptique fournit un feedback augmenté en temps réel et immédiat à l'apprenant et pourrait être considérée comme une stratégie d'enseignement viable dans les études futures. Par exemple, avec notre système, l'enseignant peut utiliser le second dispositif haptique pour suivre le mouvement de l'apprenant et corriger la trajectoire chaque fois que des erreurs se produisent. Cette stratégie sera évaluée dans la suite de nos travaux portant sur les interactions de type feedbacks.

Le temps de réalisation du mouvement était un facteur secondaire pour comparer les modalités. Les résultats ont révélé des effets intéressants, car les participants ont reproduit les mouvements plus rapidement lorsqu'ils recevaient des instructions via la modalité haptique. De plus, ils ont perçu cette modalité comme étant la plus difficile pour mémoriser les instructions. Cette dernière observation peut expliquer pourquoi ils ont réalisé la tâche plus rapidement dans cette condition. En effet, ils ont exécuté les instructions tant qu'elles étaient encore "fraîches" dans leur mémoire. Cela est conforme avec des travaux antérieurs suggérant que le guidage haptique produit de meilleures performances d'apprentissage dans les tests de rétention immédiate mais que ces performances diminuent avec le temps (Crespo & Reinkensmeyer, 2008). Cependant, cela contraste également avec d'autres travaux suggérant que le guidage visuel est meilleur pour la mémorisation à court terme d'une tâche de sélection 2D. Par conséquent, des recherches supplémentaires sont nécessaires pour mieux comprendre l'effet des instructions haptiques sur l'apprentissage des mouvements en 3D.

5.1.3.2 Charge cognitive

Le choix de la modalité d'apprentissage appropriée impacte la réduction de la charge de travail, comme l'ont souligné des recherches antérieures (Sigrist, Rauter, Riener, & Wolf, 2013). Les résultats du

NASA TLX n'ont révélé aucune différence significative dans les scores entre les modalités. Ceci suggère que les participants n'ont pas perçu de variations de charge mentale. Ainsi, les modalités ne semblent pas avoir affecté la complexité de la tâche lors de la communication d'informations d'amplitude simples. Cela peut être attribué à la simplicité des instructions d'amplitude données, qui n'exigeaient pas d'effort mental significatif pour être comprises. Pour mieux comprendre l'impact potentiel des modalités de communication sur la charge de travail, des investigations supplémentaires utilisant des instructions plus complexes seront nécessaires.

5.1.3.3 Expérience d'apprentissage

L'expérience d'apprentissage des utilisateurs a été évaluée à l'aide de deux principales mesures : le questionnaire sur la qualité de la collaboration pour évaluer leur expérience d'apprentissage et de communication avec l'instructeur, et le questionnaire de comparaison pour mesurer leur préférence subjective pour chaque modalité concernant plusieurs critères de comparaison.

Seules cinq questions dans le questionnaire sur la qualité de la collaboration ont révélé des différences significatives entre les modalités. En général, les participants ont préféré la modalité verbale, car ils l'ont trouvée plus réaliste et plus proche d'une expérience en face à face. Ils ont également ressenti une connexion plus forte avec l'instructeur avec cette modalité par rapport à la modalité visuelle. Les participants ont perçu que l'instructeur était plus utile en utilisant la modalité verbale, et ils ont trouvé les instructions verbales plus faciles à comprendre. Cependant, cela contraste avec les résultats des mesures objectives, car la modalité verbale était la moins efficace en termes de temps de réalisation de la tâche ou de précision. La préférence des participants pour la modalité verbale pourrait être due au fait que l'expérimentateur était physiquement présent dans la même pièce, et les instructions venaient directement d'une source du monde réel. En revanche, les instructions visuelles et haptiques étaient préenregistrées et transmises d'une manière médiatisée à travers l'environnement virtuel. Cette différence dans les sources d'instructions pourrait avoir influencé le sentiment de coprésence et la qualité globale de l'expérience d'apprentissage. Pour mieux

comprendre cela, des études futures pourraient comparer les modalités avec le même niveau de médiation, telles qu'un instructeur situé dans une autre pièce ou des messages vocaux préenregistrés transmis à travers le casque de réalité virtuelle.

De plus, la modalité haptique a obtenu des scores plus élevés pour la connexion avec l'instructeur (Q6) et l'utilité (Q8) que la modalité visuelle. Ces dimensions sont liées au sentiment d'établir une relation avec le partenaire, comme discuté dans des recherches de Gratch et al. (Gratch, DeVault, Lucas, & Marsella, 2015). Les scores faibles observés pour la modalité visuelle pourraient s'expliquer par l'utilisation d'une main virtuelle non animée, qui a pu réduire la fidélité de la représentation (avatar) du partenaire (instructeur). Cela a déjà été signalé comme ayant un impact négatif sur cette dimension dans des études antérieures (Gratch, DeVault, Lucas, & Marsella, 2015; Gamelin, et al., 2021; Benda & Ragan, 2021). De plus, l'absence d'une représentation du visage et du corps de l'instructeur dans le système pourrait avoir joué un rôle dans la diminution du sentiment de coprésence (Latoschik, et al., 2017; Gamelin, et al., 2021; Benda & Ragan, 2021).

D'un autre côté, il a été signalé que la modalité haptique augmente le sentiment de proximité et d'intimité avec une autre personne dans des recherches antérieures (Chellali, Dumas, & Milleville-Pennel, 2011; Sallnäs, Rassmus-Gröhn, & Sjöström, 2000). Cela pourrait avoir contribué à l'amélioration des scores liés à ces dimensions pour la modalité haptique.

Les résultats du questionnaire de comparaison montrent un contraste avec ceux du questionnaire sur la qualité de la collaboration mais sont cohérents avec les résultats des mesures de performance. Les retours des participants indiquent qu'ils ont perçu qu'ils apprenaient plus avec les modalités haptique et visuelle, qui étaient considérées comme les plus efficaces pour transmettre des informations spatiales. Néanmoins, la modalité verbale était perçue comme la moins engageante et la moins préférée. Les différences entre les modalités visuelle et haptique n'étaient pas statistiquement significatives, ce qui indique qu'elles étaient globalement acceptées de manière égale. Néanmoins, la modalité haptique a été signalée comme la plus perturbante, ce qui

pourrait être attribué au manque de familiarité des participants avec cette méthode de communication (Crandall & Karadoğan, 2021). Cependant, cela n'a pas eu d'impact négatif sur leur performance ou leur expérience d'apprentissage globale. En conséquence, la modalité haptique a le potentiel d'être davantage explorée et utilisée pour améliorer la communication des instructions dans les environnements d'enseignement immersifs.

5.1.4 Conclusion

L'objectif principal de cette étude était d'évaluer l'effet des trois modalités de communication de base (verbale, visuelle et haptique) sur la communication d'instructions spatiales à l'apprenant lors de la manipulation d'outils. L'étude a montré que la modalité visuelle était la plus efficace pour réduire les erreurs d'estimation de distance et augmenter la précision de la reproduction des mouvements par rapport aux modalités verbale et haptique. La modalité haptique, en revanche, a permis une reproduction plus rapide des instructions. Cependant, les participants ont indiqué que la modalité haptique était la plus difficile pour mémoriser les instructions et la plus perturbante. Enfin, la modalité verbale a été évaluée comme la meilleure en ce qui concerne la coprésence et la qualité perçue de l'expérience d'apprentissage, tandis que la modalité visuelle a été perçue comme la plus adaptée pour l'apprentissage et la mémorisation d'informations spatiales. Dans l'ensemble, la modalité verbale était la moins appréciée par les participants.

Ces résultats fournissent des informations précieuses quant à notre objectif principal consistant à concevoir des interactions collaboratives visant à améliorer l'apprentissage des compétences techniques par compagnonnage dans les environnements virtuels immersifs. Ils suggèrent que chaque modalité offre des avantages uniques pour améliorer l'expérience d'apprentissage et la performance des apprenants. Ils suggèrent également qu'une communication multimodale pourrait être l'approche optimale. Par conséquent, nous examinerons dans la suite de ce travail les effets de la combinaison de modalités sur les l'expérience d'apprentissage et la performance des apprenants.

5.1.4.1 *Limites et perspectives*

Cependant, il y a certaines limitations de l'étude actuelle à noter. Premièrement, il y avait deux gauches parmi les 21 participants. Or, les dispositifs utilisés, ainsi que les instructions, étaient conçus en grande partie pour des droitiers. Cela peut avoir introduit un biais dans la performance des participants gauchers, qui ont dû utiliser leur main non dominante et s'adapter aux instructions pour correspondre à leur latéralité. Cette différence peut avoir affecté leur capacité à manipuler l'outil virtuel avec la même aisance que les droitiers, influençant ainsi les résultats sur la précision ou la rapidité de la tâche. Il serait donc pertinent de considérer cette variable dans les futures études, ou de standardiser les outils et instructions pour les participants gauchers et droitiers. Deuxièmement, bien que les instructions verbales aient été lues à partir d'un script, elles ont été données en direct par l'instructeur, ce qui présente un risque de variabilité dans la formulation des instructions entre les participants, comme des différences subtiles dans le langage utilisé, le ton ou l'accentuation des consignes. Cela pouvait influencer la compréhension et la reproduction des mouvements par les apprenants. Cette absence de standardisation pourrait avoir affecté la comparaison des performances entre les participants. Une solution pour minimiser ce biais serait de préenregistrer les instructions verbales afin d'assurer une uniformité totale dans la présentation des instructions. Troisièmement, nous n'avons pas analysé les trajectoires réalisées par les apprenants. Une analyse de celles-ci en utilisant des algorithmes de comparaison de trajectoires tels que la Déformation Temporelle Dynamique (DTD) (Wyvill, McPheeters, & Wyvill, 1986) pourrait nous permettre de mieux évaluer la proximité des trajectoires des apprenants avec celle de référence. Enfin, bien qu'on ait utilisé des questions issues de questionnaires validés pour évaluer l'expérience subjective des participants, notre analyse a été réalisée sur chaque question séparément. Il sera pertinent dans les prochaines études d'évaluer des dimensions regroupant plusieurs questions. Ceci permettra une meilleure compréhension de l'expérience vécue par les participants pendant les interactions avec l'instructeur.

Pour conclure, ces premiers résultats expérimentaux montrent que chaque modalité a ses avantages et ses inconvénients. Ainsi,

l'utilisation d'une seule modalité peut-être parfois limitante, comme observé lors de notre étude observationnelle. C'est pour cela que dans l'expérience suivante, nous allons investiguer l'effet des interactions multimodales, afin de déterminer si cette approche est plus appropriée pour améliorer la communication instructeurs-apprenants pour la formation aux compétences techniques de manipulation d'outil.

5.2 EXPERIENCE 2 : EXPLORATION DES INSTRUCTIONS MULTIMODALES POUR L'APPRENTISSAGE D'UN GESTE DE MANIPULATION D'OUTIL

5.2.1 Objectifs de l'étude et hypothèses

Cette seconde étude (Simon, Boukli-Hacene, Lebrun, Otmane, & Chellali, 2024) vise à examiner l'impact de la communication multimodale entre un instructeur et un apprenant dans un environnement collaboratif virtuel. Nous analysons l'effet de différentes combinaisons de modalités pour la transmission d'instructions d'amplitude de mouvements lors d'une tâche de manipulation d'outil sur les performances des apprenants et leur expérience utilisateur.

Les modalités étudiées incluent le verbal, le visuel et l'haptique, aboutissant à trois combinaisons bimodales différentes et une combinaison tri-modale : verbale-visuelle, verbale-haptique, visuelle-haptique et verbale-visuelle-haptique. La tâche à réaliser est la même que celle décrite dans l'étude expérimentale 1. Les combinaisons sont comparées en fonction de leur impact sur les performances des participants (vitesse et précision), sur la charge mentale de ces derniers et sur leur expérience subjective.

En se basant sur la littérature et sur les résultats de la première étude expérimentale, nous formulons l'hypothèse principale que les quatre conditions de communication influenceraient différemment les performances des participants, la charge mentale et l'expérience utilisateur. Plus précisément, nous nous attendons à ce que :

H1 : La combinaison des modalités visuelles et haptiques améliorera les performances des apprenants par rapport aux conditions où une

seule d'entre elles est combinée avec la modalité verbale. En effet, la première étude a montré que les modalités visuelle et haptique améliorent respectivement la précision des gestes et la vitesse d'exécution. Nous nous attendons donc à ce que les conditions expérimentales combinant ces deux modalités permettent aux apprenants d'avoir de meilleures performances que les conditions où seule une seule des deux modalités est combinée avec la modalité verbale.

H2 : Comme le suggèrent des recherches antérieures (Sigrist, Rauter, Riener, & Wolf, 2013), la charge de travail mentale diminuerait lorsque les instructions sont fournies de manière multimodale. Par conséquent, nous nous attendons à ce que la condition trimodale diminue la charge de travail perçue par rapport aux conditions bimodales.

H3 : Notre première étude indique que la communication verbale est importante pour améliorer le sentiment de coprésence et de présence sociale. Par conséquent, nous nous attendons à ce que les conditions incluant la modalité verbale augmentent l'expérience utilisateur telle que mesurée à l'aide de questionnaires sur la présence, la présence sociale, la coprésence et l'expérience d'apprentissage.

5.2.2 Méthodologie

5.2.2.1 Participants

Cette étude a impliqué 32 participants (6 femmes et 26 hommes), recrutés parmi les étudiants, le personnel universitaire et des volontaires externes. Aucun d'entre eux n'a été impliqué dans la première étude. Aucune compétence spécifique ou d'expérience préalable avec la réalité virtuelle n'était requise. L'âge moyen des participants était de 25,5 ans (min = 20, max = 47). Contrairement à la première étude, tous les participants à cette étude étaient droitiers. Tous avaient une vision normale ou corrigée, avec 13 d'entre eux portant des lunettes correctrices pendant l'expérience. Vingt-six (26) d'entre eux avaient déjà eu une expérience avec des casques de réalité virtuelle, dont 6 en étaient des utilisateurs réguliers (au moins une fois par semaine). De plus, 16 d'entre eux avaient déjà eu une expérience avec les dispositifs haptiques pendant des démonstrations ou d'autres

études expérimentales. Le protocole expérimental a été approuvé par le Comité d'éthique de la recherche de l'Université Paris Saclay, et tous les participants ont signé un formulaire de consentement éclairé avant leur inclusion dans l'étude.

5.2.2.2 *Tâches expérimentale*

Pour cette étude, nous avons repris la même tâche que celle utilisée lors de l'étude 1 avec quelques modifications. En effet, les déplacements étaient cette fois réalisés uniquement le long de l'axe X ou l'axe Y. En effet, l'espace de travail du bras haptique est plus petit sur l'axe Z (70mm), restreignant ainsi l'amplitude des mouvements possible sur cet axe. D'autres modifications ont été apportées aux deux phases expérimentales :

1. Phase d'instruction : L'instruction était transmise selon l'une des quatre conditions de communication. Comme pour la première étude, le choix de fournir des instructions pré-enregistrées permettait de contrôler les éventuels biais induits par des instructions variant pour chaque participant. Cependant, afin d'éviter le problème des niveaux différents de médiatisation des modalités de communication observé lors de la première étude (l'instructeur était dans la même pièce), les participants étaient informés cette fois que les instructions étaient fournies en temps réel par un instructeur **distant** se trouvant dans une autre pièce, bien qu'en réalité, celles-ci étaient pré-enregistrées (**Figure 45**). De façon similaire à la première expérience, nous avons décidé de dissimuler l'absence de l'instructeur pour les mêmes raisons, i.e pour évaluer l'expérience utilisateur.
2. Phase de manipulation : cette phase était similaire à celle de la première étude.



Figure 45 : Illustration de l'étude expérimentale. Croyant qu'il interagit en temps réel avec un instructeur à distance, l'apprenant reçoit des instructions préenregistrées sur l'amplitude d'un mouvement à reproduire. Ces instructions sont fournies via quatre combinaisons différentes de modalités : verbale-visuelle, verbale-haptique, visuelle-haptique et verbale-visuelle-haptique. L'apprenant tente ensuite de reproduire ce mouvement le plus fidèlement possible.

Cette situation d'apprentissage peut être décrite à travers notre modèle d'interaction comme suit (**Figure 46**) :

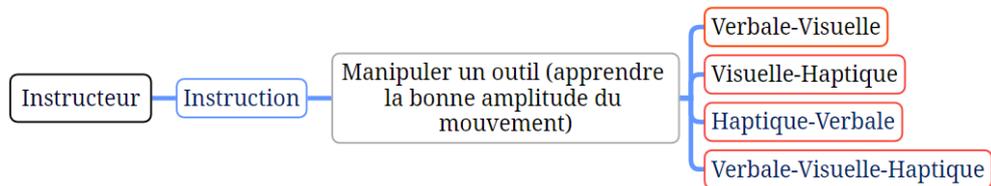


Figure 46 : Projection de la situation d'apprentissage explorée dans l'expérience 2 à travers notre modèle d'interaction.

5.2.2.3 Dispositif expérimental

5.2.2.3.1 Équipement

Nous avons utilisé le même dispositif expérimental que celui utilisé lors de la première étude (**Figure 47**).

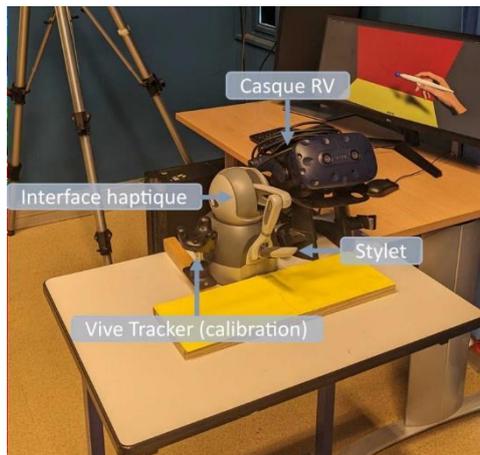


Figure 47 : Dispositif expérimental : un casque de réalité virtuelle, une interface haptique (équipé d'un stylet), et un Vive Tracker pour l'étalonnage.

5.2.2.3.2 Environnement virtuel

Nous avons également utilisé le même environnement avec les mêmes scènes virtuelles (**Figure 48**) et les mêmes interactions que ceux utilisés lors de la première étude.

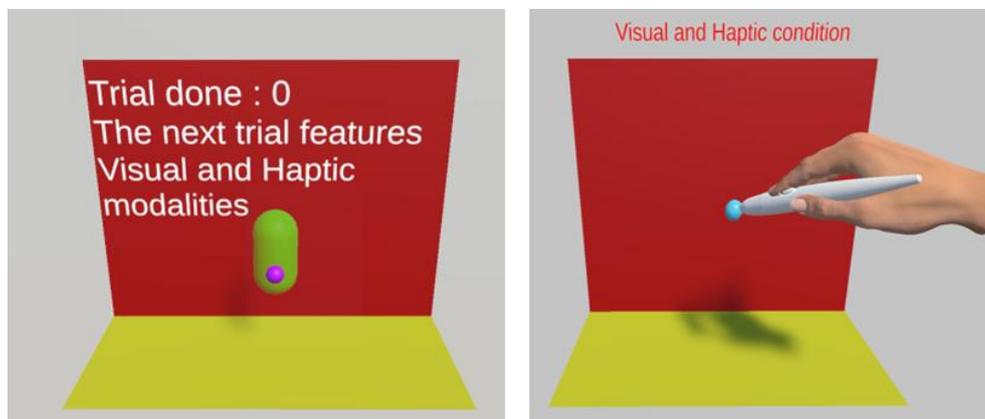


Figure 48 : Environnement virtuel : il est constitué d'un plan jaune et rouge. La scène de gauche montre l'étape avant de commencer un essai. Les participants peuvent voir les prochaines modalités qui seront utilisées. On observe également la capsule verte qui permet de démarrer l'essai. La scène de droite montre la phase d'instruction où les participants voient une sphère bleue cloue et la main virtuelle de l'instructeur seulement lorsque la modalité visuelle est impliquée.

5.2.2.4 *Plan expérimental et conditions*

L'étude était basée sur un plan expérimental intra-sujets à un seul facteur (la combinaison des modalités de communication) avec quatre conditions : verbale-visuelle, verbale-haptique, visuelle-haptique et verbale-visuelle-haptique. L'ordre de présentation des conditions aux participants a été contrebalancé à l'aide d'un carré latin pour réduire les effets d'apprentissage potentiels. Chaque participant a réalisé 14 essais pour chaque condition, avec des mouvements sur les axes X et Y (gauche/droite ; haut/bas). Pour garantir que les mouvements restaient dans les limites de l'espace de travail du bras haptique, les amplitudes des mouvements variaient entre 4 et 8 centimètres et étaient sélectionnées de manière aléatoire pour chaque essai tout en étant équilibrées entre les conditions. Cela a abouti à un total de 1792 essais enregistrés (14 essais x 4 conditions x 32 participants). Trois formes d'instructions ont été utilisées :

- **Instructions Verbales** : les participants recevaient verbalement des instructions décrivant l'amplitude et la direction du mouvement. Par exemple, l'instruction pour un mouvement de 8 centimètres vers la gauche était : "Veuillez déplacer la sphère de 8 cm vers la gauche". Toutes les instructions étaient pré-enregistrées sous forme de clips audio, avec la voix de l'expérimentateur, et étaient diffusées via les écouteurs du casque de RV.
- **Instructions Visuelles** : ces instructions étaient fournies par le biais d'une animation 3D de la main de l'instructeur manipulant l'outil dans l'environnement immersif. Suivant une courbe de Bézier, la main virtuelle se déplaçait pour saisir la sphère et la placer dans une position finale variable pour chaque essai.
- **Instructions Haptiques** : les instructions étaient transmises via le bras haptique tenu par les participants. Le bras se déplaçait de la position de départ à la position finale, suivant les mêmes courbes que la condition visuelle, imitant l'exécution de la tâche par l'instructeur à l'aide du dispositif haptique.

Ces trois formes de communication ont ensuite été combinées pour créer les quatre conditions expérimentales où les instructions étaient jouées simultanément, transmettant la même direction et la même amplitude. Il est important de noter que pendant les instructions haptiques et visuelles, la sphère 3D et la position du stylet haptique étaient placées à des positions de départ différentes pendant les phases d'instruction et de manipulation pour empêcher la mémorisation des positions finales (comme pour la première étude). De cette manière, les participants étaient encouragés à mémoriser l'amplitude et la direction du mouvement plutôt que la position finale de la sphère ou du stylet.

5.2.2.5 Procédure expérimentale

La durée moyenne de l'expérience était de 75 minutes par participant. Avant d'entrer dans la salle d'expérimentation, les participants ont rencontré un "faux" instructeur dans une pièce adjacente. Il leur a été expliqué que cette personne leur donnerait des instructions à distance pendant l'expérience. Ensuite, les participants accédaient à la salle d'expérimentation, où ils recevaient une présentation de l'objectif de l'étude et de l'équipement qu'ils allaient utiliser. Puis, il leur a été demandé de lire et de signer un formulaire de consentement pour participer à l'étude. Enfin, une fiche d'instruction leur était remise, détaillant le fonctionnement du prototype, les actions à réaliser et ce que l'on attendait d'eux. L'étape suivante consistait à remplir un questionnaire démographique, après quoi les participants étaient invités à enfiler le casque immersif pour commencer avec la première condition. Une fois les 14 essais de la condition terminés, les participants ont été invités à retirer le casque pour répondre au questionnaire NASA-TLX ainsi qu'à un questionnaire évaluant leur sentiment de présence, de présence sociale, de coprésence et d'expérience d'apprentissage au cours de la condition précédente. Une fois cette étape terminée, ils devaient remettre le casque pour commencer les essais de la condition suivante et répéter le même cycle décrit précédemment. Une fois tous les essais terminés et les questionnaires complétés pour toutes les conditions, les participants ont été invités à répondre à un dernier questionnaire comparant les quatre conditions sur la base de différents critères.

5.2.2.6 Mesures et analyses des données

Dans cette expérience, des mesures objectives et subjectives étaient utilisées. En plus des mesures objectives utilisées lors de la première expérience (temps moyen de manipulation et erreur moyenne d'estimation de distance), nous avons utilisé une nouvelle mesure. Celle-ci consistait à évaluer la qualité de la trajectoire de l'outil en se basant sur la Déformation Temporelle Dynamique (DTD) (Wyvill, McPheeters, & Wyvill, 1986). Cette métrique évalue la similitude entre les trajectoires de référence présentées par l'instructeur et celles réalisées par les participants. La DTD est un algorithme créé pour identifier l'alignement optimal entre deux trajectoires, offrant une meilleure évaluation de leur similarité par rapport aux méthodes classiques comme la distance euclidienne point à point. Une faible distance DTD indique une grande similarité entre les trajectoires. Nous avons ainsi calculé la distance DTD (en utilisant Python et le module `DTAIDistance` 1) entre les trajectoires des participants et les trajectoires de référence respectives pour chaque essai et pour chaque condition. Nous avons ensuite comparé les distances moyennes de chaque condition. Pour les trois métriques objectives, des valeurs plus faibles reflètent de meilleures performances. Les mesures subjectives incluaient les réponses des participants à divers questionnaires. Cela comprenait un questionnaire suivant une échelle de Likert à sept points, qui évaluait le sentiment de présence, de présence sociale, de coprésence et l'expérience d'apprentissage des participants (**Tableau 10**). Comme pour la première étude, le NASA TLX (Hart & Staveland, 1988) a été utilisé pour évaluer la charge mentale des participants lors de l'exécution de la tâche. Enfin, les participants ont répondu à un questionnaire où ils devaient classer les combinaisons de modalités en fonction des mêmes onze critères utilisés dans la première étude, de la plus appréciée à la moins appréciée. Le logiciel SPSS a été utilisé pour l'analyse statistique des données. Ces analyses ont été effectuées avec un niveau de confiance de 95%, et dans les cas où des corrections ont été appliquées, nous avons rapporté les valeurs de p ajustées.

Tableau 10 : *Éléments du questionnaire subjectif sur la présence, la présence sociale, la coprésence et l'expérience d'apprentissage. Les échelles de notation vont de 1 à 7.*

Q# Question	
Présence (Nowak & Biocca, 2003)	
Q1	Dans quelle mesure l'expérience a-t-elle été immersive ?
Q2	Dans quelle mesure l'expérience a-t-elle été intense ?
Q3	Dans quelle mesure vous êtes-vous senti à l'intérieur de l'environnement que vous avez vu-entendu ?
Q4	Dans quelle mesure vous êtes-vous senti immergé dans l'environnement que vous avez vu-entendu ?
Q5	Dans quelle mesure avez-vous eu l'impression d'être entouré par l'environnement que vous avez vu/entendu ?
Présence sociale (Nowak & Biocca, 2003; Basdogan, Ho, Srinivasan, & Slater, 2000)	
Q6	Dans quelle mesure cela ressemblait-il à une réunion en face à face ?
Q7	Dans quelle mesure aviez-vous l'impression d'être dans la même pièce que l'instructeur ?
Coprésence (Nowak & Biocca, 2003)	
Q8	L'instructeur était-il intensément impliqué dans notre interaction ?
Q9	L'instructeur a-t-il communiqué de la froideur plutôt que de la chaleur ?

Q10	Dans quelle mesure vous êtes-vous senti isolé de l'instructeur dans l'environnement virtuel ?
Q11	Dans quelle mesure aviez-vous le sentiment d'être avec l'instructeur ?
Q12	Dans quelle mesure y-a-t-il eu des moments où l'interface semblait disparaître, et vous travaillez directement avec l'instructeur ?
Q13	Dans quelle mesure avez-vous oublié l'instructeur et vous êtes-vous concentré uniquement sur la tâche comme si vous étiez la seule personne impliquée ?
Q14	Dans quelle mesure étiez-vous et l'instructeur en harmonie lors de l'exécution de la tâche ?
Q15	Globalement, évaluez dans quelle mesure vous aviez le sentiment qu'il y avait un instructeur qui interagissait avec vous, plutôt qu'une simple machine ?
Expérience d'apprentissage	
Q16	Dans quelle mesure pensez-vous pouvoir acquérir de nouvelles compétences avec cette application ?

5.2.3 Résultats

5.2.3.1 Mesures objectives

Pour chaque participant, nous avons calculé la moyenne de chaque mesure objective par condition, ce qui a donné 128 valeurs par mesure (4 conditions x 32 participants). Nous avons utilisé le test de Shapiro-Wilk pour vérifier la distribution normale des données. Les résultats ont montré que toutes les données d'erreurs d'estimation de distance et des temps d'achèvement étaient normalement distribuées. D'un autre côté, seules les données de distance DTD pour les conditions

Visuelle-Haptique et Verbale-Visuelle-Haptique étaient normalement distribuées.

5.2.3.1.1 Erreur d'estimation de distance

Suite aux résultats des tests de normalité, une analyse de variance (ANOVA) à mesures répétées à un facteur a été utilisée pour tester l'effet des modalités. Les résultats (sphéricité vérifiée, $p = .21$) indiquent un effet principal significatif de la combinaison de modalités sur les erreurs d'estimation de distance ($F_{(3,93)} = 10.56$, $p < .001$, η^2 partiel = .25 ; **Figure 49**). Les comparaisons post-hoc avec correction de Bonferroni montrent que les erreurs moyennes étaient significativement plus faibles dans la condition Verbale-Visuelle-Haptique que dans les conditions Verbale-Visuelle ($p = .001$) et Verbale-Haptique ($p = .006$). Les erreurs moyennes étaient également significativement plus faibles dans la condition Visuelle-Haptique que dans les conditions Verbale-Visuelle ($p = .008$) et Verbale-Haptique ($p = .002$). Aucune autre différence significative n'a été observée.

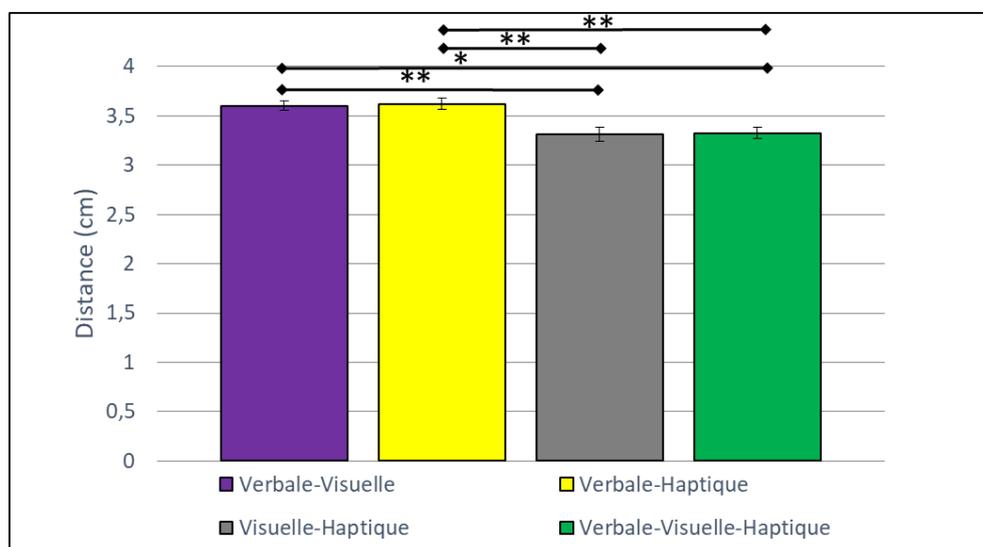


Figure 49 : Erreurs moyennes d'estimation de l'amplitude. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard (*= $p < 0.05$, **= $p < 0.01$).

5.2.3.1.2 Temps de manipulation

Suite aux résultats des tests de normalité, une ANOVA à mesures répétées à un facteur a été utilisée pour tester l'effet des modalités. Les résultats (sphéricité vérifiée, $p = .21$) montrent un effet principal significatif de la combinaison de modalités sur les temps de manipulation moyens ($F_{(3,93)} = 3.50$, $p < .019$, η^2 partiel = .10 ; **Figure 50**). Les comparaisons post-hoc avec correction de Bonferroni montrent que les temps de manipulation moyens étaient significativement plus courts dans la condition Visuelle-Haptique que dans la condition Verbale-Haptique ($p = .017$). Aucune autre différence significative n'a été observée.

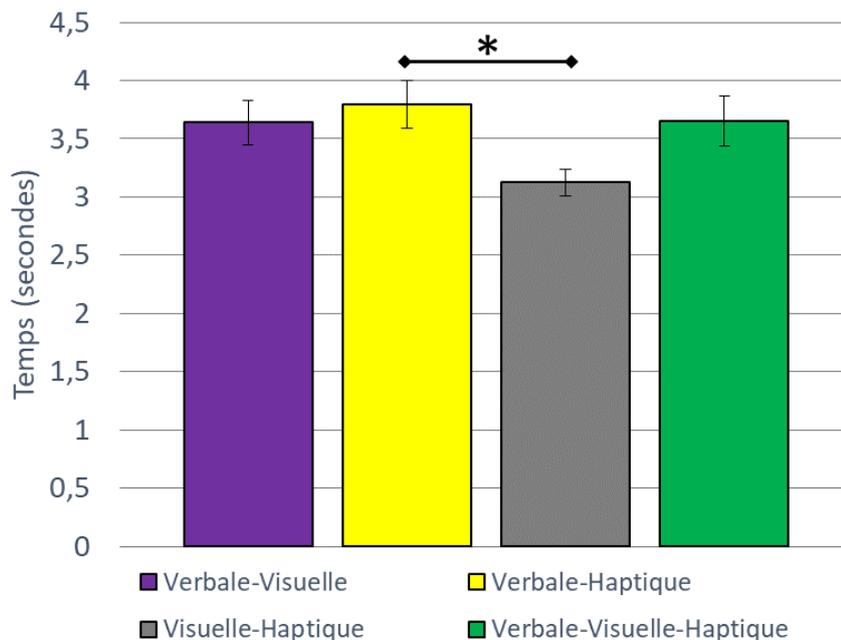


Figure 50 : Temps de manipulation moyens. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard (*= $p < 0.05$, **= $p < 0.01$).

5.2.3.1.3 Trajectoires

Suite aux tests de normalité, un test non-paramétrique de Friedman a été utilisé pour évaluer l'effet des modalités. Les résultats indiquent un effet principal de la combinaison de modalités sur les distances moyennes DTD entre les trajectoires des participants et celles de

l'instructeur ($\chi^2 = 7.91$, $p = .04$; **Figure 51**). Les tests par paires des rangs signés de Wilcoxon avec correction de Bonferroni montrent que les trajectoires des participants étaient significativement plus proches des trajectoires de référence dans la condition Visuelle-Haptique que dans les conditions Verbale-Visuelle ($p = .02$) et Verbale-Haptique ($p = .01$). Aucune autre différence significative n'a été observée.

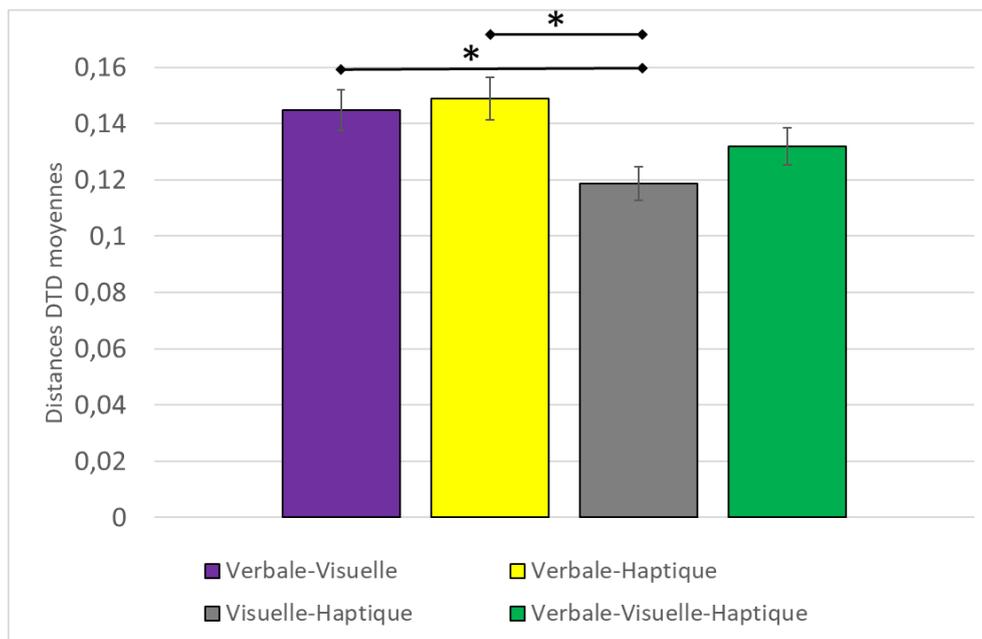


Figure 51 : Distance DTD moyenne. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard (*= $p < 0.05$, **= $p < 0.01$).

5.2.3.2 Mesures subjectives

5.2.3.2.1 Charge cognitive perçue

Les moyennes des scores bruts du NASA-TLX étaient de 32.94 ± 12.41 , 34.66 ± 13.56 , 33.88 ± 12.22 , 34.34 ± 13.13 , respectivement pour les conditions verbale-visuelle, verbale-haptique, visuelle-haptique et verbale-visuelle-haptique (**Figure 52**). Le test de Friedman n'indique aucun effet principal significatif de la combinaison de modalités sur ces scores ($\chi^2 = 3.94$, $p = .26$) ni sur les scores des sous dimensions de l'échelle.

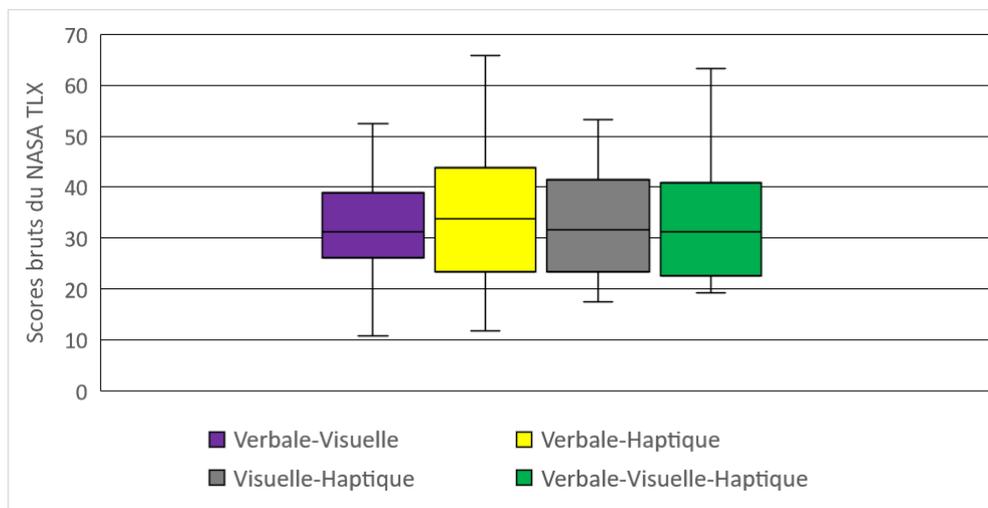


Figure 52 : Scores bruts du NASA-TLX.

5.2.3.2.2 Questionnaire subjectif

Chaque dimension du questionnaire a été étudiée séparément en calculant le score moyen des questions associées (**Figure 53**). Les tests de Friedman montrent un effet principal des combinaisons de modalités sur les scores moyens pour la présence ($\chi^2 = 15.33$, $p = .002$), la présence sociale ($\chi^2 = 10.96$, $p = .012$), la coprésence ($\chi^2 = 13.97$, $p = .003$) et l'expérience d'apprentissage ($\chi^2 = 11.63$, $p = .009$).

Le sentiment de présence des participants était significativement plus élevé dans la condition Verbale-Visuelle- Haptique que dans la condition Verbale-Haptique ($p = .01$). Le score moyen était également plus élevé que dans les conditions Verbale-Visuelle ($p = .07$) et Visuelle-Haptique ($p = .07$), mais l'effet était marginal. Aucune autre différence significative n'a été trouvée.

Le sentiment de coprésence des participants était significativement plus élevé dans la condition Verbale-Visuelle- Haptique que dans les conditions Verbale-Visuelle ($p = .03$) et Visuelle-Haptique ($p = .006$). Le score moyen était également plus élevé dans la condition Verbale-Haptique que dans la condition Visuelle-Haptique ($p = .06$), mais l'effet était marginal. Aucune autre différence significative n'a été trouvée.

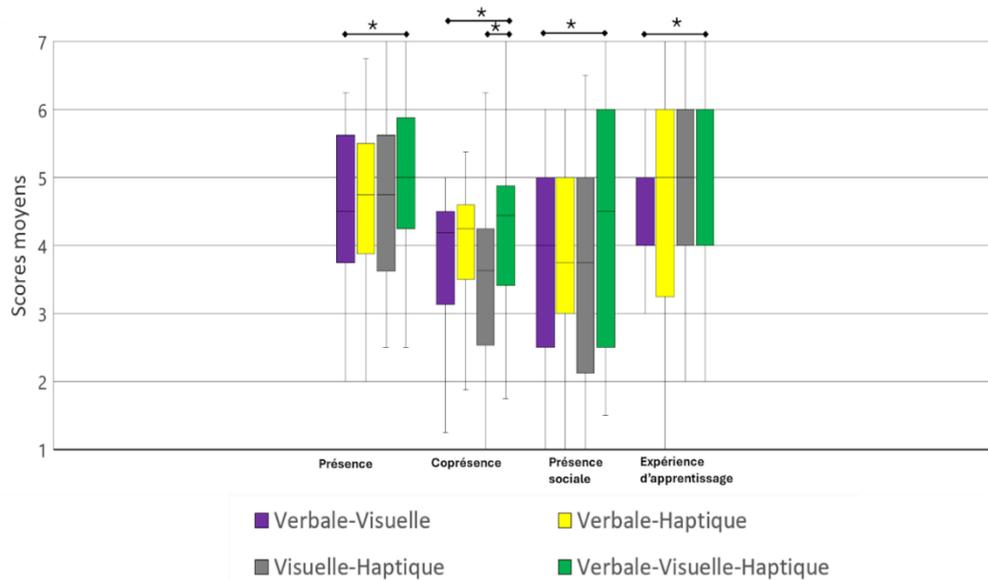


Figure 53 : Scores moyens pour les quatre dimensions du questionnaire subjectif (*= $p < 0.05$, **= $p < 0.01$).

Le sentiment de présence sociale des participants était significativement plus élevé dans la condition Verbale-Visuelle-Haptique que dans la condition Verbale-Visuelle ($p = .03$). Aucune autre différence significative n'a été trouvée.

Enfin, les participants ont estimé avoir eu une meilleure expérience d'apprentissage dans la condition Verbale-Visuelle-Haptique que dans la condition Verbale-Visuelle ($p = .04$). Aucune autre différence significative n'a été trouvée. Des tests de corrélation de Spearman ont été réalisés pour étudier les relations entre ces dimensions. Les résultats sont affichés dans le (**Tableau 11**). A noter que toutes les corrélations significatives sont positives.

Tableau 11 : Tests de corrélation de Spearman entre les quatre dimensions du questionnaire subjectif (*= $p < 0.05$, **= $p < 0.01$, ***= $p < 0.001$).

		Pr-CoPr	Pr-PrSo	Pr-ExAp	CoPr-PrSo	CoPr-ExAp	PrSo-ExAp
Verbale-Visuelle	r (30)	.36*	.40*	.41*	.70***	.32	.34
Verbale-Haptique	r (30)	.55**	.32	.53**	.49**	.59***	.58***
Visuelle-Haptique	r (30)	.35*	.32	.47**	.81***	.42*	.36*
Verbale-Visuelle-Haptique	r (30)	.41*	.39*	.54**	.76***	.39*	.33

5.2.3.2.3 Comparaison subjectif

Pour la comparaison subjective entre les différentes conditions, chaque dimension a été analysée séparément en comparant le classement de chaque condition par rapport aux autres (**Figure 54**). Les tests de Friedman (**Tableau 12**) ont été utilisés pour évaluer l'effet des combinaisons de modalités sur ces classements pour chaque dimension. Les comparaisons significatives par paires en utilisant les tests des rangs signés de Wilcoxon avec correction de Bonferroni pour chaque dimension sont rapportées ci-après. Les participants ont classé la modalité Verbale-Visuelle-Haptique comme la plus facile à comprendre (Q1), la plus adaptée (Q2), la plus précise (Q3) la plus agréable (Q4), et la plus efficace (Q10) pour recevoir des instructions ($p < .01$ pour toutes les comparaisons). De plus, elle a été classée comme la plus facile pour mémoriser le mouvement (Q6), et pour

reproduire le mouvement (Q7), comme la forme de communication la plus éducative (Q8) et la plus engageante (Q9) ($p < .01$ pour toutes les comparaisons). Enfin, elle a été classée comme la forme préférée de communication (Q11) par rapport aux autres conditions ($p < .01$ pour toutes les comparaisons). D'autre part, elle a été classée comme significativement moins perturbante que la condition Visuelle-Haptique ($p = .03$) et marginalement moins perturbante que la condition Verbale-Haptique ($p = .09$). Aucune autre différence significative n'a été observée.

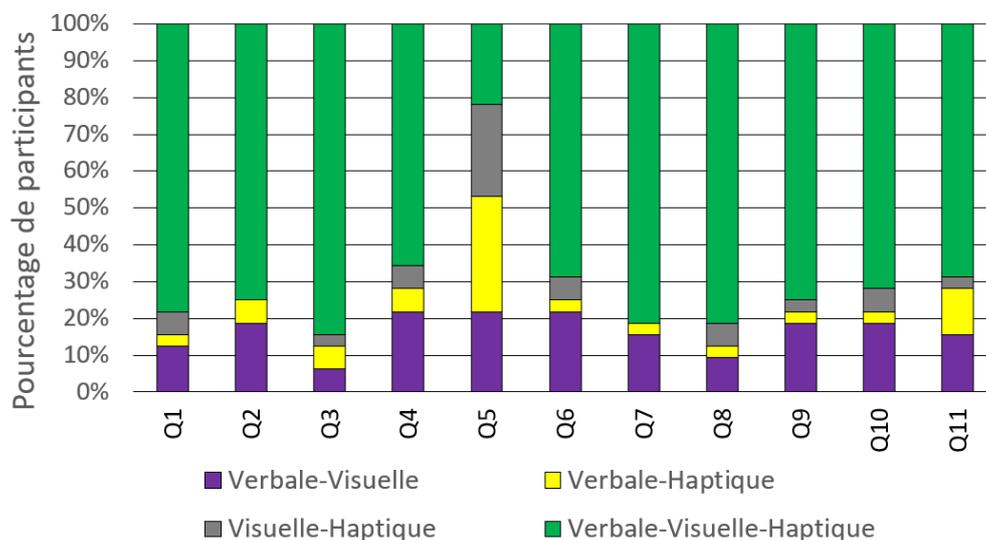


Figure 54 : Pourcentage de participants ayant choisi chaque combinaison de modalités comme mode préféré par critère (Q1 : facile à comprendre ; Q2 : adapté ; Q3 : précis ; Q4 : agréable ; Q5 : destabilisant ; Q6 : facile à mémoriser ; Q7 : facile à reproduire ; Q8 : facilitant ; Q9 : engageant ; Q10 : efficace ; Q11 : mode préféré)

Tableau 12 : Tests de Friedman pour le questionnaire de comparaison (***)= $p < 0.001$).

Q#	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	Q9	Q10	Q11
χ^2	28.2 7***	33.4 5***	25.4 2***	12.6 7***	30.9 3***	32.3 9***	32.3 9***	33.8 2***	27.3 7***	29.0 6***	24.5 6***

5.2.4 Discussion

Cette seconde étude a exploré l'impact de diverses combinaisons de modalités de communication sur l'enseignement des mouvements de manipulation d'outils dans un environnement immersif, révélant plusieurs résultats significatifs.

5.2.4.1 Performance

L'erreur d'estimation de la distance a été le premier critère utilisé pour évaluer la performance des apprenants après avoir reçu les instructions multimodales. Les résultats montrent que les combinaisons visuelle-haptique et verbale-visuelle-haptique sont les plus précises pour transmettre l'amplitude du mouvement, entraînant une réduction significative des erreurs lors de l'estimation de l'amplitude. Les résultats de notre première étude avaient indiqué que la modalité visuelle était la plus précise pour communiquer l'amplitude du mouvement et que la modalité verbale était la moins précise des trois. Il n'est donc pas surprenant que la combinaison visuelle-haptique se soit révélée comme la plus efficace dans l'étude actuelle. Ces résultats s'alignent sur ceux de Boustila, Capobianco et Bechmann (2015), qui ont montré que le profil cognitif de l'utilisateur joue un rôle crucial dans la perception des distances. En effet, leur étude a révélé que les utilisateurs visuels sont plus précis lorsqu'ils reçoivent des instructions visuelles, tandis que ceux ayant un profil kinesthésique ou auditif tirent un plus grand bénéfice des informations haptiques, ce qui renforce l'efficacité des combinaison multimodales (Boustila, Capobianco, & Bechmann, 2015). En outre, les instructions transmises avec les modalités haptique et visuelle sont similaires. En effet, elles fournissent des informations sur la forme de la trajectoire plutôt qu'une simple distance absolue (dans le cas des instructions verbales). La "règle spatio-temporelle" stipule que les stimulus présentés en proximité spatio-temporelle ont une probabilité plus élevée d'être combinés pour former une perception d'un événement physique (Meredith, 2002). Dans notre cerveau, les réponses des neurones multisensoriels (neurones intégrant des données provenant de différentes modalités) augmentent en cas de concordance spatio-temporelle et diminuent autrement (Wallace, Meredith, & Stein, 1993). Les instructions visuelles et haptiques sont davantage liées sur le plan spatio-temporel que les

instructions verbales. La similarité spatio-temporelle entre les instructions visuelles et haptiques fournit donc une autre explication à l'amélioration de la précision obtenue par leur combinaison. La précision similaire obtenue avec la combinaison des trois modalités suggère que les informations reçues par la modalité verbale étaient moins utilisées par les participants pour reproduire la trajectoire que celles reçues par les deux autres modalités. Cette observation pourrait être attribuée au fait que les instructions verbales peuvent être soit excessives, soit insuffisantes, ne fournissant pas à l'apprenant les informations nécessaires pour accomplir le geste moteur (Magill & Anderson, 2010). Cela correspond également à des recherches antérieures indiquant que l'incorporation d'instructions haptiques conduit à une amélioration de la performance des participants par rapport aux conditions n'incluant que des instructions visuelles et verbales (Chellali, Dumas, & Milleville-Pennel, 2012). Toutefois, lorsque les instructions verbales étaient combinées avec seulement une autre modalité, les participants étaient moins précis. Cela suggère que les instructions verbales pourraient interférer avec les informations reçues à travers l'autre modalité avec laquelle elle est combinée (visuelle ou haptique).

Le deuxième critère pour évaluer la performance était le temps de réalisation du mouvement. Les résultats ont montré que la reproduction du mouvement est plus rapide avec la combinaison visuelle-haptique. Dans notre première étude, les instructions haptiques avaient entraîné un temps de réalisation du mouvement plus court. Il a également été constaté que les instructions visuelles réduisaient les temps de réalisation par rapport aux instructions verbales. Dans cette seconde expérience, toutes les conditions incluant des instructions verbales ont conduit à l'augmentation des temps de réalisation de la tâche. Ces résultats sont en cohérence avec l'étude de Vitense et al. (2003) montrant que l'introduction de signaux auditifs peut captiver l'attention, entraînant ainsi une diminution de la performance lorsqu'il est associé à des signaux visuels ou haptiques (Vitense, Jacko, & Emery, 2003).

Les trajectoires du mouvement, le troisième critère d'évaluation, renforcent davantage cette hypothèse. Effectivement, les résultats ont montré que les trajectoires des participants étaient plus proches de

celles de référence avec la combinaison des modalités visuelle et haptique qu'avec les autres combinaisons. Comme mentionné précédemment, les instructions verbales ne fournissent pas d'informations sur les trajectoires des outils. Par conséquent, lorsque ces instructions étaient fournies (pendant trois des conditions expérimentales), les participants semblaient s'être davantage concentrés sur l'atteinte de la cible et moins sur la reproduction des trajectoires fournies par les autres modalités (visuelle ou haptique). D'autre part, lorsque les instructions verbales n'étaient pas fournies (condition visuelle-haptique), les participants ont tenté de reproduire la trajectoire du mouvement tout en minimisant l'erreur d'atteinte de la cible. Cela conduit à des trajectoires plus optimisées et à des mouvements plus précis, qui étaient également exécutés plus rapidement. Ces résultats valident notre hypothèse H1, suggérant que la combinaison d'instructions visuelles et haptiques conduit à la meilleure performance.

5.2.4.2 Expérience utilisateur

L'évaluation de l'expérience utilisateur impliquait trois mesures distinctes. La première mesure évaluait la charge mentale perçue par les participants. La deuxième mesure consistait en une évaluation subjective des interactions avec l'instructeur, comprenant le sentiment de présence, de coprésence, de présence sociale et l'expérience d'apprentissage. Enfin, la troisième mesure était axée sur la comparaison des quatre combinaisons de modalités. En ce qui concerne la charge mentale, des recherches antérieures (Sigrist, Rauter, Riener, & Wolf, 2013) ont suggéré que l'apprentissage multimodal réduit la charge mentale en raison de la distribution du traitement de l'information. Les résultats du NASA-TLX n'ont montré aucune différence significative dans les scores entre les combinaisons de modalités, suggérant que les participants n'ont pas perçu de variation de charge mentale. Une méta-analyse récente comprenant 556 études a trouvé que le score moyen brut du NASA-TLX était de 42, tandis que le score moyen brut dans 72 études basées sur la RV (principalement des applications éducatives et de santé) était de 41 (Hertzum, 2021). Sur la base d'instructions unimodales, notre première étude a conduit à des valeurs similaires (une moyenne de score brut de 42). La moyenne des scores bruts du NASA-TLX dans cette étude

(33.95) est nettement inférieure à ces valeurs rapportées. Bien qu'une comparaison systématique entre ces valeurs ne soit pas possible, nos résultats suggèrent que les instructions multimodales, quelles que soient leurs combinaisons, peuvent conduire à une diminution de la charge mentale. L'absence de différence significative entre les combinaisons de modalités contredit quelque peu les résultats des performances des participants. Une explication possible pourrait être la nature simple des instructions fournies (une seule direction et une seule amplitude), qui n'ont pas nécessité un effort mental important pour être traitées. À noter également la grande variabilité observée entre les participants, suggérant des différences inter-individuelles assez importantes et donc des profils différents. Des investigations supplémentaires utilisant des instructions plus complexes combinées avec des mesures plus objectives, telles que le suivi oculaire pour mesurer l'attention, seront nécessaires pour mieux comprendre l'impact potentiel des combinaisons de modalités sur la charge mentale. Par conséquent, l'hypothèse H2 est rejetée.

Les résultats du questionnaire subjectif indiquent que les participants ont ressenti des sentiments de présence, de coprésence, de présence sociale plus forts et une meilleure expérience d'apprentissage avec la combinaison des trois modalités. Ce résultat est conforme à des recherches antérieures indiquant que l'ajout de nouvelles modalités améliore le sentiment de présence (Sallnäs, Rasmus-Gröhn, & Sjöström, 2000), et ainsi, plus il y a de modalités, plus le sentiment de présence des participants est élevé. De plus, Slater et al. (Slater, Sadagic, Usoh, & Schroeder, 2000) expliquent que la présence et la coprésence ont souvent tendance à co-varier, de sorte que lorsque les utilisateurs ressentent un sentiment de présence plus fort, ils ont aussi tendance à ressentir un sentiment de coprésence plus intense. Nos résultats de corrélation sont en cohérence avec ces études et montrent une corrélation positive de la plupart des dimensions subjectives pour l'ensemble des conditions expérimentales. Dans notre première étude, la modalité verbale a également augmenté le sentiment de coprésence par rapport aux modalités visuelles et haptiques seules. Cependant, cette seconde étude diffère quelque peu de la première. En effet, l'instructeur était situé dans la même pièce alors que dans cette nouvelle étude les instructions étaient préenregistrées et l'instructeur

était perçu comme étant distant. De plus, les questionnaires utilisés ici sont différents. En dépit de ces différences, ces résultats suggèrent que la modalité verbale reste importante pour améliorer l'expérience utilisateur dans les EVC, même lorsque le partenaire d'interaction est situé à distance. Ceci est cohérent avec d'autres travaux (Sallnäs, 2004) et vient corroborer notre hypothèse H3. Plus précisément, l'interaction entre les trois modalités est encore meilleure pour améliorer l'expérience utilisateur avec un instructeur distant. Cela suggère que la communication multimodale améliore les interactions interpersonnelles entre l'instructeur et l'apprenant.

Ceci est confirmé par les résultats du questionnaire de comparaison, indiquant que les participants ont préféré les instructions à trois modalités. Ils ont perçu cette combinaison comme la plus appropriée, plaisante, engageante et éducative. Ces conclusions sont en accord avec l'observation selon laquelle l'utilisation des trois modalités contribue à une expérience d'apprentissage améliorée. De plus, les participants ont indiqué que le fait de recevoir des instructions en combinant les trois modalités était associé à une plus grande facilité de compréhension et à une efficacité accrue. Cette combinaison était également la plus précise, ce qui est cohérent avec les mesures de performance.

Il convient de souligner que les tests de corrélations entre les mesures subjectives et les mesures de performance n'ont révélé aucun résultat significatif. Néanmoins, les performances de la condition visuelle-haptique sont en contradiction avec certaines mesures subjectives. En effet, la condition visuelle-haptique ayant conduit à une meilleure trajectoire et un temps de réalisation plus rapide, était moins préférée que la combinaison à trois modalités et était perçue comme plus perturbante. Cela suggère que la nature des instructions reçues est plus importante pour améliorer la performance d'un apprenant que le sentiment de coprésence avec l'instructeur. En outre, l'ajout d'instructions verbales est utile pour améliorer l'expérience utilisateur et a tendance à rassurer les apprenants. Cependant, ces instructions ne doivent pas interférer avec celles provenant des autres modalités au risque de détériorer la performance des apprenants.

5.2.5 Conclusion

Cette seconde étude a évalué l'effet de quatre combinaisons de modalités de communication (verbale-visuelle, verbale-haptique, visuelle-haptique, verbale-visuelle-haptique) sur le transfert d'informations sur les mouvements à réaliser par les apprenants lors de la manipulation d'outils. Cette étude a montré que la combinaison visuelle-haptique et la combinaison verbale-visuelle-haptique étaient les plus efficaces pour augmenter la précision des mouvements. La combinaison visuelle-haptique a également permis une manipulation plus rapide et une meilleure trajectoire de mouvement. Cependant, les participants ont indiqué que la combinaison visuelle-haptique était plus complexe pour mémoriser les instructions spatiales et plus perturbante que la combinaison à trois modalités. De plus, la combinaison à trois modalités a augmenté le sentiment de présence, de coprésence, de présence sociale et la qualité perçue de l'expérience d'apprentissage des participants. Cette dernière combinaison a également été perçue comme la plus adaptée pour l'apprentissage et la mémorisation des instructions.

5.2.5.1 Implications pour la conception

Ces résultats offrent des perspectives précieuses pour la conception d'interactions collaboratives visant à améliorer l'acquisition des compétences de manipulation d'outils au sein d'un EVC. En effet, ils confirment davantage que chaque modalité apporte des avantages distincts pour améliorer la transmission des instructions et que l'utilisation d'une stratégie de communication multimodale est optimale. La combinaison visuelle-haptique est démontrée comme étant la plus appropriée pour améliorer les performances des apprenants lors de la réception d'instructions spatiales sur les mouvements. L'ajout d'instructions verbales peut être utile pour améliorer l'expérience utilisateur et les interactions avec un instructeur distant. Cependant, ces instructions peuvent dégrader les performances des apprenants en interférant avec les informations reçues par le biais des autres modalités. Par conséquent, nous suggérons d'ajouter des instructions verbales pour améliorer la communication avec l'instructeur tout en évitant de les utiliser pour fournir des instructions spécifiques sur les mouvements des outils. Par

exemple, elles peuvent être utilisées avant ou après la transmission des instructions sur le mouvement afin de rassurer les apprenants, attirer leur attention ou leur prodiguer des conseils spécifiques sur la réalisation de la tâche.

5.2.5.2 Limitations et perspectives

Certaines limitations de cette seconde étude doivent être soulignées. Premièrement, nous constatons que l'utilisation de la modalité verbale malgré son association avec d'autres modalités, peut ne pas être adaptée pour fournir des instructions sur les mouvements d'outils complexes tels que les courbes en raison de la précision limitée des descriptions qu'elle peut transmettre. En effet, il est difficile d'exprimer avec précision certaines nuances du mouvement comme la force à appliquer ou un mouvement en forme de courbe à travers des instructions orales, ce qui peut entraver l'efficacité de l'apprentissage. Deuxièmement, nous n'avons pas interrogé les participants après l'expérience sur leur perception de la présence "fictive" de l'instructeur distant. Il est crucial de prendre en compte cette variable dans les prochaines études afin d'analyser si la simulation de la présence de l'instructeur a eu un impact sur l'expérience utilisateur. Troisièmement, notre étude n'a pas examiné l'influence des modalités de communication sur le processus d'apprentissage, mettant en évidence la nécessité d'une étude longitudinale englobant des évaluations de type pré-apprentissage et post-apprentissage. Notre objectif principal dans cette étude était d'acquérir une compréhension plus approfondie des forces et des faiblesses de chaque combinaison de modalités de communication avant de réaliser une étude aussi complète. Compte tenu des résultats obtenus, nos travaux futurs incluront la réalisation d'une étude longitudinale pour examiner les effets de chaque combinaison de modalités sur l'apprentissage. Par ailleurs, nous envisageons également d'examiner comment la combinaison de modalités affecte l'apprentissage lors de l'acquisition de compétences motrices plus complexes dans un EVC. En effet, nos études n'ont montré aucun effet sur la charge mentale malgré une tendance à la baisse lors de l'utilisation de la communication multimodale par rapport à la communication unimodale. Ainsi, l'utilisation d'EVC plus sophistiqués qui reproduisent des scénarios plus proches de ceux observés dans le monde réel (l'apprentissage d'un geste médical, par

exemple) peut augmenter la complexité des tâches et améliorer la pertinence des résultats de l'étude, notamment en termes de l'impact sur la charge mentale. Ceci sera exploré dans notre prochaine étude expérimentale.

Conclusion du chapitre

Les résultats de ces deux études sur les instructions ont offert des premières pistes pour la conception d'environnements virtuels collaboratifs (EVCs) axés sur l'apprentissage des compétences de manipulation d'outils. Ils fournissent des indications claires pour créer des interactions collaboratives efficaces, chaque modalité et chaque combinaison de modalités ayant des avantages distincts pour améliorer le processus de communication entre l'instructeur et l'apprenant. Ainsi, sur la base de ces résultats concernant les interactions de type "instructions", nous allons maintenant mener une nouvelle étude sur les interactions de type "feedback". Cette prochaine étude explorera comment différentes modalités de communication utilisées pour fournir un feedback augmenté peuvent influencer l'acquisition et la maîtrise de compétences techniques de manipulation d'outil dans les EVC.

6 CHAPITRE 5 : TECHNIQUES D'INTERACTION POUR TRANSMETTRE DES FEEDBACKS PENDANT L'APPRENTISSAGE D'UN GESTE TECHNIQUE EN ENVIRONNEMENT VIRTUEL

Le chapitre précédent a été consacré à l'étude de l'impact des modalités de transmission des instructions pendant l'apprentissage d'un geste de manipulation d'outil, avec des deux études expérimentales. Ces études nous ont permis de dégager des premières recommandations importantes pour la conception de techniques d'interaction apprenant-instructeur pour soutenir le compagnonnage en environnement virtuel collaboratif. Dans ce chapitre, nous présentons une étude expérimentale visant à évaluer l'impact des différentes modalités de communication utilisées pour transmettre des feedbacks entre un instructeur et un apprenant au cours de l'apprentissage d'un geste technique de manipulation d'outils dans un environnement virtuel collaboratif. Cette recherche permettra de mieux comprendre comment les modalités visuelle et haptique influencent-elles la communication et le transfert de compétences techniques dans un environnement virtuel collaboratif.

Choix de conception

Similairement à l'étude des interactions pour transmettre des instructions, dans cette partie dédiée au feedback, nous nous focaliserons sur le rôle de l'instructeur et sur la tâche spécifique de la manipulation d'outil. Nous nous intéresserons cependant uniquement aux feedbacks visuels et haptiques car les résultats de nos deux premières études ainsi que des études antérieures (Vitense, Jacko, & Emery, 2003), ont montré que les feedback verbaux pourraient entraîner une diminution des performances chez les participants.

Concernant la modalité visuelle, nous avons opté pour une représentation où la main de l'expert devient semi-transparente lorsque celui-ci souhaite transmettre un feedback augmenté à

l'apprenant. Cette transparence, rendue possible uniquement dans un environnement virtuel, permet à l'apprenant de superposer sa propre main à celle de l'expert sans que cela gêne physiquement son mouvement, ce qui n'est pas réalisable dans le monde réel. Nous supposons donc que cette superposition permettra une imitation plus précise des gestes, car l'apprenant peut mieux suivre les mouvements de l'expert en synchronisant ses propres actions directement sur les gestes observés. Par ailleurs, le choix de visualiser la main avec une perspective à la première personne est conservé afin de faciliter cette superposition.

Pour la modalité haptique, nous avons repris le mode maître-esclave utilisé précédemment avec une légère modification. En effet, les rôles sont quelque peu inversés. En effet, l'instructeur peut superviser passivement le mouvement de l'apprenant et intervient uniquement lorsque cela est nécessaire, laissant l'apprenant libre de manipuler l'outil. Ce choix peut résoudre différents problèmes empêchant une utilisation efficace de cette modalité dans le monde réel, notamment en réduisant les risques de gêne, tout en bénéficiant d'un retour haptique de la part de l'expert uniquement quand cela est pertinent, garantissant une interaction plus fluide et respectueuse de l'espace de travail personnel.

Sur le plan expérimental, nous avons opté pour une étude permettant d'évaluer l'impact du feedback augmenté sur l'apprentissage d'un geste technique. Nous avons donc opté pour une étude de type pré-post-test avec un entraînement entre les deux phases et un groupe contrôle, servant de base de référence. Nous avons également opté pour une tâche expérimentale plus complexe qui se rapproche davantage des tâches observées en anesthésie locorégionale échoguidée.

6.1 EXPERIENCE 3 : EXPLORATION DE L'IMPACT DE FEEDBACKS UNIMODAUX ET MULTIMODAUX PENDANT L'APPRENTISSAGE D'UN GESTE DE MANIPULATION D'OUTIL

6.1.1 Objectif de l'étude et hypothèses

Cette nouvelle étude examine l'impact du feedback augmenté fourni

par un instructeur à un apprenant lors de l'apprentissage d'un geste technique dans un environnement virtuel collaboratif. Nous évaluons l'impact des modalités utilisées pour fournir ce feedback augmenté sur la capacité de l'apprenant à reproduire le mouvement seul, ainsi que sur l'expérience utilisateurs. Les formes de feedback augmenté étudiées sont la modalité visuelle et la modalité visuo-haptique. Nous comparons également ces deux conditions à une condition contrôle avec un groupe d'apprenants n'ayant reçu aucun feedback pendant l'apprentissage. La tâche consiste à reproduire une trajectoire de référence d'un outil aussi précisément que possible. Les différences entre les formes de feedback augmenté sont évaluées en fonction de leur impact sur la performance des apprenants (précision et rapidité), la charge mentale perçue et une évaluation subjective de la qualité de leur collaboration avec l'instructeur pendant la formation. Notre hypothèse générale est que la forme du feedback augmenté influencera différemment la performance, la charge cognitive et l'expérience subjective d'apprentissage des participants. Plus particulièrement, nous nous attendons à ce que :

- **H1** : Le feedback augmenté (unimodal ou multimodal) reçu pendant la formation améliorerait la courbe d'apprentissage des participants en termes de performance par rapport au groupe contrôle.
- **H2** : Le feedback augmenté multimodal (visuo-haptique) reçu pendant la formation améliorerait la courbe d'apprentissage des participants en termes de performance par rapport au feedback augmenté unimodal (uniquement visuel).
- **H3** : Le feedback augmenté (unimodal ou multimodal) reçu pendant la phase de formation réduirait la charge mentale perçue par les participants par rapport au groupe contrôle.
- **H4** : Le feedback augmenté multimodal (visuo-haptique) reçu pendant la phase de formation réduirait la charge mentale perçue par les participants par rapport au feedback augmenté unimodal (uniquement visuel).

- **H5** : Le feedback augmenté multimodal (visuo-haptique) reçu pendant la phase de formation améliorerait la qualité perçue de la collaboration entre les participants et l'instructeur par rapport au feedback augmenté unimodal (uniquement visuel).
- **H6** : L'amélioration des performances entre les pré-tests et les post-tests sera plus importante pour les groupes recevant le feedback augmenté (unimodal ou multimodal) par rapport au groupe contrôle.
- **H7** : L'amélioration des performances entre les pré-tests et les post-tests sera plus importante pour le groupe recevant le feedback augmenté multimodal (visuo-haptique) par rapport au groupe recevant le feedback unimodal (uniquement visuel).

6.1.2 Méthodologie

6.1.2.1 Participants

Cette étude a impliqué 27 participants (8 femmes et 19 hommes), recrutés parmi les étudiants, le personnel universitaire et des participants externes. Aucun critère spécifique d'expertise ou d'expérience préalable avec la réalité virtuelle n'était requis. L'âge moyen des participants était de 30.52 ± 11.26 ans (min = 18, max = 62). Vingt-cinq d'entre eux étaient droitiers et deux gauchers. Tous les participants avaient une vision normale ou corrigée, avec dix d'entre eux portant des lunettes correctrices pendant l'expérience. Tous les participants avaient déjà eu une expérience avec des casques de RV, dont neuf en étaient des utilisateurs réguliers (au moins une fois par semaine). Quatorze d'entre eux avaient déjà eu une expérience avec les dispositifs haptiques, avec un usage essentiellement pendant des démonstrations ou d'autres études expérimentales. Le Comité d'éthique de la recherche de l'Université Paris Saclay a validé le protocole expérimental, et tous les participants ont signé un formulaire de consentement éclairé avant d'être inclus dans l'étude.

6.1.2.2 Tâche expérimentale

La tâche expérimentale s'inspire des gestes médicaux de base nécessitant une coordination précise entre les mains et les yeux lors de

la manipulation d'instruments. Pour réaliser le geste, les participants doivent utiliser une main pour guider avec précision un instrument le long d'un chemin de référence prédéterminé, tandis que l'autre main manipule un outil de visualisation (similaire à une sonde échographique). Ce dispositif reflète des scénarios réels tels que ceux observés en anesthésie locorégionale échoguidée, et peut être généralisé à d'autres interventions médicales. L'objectif est de suivre le chemin de référence du début à la fin à l'aide d'un instrument, tout en ajustant l'outil de visualisation pour afficher la vue optimale le long de la trajectoire, afin d'éviter un certain nombre d'obstacles (**compétence à acquérir**). Pour ce faire, le participant (**apprenant**) doit souvent déplacer l'outil de visualisation vers la gauche ou la droite pour trouver la vue optimale qui maximise la taille de chaque obstacle. La précision était le critère principal pour évaluer la performance des participants. Ainsi, le participant devait suivre le chemin de référence aussi précisément que possible tout en évitant les obstacles. Le participant devait également réaliser la tâche le plus rapidement possible. La tâche se termine une fois que l'instrument a atteint la position finale. Pendant la phase d'entraînement, le participant reçoit un **feedback** augmenté de la part de l'expérimentateur (**instructeur**) afin de corriger son mouvement lorsque cela est nécessaire. Pour ce faire, l'instructeur utilise les **modalités** visuelle ou visuo-haptique.

Cette situation d'apprentissage peut être décrite à travers notre modèle d'interaction comme suit (**Figure 55**) :

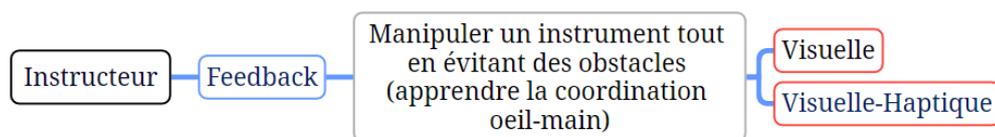


Figure 55 : Projection de la situation d'apprentissage explorée dans l'expérience 3 à travers notre modèle d'interaction.

6.1.2.3 Dispositif expérimentale

6.1.2.3.1 Équipement

L'équipement utilisé (**Figure 56**) comprenait un casque Meta Quest 2 pour afficher l'environnement virtuel aux participants. Ce casque a une résolution de 1832 x 1920 pixels par œil, avec un taux de rafraîchissement de 120Hz et un champ de vision de 90 degrés (horizontal et vertical). De plus, deux dispositifs haptiques Geomagic Touch, avec un espace de travail de 160mm x 120mm x 70mm, ont été utilisés. L'un était manipulé par la main droite du participant pour contrôler l'instrument virtuel et recevoir le feedback augmenté haptique. D'autre part, la main droite de l'instructeur contrôlait l'autre dispositif pour fournir le feedback augmenté (visuel et haptique). Ce dispositif est doté d'un stylet avec un bouton que l'instructeur utilisait pour activer/désactiver le feedback augmenté en appuyant ou relâchant ce bouton. De plus, la main gauche du participant manipulait une manette Meta Quest positionnée à l'envers pour contrôler l'outil de visualisation virtuel. Les participants utilisaient un accoudoir pour reposer leur bras gauche tout en manipulant la manette. De plus, l'instructeur utilisait un écran déporté (29 pouces avec une résolution de 2560 x 1080) pour avoir une vue personnalisée de l'environnement virtuel.

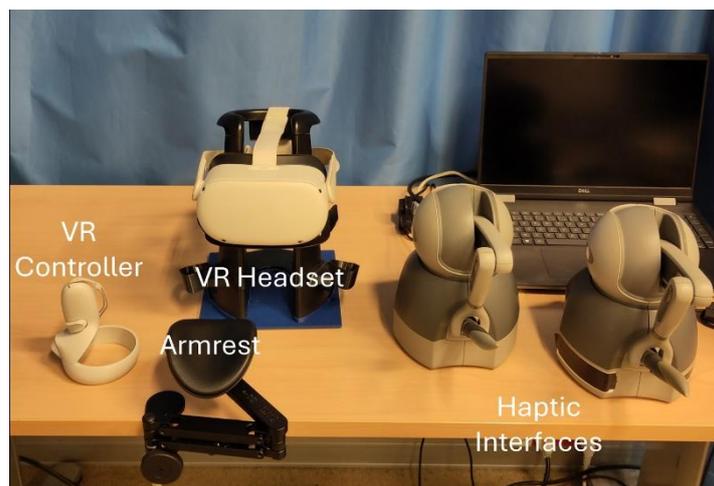


Figure 56 : Dispositif expérimental comprenant un casque VR, un contrôleur, deux dispositifs haptiques et un support pour les bras.

6.1.2.3.2 Environnement virtuel

L'environnement virtuel a été créé à l'aide de Unity 3D (version 2020.3.15f2) et du plugin SteamVR (version 1.17.3). Il se compose d'une pièce avec une table sur laquelle un écran d'affichage était positionné à 45° (**Figure 57**). Les représentations virtuelles des deux mains du participant étaient affichées pendant l'expérience. La main droite tenait l'instrument virtuel qui servait à tracer la trajectoire parcourue, tandis que la main gauche tenait une sonde échographique virtuelle. L'écran virtuel affichait l'espace de travail. Celui-ci comprenait le point de départ, représenté par une sphère verte, et le point d'arrivée, représenté par une sphère bleue. Les obstacles à éviter étaient représentés par des ellipses rouges dont la taille variait en fonction de la position de la sonde échographique. Enfin, la trajectoire parcourue apparaissait progressivement sur l'écran au fur et à mesure que le participant le traçait.

Selon la condition expérimentale, la main virtuelle de l'instructeur tenant un instrument similaire apparaissait par intermittence dans le champ de vision du participant pour afficher le feedback visuel. Elle était colorée en gris foncé et semi-transparente pour la différencier de la main du participant et était contrôlée par le dispositif haptique de l'instructeur (**Figure 57**).

La vue personnalisée de l'instructeur (**Figure 58**) était affichée pendant la phase d'entraînement (cf. section 1.4.3). Elle comprenait le chemin de référence avec les marges d'erreur et les obstacles. L'instructeur pouvait également visualiser sa propre main et son instrument, la main du participant manipulant l'instrument, ainsi que le chemin tracé par le participant. Ces informations simulent des compétences qu'un expert a acquis et qu'il souhaite transmettre à un apprenant. Cela l'aidait à superviser la progression de la tâche et à fournir un feedback augmenté lorsque cela était nécessaire.

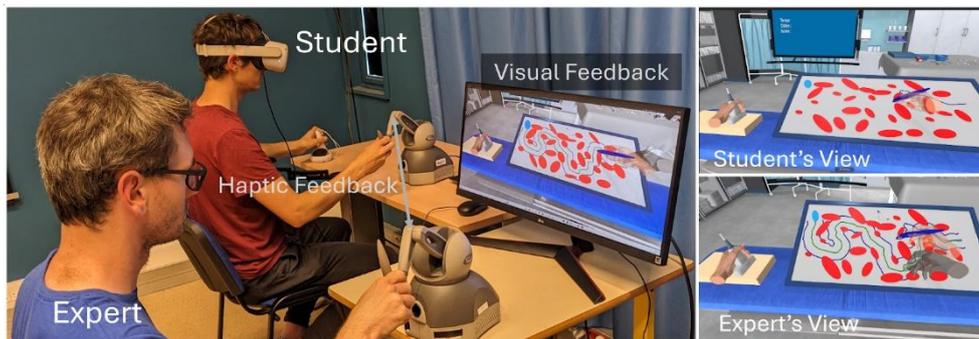


Figure 57 : Illustration de l'étude expérimentale. Pendant la réalisation de la tâche bimanuelle, l'expert supervise la performance de l'apprenant sur une vue personnalisée. En cas d'erreur, l'expert fournit des corrections à l'apprenant en utilisant un feedback augmenté en temps réel. Le feedback peut être visuel : la main virtuelle de l'expert apparaît dans la vue de l'apprenant pour montrer le chemin correct à suivre. Le retour peut également être visuel et haptique : l'apprenant voit la main de l'expert et ressent une force corrective l'orientant vers le bon chemin.

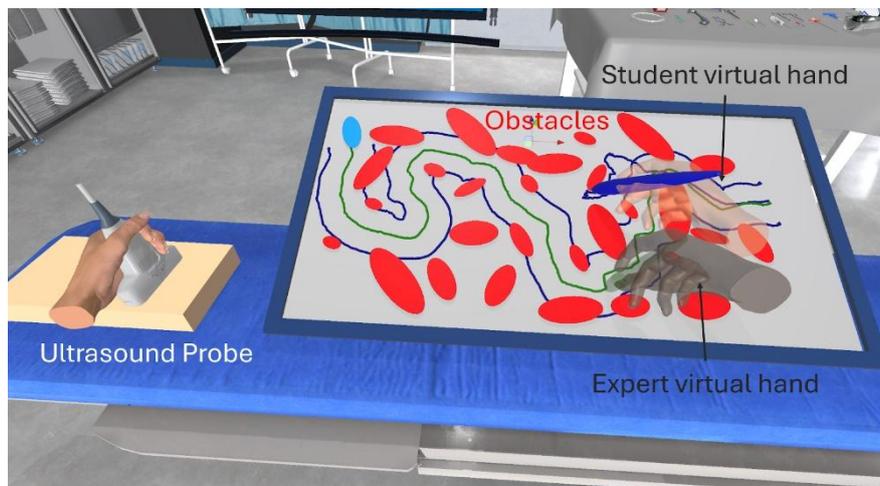


Figure 58 : Vue de l'expert pendant l'expérience. Les participants ne voyaient pas la trajectoire de référence (en vert), ni les marges d'erreur (en bleu). Ils ne voyaient que la main de l'expert lorsque le retour visuel était fourni.

6.1.2.3.3 Scènes virtuelles et interactions

Une série de scènes virtuelles a été présentée aux participants en fonction de la phase expérimentale. Au début de l'expérience, les

participants étaient placés dans une scène de familiarisation où ils pouvaient tester les manipulations du dispositif haptique et du contrôleur. Ils ont notamment expérimenté des forces de friction en traçant le chemin sur l'affichage virtuel et en manipulant la sonde échographique virtuelle pour contrôler l'affichage des obstacles.

Ensuite, les participants étaient placés dans la scène expérimentale principale. Il leur était demandé de positionner l'instrument au point de départ. Une fois cette position atteinte, la phase d'instruction débutait. Cette phase avait pour but de montrer la trajectoire de référence aux participants avant qu'ils ne soient invités à la reproduire individuellement. L'instruction était basée sur des données préenregistrées en utilisant les modalités haptiques et visuelles, comme suggéré par nos études précédentes. Pour ce faire, le dispositif haptique du participant se déplaçait automatiquement le long du chemin de référence, tandis que l'instrument virtuel et la main du participant suivaient ce chemin sur l'écran. Un écran de transition apparaissait à la fin de la phase d'instruction, informant les participants qu'ils pouvaient passer à la phase de pré-test.

Lors de la phase de pré-test, les participants devaient amener l'instrument à la position de départ et tenter de reproduire par eux même la trajectoire apprise, tout en évitant les obstacles. Pour cela, ils devaient déplacer l'instrument pour tracer le chemin, tout en ajustant l'affichage des obstacles pour les éviter. Si la taille de l'obstacle n'était pas maximisée, les participants risquaient de le traverser sans s'en rendre compte, car la zone de contact avec l'obstacle était à sa taille maximale. Les participants devaient atteindre la position finale pour terminer l'essai. Les participants avaient réalisé deux essais dans cette phase. A la fin de chaque essai, un écran de transition apparaissait, indiquant le numéro de l'essai, le temps pris pour réaliser la tâche, ainsi qu'un score mesurant la qualité de la trajectoire.

Ensuite, les participants passaient à la phase d'entraînement. De manière similaire, ils reproduisaient la trajectoire tout en minimisant le temps de chaque essai et le nombre d'obstacles touchés, et en améliorant leur score de trajectoire. Cependant, les participants des deux groupes expérimentaux recevaient un retour augmenté de l'instructeur (selon leur condition expérimentale), tandis que les

participants du groupe contrôle n'en recevaient pas. Après dix essais d'entraînement, les participants devaient compléter deux essais lors de la phase de post-test. Comme pour le pré-test, ces essais étaient réalisés d'une manière individuelle sans les retours de l'instructeur.

6.1.2.4 Plan expérimentale

L'étude était basée sur un plan expérimental mixte avec un facteur inter-sujet (la modalités de feedback) comprenant trois conditions : visuelle, visuo-haptique et contrôle, et un facteur intra-sujets (essai), avec un nombre d'essais différent selon la phase expérimentale. En effet, chaque participant a réalisé 10 essais d'entraînement, 2 essais de pré-test (moyennés) et 2 essais de post-test (moyennés), pour un total de 378 essais enregistrés (14 essais x 27 participants).

Conformément à ce plan expérimental, les participants ont été répartis aléatoirement en trois groupes de neuf participants, chacun assigné à une condition du facteur inter-sujets. Dans la condition de contrôle, les participants ne recevaient aucun feedback pendant la phase d'entraînement. Chacun des deux autres groupes recevait une forme différente de feedback :

- **Feedback visuel** : Pendant que le participant réalisait la tâche, l'instructeur suivait la trajectoire de référence tout en supervisant la progression du participant sur sa vue personnalisée. Lorsque le participant s'écartait du chemin de référence et dépassait la marge d'erreur autorisée (**Figure 57**), l'instructeur appuyait sur le bouton de son dispositif haptique, rendant sa main virtuelle visible pour le participant. Cela permettait au participant d'aligner visuellement sa main avec celle de l'instructeur, l'aidant à corriger son mouvement et à se rapprocher de la trajectoire de référence. Une fois que le participant revenait sur le chemin de référence, l'instructeur relâchait le bouton, et sa main disparaissait de la vue du participant.
- **Feedback visuo-haptique** : Le feedback haptique nécessitait une connexion maître-esclave entre les deux dispositifs haptiques. Le dispositif de l'instructeur fonctionnait comme

maître pour contrôler le dispositif esclave manipulé par le participant. Ainsi, en plus du feedback visuel décrit ci-dessus, le dispositif haptique de l'instructeur appliquait une force sur celui du participant, guidant la main de ce dernier pour l'aligner avec la main virtuelle de l'instructeur. Cette force élastique $F(F_x, F_y)$, illustrée ici en 2 dimension, est appliquée aux deux bras :

$$[F_x/F_y] = K \begin{bmatrix} x_p - x_e \\ y_p - y_e \end{bmatrix} + D \begin{bmatrix} \dot{x}_p - \dot{x}_e \\ \dot{y}_p - \dot{y}_e \end{bmatrix}$$

Où x_p , y_p et x_e et y_e sont les positions des mains du participant et de l'expert respectivement, K est le coefficient de raideur, et D est le coefficient d'amortissement. Cette force corrective restait active tant que l'instructeur maintenait le bouton enfoncé. Une fois que le participant revenait sur le chemin de référence, l'instructeur relâchait le bouton, sa main disparaissait de la vue du participant, et la connexion maître-esclave était désactivée.

6.1.2.5 Procédure expérimentale

La durée moyenne de l'expérience était de 30 minutes par participant. La première étape consistait à présenter l'objectif de l'étude aux participants ainsi que le matériel qu'ils utiliseraient, à l'aide d'une vidéo préenregistrée. Ensuite, il leur était demandé de lire et de signer un formulaire de consentement pour participer à l'étude, puis de remplir un questionnaire démographique. Après cela, les participants devaient enfiler le casque de réalité virtuelle pour commencer l'expérience. Une fois les essais de pré-test et d'entraînement terminés, il leur était demandé de retirer le casque pour remplir le questionnaire NASA-TLX et un questionnaire évaluant la qualité de la collaboration avec l'instructeur. Une fois cette étape accomplie, ils devaient remettre le casque pour effectuer les deux essais de post-test.

6.1.2.6 Mesures et analyses des données

Les mesures objectives utilisaient la capacité des participants à

reproduire la trajectoire de référence. Elles incluent trois métriques : le nombre d'obstacles traversés, la qualité de la trajectoire et le temps d'exécution de la tâche. Le nombre d'obstacles traversés indique le nombre de fois où le chemin tracé traversait un obstacle à sa taille maximale. Des valeurs plus faibles indiquent une meilleure performance. La qualité de la trajectoire était évaluée à l'aide de la méthode de Déformation Temporelle Dynamique (DTD) (Wyvill, McPheeters, & Wyvill, 1986), déjà utilisée lors de l'étude 2. Plus la distance DTD était faible, plus les trajectoires du participant se rapprochaient de la trajectoire de référence. Enfin, le calcul du temps de manipulation pour chaque essai commençait lorsque les participants plaçaient l'instrument à la position de départ et se terminait lorsqu'ils le positionnaient à la position finale. Des valeurs plus faibles indiquent une meilleure performance.

Les mesures subjectives incluent les réponses des participants à divers questionnaires. Ceux-ci comprenaient le questionnaire NASA-TLX (Hart & Staveland, 1988) pour mesurer la charge mentale des participants après la phase d'entraînement, ainsi qu'un questionnaire sur la qualité de la collaboration, évaluent le sentiment de présence sociale, de coprésence, la compréhension perçue, l'interdépendance comportementale perçue et l'expérience d'apprentissage perçue sur une échelle de Likert à cinq points. Comme pour les études précédentes, les questions étaient basées sur des questionnaires utilisés dans des publications internationales revues par des pairs et adaptées pour cette étude. Le sentiment de présence sociale était mesuré à l'aide de trois questions tirées de la dimension de présence sociale du questionnaire de Nowak et Biocca (Nowak & Biocca, 2003). Le sentiment de coprésence était mesuré à l'aide de six questions : deux extraites de la dimension de coprésence du questionnaire de Nowak et Biocca (Nowak & Biocca, 2003), et quatre du questionnaire de Basdogan et al. (Basdogan, Ho, Srinivasan, & Slater, 2000). Les questions sur la compréhension perçue et l'interdépendance comportementale perçue étaient extraites de la mesure de la présence sociale Networked Minds de (Harms & Biocca, 2004). Enfin, l'expérience d'apprentissage était mesurée à l'aide de deux questions déjà utilisées dans nos études précédentes.

L'analyse statistique des données a été effectuée à l'aide du logiciel SPSS, avec un seuil de confiance fixé à 95%. Des tests de Shapiro-Wilk ont été utilisés pour vérifier la distribution normale des données. Le test de Levene a été utilisé pour évaluer l'homogénéité des variances, tandis que le test de Mauchly a été appliqué pour évaluer la sphéricité des données. En fonction de ces vérifications préliminaires, des analyses de variance (ANOVA) mixtes à deux facteurs ont été utilisées. La correction de Greenhouse-Geisser a été utilisée en cas de non-conformité à l'hypothèse de sphéricité. Des comparaisons par paires avec ajustements de Bonferroni ont été utilisées lorsque cela était nécessaire. Enfin, pour les données subjectives recueillies, les tests non-paramétriques de Mann-Whitney U ont été utilisés pour comparer les scores moyens de chaque dimension du questionnaire de la qualité de la collaboration. Une ANOVA à un facteur (One-Way Between-Subjects ANOVA) a été utilisée pour comparer les scores de chaque dimension et le score global du NASA-TLX.

6.1.3 Résultats

6.1.3.1 Phase d'entraînement

Pour la phase d'entraînement avec/sans feedback, un plan mixte 3x10 à deux facteurs a été utilisé. Le facteur intra-sujet était l'essai avec 10 niveaux : E1-E10, et le facteur inter-sujets était la modalité de feedback avec 3 niveaux : feedback visuel (Visuel), feedback visuo-haptique (Visuel-Haptique) et le groupe contrôle sans feedback (Contrôle). L'analyse statistique pour chaque mesure est présentée dans ce qui suit.

6.1.3.1.1 Nombres de cibles touchées

Les résultats de l'ANOVA mixte à trois facteurs 3x10 (sphéricité non assumée, correction de Greenhouse-Geisser utilisée) ne montrent aucun effet principal du facteur Essai ($F_{(4.50, 108.10)} = .29, p = .89, \eta^2 \text{ partiel} = .01$), ni d'effet d'interaction entre le facteur Essai et la modalité de feedback ($F_{(9.00, 108.10)} = 1.60, p = .12, \eta^2 \text{ partiel} = .12$) sur le nombre de cibles touchées (**Figure 59**). En revanche, les résultats montrent un effet principal de la modalité de feedback ($F_{(2.00, 24.00)} = 5.73, p = .009, \eta^2 \text{ partiel} = .32$) sur le nombre de cibles touchées. Les comparaisons par

paires avec la correction de Bonferroni montrent que les participants du groupe contrôle ont touché les cibles de manière significativement plus fréquente que les participants du groupe Visuel (p ajusté = 0.04) et du groupe Visuel-Haptique (p ajusté = 0.01). Aucune différence significative n'a été observée entre les groupes Visuel et Visuel-haptique.

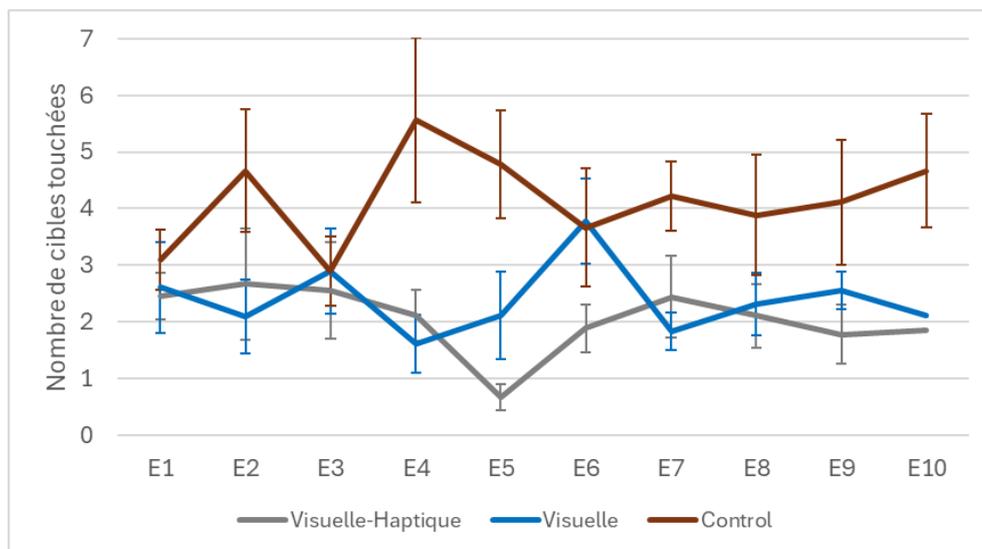


Figure 59 : Nombre moyen de cibles touchées pendant la phase d'apprentissage.

6.1.3.1.2 Qualité de la trajectoire

Les résultats de l'ANOVA mixte à trois facteurs 3×10 (sphéricité non assumée, correction de Greenhouse-Geisser utilisée) montrent un effet principal de la variable Essai ($F_{(2,56, 61,25)} = 3.43$, $p = 0.02$, η^2 partiel = .12) et un effet principal de la modalité de feedback ($F_{(2, 24)} = 9.06$, $p = .001$, η^2 partiel = .43) sur le score DTD (**Figure 60**). En revanche, les résultats ne montrent pas d'effet d'interaction entre le facteur Essai et la modalité de feedback ($F_{(5,12, 61,25)} = 1.65$, $p = .15$, η^2 partiel = .12) sur les scores DTD. Les comparaisons par paires avec la correction de Bonferroni montrent que les trajectoires des participants étaient significativement plus proches de la trajectoire de référence dans le groupe Visuel (p ajusté = .005) et le groupe Visuel-Haptique (p ajusté

=.003) que dans le groupe contrôle. Aucune différence significative n'a été observée entre les groupes Visuel et Visuel-Haptique. De plus, les comparaisons par paires avec la correction de Bonferroni ne montrent pas de différence significative entre les essais, indiquant que l'amélioration des performances au fil du temps n'était pas significative.

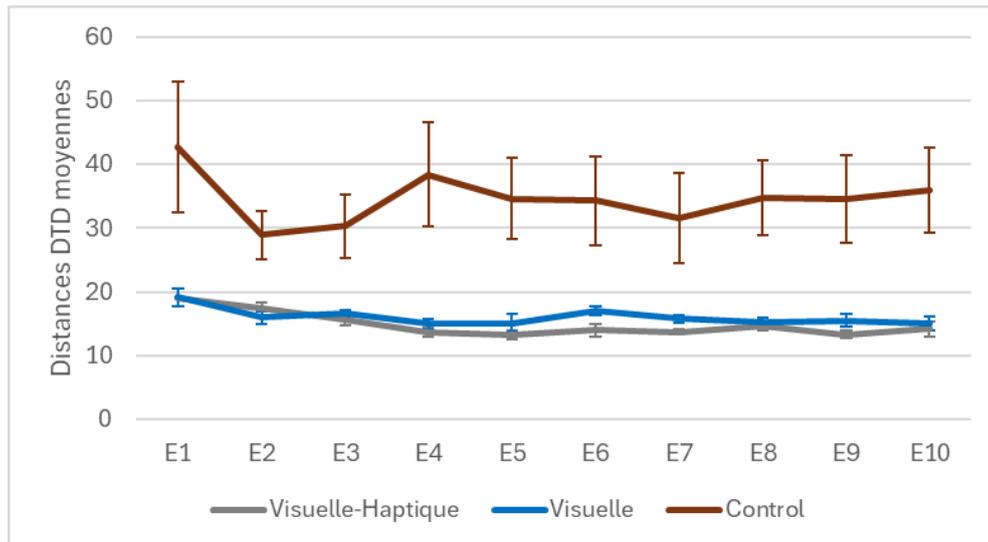


Figure 60 : Qualité de la trajectoire calculée sur la base des distances DTD moyennes entre les trajectoires des participants et celles de référence pendant la phase d'apprentissage.

6.1.3.1.3 Temps de réalisation de la tâche

Les résultats de l'ANOVA mixte à trois facteurs 3x10 (sphéricité non assumée, correction de Greenhouse–Geisser utilisée) montrent un effet principal de la variable essai ($F_{(3,40, 81.68)} = 13.55, p < .0001, \eta^2$ partiel = .36) et un effet principal de la modalité de feedback ($F_{(2, 24)} = 15.98, p < .0001, \eta^2$ partiel = .57) sur le temps de réalisation de la tâche (**Figure 61**). En revanche, les résultats montrent seulement un effet d'interaction marginal entre le facteur Essai et la modalité de feedback ($F_{(6,80, 104.757)} = 2.01, p = .06, \eta^2$ partiel = .014). Les comparaisons par paires avec la correction de Bonferroni montrent que les participants du groupe Visuel-Haptique ont accompli la tâche de manière significativement plus lente que ceux du groupe contrôle (p ajusté $< .0001$) et du groupe Visuel (p ajusté = .01). Aucune différence

significative n'a été observée entre les groupes Visuel et Contrôle. De plus, les comparaisons par paires avec la correction de Bonferroni montrent une différence significative entre E1 et E4-E10, entre E2 et E5-E10, et entre E3 et E10 (toutes les valeurs p ajustée étaient $<.05$), avec des temps de réalisations qui diminuent au fil des essais. Aucune autre différence significative n'a été observée.

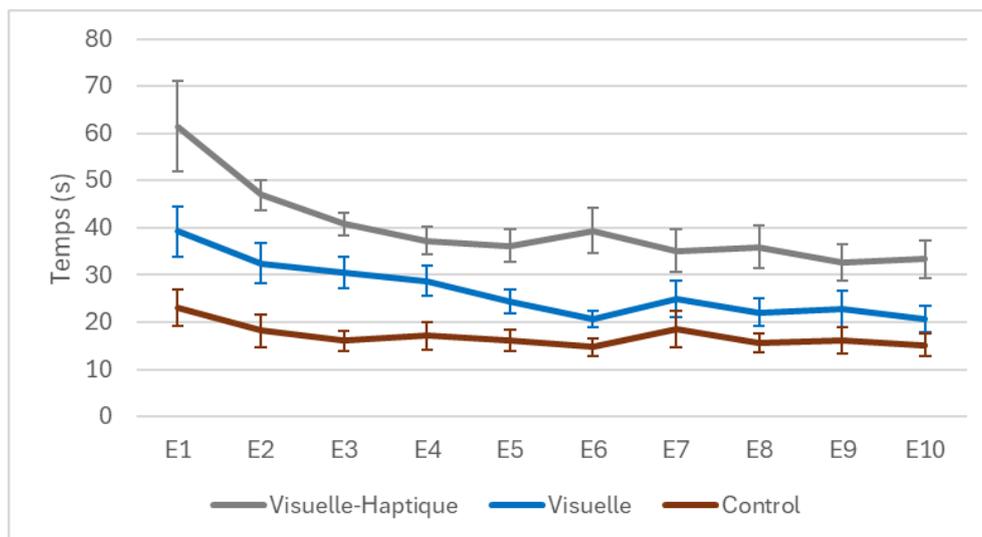


Figure 61 : Temps moyen de réalisation de la trajectoire pendant la phase d'apprentissage.

6.1.3.1.4 Nombre d'intervention de l'expert

Comme l'expert n'a pas fourni de feedback pendant l'entraînement du groupe contrôle, seules les performances des deux groupes avec feedback ont été comparées. Les résultats de l'ANOVA mixte à deux facteurs 2×10 (sphéricité non assumée, correction de Greenhouse–Geisser utilisée) montrent un effet principal du facteur Essai ($F_{(3.56, 56.96)} = 13.55$, $p < .0001$, η^2 partiel = .47) sur le nombre d'interventions de l'expert (**Figure 62**). En revanche, les résultats ne montrent pas d'effet principal de la modalité de feedback ($F_{(1, 16)} = 0.05$, $p = .81$, η^2 partiel = .03) ni d'effet d'interaction entre le facteur Essai et la modalité de feedback ($F_{(3.56, 56.96)} = 1.52$, $p = .21$, η^2 partiel = .08). Les comparaisons par paires avec la correction de Bonferroni montrent une différence

significative entre E1 et E4-E10, E2 et E5, E9 et E10, E3 et E10, et E4 et E10, avec une diminution du nombre d'interventions de l'expert au fil des essais. Aucune autre différence significative n'a été observée.

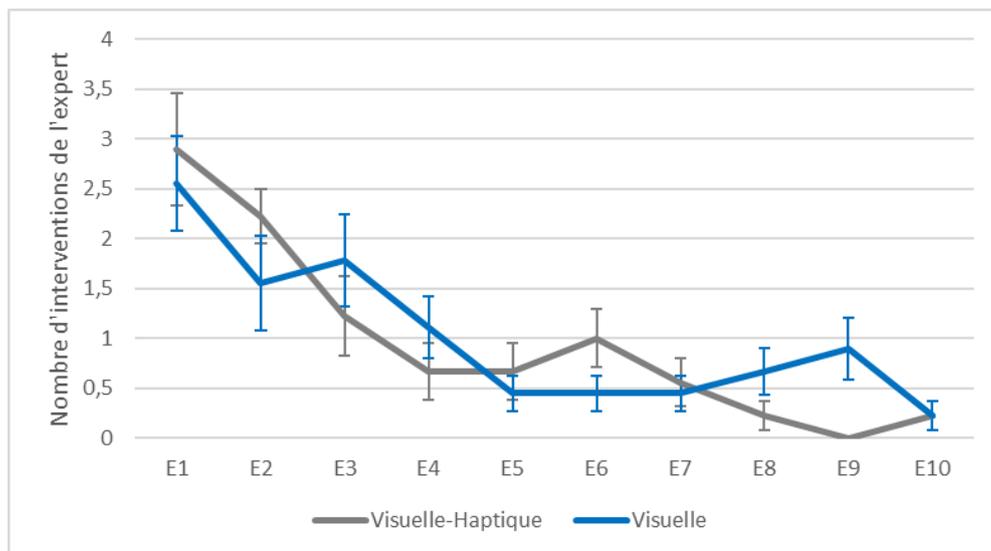


Figure 62 : Nombre d'intervention de l'expert pendant la phase d'apprentissage

6.1.3.1.5 Questionnaire de la qualité de collaboration

Les tests de Mann-Whitney U pour échantillons indépendants (**Figure 63**) ne montrent aucun effet significatif de la modalité de feedback sur les scores de quatre des cinq dimensions du questionnaire de la qualité de collaboration. En revanche, un effet significatif de la modalité de feedback est observé pour les scores de la dimension « Interdépendance comportementale perçue » (**Tableau 13**, Mann-Whitney U= 16.5, $p= .03$). Le score moyen pour cette dimension était significativement plus élevé pour la condition Visuel-Haptique que pour la condition Visuel.

Tableau 13 : Tests de Mann-Whitney U pour le questionnaire de la qualité de collaboration.

Dimensions	Mann-Whitney U	Valeur de p
Présence sociale	31.5	.42
Coprésence	36.5	.72
Compréhension perçue	36.0	.68
Interdépendance comportementale perçue	16.5	.03*
Expérience d'apprentissage	27.0	.25

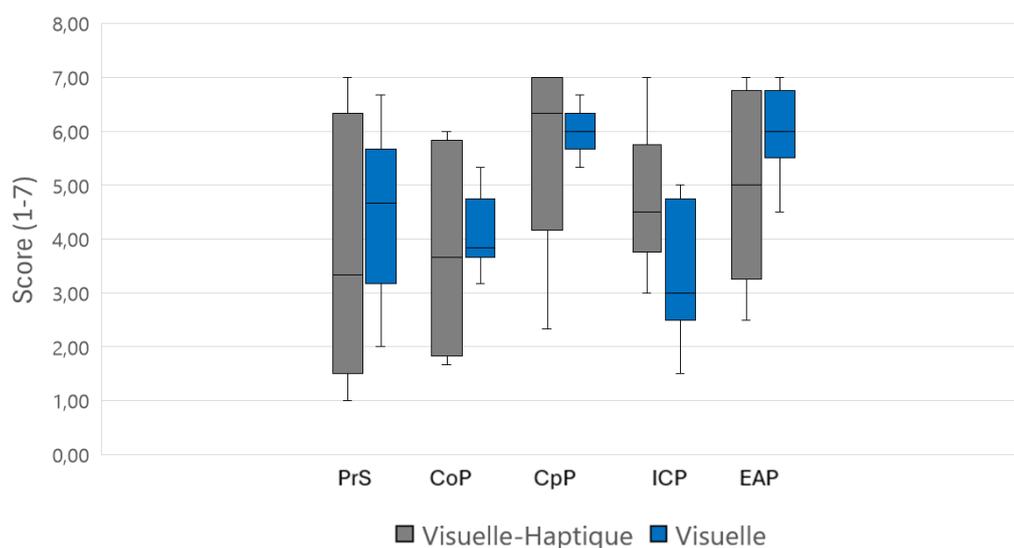


Figure 63 : Boxplots avec médianes montrant les résultats (le plus élevé est le meilleur) des sous-échelles du questionnaire de la qualité de la collaboration (échelle de 1 à 7) : Présence sociale (PrS), Coprésence (CoP), Compréhension perçue (CpP), Interdépendance comportementale perçue (ICP), Expérience d'apprentissage perçue (EAP)

6.1.3.1.6 Charge cognitive perçue

Nous avons comparé à la fois les scores bruts du NASA-TLX et les sous-échelles individuelles, ce qui est une pratique courante avec le NASA-TLX [hart2006nasa]. Les scores moyens bruts du NASA-TLX étaient plus bas dans le groupe avec feedback Visuel-Haptique (38.61 ± 8.40) que dans le groupe avec feedback Visuel (50.83 ± 15.84) et dans le groupe Contrôle (48.51 ± 8.18), indiquant une charge de travail inférieure. L'ANOVA à un facteur inter-sujets suggère que cette différence est marginale ($F_{(2.00, 24)} = 2.92$, $p = .07$, η^2 partiel = .19). Les analyses par dimension (**Figure 64**) montrent un effet significatif de la modalité de feedback sur la demande physique ($F_{(2.00, 24)} = 4.14$, $p = .02$, η^2 partiel = .25), sur la satisfaction vis-à-vis de sa propre performance ($F_{(2.00, 24)} = 6.48$, $p = .006$, η^2 partiel = .35) et sur l'effort ($F_{(2.00, 24)} = 3.41$, $p = .04$, η^2 partiel = .22). Les comparaisons post hoc montrent que les participants du groupe avec feedback Visuel-Haptique ont rapporté une demande physique significativement plus faible par rapport aux participants du groupe avec feedback Visuel ($p = .008$). Ils ont également rapporté une satisfaction significativement plus élevée vis-à-vis de leur propre performance par rapport aux participants du groupe avec feedback visuel ($p = .04$) et du groupe Contrôle ($p = .002$). Enfin, ils ont rapporté des niveaux d'effort plus faibles que les participants du groupe avec feedback Visuel ($p = .02$) et du groupe Contrôle ($p = .04$). Aucune autre différence significative n'a été observée.

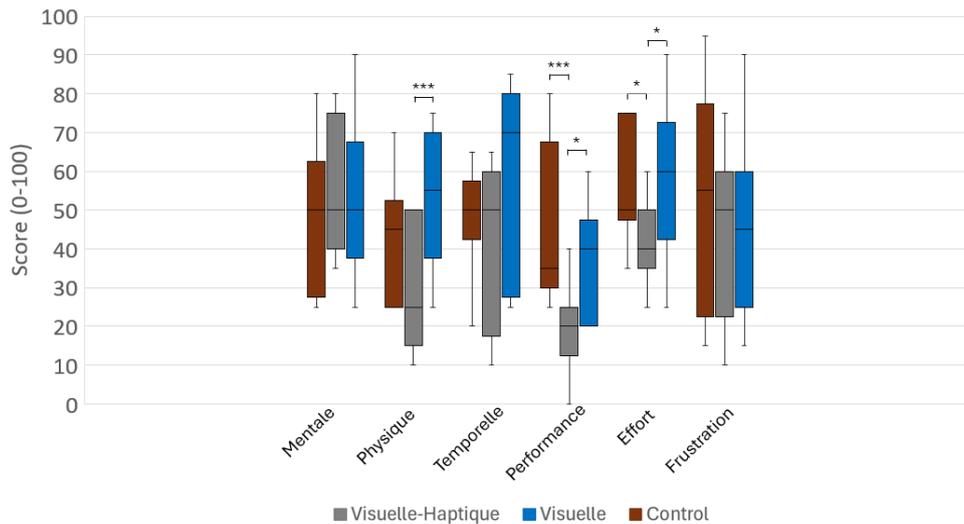


Figure 64 : Boîtes à moustaches avec médianes montrant les scores des sous-dimensions du NASA-TLX (échelle de 0 à 100, un score plus bas est mieux) : demande mentale, demande physique, demande temporelle, performance personnelle, effort et niveau de frustration (*= $p < .05$, ***= $p < .001$)

6.1.3.2 Pré et Post-tests

Pour les comparaisons entre les pré-tests et les post-tests, un plan expérimental mixte 2x3 à deux facteurs a été utilisé. Le facteur intra-sujets était le Test avec deux niveaux : Pré-test et Post-test, et le facteur inter-sujet était la modalité de feedback avec trois niveaux : le groupe de feedback Visuel-Haptique, le groupe de feedback Visuel, et le groupe Contrôle sans feedback. Les analyses pour chaque mesure sont présentées ci-dessous.

6.1.3.2.1 Nombre de cibles touchées

Les résultats de l'ANOVA mixte à deux facteurs 2x3 montrent un effet principal du Test ($F_{(1, 24)} = 16.66$, $p = < .001$, η^2 partiel = .41) et un effet principal de la modalité de feedback ($F_{(2, 24)} = 16.66$, $p = .03$, η^2 partiel = .24) sur le nombre d'obstacles touchés. En revanche, aucun effet d'interaction entre les deux variables ($F_{(2, 24)} = 1.00$, $p = .38$, η^2 partiel = .07) n'a été observé. Les résultats montrent une amélioration des performances au post test par rapport au prétest pour tous les groupes (**Figure 65**). De plus, les comparaisons par paires avec la correction de

Bonferroni montrent que la différence entre le groupe de contrôle et le groupe Visuel-Haptique était marginale (p ajusté = .05). Aucune autre différence significative n'a été observée.

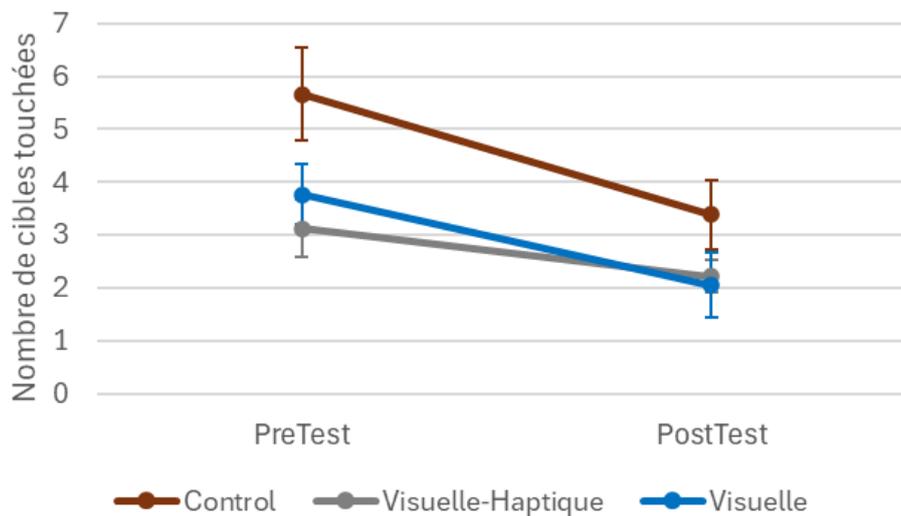


Figure 65 : Nombre moyen de cible touchées entre le pré et le post-test.

6.1.3.2.2 Qualité de la trajectoire

Les résultats de l'ANOVA mixte à deux facteurs 2x3 montrent un effet principal du Test ($F_{(1, 24)} = 43.13, p < .0001, \eta^2$ partiel = .64) et un effet d'interaction entre les variables Test et modalités de feedback ($F_{(2, 24)} = 10.64, p < .0001, \eta^2$ partiel = .47) sur les scores DTD (**Figure 66**). En revanche, aucun effet principal de la modalité de feedback ($F_{(2, 24)} = 1.91, p = .16, \eta^2$ partiel = .13) n'a été observé. Pour identifier où se situe l'interaction le long des niveaux des deux variables indépendantes, une série d'ANOVA complémentaires a été réalisée (comme suggéré par (Gignac, 2023)). Ainsi, trois ANOVA 2x2 ont été effectuées pour tester toutes les interactions possibles entre les trois niveaux de la modalité de feedback et les deux niveaux de la variable Test. Des ajustements de Bonferroni ont été utilisés pour réduire les risques d'erreur de Type I. Les résultats indiquent que seules deux interactions étaient statistiquement significatives. Ainsi, l'effet de la modalité de feedback au fil du temps s'est produit uniquement entre le groupe de contrôle et les deux autres groupes. Cela suggère que les deux groupes ayant reçu un feedback d'un expert pendant l'entraînement ont amélioré

leurs trajectoires de manière significativement plus importante entre le pré-test et le post-test par rapport au groupe Contrôle. En revanche, les résultats ne montrent pas de différence entre les deux groupes ayant reçu un feedback expert en ce qui concerne l'amélioration des performances au fil du temps.

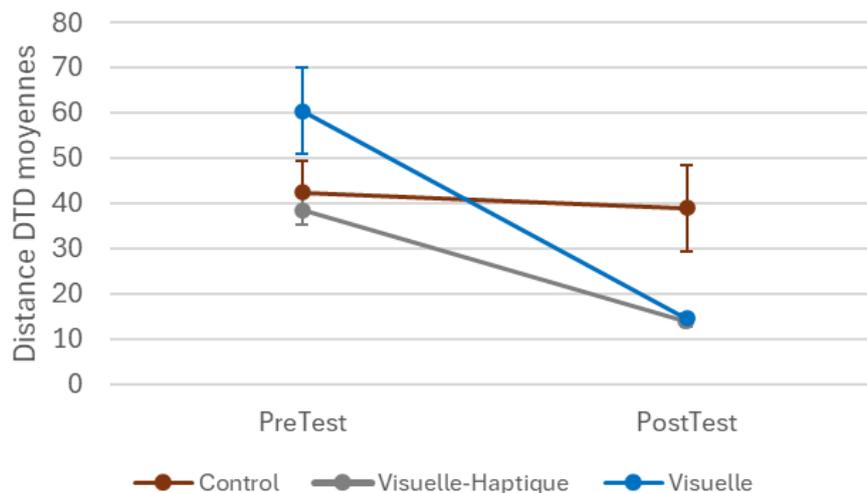


Figure 66 : Qualité de la trajectoire calculée à partir des distances DTD moyennes (entre la trajectoire du participant et celle de référence) entre le pré-test et le post-test.

6.1.3.2.3 Temps de réalisation de la tâche

Les résultats de l'ANOVA mixte à deux facteurs 2x3 montrent un effet principal du Test ($F_{(1, 24)} = 11.05$, $p = .003$, η^2 partiel = .31) et un effet principal de la modalité de feedback ($F_{(2, 24)} = 16.66$, $p = .002$, η^2 partiel = .40) sur les temps de réalisation de la tâche. En revanche, aucun effet d'interaction entre les deux variables ($F_{(2, 24)} = 1.24$, $p = .30$, η^2 partiel = .009) n'a été observé. Les résultats montrent que tous les groupes ont réalisé la tâche de manière significativement plus rapide lors du post-test en comparaison avec le pré-test (**Figure 67**). De plus, les comparaisons par paires avec la correction de Bonferroni montrent que les participants du groupe contrôle ont accompli la tâche de manière significativement plus rapidement que ceux du groupe avec le feedback Visuel-Haptique (p ajusté = .002). En revanche, la différence entre les groupes avec feedback Visuel et Visuel-Haptique était marginale (p ajusté = .05).

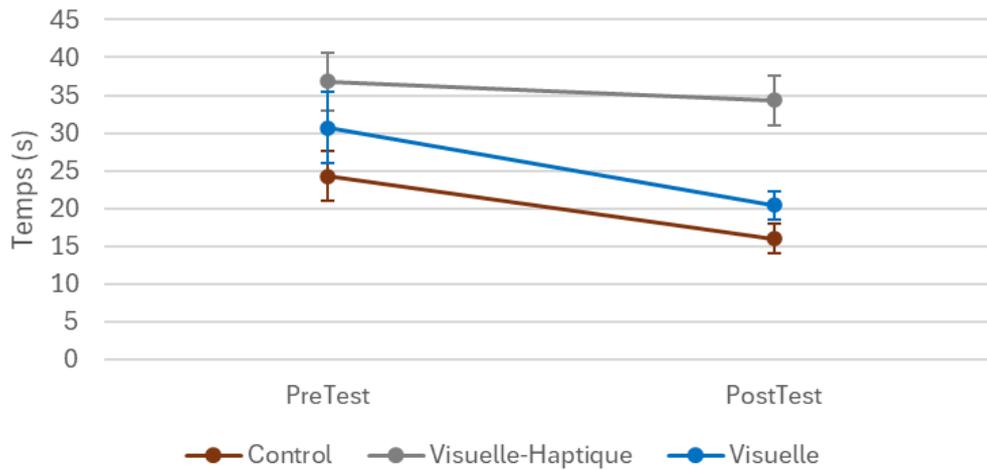


Figure 67 : Temps moyen de réalisation de la tâche entre le pré et le post-test.

6.1.4 Discussion

6.1.4.1 Performances des apprenants

6.1.4.1.1 Phase d'entraînement

L'analyse des résultats de la phase d'entraînement permet de mieux comprendre la dynamique de la courbe d'apprentissage avec et sans feedback augmenté dans l'environnement virtuel collaboratif. Bien qu'aucun des trois groupes n'ait significativement amélioré sa performance en termes de qualité de la trajectoire et du nombre d'obstacles touchés durant la phase d'entraînement, les participants ayant reçu un feedback ont obtenu de meilleurs résultats que le groupe contrôle tout au long de la session. Ces résultats valident partiellement l'hypothèse H1 et corroborent les études existantes qui soulignent le rôle crucial du feedback augmenté dans l'amélioration des performances motrices, en permettant aux apprenants de corriger leurs erreurs, d'optimiser leurs mouvements et de savoir si l'objectif est atteint, afin d'ajuster leur stratégie en conséquence (Lauber & Keller, 2014; Moinuddin, Goel, & Sethi, 2021). Puisque les participants ont reçu le feedback dès le début de la phase d'entraînement, ils ont pu corriger leurs mouvements immédiatement et maintenir cette performance même lorsque le nombre de feedbacks et corrections de trajectoire fournis par l'expert a diminué de manière significative (il était presque

nul à la fin de la phase d'entraînement). En revanche, les participants du groupe contrôle ont eu du mal à améliorer leurs performances en s'entraînant seuls et ont conservé la même qualité de trajectoire et le même niveau d'obstacles touchés, même après dix sessions d'entraînement.

D'autre part, le feedback visuo-haptique a entraîné un temps de réalisation de la tâche plus long que celui observé dans les groupes Visuel et Contrôle. Cette différence peut être principalement liée à une différence initiale dans les performances en termes de temps de réalisation de la tâche entre le groupe Visuel-Haptique et les deux autres groupes. Cela est confirmé par l'analyse des résultats du pré-test et du post-test. Bien qu'une procédure de randomisation ait été utilisée pour distribuer les participants sur les trois groupes expérimentaux, il peut arriver parfois qu'une différence statistique dans une variable dépendante soit observée au début de l'expérience (avant l'intervention expérimentale), surtout lorsque le nombre de participants est limité (Gignac, 2023). De plus, nos résultats indiquent que les trois groupes ont réduit leur temps de réalisation, mais la différence dans cette amélioration de performance n'était pas significative entre les groupes (l'effet d'interaction est marginal). Cela suggère l'existence d'un effet d'apprentissage similaire pour les trois groupes. Étant donné que la précision était le critère principal d'évaluation des performances, cette amélioration des temps de réalisation peut simplement refléter une habitude des participants à la tâche et au dispositif.

Enfin, contrairement à nos attentes, aucune différence significative en termes de performance n'est observée entre les groupes Visuel et Visuel-Haptique, ce qui rejette l'hypothèse H2. Cette différence non significative pourrait être liée à la nature visuo-spatiale de la tâche. Effectivement, les indices visuels affichés à l'écran semblent suffire pour guider les participants, rendant le feedback haptique superflue pour ce type de tâche. Selon Hecht et Reiner (Hecht & Reiner, 2009), le système visuel domine souvent les autres modalités, comme l'haptique dans les tâches spatiales. Cette dominance visuelle est également confirmée par les recherches de Krakauer et Mazzoni (Krakauer & Mazzoni, 2011), indiquant que l'apprentissage sensorimoteur repose sur une adaptation continue aux indices visuels,

en particulier dans les tâches spatiales où la précision est cruciale. Les participants semblaient principalement se fier aux obstacles visuels, au tracé dessiné, et à la main de l'instructeur (feedback visuel) pour mémoriser et exécuter la trajectoire, sans tirer de bénéfices supplémentaires du feedback haptique fourni par l'instructeur. Eaves et al. (Eaves, Riach, Holmes, & Wright, 2016) expliquent que, bien que la rétroaction haptique puisse parfois être utile, elle ne fournit pas nécessairement des avantages significatifs dans les tâches dominées par des indices visuels. De plus, Riener et Harders (Riener, Harders, Riener, & Harders, 2012) montrent que lorsque les indices visuels sont disponibles et suffisants pour guider l'utilisateur, la rétroaction haptique peut parfois ralentir l'exécution de la tâche. Tagliabue explique que l'intégration simultanée d'informations provenant de plusieurs canaux sensoriels lors du contrôle moteur peut entraîner des conflits sensoriels lorsque les signaux sont incongruents ou redondants (Tagliabue & McIntyre, 2014). Cela pourrait également expliquer en partie pourquoi le feedback haptique a conduit à des temps de réalisation de la tâche plus longs.

En résumé, dans les tâches où la précision spatiale est importante, les utilisateurs ont tendance à se fier principalement aux indices visuels pour guider leurs actions plutôt qu'aux indices haptiques.

Enfin, Wolpert et Flanagan (Wolpert & Flanagan, 2010) nous rappellent que l'apprentissage moteur est un processus dans lequel la répétition et l'auto-correction jouent un rôle central. Cette répétition des essais, combinée au feedback augmenté, a permis aux participants de raffiner leurs schémas moteurs sans dépendre constamment des retours de l'instructeur, ce qui explique la diminution progressive des interventions de l'expert, quel que soit le type de feedback reçu.

6.1.4.1.2 Phase Pré et Post-test

Les résultats des phases de pré-test et post-test confirment les observations faites durant la phase d'entraînement. L'interaction significative dans la mesure de la qualité de la trajectoire indique que les participants ayant reçu des retours ont montré une amélioration significative de la qualité de leur trajectoire. En revanche, les participants du groupe contrôle n'ont pas montré d'amélioration. Cela

confirme partiellement l'hypothèse H6. Ces résultats mettent en lumière une amélioration notable des performances des participants entre le pré-test et le post-test.

Il semble que le feedback reçu par les participants, qu'il soit visuel ou visuo-haptique, les ait aidés à améliorer leurs performances. Ces résultats sont en accord avec la littérature, qui indique que la présence d'un expert est importante pour un apprentissage efficace et améliore les performances des apprenants (Ojala, Sirola, Nykopp, Kröger, & Nuutinen, 2022; Fong, Mansor, Zakaria, Sharif, & Nordin, 2012). De plus, les résultats montrent que recevoir des feedbacks d'un expert permet aux apprenants d'améliorer leur performance motrice, ce qui est en accord avec l'étude de Lauber (Lauber & Keller, 2014).

D'un autre côté, tous les groupes ont réduit le nombre d'obstacles traversés. Ce résultat n'est pas surprenant puisqu' aucun des trois groupes n'a reçu de feedback sur la manipulation de l'outil de visualisation (la sonde échographique). Par conséquent, ce gain de performance est probablement dû à l'entraînement et à l'habituation à la tâche. Au début, les participants semblaient s'être davantage concentrés sur la trajectoire et ne faisaient pas autant attention à l'évitement des obstacles. Après un certain entraînement et avec plus de confiance dans l'exécution de la tâche, ils semblaient avoir libéré davantage de ressources cognitives pour contrôler la sonde et éviter les obstacles. C'est également le cas pour le temps de réalisation de la tâche, qui montre des améliorations similaires entre les sessions de pré-test et de post-test pour tous les groupes, probablement en raison de l'entraînement et de l'habituation à la tâche et au dispositif expérimental. Encore une fois, le groupe avec feedback visuo-haptique a montré un temps d'exécution plus long que les deux autres groupes, mais la différence était similaire pour les deux sessions (aucune interaction significative n'a été observée). Ceci reflète encore une fois une différence de performance initiale entre les participants plutôt qu'une différence liée à l'intervention expérimentale, comme expliqué précédemment.

Enfin, comme observé lors de la phase d'entraînement, aucune différence significative n'a été trouvée entre les groupes Visuel et Visuel-Haptique, ce qui conduit au rejet de l'hypothèse H7. Une fois de

plus, la nature visuelle de la tâche semble réduire l'influence du feedback haptique. Selon Eaves et al. (Eaves, Riach, Holmes, & Wright, 2016), l'efficacité du feedback haptique peut varier en fonction de la tâche, et dans certains cas, elle peut même gêner la performance. Dans notre étude, bien que le feedback haptique n'ait pas détérioré les performances, il n'a pas non plus contribué à une amélioration notable. De futures études seront intéressantes pour étudier l'impact du feedback haptique sur des tâches avec moins d'indices visuels, par exemple avec moins d'obstacles et sans tracé du chemin lors de l'exécution de la trajectoire.

6.1.4.2 Mesures subjectives

Les résultats du questionnaire NASA-TLX montrent que la combinaison des modalités visuelle et haptique réduit significativement la charge mentale perçue par les participants, comparée au feedback visuel seul ou l'absence de feedback (groupe contrôle), validant ainsi l'hypothèse H4 et validant partiellement H3. Ces résultats sont en accord avec la littérature qui rapporte que l'intégration de différentes modalités dans des environnements d'apprentissage collaboratifs peut diminuer la charge cognitive (Erlandson, Nelson, & Savenye, 2010). La revue de littérature présentée par Sigrist et al. (Sigrist, Rauter, Riener, & Wolf, 2013) corroborent ces conclusions en montrant que la combinaison de plusieurs modalités sensorielles, telles que visuelle et haptique, peut alléger la charge mentale lors de l'acquisition de compétences motrices.

Dans notre étude, la différence est principalement liée aux dimensions de la demande physique, de la performance et de l'effort. Il semble que le feedback haptique, en plus des aides visuelles, fournit une assistance physique qui allège la charge de l'apprenant, lui donnant l'impression de fournir moins d'effort. Cette réduction perçue de l'effort physique semble avoir un impact positif sur sa perception de sa propre performance. Ces résultats sont cohérents avec les recherches précédentes sur les effets des feedbacks multimodaux sur l'apprentissage moteur et la charge cognitive. En effet, l'étude de Vitense explique que les participants exposés à un feedback Visuel-Haptique ont rapporté une demande physique et un effort perçus significativement plus faibles, ainsi qu'une performance perçue plus

élevée (Vitense, Jacko, & Emery, 2003). Nos travaux confirment donc ces résultats mais dans le contexte d'un apprentissage dans un environnement virtuel immersif.

Les résultats du questionnaire de la qualité de collaboration montrent des scores plus élevés sur la dimension de l'Interdépendance Comportementale Perçue (ICP) pour le groupe Visuel-Haptique en comparaison avec le groupe Visuel, validant partiellement l'hypothèse H5. L'étude montre que l'ajout du feedback haptique dans les environnements d'apprentissage par compagnonnage peut renforcer le sentiment d'interdépendance comportementale entre l'apprenant et le formateur. Cela s'explique par le fait que le feedback haptique crée une forme de contact qui améliore la perception de l'action conjointe et de la collaboration entre individus, comme le souligne l'étude de Van Erp et Toat (Van Erp & Toet, 2015). Cependant, l'acceptation et l'appréciation du feedback haptique varient d'une personne à l'autre, comme le montrent les fortes variations interindividuelles parmi les participants pour les autres dimensions du questionnaire. Cela suggère que le feedback haptique est perçu différemment selon les individus. L'étude de Crandall et al. (Crandall & Karadoğan, 2021) indiquent que, malgré les avantages des feedbacks haptique pour l'apprentissage, le recours à des systèmes haptiques n'est pas perçue de manière uniforme par tous les apprenants. En effet, certains d'entre eux perçoivent ces systèmes haptiques comme perturbants ou difficiles à utiliser en raison de leur préférence personnelle ou de leur style d'apprentissage. Ces résultats sont également exprimés dans l'étude de Shaikh et al. (Shaikh, et al., 2017), indiquant que certains participants peuvent éprouver des difficultés à s'adapter à cette modalité notamment lorsque celle-ci s'ajoute à d'autres stimuli sensoriels. De plus, notre première étude a montré que la modalité haptique était la plus perturbante lorsqu'elle est utilisée par le formateur pour transmettre des instructions. Ces trois études soulignent donc la nécessité d'adapter les dispositifs haptiques pour éviter de surcharger l'apprenant avec un excès d'informations sensorielles tout en optimisant l'expérience d'apprentissage en fonction des besoins et des préférences de chacun. Il serait donc intéressant, dans de futures études, d'inclure des approches personnalisées qui permettraient aux étudiants de contrôler le niveau

de feedback haptique ou de choisir les modalités d'apprentissage qui correspondent le mieux à leur style d'apprentissage et leurs préférences de communication.

6.1.5 Conclusion

L'objectif principal de cette dernière étude expérimentale était d'évaluer l'impact des feedbacks visuels et visuo-haptiques sur l'apprentissage d'une trajectoire de référence lors de la manipulation d'un outil dans une tâche bimanuel. Les résultats obtenus révèlent plusieurs éléments clés concernant l'efficacité des feedbacks sensoriels dans l'apprentissage de gestes techniques par compagnonnage.

Les résultats montrent que le feedback visuel peut être suffisant pour des tâches dominées par des composants spatiaux, confirmant son importance dans l'apprentissage moteur. Bien que l'intégration du feedbacks visuo-haptiques n'améliore ni la qualité de la trajectoire ni le nombre de cibles évités dans le cadre de notre étude, elle réduit la charge cognitive perçue par les apprenants. De plus, elle renforce la perception de l'interdépendance comportementale avec les actions de l'expert, ce qui pourrait améliorer la collaboration. Ces résultats fournissent des informations précieuses pour la conception d'interactions collaboratives visant à améliorer l'apprentissage de la manipulation d'outils par compagnonnage dans les environnements virtuels collaboratifs. Ils confirment également que les feedbacks augmentés améliorent efficacement l'apprentissage d'une tâche visuo-motrice et démontrent que les modalités de communication offrent des avantages spécifiques pour enrichir l'expérience d'apprentissage.

6.1.5.1 *Limites et perspectives*

Cette étude comporte certaines limites. Tout d'abord, la tâche expérimentale était fortement dépendante des indices visuels. Nous avons introduit des obstacles visuels pour augmenter la complexité de la tâche, imitant des procédures médicales nécessitant une dextérité bi-manuelle et une coordination œil-main, similaires à celles observées en anesthésie locorégionale. De plus, la trajectoire a été affichée et visualisée par les participants lors de la phase d'instruction, offrant un

guidage visuel supplémentaire. Nous n'avions pas prévu que cela permettrait aux participants de mémoriser le chemin plus rapidement, comme l'indiquent les courbes d'apprentissage, qui montrent une amélioration rapide de la précision de la trajectoire, avec une réduction du besoin d'avoir des feedbacks de l'expert après seulement cinq essais. Bien que ces aides visuelles seules aient été insuffisantes (comme le montre les résultats du groupe contrôle, qui n'a pas progressé en se basant uniquement sur ces aides), elles ont peut-être réduit la possibilité d'évaluer pleinement les avantages du feedback haptique dans l'apprentissage moteur. Des études futures avec des tâches impliquant moins d'indices visuels sont donc nécessaires afin de mieux évaluer l'impact de cette modalité.

De plus, aucun feedback augmenté n'a été fourni pour corriger la manipulation de l'outil de visualisation (la sonde), ce qui a conduit à une amélioration moindre de la performance d'évitement des obstacles pendant la phase d'entraînement. Les participants semblent s'être concentrés davantage sur le feedback augmenté fourni par l'expert et sur l'amélioration de leur trajectoire plutôt que sur l'évitement des obstacles. Cependant, une fois qu'ils ont pratiqué la tâche de manière indépendante (post-test), leur performance en matière d'évitement des obstacles s'est améliorée (par rapport au pré-test). Cela soulève des questions sur l'efficacité de l'utilisation de plusieurs sources de feedback augmenté pour des tâches parallèles. De futures recherches pourraient explorer si la délivrance simultanée de feedback augmenté via différentes modalités, adaptées à la nature de la tâche, pourrait améliorer les résultats d'apprentissage.

Enfin, la variabilité interindividuelle dans la perception et l'acceptation du feedback haptique souligne la nécessité de personnaliser ces approches afin de les adapter aux préférences de chaque apprenant. Explorer des stratégies personnalisées permettant aux apprenants de réguler le niveau de feedback pourrait aider à surmonter les variations individuelles dans l'acceptation et l'efficacité du feedback. Réaliser une étude examinant la meilleure manière de combiner les modalités visuelles et haptiques pour minimiser la surcharge cognitive tout en maximisant les résultats d'apprentissage serait particulièrement pertinent.

Ces études nous aideront à développer des interfaces utilisateur plus efficaces pour soutenir le modèle de compagnonnage et faciliter le transfert de compétences motrices de l'instructeur à l'apprenant dans des environnements virtuels collaboratifs dédiés à l'apprentissage.

7 CONCLUSION GENERALE

Les travaux menés dans le cadre de cette thèse visent à améliorer l'apprentissage des compétences techniques par compagnonnage, en mettant l'accent sur l'interaction entre formateurs et apprenants au sein d'environnements virtuels collaboratifs. Cette conclusion a pour but de résumer les contributions de ce travail tout en ouvrant des perspectives pour des recherches futures.

7.1 BILAN

L'objectif de cette recherche était d'explorer l'usage des interactions multimodales pour améliorer la communication entre instructeurs et apprenants pendant l'apprentissage par compagnonnage dans des environnements virtuels collaboratifs. Notre revue de la littérature a révélé plusieurs défis liés à la conception de ce type d'environnements. Il en ressort que les systèmes actuels ne répondent pas pleinement aux besoins de communication pour soutenir efficacement les interactions collaboratives, notamment dans le cadre de la formation par compagnonnage. Pour répondre à ces enjeux, notre recherche a évalué la multimodalité comme une solution possible pour optimiser la communication dans ces environnements. Le but principal était de formuler des recommandations et des lignes directrices pour concevoir des environnements virtuels collaboratifs adaptés à la formation par compagnonnage

Dans un premier temps, nous avons analysé les interactions entre instructeurs et apprenants issues du monde réel lors d'une procédure d'anesthésie locorégionale échoguidée. Notre objectif était de mieux comprendre et de modéliser ces interactions, en mettant l'accent sur les modalités de communication utilisées dans le transfert des compétences techniques. Il est apparu que les instructeurs s'appuient principalement sur des modalités visuelles et verbales, souvent combinées, et adaptent leur communication selon la complexité de la compétence à transmettre. Cette étude observationnelle sur le terrain a permis de concevoir un diagramme d'interaction illustrant les modalités de communications utilisées par les instructeurs en fonction des tâches. Ce modèle, basé sur des pratiques réelles, a servi de guide

pour concevoir et évaluer des interactions multimodales destinées à l'enseignement des compétences techniques dans des environnements virtuels collaboratifs.

Ensuite, nous avons mené trois études expérimentales. L'étude terrain ainsi que le modèle d'interaction réalisés précédemment ont fourni des pistes de réflexion pour concevoir des techniques d'interactions adaptées à la transmission des compétences liées à la manipulation d'outils dans les environnements virtuels collaboratifs. L'objectif de ces études était de déterminer les modalités de communication les plus adaptées pour garantir une interaction efficace entre l'instructeur et l'apprenant lors de l'apprentissage d'une compétence technique définie.

Les résultats de la première étude, axée sur les instructions unimodales, ont montré que la modalité visuelle améliore la précision des gestes techniques, que la modalité haptiques accélère l'exécution des tâches, et que la modalité verbale renforce le sentiment de coprésence entre instructeur et apprenant. Ces résultats nous ont orienté sur l'utilisation d'instructions multimodales pour optimiser la communication. Notre deuxième étude a été donc consacrée à l'usage d'instructions multimodales. Les résultats ont révélé que la combinaison visuel-haptique offrait les meilleures performances en termes de précision et de rapidité, tandis que l'ajout d'une troisième modalité (verbale) améliorait l'expérience utilisateur. Enfin, la troisième étude portait sur les feedbacks augmentés visuels et visuo-haptiques. Les résultats ont montré que les feedbacks visuels sont aussi efficaces que les feedbacks visuo-haptiques pour aider un apprenant à maîtriser un geste technique. Néanmoins, les feedbacks visuo-haptiques permettent en plus de réduire la charge cognitive et améliorent la collaboration perçue.

En conclusion, nos travaux de recherche ont mis en lumière l'importance cruciale d'une approche observationnelle approfondie des communications entre instructeurs et apprenants avant la conception d'outils d'interaction adaptés aux environnements virtuels collaboratifs. En analysant les modalités de communication utilisées lors de la formation par compagnonnage, notamment dans le cadre d'une procédure d'anesthésie locorégionale échoguidée, nous avons

pu modéliser ces interactions et en extraire des recommandations précises pour concevoir les outils d'échanges d'information dans ces environnements. Les études expérimentales menées ont confirmé que la multimodalité, en combinant des modalités visuelles, haptiques et verbales, constitue une approche efficace pour améliorer la précision, la rapidité d'exécution et la qualité de la collaboration perçue. Ainsi, cette recherche permet d'établir des lignes directrices solides pour la conception d'interactions multimodales efficaces, adaptées aux besoins réels de l'apprentissage et à la transmission des compétences techniques dans les environnements virtuels collaboratifs. Nous résumons dans la suite les contributions de nos travaux de recherche.

7.2 CONTRIBUTIONS

- **Observation du monde réel** : L'approche observationnelle est essentielle dans ce type de recherche, car elle permet dans un premier temps d'avoir une analyse contextuelle de l'environnement d'apprentissage, nous permettant d'obtenir des informations telles que les tâches réalisées et les compétences associées. De plus, elle permet de comprendre en profondeur les méthodes d'enseignement actuelles, et les interactions entre formateurs et apprenants dans des situations réelles. L'observation des pratiques sur le terrain permet de capter les dynamiques d'interactions en temps réel, dévoilant les défis rencontrés et les stratégies utilisées par les formateurs. Cette compréhension a participé à guider la conception des techniques d'interaction pour les environnements virtuels collaboratifs afin de garantir leur pertinence.
- **Modèle d'interaction et conception des techniques d'interaction** : Le modèle d'interaction élaboré a principalement servi de base pour comprendre les modalités de communication utilisées par les instructeurs dans des contextes d'apprentissage réels. Il a permis de décrire les interactions visuelles, verbales, haptiques et non-verbales utilisées, ainsi que leurs combinaisons, en fonction des compétences enseignées et des caractéristiques contextuelles comme les contraintes du terrain. Ce modèle a ensuite guidé la réflexion sur la conception des environnements collaboratifs, sans pour autant nous

contraindre à reproduire à l'identique les interactions observées. Au contraire, il a servi de point de départ et de terrain de réflexion afin d'adapter ces interactions aux spécificités des environnements virtuels, tout en prenant en compte les opportunités offertes par ces technologies. En particulier, le modèle a aidé à orienter la conception et l'évaluation des techniques d'interaction multimodales, en identifiant les modalités les plus adaptées à la transmission des compétences techniques. Il n'a pas simplement permis de tester des combinaisons existantes, mais de réfléchir à la manière dont ces modalités pourraient être optimisées dans un contexte virtuel. En s'inspirant des tâches et des compétences observées dans les situations réelles, le modèle a permis d'imaginer de nouveaux scénarios d'apprentissage adaptés aux environnements virtuels collaboratifs.

- **Apport de la multimodalité** : L'intégration de la multimodalité dans les environnements virtuels collaboratifs constitue un apport majeur. En combinant différentes modalités de communication, telles que le visuel, l'haptique et le verbal, la multimodalité a démontré son efficacité pour améliorer la précision des gestes techniques, accélérer l'exécution des tâches, et améliorer l'expérience utilisateur des apprenants. Les trois études expérimentales menées ont révélé que les interactions multimodales offrent non seulement de meilleures performances mais aussi une expérience utilisateur plus riche. Ainsi, la multimodalité permet d'optimiser la transmission des compétences dans des environnements virtuels, tout en prenant en compte les besoins spécifiques de la formation par compagnonnage.

7.3 RECOMMANDATIONS

Cette thèse propose plusieurs recommandations pour optimiser la conception des environnements virtuels collaboratifs dédiés à l'apprentissage par compagnonnage de compétences techniques liées à des tâches de manipulation d'outils :

7.3.1 Pour les instructions :

Les études montrent que l'utilisation de différentes modalités pour transmettre des instructions offre des avantages spécifiques. Pour optimiser la transmission de la compétence de manipulation d'outils dans les environnements virtuels collaboratifs, il est recommandé de :

- Instructions visuelles : Utiliser des instructions visuelles à travers l'affichage de la représentation de la main de l'instructeur en 3D améliore la **précision des gestes techniques**.
- Instructions haptiques : Intégrer des instructions haptiques en permettant à l'apprenant de suivre le mouvement de l'instructeur à travers un dispositif basé sur le système de maître-esclave **accélère l'exécution des tâches**.
- Instructions verbales : Incorporer des instructions verbales peut renforcer **le sentiment de coprésence** entre instructeur et apprenant. Cela favorise une communication plus fluide et un soutien plus direct pendant l'apprentissage.
- Instructions multimodales : Utiliser la combinaison visuelle-haptique pour obtenir les meilleures performances en termes de **précision et de rapidité**. Cette combinaison permet aux apprenants d'améliorer à la fois la qualité de leurs gestes et la vitesse à laquelle ils accomplissent les tâches. Ajouter la modalité verbale aux instructions visuelles et haptiques peut améliorer **l'expérience utilisateur**. Les instructions verbales peuvent compléter les informations reçues à travers les deux autres modalités mais sans interférer avec elles.

7.3.2 Pour les feedbacks :

Les feedbacks sont essentiels pour guider et corriger l'apprenant tout au long de la tâche. Pour optimiser la transmission de la compétence de manipulation d'outils dans les environnements virtuels collaboratifs, il est recommandé de :

- Feedbacks visuels : permettre à l'instructeur de transmettre des feedbacks visuels à travers une représentation virtuelle et transparente de sa main en la superposant à celle de l'apprenant permet d'**améliorer la précision du mouvement**.

Les retours visuels en temps réel permettent aux apprenants de visualiser immédiatement leurs erreurs et les corrections à apporter, rendant l'apprentissage plus efficace. Ce feedback visuel est particulièrement préconisé pour des tâches ayant une dimension spatiale.

- Feedbacks visuo-haptique : Intégrer des feedbacks visuo-haptique représenté par une main transparente couplé à des sensations physiques (représentant la main et la force de l'instructeur pour **réduire la charge cognitive et améliorer la collaboration perçue**. Ces feedbacks combinés offrent une meilleure expérience utilisateurs aux apprenants et sont aussi efficaces que les feedbacks visuels seuls en termes de précision des mouvements.

7.3.3 Pour la multimodalité :

La multimodalité est une approche clé pour optimiser les interactions dans les environnements virtuels collaboratifs :

- Combiner plusieurs modalités : Les interactions multimodales **offrent une meilleure performance globale et une meilleure expérience utilisateurs**.
- Adapter les modalités selon la tâche : Il est important de **moduler l'usage des modalités** en fonction de la complexité de la tâche et des besoins des apprenants.

Ces recommandations s'appuient sur les résultats des études menées et visent à améliorer la performance et l'expérience utilisateur des apprenants dans les environnements virtuels collaboratifs, particulièrement lors de l'apprentissage de compétences de manipulation d'outils.

7.4 LIMITES

Dans cette section, nous aborderons les défis rencontrés ainsi que les limites des études que nous avons menées. Nous donnerons également certaines solutions envisagées pour les surmonter.

- **Limites de l'analyse terrain** : Dans notre étude, nous avons observé des apprenants qui n'étaient pas tout à fait au début de leur formation. De plus, le nombre de procédures observées et de personnes impliquées dans les observations sont relativement limités. En outre, toutes les observations ont été réalisées dans le même service hospitalier avec des instructeurs ayant les mêmes pratiques et probablement des approches pédagogiques très proches. Enfin, la codification a été réalisée de manière subjective sans validation par les experts du domaine. Toutes ces problématiques ont pu influencer les résultats de notre étude. Pour surmonter cette limitation, il serait judicieux de valider la codification avec les instructeurs en réalisant des entretiens semi-dirigés et d'élargir l'échantillon en observant un plus grand nombre de procédures dans un cadre multicentrique et en visant des apprenants qui débutent leur apprentissage.
- **Taille de l'échantillon** : Bien que nos études expérimentales aient apporté des résultats intéressants, le nombre de participants pourrait restreindre la généralisation de nos conclusions. Il serait bénéfique d'élargir l'échantillon pour mieux évaluer l'efficacité des modalités de communications.
- **Latéralité des participants** : La présence de participants gauchers parmi une majorité de droitiers a pu introduire un biais dans les performances dans l'étude 1. Pour remédier à cela, il serait pertinent de standardiser les dispositifs et instructions pour les participants gauchers et droitiers.
- **Absence d'un instructeur réel** : Les deux premières études expérimentales ont été réalisées avec des instructions pré enregistrées sans instructeur réel (sauf pour les instructions verbales de l'étude 1). Bien que cette approche ait été justifiée d'un point de vue expérimental, ceci a pu avoir un impact sur les résultats de ces deux études. Dans la dernière étude nous avons remédié à cette problématique en incorporant l'instructeur tout en contrôlant les feedbacks pour éliminer les risques de biais expérimentaux. Il sera donc intéressant

d'adopter la même approche dans les futures études liées aux instructions

- **Absence d'évaluation de la perception de la présence de l'instructeur distant** : Lors de nos expériences sur les instructions, nous n'avons pas sondé les participants sur leur ressenti concernant la présence "fictive" de l'instructeur, ce qui aurait pu apporter des indications précieuses sur l'effet de cette variable sur les interactions et des résultats d'apprentissage. La prise en compte de la perception de cette présence est essentielle pour comprendre comment elle influence l'expérience utilisateur. Pour les recherches futures, il sera crucial d'intégrer cette variable afin d'évaluer si la simulation de la présence de l'instructeur a un impact significatif sur l'engagement des apprenants et la qualité de leur apprentissage.
- **Absence de feedback augmenté pour la manipulation de l'outil** : Dans la dernière étude expérimentale, aucun feedback n'a été utilisé pour corriger la manipulation de l'outil de visualisation (la sonde). Ceci s'est reflété sur les performances d'évitement d'obstacle pendant la réalisation de la tâche. Ainsi, il serait peut-être intéressant d'ajouter des feedbacks augmentés et d'investiguer l'impact de la délivrance simultanée de feedbacks augmentés via différentes modalités pendant la réalisation de deux tâches simultanées. Ces feedbacks devront être adaptés à la nature des tâches afin d'améliorer les résultats de l'apprentissage.
- **Impact des obstacles visuels sur l'évaluation du feedback haptique** : L'utilisation excessive d'aides visuelles dans la dernière étude expérimentale a pu limiter notre capacité à évaluer pleinement l'efficacité du feedback haptique dans l'apprentissage moteur. Il serait donc essentiel de concevoir des tâches avec moins d'indices visuels afin d'isoler l'impact de cette modalité sur l'apprentissage des gestes techniques complexes.

7.5 PERSPECTIVES DE RECHERCHE

Après avoir discuté des limites de nos études en énonçant quelques perspectives à court-terme, d'autres directions pour les recherches dans le domaine peuvent être envisagées à plus long terme :

- **Influence des modalités de communications non examinée** : Dans les études présentées sur les instructions, nous n'avons pas étudié l'influence à long terme des modalités de communication. Cette absence limite la compréhension approfondie de l'impact durable des modalités sur l'apprentissage. C'est pourquoi à plus long terme, il serait pertinent de réaliser des études longitudinales, intégrant des évaluations pré-apprentissage et post-apprentissage, afin d'analyser l'impact de chaque modalité et de leurs combinaisons. Cela offrirait une vision plus globale et précise des effets sur la rétention des connaissances et l'efficacité de l'apprentissage, contribuant ainsi à l'élaboration de méthodes pédagogiques mieux adaptées aux besoins des apprenants et des instructeurs.
- **Perspectives de l'instructeur non étudiées** : Les trois études expérimentales se sont exclusivement centrées sur la perspective de l'apprenant concernant l'influence des modalités de communication, ce qui, bien que pertinent pour le contrôle expérimental, limite la compréhension globale des dynamiques pédagogiques en négligeant le rôle des instructeurs. En effet, l'impact des modalités sur la capacité des enseignants à transmettre des compétences n'a pas été examiné. Pour les recherches futures, il sera essentiel d'explorer comment les combinaisons de modalités affectent les instructeurs et comment la technologie peut les aider à optimiser leurs approches pédagogiques. Cette approche élargie permettra de mieux cerner les interactions entre apprenants et formateurs, favorisant ainsi le développement des méthodes d'enseignements plus efficaces.
- **Manque de fidélité des représentations visuelles de l'instructeur** : Dans nos études, nous nous sommes contentés

de représenter uniquement la main de l'instructeur et sans animation réaliste. Il serait donc intéressant dans les futures études d'explorer l'utilisation de représentations des enseignants avec des degrés de fidélité plus élevés, incluant des animations réalistes du corps de l'instructeur, pour améliorer le sentiment de coprésence lors de démonstrations visuelles. Cette représentation du corps de l'instructeur, pourrait également montrer l'intégralité de sa posture ce qui pourrait renforcer la perception de son expertise. Il serait également intéressant d'explorer d'autres approches telles que les techniques de co-incarnation virtuelle pour renforcer la connexion entre l'instructeur et les apprenants, facilitant ainsi une expérience d'apprentissage plus immersive et interactive.

- **Complexité des compétences motrices** : Nos études se sont concentrées sur des gestes techniques simples, sans prendre en compte la complexité des compétences motrices, notamment celles requises dans des contextes réels comme les gestes médicaux. Pour remédier à cette lacune, il est essentiel de mener des recherches supplémentaires pour examiner l'impact des combinaisons de modalités de communication sur l'apprentissage de compétences motrices plus avancées. Le développement d'environnements virtuels plus complexes permettrait d'augmenter la difficulté des tâches et d'améliorer la généralisation des résultats. Tester les modalités dans un simulateur d'anesthésie pourrait également offrir une évaluation réaliste. Dans le cadre du projet Show-me, nos travaux ont permis de contribuer au développement d'un simulateur immersif pour cette procédure (Simon, et al., 2024). Implémenter nos techniques d'interaction sur ce simulateur contribuerait à mieux comprendre le transfert des compétences motrices complexes de l'instructeur vers l'apprenant dans des environnements immersifs.
- **Variabilité interindividuelle** : Lors de notre troisième étude expérimentale, l'efficacité des feedbacks fournis aux apprenants, peuvent ne pas avoir été optimaux en raison de la variabilité interindividuelle dans la perception et l'acceptation du feedback haptique. Ceci a également été observé dans les

deux premières études où les instructions haptiques ont été jugées comme perturbantes par plusieurs participants. Chaque apprenant ayant des réactions différentes, il nous semble essentiel de développer des approches pédagogiques personnalisées, incluant des évaluations préalables des préférences d'apprentissage et des modalités de communication et des ajustements dynamiques des feedbacks et des instructions en temps réel. En se concentrant sur la personnalisation, les recherches futures pourraient améliorer l'efficacité de l'apprentissage et offrir une expérience plus engageante et adaptée aux divers styles d'apprentissage.

8 REFERENCES

- Adams, J. A. (1971). A closed-loop theory of motor learning. *Journal of motor behavior*, 3, 111–150.
- Adilkhanov, A., Rubagotti, M., & Kappassov, Z. (2022). Haptic devices: Wearability-based taxonomy and literature review. *IEEE Access*, 10, 91923–91947.
- Agha, R. A., Fowler, A. J., & Sevdalis, N. (2015). The role of non-technical skills in surgery. *Annals of medicine and surgery*, 4, 422–427.
- Aguerreche, L., Duval, T., & Arnaldi, B. (2009). Analyse de techniques de coopération en environnements virtuels 3D. *Revue des Sciences et Technologies de l'Information-Série TSI: Technique et Science Informatiques*, 28, 767–797.
- Al-Elq, A. H. (2010). Simulation-based medical teaching and learning. *Journal of family and Community Medicine*, 17, 35–40.
- Amber, M., Benkhaled, M., Pincemail, M., Verebi, E., & Claude, I. (2021). Apports et limites de la réalité virtuelle dans les pratiques médicales en 2020. *IRBM News*, 42, 100325.
- Ammirati, C., Amsallem, C., Gignon, M., BERTRAND, C., & PELACCIA, T. (2011). Les techniques modernes en pédagogie appliquée aux gestes et soins d'urgence. *SFMU*, 61, 693–707.
- Ansar, A., Rodrigues, D., Desai, J. P., Daniilidis, K., Kumar, V., & Campos, M. F. (2001). Visual and haptic collaborative tele-presence. *Computers & Graphics*, 25, 789–798.
- Anu, S., Babitha, R., & Muthukumaravel, N. (2013). Role of speech associated gestures of the teacher in Medical education-a comparative study. *National Journal of Clinical Anatomy*, 2, 150–157.
- Aseeri, S., & Interrante, V. (2021). The influence of avatar representation on interpersonal communication in virtual social

environments. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, 27, 2608–2617.

Bailenson, J. N., & Yee, N. (2008). Virtual interpersonal touch: Haptic interaction and copresence in collaborative virtual environments. *Multimedia Tools and Applications*, 37, 5–14.

Baker, M., Hansen, T., Joiner, R., & Traum, D. (1999). The role of grounding in collaborative learning tasks. *Collaborative learning: Cognitive and computational approaches*, 31, 63.

Bangor, A., Kortum, P., & Miller, J. (2009). Determining what individual SUS scores mean: Adding an adjective rating scale. *Journal of usability studies*, 4, 114–123.

Bani-Salameh, H., Al-Gharaibeh, J., Jeffery, C., & Al-Sharif, Z. A. (2017). Collaborative education in a virtual learning environment. *International Journal of Business Information Systems*, 25, 474–489.

Barić, R., & Buško, V. (2008). The influence of visual demonstration and verbal instruction on learning a complex motor skill. *5th International Scientific Conference on Kinesiology: Kinesiology research trends and applications: proceedings book*, (p. 487).

Barrington, M. J., Wong, D. M., Slater, B., Ivanusic, J. J., & Ovens, M. (2012). Ultrasound-guided regional anesthesia: how much practice do novices require before achieving competency in ultrasound needle visualization using a cadaver model. *Regional Anesthesia & Pain Medicine*, 37, 334–339.

Basdogan, C., Ho, C.-H., Srinivasan, M. A., & Slater, M. (2000). An experimental study on the role of touch in shared virtual environments. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction (TOCHI)*, 7, 443–460.

Bellik, Y., & Teil, D. (1992). Définitions terminologiques pour la communication multimodale. *Conference Interaction Humain-Machine IHM'92*.

- Benabbou, A., & Lelong, R. (2023). Réalité virtuelle et mixte pour l'apprentissage et la formation. *Les Techniques de l'Ingenieur*.
- Benda, B., & Ragan, E. D. (2021). The effects of virtual avatar visibility on pointing interpretation by observers in 3d environments. *2021 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*, (pp. 50–59).
- Benford, S., Bowers, J., Fahlen, L. E., Greenhalgh, C., Mariani, J., & Rodden, T. (1995). Networked virtual reality and cooperative work. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, *4*, 364–386.
- Benhamou, D., Roulleau, P., & Trabold, F. (2013). La simulation en anesthésie-réanimation: outil pédagogique et d'amélioration de la prise en charge des patients. *Médecine Intensive Réanimation*, *22*, 383–390.
- Bibin, L., Lécuyer, A., Burkhardt, J.-M., Delbos, A., & Bonnet, M. (2008). SAILOR: a 3-D medical simulator of loco-regional anaesthesia based on desktop virtual reality and pseudo-haptic feedback. *Proceedings of the 2008 ACM symposium on Virtual reality software and technology*, (pp. 97–100).
- Bisseret, A., Sebillotte, S., & Falzon, P. (1999). *Techniques pratiques pour l'étude des activités expertes*. Octarès.
- Blom, E. M., Verdaasdonk, E. G., Stassen, L. P., Stassen, H. G., Wieringa, P. A., & Dankelman, J. (2007). Analysis of verbal communication during teaching in the operating room and the potentials for surgical training. *Surgical endoscopy*, *21*, 1560–1566.
- Borst, C. W., Lipari, N. G., & Woodworth, J. W. (2018). Teacher-guided educational vr: Assessment of live and prerecorded teachers guiding virtual field trips. *2018 IEEE conference on virtual reality and 3D user interfaces (VR)*, (pp. 467–474).
- Bouaziz, H., & Jochum, D. (2010). Formation et évaluation de l'apprentissage. *SFMU/Samu de France-Enseignement supérieur et conférences*.

- Boustila, S., Capobianco, A., & Bechmann, D. (2015). Evaluation of factors affecting distance perception in architectural project review in immersive virtual environments. *Proceedings of the 21st ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, (pp. 207–216).
- Braun, V., & Clarke, V. (2012). *Thematic analysis*. American Psychological Association.
- Bulu, S. T. (2012). Place presence, social presence, co-presence, and satisfaction in virtual worlds. *Computers & Education*, *58*, 154–161.
- Casaneuva, J. S. (2001). Presence and co-presence in collaborative virtual environments.
- Casanueva, J., & Blake, E. (2000). The effects of group collaboration on presence in a collaborative virtual environment. *Virtual Environments 2000: Proceedings of the Eurographics Workshop in Amsterdam, The Netherlands, June 1–2, 2000*, (pp. 85–94).
- Cecilio-Fernandes, D., Cnossen, F., Coster, J., Jaarsma, A. (.), & Tio, R. A. (2020). The effects of expert and augmented feedback on learning a complex medical skill. *Perceptual and motor skills*, *127*, 766–784.
- Chan, V., & Dabu, A. (2006). *Guide pratique des blocs nerveux échoguidés*. Sauramps médical.
- Chang, C.-H. (2013). Medical simulation is needed in anesthesia training to achieve patient's safety. *Korean Journal of Anesthesiology*, *64*, 204–211.
- Chellali, A., Ahn, W., Sankaranarayanan, G., Flinn, J. T., Schwaitzberg, S. D., Jones, D. B., . . . Cao, C. G. (2015). Preliminary evaluation of the pattern cutting and the ligating loop virtual laparoscopic trainers. *Surgical endoscopy*, *29*, 815–821.
- Chellali, A., Dumas, C., & Milleville-Pennel, I. (2010). WYFIWIF: A haptic communication paradigm for collaborative motor skills

- learning. *Web Virtual Reality and Three-Dimensional Worlds 2010*, (pp. 301–308).
- Chellali, A., Dumas, C., & Milleville-Pennel, I. (2011). Influences of haptic communication on a shared manual task. *Interacting with Computers*, *23*, 317–328.
- Chellali, A., Dumas, C., & Milleville-Pennel, I. (2012). Haptic communication to support biopsy procedures learning in virtual environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, *21*, 470–489.
- Chellali, A., Mentis, H., Miller, A., Ahn, W., Arikatla, V. S., Sankaranarayanan, G., . . . Cao, C. G. (2016). Achieving interface and environment fidelity in the Virtual Basic Laparoscopic Surgical Trainer. *International journal of human-computer studies*, *96*, 22–37.
- Chellali, A., Milleville-Pennel, I., & Dumas, C. (2013). Influence of contextual objects on spatial interactions and viewpoints sharing in virtual environments. *Virtual Reality*, *17*, 1–15.
- Chiniara, G. (2007). Simulation médicale pour acquisition des compétences en anesthésie. *Congrès national d'anesthésie et de réanimation*, 41–49.
- Churchill, E. F., & Snowdon, D. (1998). Collaborative virtual environments: an introductory review of issues and systems. *virtual reality*, *3*, 3–15.
- Clark, H. H., & Brennan, S. E. (1991). Grounding in communication.
- Clark, H. H., Schreuder, R., & Buttrick, S. (1983). Common ground at the understanding of demonstrative reference. *Journal of verbal learning and verbal behavior*, *22*, 245–258.
- Clark, R. E. (2009). How much and what type of guidance is optimal for learning from instruction? Dans *Constructivist instruction* (pp. 170–195). Routledge.
- Conati, C., & Maclaren, H. (2008). Exploring the role of individual

- differences in information visualization. *Proceedings of the working conference on Advanced visual interfaces*, (pp. 199–206).
- Convertino, G., Mentis, H. M., Slavkovic, A., Rosson, M. B., & Carroll, J. M. (2011). Supporting common ground and awareness in emergency management planning: A design research project. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction (TOCHI)*, *18*, 1–34.
- Cooper, J. B., & Taqueti, V. (2008). A brief history of the development of mannequin simulators for clinical education and training. *Postgraduate medical journal*, *84*, 563–570.
- Cope, A. C., Bezemer, J., Kneebone, R., & Lingard, L. (2015). 'You see?' Teaching and learning how to interpret visual cues during surgery. *Medical education*, *49*, 1103–1116.
- Cordovani, L., & Cordovani, D. (2016). A literature review on observational learning for medical motor skills and anesthesia teaching. *Advances in Health Sciences Education*, *21*, 1113–1121.
- Correa, C. G., Machado, M. A., Ranzini, E., Tori, R., & Nunes, F. d. (2017). Virtual Reality simulator for dental anesthesia training in the inferior alveolar nerve block. *Journal of Applied Oral Science*, *25*, 357–366.
- Cosentino, G., & Giannakos, M. (2023). Multisensory interaction and analytics to enhance smart learning environments: a systematic literature review. *IEEE Transactions on Learning Technologies*, *16*, 414–430.
- Crandall, R., & Karadoğan, E. (2021). Designing pedagogically effective haptic systems for learning: a review. *Applied Sciences*, *11*, 6245.
- Crespo, L. M., & Reinkensmeyer, D. J. (2008). Haptic guidance can enhance motor learning of a steering task. *Journal of motor behavior*, *40*, 545–557.
- Cruz, A., Paredes, H., Morgado, L., & Martins, P. (2021). Non-verbal aspects of collaboration in virtual worlds: a CSCW taxonomy-

- development proposal integrating the presence dimension. *JUCS-Journal of Universal Computer Science*, 27, 913–954.
- D'angelo, S., & Schneider, B. (2021). Shared gaze visualizations in collaborative interactions: Past, present and future. *Interacting with Computers*, 33, 115–133.
- Danion, J., Breque, C., Oriot, D., Faure, J. P., & Richer, J. P. (2020). La technologie SimLife® dans la formation du chirurgien. *Journal de Chirurgie Viscérale*, 157, S119–S124.
- De Back, T. T., Tinga, A. M., & Louwarse, M. M. (2023). Learning in immersed collaborative virtual environments: design and implementation. *Interactive Learning Environments*, 31, 5364–5382.
- De Terssac, G., & Chabaud, C. (1990). Référentiel opératif commun et fiabilité. *Les facteurs humains de la fiabilité dans les systèmes complexes*, 111–139.
- de Winter, J. C. (2014). Controversy in human factors constructs and the explosive use of the NASA-TLX: a measurement perspective. *Cognition, technology & work*, 16, 289–297.
- Derouech, O., Hrimech, H., Lachgar, M., & Hanine, M. (2024). A Literature Review of Collaborative Virtual Environments: Impacts, Design Principles, and Challenges. *Journal of Information Technology Education: Research*, 23, 11.
- Desmurget, M. (2006). *Imitation et apprentissages moteurs: des neurones miroirs à la pédagogie du geste sportif*. Groupe de Boeck.
- Dewiyanti, S., Brand-Gruwel, S., Jochems, W., & Broers, N. J. (2007). Students' experiences with collaborative learning in asynchronous computer-supported collaborative learning environments. *Computers in Human Behavior*, 23, 496–514.
- d'Huart, D. M. (2001). La réalité virtuelle: un média pour apprendre. *Cinquième colloque hypermédias et apprentissages*, (pp. 331–

338).

- Dodds, T. J. (2009). *Collaborative interaction in virtual environments*. Ph.D. dissertation, University of Leeds.
- Doroudian, S., & Wartell, Z. (2023). Collaboration in Immersive Environments: Challenges and Solutions. *arXiv preprint arXiv:2311.00689*.
- Doumanis, I., & Economou, D. (2020). Evaluating the impact of multimodal collaborative virtual environments on user's spatial knowledge and experience of gamified educational tasks. *2020 6th International Conference of the Immersive Learning Research Network (iLRN)*, (pp. 185–193).
- Ducros, A., & Céphalées, U. (2011). Mémoire pour l'obtention du Diplôme Inter Universitaire de Pédagogie médicale.
- Duval, T., Nguyen, H., Fleury, C., Chauffaut, A., Dumont, G., & Gouranton, V. (2012). Embedding the features of the users' physical environments to improve the feeling of presence in collaborative Virtual Environments. *2012 IEEE 3rd International Conference on Cognitive Infocommunications (CogInfoCom)*, (pp. 243–248).
- Duval, T., Nguyen, T. T., Fleury, C., Chauffaut, A., Dumont, G., & Gouranton, V. (2014). Improving awareness for 3D virtual collaboration by embedding the features of users' physical environments and by augmenting interaction tools with cognitive feedback cues. *Journal on Multimodal User Interfaces*, *8*, 187–197.
- Dzardanova, E., Nikolakopoulou, V., Kasapakis, V., Vosinakis, S., Xenakis, I., & Gavalas, D. (2024). Exploring the impact of non-verbal cues on user experience in immersive virtual reality. *Computer Animation and Virtual Worlds*, *35*, e2224.
- Eaves, D. L., Riach, M., Holmes, P. S., & Wright, D. J. (2016). Motor imagery during action observation: a brief review of evidence, theory and future research opportunities. *Frontiers in*

neuroscience, 10, 514.

- Eaves, M., & Leathers, D. G. (2017). *Successful nonverbal communication: Principles and applications*. Routledge.
- Ehmer, O. (2021). Synchronization in demonstrations. Multimodal practices for instructing body knowledge. *Linguistics Vanguard*, 7, 20200038.
- Ehmer, O., & Brône, G. (2021). Instructing embodied knowledge: multimodal approaches to interactive practices for knowledge constitution. *Linguistics Vanguard*, 7, 20210012.
- Enquobahrie, A., Horvath, S., Arikatla, S., Rosenberg, A., Cleary, K., & Sharma, K. (2019). Development and face validation of ultrasound-guided renal biopsy virtual trainer. *Healthcare technology letters*, 6, 210–213.
- Erfanian, A., & Hu, Y. (2020). Verbal and vibrotactile cues on multiuser usability within collaborative virtual environments. *Virtual Reality*, 24, 75–91.
- Erlandson, B. E., Nelson, B. C., & Savenye, W. C. (2010). Collaboration modality, cognitive load, and science inquiry learning in virtual inquiry environments. *Educational Technology Research and Development*, 58, 693–710.
- Escobar-Castillejos, D., Noguez, J., Neri, L., Magana, A., & Benes, B. (2016). A review of simulators with haptic devices for medical training. *Journal of medical systems*, 40, 1–22.
- Fairén, M., Moyés, J., & Insa, E. (2020). VR4Health: Personalized teaching and learning anatomy using VR. *Journal of medical systems*, 44, 94.
- Feng, Y., Wong, C., Park, A., & Mentis, H. (2016). Taxonomy of instructions given to residents in laparoscopic cholecystectomy. *Surgical endoscopy*, 30, 1073–1077.
- Fitts, P. M., & Posner, M. I. (1967). Human performance. brooks. *Cole, Belmont, CA*, 5, 7–16.

- Fögen, T. (2005). The role of verbal and non-verbal communication in ancient medical discourse. *Latin et langues romanes. Études de linguistique offertes à József Herman à l'occasion de son 80ème anniversaire, Tübingen*, 287–300.
- Fong, N. S., Mansor, W. F., Zakaria, M. H., Sharif, N. H., & Nordin, N. A. (2012). The roles of mentors in a collaborative virtual learning environment (CVLE) project. *Procedia-Social and behavioral sciences*, 66, 302–311.
- Forens, M., Bonnardel, N., & Barbier, M.-L. (2015). How communication modalities can impact group creativity in multi-user virtual environments. *Proceedings of the European Conference on Cognitive Ergonomics 2015*, (pp. 1–4).
- Fox, J., Ahn, S. J., Janssen, J. H., Yeykelis, L., Segovia, K. Y., & Bailenson, J. N. (2015). Avatars versus agents: a meta-analysis quantifying the effect of agency on social influence. *Human-Computer Interaction*, 30, 401–432.
- Freides, D. (1974). Human information processing and sensory modality: cross-modal functions, information complexity, memory, and deficit. *Psychological bulletin*, 81, 284.
- Frikha, M., Chaâri, N., Elghoul, Y., Mohamed-Ali, H. H., & Zinkovsky, A. V. (2019). Effects of combined versus singular verbal or haptic feedback on acquisition, retention, difficulty, and competence perceptions in motor learning. *Perceptual and motor skills*, 126, 713–732.
- Fuchs, P. (2006). *Le traité de la réalité virtuelle* (Vol. 2). Presses des MINES.
- Funke, G. J., & Galster, S. M. (2009). The effects of cognitive processing load and collaboration technology on team performance in a simulated command and control environment. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 39, 541–547.
- Gaba, D. M. (2007). The future vision of simulation in healthcare. *Simulation in Healthcare*, 2, 126–135.

- Gamelin, G., Chellali, A., Cheikh, S., Ricca, A., Dumas, C., & Otmame, S. (2021). Point-cloud avatars to improve spatial communication in immersive collaborative virtual environments. *Personal and Ubiquitous Computing, 25*, 467–484.
- Garau, M. (2003). *The impact of avatar fidelity on social interaction in virtual environments*. University of London, University College London (United Kingdom).
- Garcia, D. (2024). VIRTUAL CLASSROOMS: THE CHANGE OF ONLINE EDUCATION. *INTED2024 Proceedings*, (pp. 1219–1224).
- Ghamandi, R. K., Kattoju, R. K., Hmaiti, Y., Maslych, M., Taranta, E. M., McMahan, R. P., & LaViola, J. (2024). Unlocking Understanding: An Investigation of Multimodal Communication in Virtual Reality Collaboration. *Proceedings of the CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, (pp. 1–16).
- Giboin, A. (2004). La construction de référentiels communs dans le travail coopératif. *Psychologie ergonomique: tendances actuelles*, 119–139.
- Gignac, G. E. (2023). How2statsbook (Online 2023 Edition), Chapter 11. *Perth, Australia*.
- Glaser, A. (1967). The Discovery of Grounded Theory. *Strategies for Qualitative Research*. London: Weidenfeld and Nicolson.
- Glaser, B., & Strauss, A. (2017). *Discovery of grounded theory: Strategies for qualitative research*. Routledge.
- Glaser, N. J., & Schmidt, M. (2020). Usage considerations of 3D collaborative virtual learning environments to promote development and transfer of knowledge and skills for individuals with autism. *Technology, Knowledge and Learning, 25*, 315–322.
- Goebbels, G., Lalioti, V., & Göbel, M. (2003). Design and evaluation of team work in distributed collaborative virtual environments. *Proceedings of the ACM symposium on Virtual reality software*

and technology, (pp. 231–238).

Goffman, E. (1974). *Frame analysis: An essay on the organization of experience*. Harvard University Press.

Goldin-Meadow, S. (1999). The role of gesture in communication and thinking. *Trends in cognitive sciences*, 3, 419–429.

Grandi, J. G., Debarba, H. G., & Maciel, A. (2019). Characterizing asymmetric collaborative interactions in virtual and augmented realities. *2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, (pp. 127–135).

Granry, J. C., & Moll, M. C. (2012). Haute Autorité de santé. Rapport de mission. État de l'art (national et international) en matière de pratiques de simulation dans le domaine de la santé. *Disponible sur:* http://www.hassante.fr/portail/upload/docs/application/pdf/2012-01/simulation_en_sante_-_rapport.pdf.

Gratch, J., DeVault, D., Lucas, G. M., & Marsella, S. (2015). Negotiation as a challenge problem for virtual humans. *Intelligent Virtual Agents: 15th International Conference, IVA 2015, Delft, The Netherlands, August 26-28, 2015, Proceedings 15*, (pp. 201–215).

Greenhalgh, C., & Benford, S. (1997). Boundaries, awareness and interaction in collaborative virtual environments. *Proceedings of IEEE 6th Workshop on Enabling Technologies: Infrastructure for Collaborative Enterprises*, (pp. 193–198).

Grenvik, A., Schaefer III, J. J., DeVita, M. A., & Rogers, P. (2004). New aspects on critical care medicine training. *Current opinion in critical care*, 10, 233–237.

Groten, R., Feth, D., Klatzky, R. L., & Peer, A. (2012). The role of haptic feedback for the integration of intentions in shared task execution. *IEEE transactions on haptics*, 6, 94–105.

Groten, R., Feth, D., Peer, A., & Buss, M. (2012). Psychological Experiments in Haptic Collaboration Research. Dans *Immersive*

Multimodal Interactive Presence (pp. 65–90). Springer London.
doi:10.1007/978-1-4471-2754-3_5

Gruber, A., & Kaplan-Rakowski, R. (2022). Verbal and nonverbal communication in high-immersion virtual reality for language learners. *Intelligent CALL, granular systems, and learner data: short papers from EUROCALL*, 129–134.

Guadagnoli, M. A., & Lee, T. D. (2004). Challenge point: a framework for conceptualizing the effects of various practice conditions in motor learning. *Journal of motor behavior*, 36, 212–224.

Harms, C., & Biocca, F. (2004). Internal consistency and reliability of the networked minds measure of social presence. *Seventh annual international workshop: Presence, 2004*.

Hart, S. G. (2006). NASA-task load index (NASA-TLX); 20 years later. *Proceedings of the human factors and ergonomics society annual meeting*, 50, pp. 904–908.

Hart, S. G., & Staveland, L. E. (1988). Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research. Dans *Advances in psychology* (Vol. 52, pp. 139–183). Elsevier.

Hattie, J., & Timperley, H. (2007). The power of feedback. *Review of educational research*, 77, 81–112.

Hauber, J., Regenbrecht, H., Cockburn, A., & Billinghamurst, M. (2012). The impact of collaborative style on the perception of 2D and 3D videoconferencing interfaces. *The Open Software Engineering Journal*, 6.

He, T., Chen, X., Chen, Z., Li, Y., Liu, S., Hou, J., & He, Y. (2017). Immersive and collaborative Taichi motion learning in various VR environments. *2017 IEEE Virtual Reality (VR)*, (pp. 307–308).

Hecht, D., & Reiner, M. (2009). Sensory dominance in combinations of audio, visual and haptic stimuli. *Experimental brain research*, 193, 307–314.

Hertzum, M. (2021). Reference values and subscale patterns for the

- task load index (TLX): a meta-analytic review. *Ergonomics*, 64, 869–878.
- Heslin, R. (1974). Steps toward a taxonomy of touching. *annual convention of the Midwestern Psychological Association, Chicago*.
- Hindmarsh, J., Fraser, M., Heath, C., Benford, S., & Greenhalgh, C. (1998). Fragmented interaction: establishing mutual orientation in virtual environments. *Proceedings of the 1998 ACM conference on Computer supported cooperative work*, (pp. 217–226).
- Hodges, N. J. (2001). *The role of instructions and demonstrations in learning a coordination skill*. Ph.D. dissertation, University of British Columbia.
- Hodges, N. J., & Franks, I. M. (2001). Learning a coordination skill: Interactive effects of instruction and feedback. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 72, 132–142.
- Hodges, N. J., & Franks, I. M. (2002). Modelling coaching practice: the role of instruction and demonstration. *Journal of sports sciences*, 20, 793–811.
- Hoppe, A. H., Reeb, R., van de Camp, F., & Stiefelhagen, R. (2018). Interaction of distant and local users in a collaborative virtual environment. *Virtual, Augmented and Mixed Reality: Interaction, Navigation, Visualization, Embodiment, and Simulation: 10th International Conference, VAMR 2018, Held as Part of HCI International 2018, Las Vegas, NV, USA, July 15-20, 2018, Proceedings, Part I 10*, (pp. 328–337).
- Howland, A. (2021). Virbela. *Virbela*.
- Huang, Q. (2020). Differential effects of explicit verbal and visual feedback on proprioceptive learning: Examining position sense acuity of the forearm during active and passive displacement.
- Huang, X. (2018). Improving communicative competence through synchronous communication in computer-supported

- collaborative learning environments: A systematic review. *Education Sciences*, 8, 15.
- Huang, Y. Y., Moll, J., Sallnäs, E.-L., & Sundblad, Y. (2012). Auditory feedback in haptic collaborative interfaces. *International journal of human-computer studies*, 70, 257–270.
- Hurstel, A. (2019). *Approche pour une interaction intuitive et sans contact en bloc opératoire*. Ph.D. dissertation, Université de Strasbourg.
- Hutchins, M. A., Stevenson, D. R., Gunn, C., Krumpholz, A., Adriaansen, T., Pyman, B., & O’Leary, S. (2006). Communication in a networked haptic virtual environment for temporal bone surgery training. *Virtual reality*, 9, 97–107.
- Jackob, N., Roessing, T., & Petersen, T. (2016). Effects of verbal and non-verbal elements in communication. *Verbal communication*, 39–53.
- Jackson, R. L., & Fagan, E. (2000). Collaboration and learning within immersive virtual reality. *Proceedings of the third international conference on Collaborative virtual environments*, (pp. 83–92).
- Jaszczur-Nowicki, J., Romero-Ramos, O., Rydzik, Ł., Ambroży, T., Biegajło, M., Nogal, M., . . . Niżnikowski, T. (2021). Motor learning of complex tasks with augmented feedback: Modality-dependent effectiveness. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18, 12495.
- Jiang, H., Vimalasvaran, S., Wang, J. K., Lim, K. B., Mogali, S. R., & Car, L. T. (2022). Virtual reality in medical students’ education: scoping review. *JMIR medical Education*, 8, e34860.
- Jing, A., May, K., Matthews, B., Lee, G., & Billinghamurst, M. (2022). The impact of sharing gaze behaviours in collaborative mixed reality. *Proceedings of the ACM on Human-Computer Interaction*, 6, 1–27.
- Katsumata, Y., Inoue, Y., Toriumi, S., Ishimoto, H., Hapuarachchi, H., &

- Kitazaki, M. (2023). Shared avatar for hand movement imitation: Subjective and behavioral analyses. *IEEE Access*.
- Khojasteh, N., & Won, A. S. (2021). Working together on diverse tasks: A longitudinal study on individual workload, presence and emotional recognition in collaborative virtual environments. *Frontiers in Virtual Reality, 2*, 643331.
- Kim, H., & Park, J.-M. (2024). Providing dual awareness using multimodal cues for collaborative manipulation in virtual environments. *International Journal of Human-Computer Interaction, 40*, 3298–3312.
- Kim, H.-Y., & Kim, E.-Y. (2023). Effects of medical education program using virtual reality: a systematic review and meta-analysis. *International Journal of Environmental Research and Public Health, 20*, 3895.
- Kim, S., Huang, W., Oh, C.-M., Lee, G., Billingham, M., & Lee, S.-J. (2023). View types and visual communication cues for remote collaboration. *Computers, Materials and Continua*.
- Kim, S., Lee, G., Billingham, M., & Huang, W. (2020). The combination of visual communication cues in mixed reality remote collaboration. *Journal on Multimodal User Interfaces, 14*, 321–335.
- Kim, S., Lee, G., Huang, W., Kim, H., Woo, W., & Billingham, M. (2019). Evaluating the combination of visual communication cues for HMD-based mixed reality remote collaboration. *Proceedings of the 2019 CHI conference on human factors in computing systems*, (pp. 1–13).
- Kirk, J., Mininger, A., & Laird, J. (2016). Learning task goals interactively with visual demonstrations. *Biologically Inspired Cognitive Architectures, 18*, 1–8.
- Kiss, L., Hámornik, B. P., Geszten, D., & Hercegfi, K. (2015). The connection of the style of interactions and the collaboration in a virtual work environment. *2015 6th IEEE International*

Conference on Cognitive Infocommunications (CogInfoCom), (pp. 211–214).

- Konukman, F., & Petrakis, E. (2001). Verbal and visual teaching cues for tennis. *Journal of Physical Education, Recreation & Dance*, 72, 38–43.
- Köpsel, A., Majaranta, P., Isokoski, P., & Huckauf, A. (2016). Effects of auditory, haptic and visual feedback on performing gestures by gaze or by hand. *Behaviour & Information Technology*, 35, 1044–1062.
- Koritnik, T., Koenig, A., Bajd, T., Riener, R., & Munih, M. (2010). Comparison of visual and haptic feedback during training of lower extremities. *Gait & posture*, 32, 540–546.
- Kotsis, S. V., & Chung, K. C. (2013). Application of the “see one, do one, teach one” concept in surgical training. *Plastic and reconstructive surgery*, 131, 1194–1201.
- Krakauer, J. W., & Mazzoni, P. (2011). Human sensorimotor learning: adaptation, skill, and beyond. *Current opinion in neurobiology*, 21, 636–644.
- Kütt, G. H., Lee, K., Hardacre, E., & Papoutsaki, A. (2019). Eye-write: Gaze sharing for collaborative writing. *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, (pp. 1–12).
- Kütt, G. H., Tanprasert, T., Rodolitz, J., Moyza, B., So, S., Kenderova, G., & Papoutsaki, A. (2020). Effects of shared gaze on audio-versus text-based remote collaborations. *Proceedings of the ACM on Human-Computer Interaction*, 4, 1–25.
- Kyrlitsias, C., & Michael-Grigoriou, D. (2022). Social interaction with agents and avatars in immersive virtual environments: A survey. *Frontiers in Virtual Reality*, 2, 786665.
- Lago-Rodriguez, A., Lopez-Alonso, V., & Fernández-del-Olmo, M. (2013). Mirror neuron system and observational learning: Behavioral and neurophysiological evidence. *Behavioural Brain*

Research, 248, 104–113.

- Lai, E. R. (2011). Collaboration: A literature review. *Pearson Publisher*. Retrieved November, 11, 1–23.
- Latoschik, M. E., Roth, D., Gall, D., Achenbach, J., Waltemate, T., & Botsch, M. (2017). The effect of avatar realism in immersive social virtual realities. *Proceedings of the 23rd ACM symposium on virtual reality software and technology*, (pp. 1–10).
- Lauber, B., & Keller, M. (2014). Improving motor performance: Selected aspects of augmented feedback in exercise and health. *European journal of sport science*, 14, 36–43.
- Le Chénéchal, M., Duval, T., Gouranton, V., Royan, J., & Arnaldi, B. (2019). Help! i need a remote guide in my mixed reality collaborative environment. *Frontiers in Robotics and AI*, 6, 106.
- Leff, D. R., James, D. R., Orihuela-Espina, F., Kwok, K.-W., Sun, L. W., Mylonas, G., . . . Yang, G.-Z. (2015). The impact of expert visual guidance on trainee visual search strategy, visual attention and motor skills. *Frontiers in human neuroscience*, 9, 526.
- Leyrer, M., Linkenauger, S. A., Bühlhoff, H. H., Kloos, U., & Mohler, B. (2011). The influence of eye height and avatars on egocentric distance estimates in immersive virtual environments. *Proceedings of the ACM SIGGRAPH symposium on applied perception in graphics and visualization*, (pp. 67–74).
- Liebregt, M. (2005). Collaborative virtual environments in education. *2nd Twente Student Conference on IT, Enschede*, 21.
- Liu, L., & Kaplan, A. (2018). No longer alone: finding common ground in collaborative virtual environments. *Proceedings of the 33rd Annual ACM Symposium on Applied Computing*, (pp. 240–246).
- Liu, Y., Zhao, S., & Cheng, S. (2024). Augmenting collaborative interaction with shared visualization of eye movement and gesture in VR. *Computer Animation and Virtual Worlds*, 35, e2264.

- Loup-Escande, E., Dominjon, L., Perret, D., Erhel, S., Jamet, E., Michinov, N., . . . Ragot, M. (2013). La démarche de Conception Centrée-Utilisateur en Réalité Virtuelle: l'exemple du projet VirtualiTeach. *Journées de l'Association Française de Réalité Virtuelle*.
- Loup-Escande, E., Jamet, É., Ragot, M., Erhel, S., Michinov, N., Peltier, C., & Lopez, T. (2015). Concevoir des environnements virtuels éducatifs avec les utilisateurs finaux: Exemple du projet VirtualiTeach. *Terminal. Technologie de l'information, culture & société*.
- Lourdeaux, D. (2001). *Réalité virtuelle et formation: conception d'environnements virtuels pédagogiques*. Ph.D. dissertation, École Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- Lovell, B. (2018). What do we know about coaching in medical education? A literature review. *Medical education, 52*, 376–390.
- Lu, K., Liu, G., & Liu, L. (2013). A study on haptic collaborative game in shared virtual environment. *Fifth International Conference on Machine Vision (ICMV 2012): Computer Vision, Image Analysis and Processing, 8783*, pp. 425–431.
- Magill, R., & Anderson, D. I. (2010). *Motor learning and control*. McGraw-Hill Publishing New York.
- Maloney, D., Freeman, G., & Wohn, D. Y. (2020). " Talking without a Voice" Understanding Non-verbal Communication in Social Virtual Reality. *Proceedings of the ACM on Human-Computer Interaction, 4*, 1–25.
- Marjanovic, O. (1999). Learning and teaching in a synchronous collaborative environment. *Journal of Computer Assisted Learning, 15*, 129–138.
- Marta, N. (2020). Effectiveness of verbal feedback in complex motor skill learning. *Theory and Practice of Physical Culture, 63–66*.
- Martin, D., Malpica, S., Gutierrez, D., Masia, B., & Serrano, A. (2022). Multimodality in VR: A survey. *ACM Computing Surveys (CSUR)*,

54, 1–36.

- Mathis, F., Vaniea, K., & Khamis, M. (2021). Observing virtual avatars: The impact of avatars' fidelity on identifying interactions. *Proceedings of the 24th International Academic Mindtrek Conference*, (pp. 154–164).
- Mayer, R. E. (2002). Multimedia learning. Dans *Psychology of learning and motivation* (Vol. 41, pp. 85–139). Elsevier.
- Mayer, R. E. (2005). *The Cambridge handbook of multimedia learning*. Cambridge university press.
- Melo, M., Gonçalves, G., Monteiro, P., Coelho, H., Vasconcelos-Raposo, J., & Bessa, M. (2020). Do multisensory stimuli benefit the virtual reality experience? A systematic review. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, 28, 1428–1442.
- Mentis, H. M., Chellali, A., & Schwaitzberg, S. (2014). Learning to see the body: supporting instructional practices in laparoscopic surgical procedures. *Proceedings of the SIGCHI conference on human factors in computing systems*, (pp. 2113–2122).
- Meredith, M. A. (2002). On the neuronal basis for multisensory convergence: a brief overview. *Cognitive brain research*, 14, 31–40.
- Merz, C., Wienrich, C., & Latoschik, M. E. (2024). Does Voice Matter? The Effect of Verbal Communication and Asymmetry on the Experience of Collaborative Social XR.
- Michel, P., MINODIER, C., & ROBERTS, T. (2011). Les événements indésirables graves dans les établissements de santé: fréquence, évitabilité et acceptabilité. *Études et résultats*.
- Moinuddin, A., Goel, A., & Sethi, Y. (2021). The role of augmented feedback on motor learning: a systematic review. *Cureus*, 13.
- Moll, J. (2013). *The influence of Modality Combinations on Communication in Collaborative Virtual Environments*. Ph.D. dissertation, KTH Royal Institute of Technology.

- Moll, J., Pysander, E.-L. S., Eklundh, K. S., & Hellström, S.-O. (2014). The effects of audio and haptic feedback on collaborative scanning and placing. *Interacting with computers, 26*, 177–195.
- Montoya, M. M., Massey, A. P., & Lockwood, N. S. (2011). 3D collaborative virtual environments: Exploring the link between collaborative behaviors and team performance. *Decision Sciences, 42*, 451–476.
- Moreira, C., Simões, F. P., Lee, M. J., Zorzal, E. R., Lindeman, R. W., Pereira, J. M., . . . Jorge, J. (2022). Toward VR in VR: assessing engagement and social interaction in a virtual conference. *IEEE Access, 11*, 1906–1922.
- Nam, C. S., Shu, J., & Chung, D. (2008). The roles of sensory modalities in collaborative virtual environments (CVEs). *Computers in Human Behavior, 24*, 1404–1417.
- Nasir, A. N., Ali, D. F., Noordin, M. K., & Nordin, M. S. (2011). Technical skills and non-technical skills: predefinition concept. *Proceedings of the IETEC'11 Conference, Kuala Lumpur, Malaysia*, (pp. 01–p17).
- Negrón, A. P., Vera, R. A., & de Antonio Jiménez, A. (2010). Collaborative interaction analysis in virtual environments based on verbal and nonverbal interaction. *2010 Ninth Mexican International Conference on Artificial Intelligence*, (pp. 129–133).
- Newell, K. M., Moris, L. R., & SCULLY, D. M. (1985). Augmented information and the acquisition of skill in physical activity. *Exercise and sport sciences reviews, 13*, 235–262.
- Nguyen, H., & Bednarz, T. (2020). User experience in collaborative extended reality: overview study. *Virtual Reality and Augmented Reality: 17th EuroVR International Conference, EuroVR 2020, Valencia, Spain, November 25–27, 2020, Proceedings 17*, (pp. 41–70).
- Nguyen, T. T., & Duval, T. (2014). A survey of communication and awareness in collaborative virtual environments. *2014*

international workshop on collaborative virtual environments (3DCVE), (pp. 1–8).

Nicholson, R. A., & Crofton, M. (1997). Training phantom for ultrasound guided biopsy. *The British journal of radiology*, *70*, 192–194.

Noël, R., Miranda, D., Cechinel, C., Riquelme, F., Primo, T. T., & Munoz, R. (2022). Visualizing collaboration in teamwork: A multimodal learning analytics platform for non-verbal communication. *Applied Sciences*, *12*, 7499.

Nowak, K. L., & Biocca, F. (2003). The effect of the agency and anthropomorphism on users' sense of telepresence, copresence, and social presence in virtual environments. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, *12*, 481–494.

O'Connor, A., Schwaitzberg, S. D., & Cao, C. G. (2008). How much feedback is necessary for learning to suture? *Surgical endoscopy*, *22*, 1614–1619.

Oh, C. S., Bailenson, J. N., & Welch, G. F. (2018). A systematic review of social presence: Definition, antecedents, and implications. *Frontiers in Robotics and AI*, *5*, 409295.

Oiwake, K., Komiya, K., Akasaki, H., & Nakajima, T. (2018). VR classroom: enhancing learning experience with virtual class rooms. *2018 Eleventh International Conference on Mobile Computing and Ubiquitous Network (ICMU)*, (pp. 1–6).

Ojala, S., Sirola, J., Nykopp, T., Kröger, H., & Nuutinen, H. (2022). The impact of teacher's presence on learning basic surgical tasks with virtual reality headset among medical students. *Medical education online*, *27*, 2050345.

Paas, F., Tuovinen, J. E., Tabbers, H., & Van Gerven, P. W. (2016). Cognitive load measurement as a means to advance cognitive load theory. Dans *Cognitive Load Theory* (pp. 63–71). Routledge.

Paiva, P. V., Machado, L. S., Valença, A. M., Batista, T. V., & Moraes, R. M. (2018). SimCEC: a collaborative VR-based simulator for

- surgical teamwork education. *Computers in Entertainment (CIE)*, 16, 1–26.
- Paivio, A. (1990). *Mental representations: A dual coding approach*. Oxford university press.
- Palter, V. N., & Grantcharov, T. P. (2010). Virtual reality in surgical skills training. *Surgical Clinics*, 90, 605–617.
- Parikh, S. P., Esposito, J. M., & Searock, J. (2014). The Role of Verbal and Nonverbal Communication in a Two-Person, Cooperative Manipulation Task. *Advances in Human-Computer Interaction*, 2014, 375105.
- Park, W., Heo, H., Park, S., & Kim, J. (2019). A study on the presence of immersive user interface in collaborative virtual environments application. *Symmetry*, 11, 476.
- Pastré, P., Mayen, P., & Vergnaud, G. (2006). La didactique professionnelle. *Revue française de pédagogie. Recherches en éducation*, 145–198.
- Peña Pérez Negrón, A., Muñoz, E., & Lara López, G. (2020). A model for nonverbal interaction cues in collaborative virtual environments. *Virtual Reality*, 24, 605–618.
- Perot, L. (2022). La réalité virtuelle et augmentée dans l'enseignement.
- Philippe, S., Souchet, A. D., Lamas, P., Petridis, P., Caporal, J., Coldeboeuf, G., & Duzan, H. (2020). Multimodal teaching, learning and training in virtual reality: a review and case study. *Virtual Reality & Intelligent Hardware*, 2, 421–442.
- Phillips, L., Ries, B., Kaeding, M., & Interrante, V. (2010). Avatar self-embodiment enhances distance perception accuracy in non-photorealistic immersive virtual environments. *2010 IEEE virtual reality conference (VR)*, (pp. 115–1148).
- Pontonier, C., Dumont, G., & Duval, T. (2014). Ergonomics and Virtual Reality: VISIONAIR Project examples. *EuroVR 2014*.

- Popov, V., Chen, X., Wang, J., Kemp, M., Sandhu, G., Kantor, T., . . . Wang, X. (2024). Looking Together Seeing the Same Thing: Understanding Surgeons' Visual Needs During Intra-operative Coordination and Instruction. *Proceedings of the CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, (pp. 1–12).
- Porte, M. C., Xeroulis, G., Reznick, R. K., & Dubrowski, A. (2007). Verbal feedback from an expert is more effective than self-accessed feedback about motion efficiency in learning new surgical skills. *The American journal of surgery*, *193*, 105–110.
- Pouliquen-Lardy, L., Milleville-Pennel, I., Guillaume, F., & Mars, F. (2016). Remote collaboration in virtual reality: asymmetrical effects of task distribution on spatial processing and mental workload. *Virtual Reality*, *20*, 213–220.
- Pretto, N., & Poiesi, F. (2017). Towards gesture-based multi-user interactions in collaborative virtual environments. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *42*, 203–208.
- Rakkolainen, I., Farooq, A., Kangas, J., Hakulinen, J., Rantala, J., Turunen, M., & Raisamo, R. (2021). Technologies for multimodal interaction in extended reality—a scoping review. *Multimodal Technologies and Interaction*, *5*, 81.
- Rao, K. N., Arora, R. D., Singh, A., Dange, P., & Nagarkar, N. M. (2023). Observational learning in surgical skill development. *Indian Journal of Surgical Oncology*, *14*, 540–544.
- Rasmussen, J. (1983). Skills, rules, and knowledge; signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, 257–266.
- Rauter, G., Sigrist, R., Riener, R., & Wolf, P. (2015). Learning of temporal and spatial movement aspects: A comparison of four types of haptic control and concurrent visual feedback. *IEEE transactions on haptics*, *8*, 421–433.
- Reznick, R. K., & MacRae, H. (2006). Teaching surgical skills—changes

in the wind. *New England Journal of Medicine*, 355, 2664–2669.

- Ricca, A., Chellali, A., & Otrnane, S. (2021). The influence of hand visualization in tool-based motor-skills training, a longitudinal study. *2021 IEEE Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, (pp. 103–112).
- Riener, R., Harders, M., Riener, R., & Harders, M. (2012). VR for medical training. *Virtual reality in medicine*, 181–210.
- Ries, B., Interrante, V., Kaeding, M., & Anderson, L. (2008). The effect of self-embodiment on distance perception in immersive virtual environments. *Proceedings of the 2008 ACM symposium on Virtual reality software and technology*, (pp. 167–170).
- Rineau, E. (2013). Courbes d'apprentissage des internes pour la pratique de l'anesthésie loco-régionale sous échographie: étude CAPPRI.
- Ripart, J., & de la Sfar, C. D.–A. (2006). Quel apprentissage de l'anesthésie locorégionale? *Annales francaises d'anesthesie et de reanimation*, 25, pp. 89–95.
- Rizzolatti, G., & others. (2006). Les systèmes de neurones miroirs. *Paper delivered at the Paris Academy of Sciences, December, 12*, 1371–1381.
- Roberts, D., Wolff, R., Rae, J., Steed, A., Aspin, R., McIntyre, M., . . . Steptoe, W. (2009). Communicating eye-gaze across a distance: Comparing an eye-gaze enabled immersive collaborative virtual environment, aligned video conferencing, and being together. *2009 IEEE Virtual Reality Conference*, (pp. 135–142).
- Roberts, N. K., Brenner, M. J., Williams, R. G., Kim, M. J., & Dunnington, G. L. (2012). Capturing the teachable moment: a grounded theory study of verbal teaching interactions in the operating room. *Surgery*, 151, 643–650.
- Romain, B. E., Ghuysen, A., & D'Orio, V. (2014). Simulation en pédagogie médicale: état des lieux. *Revue médicale de Liège*, 69.

- Rosenshine, B. (2012). Principles of instruction: Research-based strategies that all teachers should know. *American educator*, 36, 12.
- Rugelj, J. (2018). Collaborative virtual environments for problem based learning. Dans *International perspectives on tele-education and virtual learning environments* (pp. 140–155). Routledge.
- Salem, B., & Earle, N. (2000). Designing a non-verbal language for expressive avatars. *Proceedings of the third international conference on Collaborative virtual environments*, (pp. 93–101).
- Salinäs, E.-L. (2002). Collaboration in multi-modal virtual worlds: Comparing touch, text, voice and video. Dans *The social life of avatars: Presence and interaction in shared virtual environments* (pp. 172–187). Springer.
- Sallnäs, E.-L. (2004). *The effect of modality on social presence, presence and performance in collaborative virtual environments*. Ph.D. dissertation, KTH.
- Sallnäs, E.-L. (2005). Effects of communication mode on social presence, virtual presence, and performance in collaborative virtual environments. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 14, 434–449.
- Sallnäs, E.-L., Rasmus-Gröhn, K., & Sjöström, C. (2000). Supporting presence in collaborative environments by haptic force feedback. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction (TOCHI)*, 7, 461–476.
- Scapin, D. L., & Pierret-Golbreich, C. (1989). MAD: Une méthode analytique de description des tâches. *Actes du colloque sur l'ingénierie des Interfaces Homme-Machine*.
- Schäfer, A., Reis, G., & Stricker, D. (2022). A survey on synchronous augmented, virtual, and mixed reality remote collaboration systems. *ACM Computing Surveys*, 55, 1–27.
- Schmidt, R. A., & Wrisberg, C. A. (2008). *Motor learning and*

- performance: A situation-based learning approach*. Human kinetics.
- Schmidt, R. A., Lee, T. D., Winstein, C., Wulf, G., & Zelaznik, H. N. (2018). *Motor control and learning: A behavioral emphasis*. Human kinetics.
- Sebeok, T. A. (2005). Nonverbal communication. Dans *The Routledge companion to semiotics and linguistics* (pp. 30–43). Routledge.
- Shaikh, U. A., Magana, A. J., Neri, L., Escobar-Castillejos, D., Noguez, J., & Benes, B. (2017). Undergraduate students' conceptual interpretation and perceptions of haptic-enabled learning experiences. *International Journal of Educational Technology in Higher Education*, 14, 1–21.
- Shih, Y.-C. (2014). Communication strategies in a multimodal virtual communication context. *System*, 42, 34–47.
- Sigrist, R. (2014). *Multimodal augmented feedback in complex motor learning*. Ph.D. dissertation, ETH Zurich.
- Sigrist, R., Rauter, G., Marchal-Crespo, L., Riener, R., & Wolf, P. (2015). Sonification and haptic feedback in addition to visual feedback enhances complex motor task learning. *Experimental brain research*, 233, 909–925.
- 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, 21–53.
- Simon, C., Boukli-Hacene, M., Lebrun, F., Otmane, S., & Chellali, A. (2024). Impact of Multimodal Instructions for Tool Manipulation Skills on Performance and User Experience in an Immersive Environment. *2024 IEEE Conference Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, (pp. 670–680).
- Simon, C., Hacene, M. B., Otmane, S., & Chellali, A. (2023). Study of communication modalities to support teaching tool manipulation skills in a shared immersive environment.

Computers & Graphics, 117, 31–41.

Simon, C., Herfort, L., Lebrun, F., Brocas, E., Otmame, S., & Chellali, A. (2024). Design and evaluation of UlTRASim: An immersive simulator for learning ultrasound-guided regional anesthesia basic skills. *Computers & Graphics*, 119, 103878.

Simon, C., Otmame, S., & Chellali, A. (2022). Comparing modalities to communicate movement amplitude during tool manipulation in a shared learning virtual environment. *International Conference on Artificial Reality and Telexistence and Eurographics Symposium on Virtual Environments (ICAT-EGVE 2022)*.

Sites, B. D., Chan, V. W., Neal, J. M., Weller, R., Grau, T., Koscielniak-Nielsen, Z. J., & Ivani, G. (2009). The American Society of Regional Anesthesia and Pain Medicine and the European Society of Regional Anaesthesia and Pain Therapy Joint Committee recommendations for education and training in ultrasound-guided regional anesthesia. *Regional Anesthesia & Pain Medicine*, 34, 40–46.

Sites, B. D., Spence, B. C., Gallagher, J. D., Wiley, C. W., Bertrand, M. L., & Blike, G. T. (2007). Characterizing novice behavior associated with learning ultrasound-guided peripheral regional anesthesia. *Regional Anesthesia & Pain Medicine*, 32, 107–115.

Slater, M., Sadagic, A., Usoh, M., & Schroeder, R. (2000). Small-group behavior in a virtual and real environment: A comparative study. *Presence*, 9, 37–51.

So, H. Y., Chen, P. P., Wong, G. K., & Chan, T. T. (2019). Simulation in medical education. *Journal of the Royal College of Physicians of Edinburgh*, 49, 52–57.

Steed, A., & Schroeder, R. (2015). Collaboration in immersive and non-immersive virtual environments. *Immersed in media: Telepresence theory, measurement & technology*, 263–282.

Stein, B. E., & Stanford, T. R. (2008). Multisensory integration: current issues from the perspective of the single neuron. *Nature reviews*

neuroscience, 9, 255–266.

- Strandbygaard, J., Bjerrum, F., Maagaard, M., Winkel, P., Larsen, C. R., Ringsted, C., . . . Sorensen, J. L. (2013). Instructor feedback versus no instructor feedback on performance in a laparoscopic virtual reality simulator: a randomized trial. *Instructor feedback versus no instructor feedback on performance in a laparoscopic virtual reality simulator: a randomized trial*. LWW.
- Sunaryadi, Y. (2016). The role of augmented feedback on motor skill learning. *6th International Conference on Educational, Management, Administration and Leadership*, (pp. 271–275).
- Sung, G., Feng, T., & Schneider, B. (2021). Learners learn more and instructors track better with real-time gaze sharing. *Proceedings of the ACM on Human-Computer Interaction*, 5, 1–23.
- Sutkin, G., Littleton, E. B., & Kanter, S. L. (2015). How surgical mentors teach: a classification of in vivo teaching behaviors part 1: verbal teaching guidance. *Journal of Surgical Education*, 72, 243–250.
- Sutkin, G., Littleton, E. B., & Kanter, S. L. (2015). How surgical mentors teach: a classification of in vivo teaching behaviors part 2: physical teaching guidance. *Journal of Surgical Education*, 72, 251–257.
- Swinnen, S. P. (1996). Information feedback for motor skill learning: A review. *Advances in motor learning and control*, 37–66.
- Tagkas, P. (2020). The Interface between Verbal and Nonverbal Communication. *Annals of the University of Craiova, Series: Philology, English*, 1, 263–273.
- Tagliabue, M., & McIntyre, J. (2014). A modular theory of multisensory integration for motor control. *Frontiers in computational neuroscience*, 8, 1.
- Tanenbaum, J., El-Nasr, M. S., & Nixon, M. (2014). *Nonverbal Communication in Virtual Worlds*. ETC Press Pittsburgh, PA.
- Thilakumara, I. P., Jayasinghe, R. M., Rasnayaka, S. K., Jayasinghe, V. P.,

- & Abeyesundara, S. (2018). Effectiveness of procedural video versus live demonstrations in teaching laboratory techniques to dental students. *Journal of Dental Education*, *82*, 898–904.
- Triantafyllidis, E., Mcgreavy, C., Gu, J., & Li, Z. (2020). Study of multimodal interfaces and the improvements on teleoperation. *IEEE Access*, *8*, 78213–78227.
- Ullah, S., Richard, P., Otmane, S., Naud, M., & Mallem, M. (2009). Human performance in cooperative virtual environments: the effect of visual aids and oral communication. *International Journal of Virtual Reality*, *8*, 79–86.
- Van De Ridder, J. M., Stokking, K. M., McGaghie, W. C., & Ten Cate, O. T. (2008). What is feedback in clinical education? *Medical education*, *42*, 189–197.
- Van Erp, J. B., & Toet, A. (2015). Social touch in human–computer interaction. *Frontiers in digital humanities*, *2*, 2.
- Verhulst, E. (2018). *Contribution de l'étude de l'interaction en environnement virtuel: intérêt de la charge mentale*. Ph.D. dissertation, Université d'Angers.
- Vitense, H. S., Jacko, J. A., & Emery, V. K. (2003). Multimodal feedback: an assessment of performance and mental workload. *Ergonomics*, *46*, 68–87.
- Wahyuni, A. (2018). The power of verbal and nonverbal communication in learning. *1st International Conference on Intellectuals' Global Responsibility (ICIGR 2017)*, (pp. 80–83).
- Wallace, M. T., Meredith, M. A., & Stein, B. E. (1993). Converging influences from visual, auditory, and somatosensory cortices onto output neurons of the superior colliculus. *Journal of neurophysiology*, *69*, 1797–1809.
- Wang, J., Chellali, A., & Cao, C. G. (2013). A study of communication modalities in a virtual collaborative task. *2013 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, (pp. 542–546).

- Wang, J., Chellali, A., & Cao, C. G. (2016). Haptic communication in collaborative virtual environments. *Human factors*, *58*, 496–508.
- Wang, R., & Wang, X. (2008). Here and there: Experiencing co-presence through mixed reality-mediated collaborative design system. *2008 8th IEEE International Conference on Computer and Information Technology*, (pp. 577–582).
- Wang, X., & Wang, R. (2011). Co-Presence in mixed reality-mediated collaborative design space. Dans *Collaborative Design in Virtual Environments* (pp. 51–64). Springer.
- Wang, X., Laffey, J., Xing, W., Galyen, K., & Stichter, J. (2017). Fostering verbal and non-verbal social interactions in a 3D collaborative virtual learning environment: a case study of youth with Autism Spectrum Disorders learning social competence in iSocial. *Educational Technology Research and Development*, *65*, 1015–1039.
- Wigham, C. R., & Chanier, T. (2013). A study of verbal and nonverbal communication in Second Life—the ARCHI21 experience. *ReCALL*, *25*, 63–84.
- Williams, S., & Roberts, T. S. (2002). Computer-supported collaborative learning: strengths and weaknesses. *International Conference on Computers in Education, 2002. Proceedings.*, (pp. 328–331).
- Wolpert, D. M., & Flanagan, J. R. (2010). Motor learning. *Current biology*, *20*, R467–R472.
- Wright, T., & Madey, G. (2008). A survey of collaborative virtual environment technologies. *University of Notre Dame-USA, Tech. Rep*, 1–16.
- Wu, Y., Wang, Y., Jung, S., Hoermann, S., & Lindeman, R. W. (2021). Using a fully expressive avatar to collaborate in virtual reality: Evaluation of task performance, presence, and attraction. *Frontiers in Virtual Reality*, *2*, 641296.
- Wulf, G., & Shea, C. H. (2002). Principles derived from the study of

simple skills do not generalize to complex skill learning. *Psychonomic bulletin & review*, 9, 185–211.

- Wulf, G., Shea, C., & Lewthwaite, R. (2010). Motor skill learning and performance: a review of influential factors. *Medical education*, 44, 75–84.
- Wyvill, G., McPheeters, C., & Wyvill, B. (1986). Soft objects. *Advanced Computer Graphics: Proceedings of Computer Graphics Tokyo'86*, (pp. 113–128).
- Yang, J., Sasikumar, P., Bai, H., Barde, A., Sörös, G., & Billingham, M. (2020). The effects of spatial auditory and visual cues on mixed reality remote collaboration. *Journal on Multimodal User Interfaces*, 14, 337–352.
- Yiannakopoulou, E., Nikiteas, N., Perrea, D., & Tsigris, C. (2015). Virtual reality simulators and training in laparoscopic surgery. *International Journal of Surgery*, 13, 60–64.
- Yuksel, T., Walsh, Y., Magana, A. J., Nova, N., Krs, V., Ngambeki, I., . . . Benes, B. (2019). Visuohaptic experiments: Exploring the effects of visual and haptic feedback on students' learning of friction concepts. *Computer Applications in Engineering Education*, 27, 1376–1401.
- Zhu, M., Sun, Z., Zhang, Z., Shi, Q., He, T., Liu, H., . . . Lee, C. (2020). Haptic-feedback smart glove as a creative human-machine interface (HMI) for virtual/augmented reality applications. *Science Advances*, 6, eaaz8693.
- Ziv, A., Wolpe, P. R., Small, S. D., & Glick, S. (2006). Simulation-based medical education: an ethical imperative. *Simulation in Healthcare*, 1, 252–256.

9 ANNEXES

Questionnaire en ligne de validation du modèle de tâche

Sexe : M ou F

Nombre d'années de pratique :

Nombre de cas réalisés :

Validez-vous ou non le diagramme présenté : Oui / Non

Questionnaire démographique utilisé pour interroger les anesthésistes

INFORMATIONS GÉNÉRALES

Quel âge avez-vous ? : ans

Sexe : M ou F

Main Dominante : D ou G

Porter vous des lunettes : OUI ou NON

EXPÉRIENCE EN MÉDECINE

Depuis combien de temps exercez-vous ?

Interne :

- DESAR 1-2-3
- DESAR 4-5

Médecin anesthésiste :

- <5 ans
- 5-10 ans
- 11-20 ans
- >20 ans

Quel est votre principal lieu d'exercice ?

NB : Pour les internes, répondre en fonction de votre stage actuel

- Département : ___
- CHU
- CHR
- Clinique
- Autre : ___

Avez-vous été formé à l'ALR échoguidée ?

OUI ou NON

Si oui, quel type de formation avez-vous reçu ?

Théorique :

- DU/DIU
- Cours reçus pendant l'internat d'anesthésie réanimation
- Congrès
- Autodidacte (manuels d'ALR, tutoriels sur internet...)
- Autres : ____

Pratique :

- Bloc opératoire auprès d'un collègue plus expérimenté en ALR
- Centre de simulation
- Autres : ____

Au cours de votre activité d'anesthésiste, avez-vous l'occasion de pratiquer l'ALR échoguidée ?

OUI ou NON

Si oui, à quelle fréquence ?

- Quotidienne
- Plusieurs fois/semaine
- Plusieurs fois/mois
- Occasionnel

PRATIQUE & EXPÉRIENCE PERSONNELLE DE L'ALR

Quelle(s) méthode(s) d'ALR utilisez-vous le plus souvent ? (plusieurs réponses possibles)

- Selon repères anatomiques
- Échoguidage combiné à la neurostimulation
- Neurostimulation
- ALRIV
- Echoguidage

Quels sont les blocs périphériques que vous pratiquez ? (plusieurs réponses possibles)

Membre sup :

- Bloc interscalénique
- Bloc supra claviculaire
- Bloc infra claviculaire
- Bloc axillaire
- Blocs distaux

Membre inf :

- Bloc fémoral

- Bloc obturateur
- Bloc cutané latéral de cuisse
- Bloc sciatique
- Bloc saphène ou du canal des adducteurs
- Blocs distaux

Veillez indiquer dans le tableau suivant, votre expérience passée (mesuré par le nombre de cas approximatif) en ALR échoguidée

Technique chirurgicale	Cas observés	Cas assistés	Cas performés
ALR échoguidée			

AMÉLIORATION DE LA FORMATION ET DE LA PRATIQUE DE L'ALR ÉCHOGUIDÉE

Dans la pratique de l'ALR échoguidée, quelles sont les difficultés que vous rencontrez le plus souvent sur votre lieu d'exercice principal ? (plusieurs réponses possibles)

- Manque de temps (nombre de patients trop important ou personnel insuffisant)
- Matériel dédié à l'ALR insuffisant
- Autres : ____
- Aucune

Avez-vous lu les recommandations de la SFAR sur "l'anesthésie locorégionale échoguidée" ?

OUI ou NON

Si oui, votre pratique respectait-elle l'ensemble de ces recommandations ?

OUI ou NON

Que pensez-vous de votre formation personnelle en ALR échoguidée ?

- Bonne
- Moyenne
- Insuffisante

Si moyenne ou insuffisante, quelles sont les lacunes que vous pensez avoir ?

- Théorique (anatomie, pharmacologie, neurophysiologie...)
- Pratique
- Théorique et Pratique

Quels sont vos souhaits pour l'amélioration de la formation et de la pratique des anesthésistes concernant l'ALR échoguidée ? (plusieurs réponses possibles)

- Aucun
- Meilleure accessibilité à des DU/DIU
- Développer la simulation pour la pratique de l'ALR échoguidée
- Autres : ____

EXPÉRIENCE DE SIMULATEUR

Avez-vous déjà utilisé un simulateur ?

- OUI ou NON
- Si OUI lesquels ?
- Phantom
- Morceau de viande
- Mannequin
- Réalité virtuelle
- Autres : ____

Avez-vous rencontré des problèmes avec ces simulateurs ?

OUI ou NON

Si OUI lesquels ?

Avez-vous pratiqué votre toute première ALR échoguidée sur un simulateur ou sur un vrai patient ?

- Simulateur
- Vrai patient

Seriez-vous intéressés par une formation à l'ALR par simulation en réalité virtuelle ?

OUI ou NON

Pour quelles raisons ?

Notice d'information de participation à l'étude observationnelle

NOTICE D'INFORMATION

Titre du projet : Etude de la communication formateur-apprenant pendant la formation à l'anesthésie locorégionale échoguidée

Chercheur titulaire responsable scientifique du projet : Amine Chellali

Mail : amine.chellali@ibisc.fr

Téléphone : 01 69 47 75 33

Fonction : Maître de conférences

Affiliation : Laboratoire IBISC, Univ Evry, Université Paris-Saclay

Adresse postale :

40 rue du Pelvoux

91020 Evry Cédex

But du projet de recherche :

L'objectif de cette étude observationnelle est de comprendre les interactions et échanges multimodaux entre un formateur et un apprenant pendant l'apprentissage au geste d'anesthésie locorégionale échoguidée (ALR).

Ce que l'on attend de vous :

Nous attendons de vous que vous ne prêtiez aucune attention à notre présence et que vous vous concentriez uniquement sur votre activité professionnelle. On vous demandera de porter un micro-cravate afin d'enregistrer vos échanges avec vos collègues. Un membre de l'équipe de recherche utilisera un téléphone portable afin de filmer vos interactions avec vos collègues. À la fin de la journée, une fois l'ensemble des procédures terminés, on vous demandera de remplir un questionnaire démographique et de signer une fiche de consentement pour le droit à l'image. Une notice d'information vous sera également remise. Puis, vous serez invité à suivre un débriefing. Enfin, un entretien semi-dirigé vous sera proposé. Celui-ci se réalisera uniquement sur volontariat de votre part.

Vos droits de vous retirer de la recherche à tout moment :

Votre contribution à cette recherche est volontaire. Vous pouvez donc vous retirer ou cesser votre participation à n'importe quel moment. Votre décision de participer, de refuser de participer, ou de cesser votre participation n'aura aucun effet sur vos notes, sur votre statut, vos relations futures avec le Laboratoire IBISC, l'Université Paris-Saclay.

Vos droits à la confidentialité et au respect de la vie privée :

Les données obtenues suite à votre participation seront traitées avec la confidentialité la plus entière. Votre identité sera masquée. Aucun renseignement ne pourra révéler votre identité. Toutes les données seront gardées dans un endroit sécurisé et seuls le responsable scientifique et les chercheurs adjoints y auront accès. Les données audios/vidéos obtenues à la suite de votre participation seront prés traités afin de supprimer toute information pouvant permettre de vous identifier. Il ne sera donc pas possible de les rectifier ou de les supprimer après 7 jours à partir de la date de votre participation.

Bénéfices de l'étude :

Aucune indemnisation ne vous sera donnée pour votre participation à cette étude.

Il n'y a pas de bénéfices directs pour vous. L'avantage à long terme est que cette recherche contribuera à une meilleure compréhension des méthodes d'apprentissages entre un expert et un apprenant et conduira ainsi à une meilleure conception d'environnements virtuels pédagogiques et collaboratifs, et donc à un développement plus efficace de la formation et des outils.

Risques possibles de l'étude :

À notre connaissance, cette recherche n'implique aucun risque ou inconfort autre que ceux de la vie quotidienne. Vous serez emmenés à manipuler vos outils/instruments habituels et pour lesquelles aucunes interventions de notre part ne sera nécessaire.

Compte tenu de la situation actuelle (Covid-19), cette étude respectera strictement le protocole sanitaire défini au sein des établissements de santé où nous serons amenés à réaliser l'étude.

Diffusion :

Les résultats globaux de cette étude (moyennés sur l'ensemble des participants) sont susceptibles d'être diffusés lors de colloques et d'être publiés dans des revues scientifiques. Vous pouvez consulter ces résultats sur une simple demande.

Vos droits de poser des questions :

Vous pouvez poser des questions au sujet de la recherche en tout temps (avant, pendant et après votre participation) en communiquant avec le responsable scientifique du projet par courrier électronique à amine.chellali@ibisc.fr (ou par téléphone au 01 69 47 75 33).

Nous vous remercions du temps consacré à la lecture attentive de ce document et de l'intérêt porté à cette étude

Autorisation pour des enregistrements audio/vidéos

Je suis d'accord pour que l'intervention que je vais réaliser soit filmée de manière anonyme et que seules mes bras, mains et mes conversations avec mes collègues soient enregistrées sur des fichiers audios pour des fins de recherche. Aucune information permettant de m'identifier ne sera donc enregistrée. Si par inadvertance des informations permettant de m'identifier sont présentes sur les enregistrements, elles seront floutées/supprimées au moment du prétraitement de données.

De ce fait, je ne pourrais pas exercer mon droit d'accès et de rectification de mes informations personnelles après une semaine de ma participation à l'étude.

Nom, Prénom :

Date :

Signature

A remplir par l'investigateur :

Nom de l'investigateur :

Date :

Signature

Formulaire de consentement éclairé étude 1

NOTICE D'INFORMATION ET CONSENTEMENT ECLAIRE

Titre du projet : Etude des modalités de communication avec un formateur pour l'apprentissage d'un geste technique dans un environnement virtuel partagé

Chercheur titulaire responsable scientifique du projet : Amine Chellali

Mail : amine.chellali@ibisc.fr

Téléphone : 01 69 47 75 33

Fonction : Maître de conférences

Affiliation : Laboratoire IBISC, Univ Evry, Université Paris-Saclay

Adresse postale :

40 rue du Pelvoux

91020 Evry Cédex

Lieu de la recherche :

Salle EVR@ - Laboratoire IBISC

Bâtiment Pelvoux

40 rue du Pelvoux

91020 Evry Cédex

But du projet de recherche :

L'objectif de cette étude expérimentale est de comparer l'efficacité de trois modalités de formation (voix, geste, haptique) pour l'apprentissage d'un geste technique en environnement virtuel immersif.

Ce que l'on attend de vous :

Après avoir rempli un questionnaire démographique, vous serez équipé d'un casque de réalité virtuelle et il vous sera demandé de saisir à l'aide d'un bras à retour de force, un objet virtuel se trouvant à un point de départ et de le déposer à un point d'arrivée, lequel ne vous sera pas visible. Pour ce faire, vous disposerez au départ d'indications concernant la position de ce point d'arrivée selon une des trois modalités suivantes : verbale, gestuelle ou haptique. Cette tâche sera répétée 6 fois pour chaque modalité.

Après chaque modalité, vous répondrez à un questionnaire, puis réitérerez pour chacune des trois modalités. A la fin, on vous demandera de remplir un questionnaire pour comparer les 3 modalités.

Vos droits de vous retirer de la recherche à tout moment :

Votre contribution à cette recherche est volontaire. Vous pouvez donc vous retirer ou cesser votre participation à n'importe quel moment. Votre décision de participer, de refuser de participer, ou de cesser votre participation n'aura aucun effet sur vos notes, sur votre statut, vos relations futures avec le Laboratoire IBISC ou avec l'Université Paris-Saclay.

Vos droits à la confidentialité et au respect de la vie privée :

Les données obtenues suite à votre participation seront traitées avec la confidentialité la plus entière. Votre identité sera masquée à l'aide d'un numéro aléatoire. Aucun autre renseignement ne pourra révéler votre identité. Toutes les données seront gardées dans un endroit sécurisé et seuls le responsable scientifique et les chercheurs adjoints y auront accès. Les données obtenues suite à votre participation étant strictement anonymes, il ne sera pas possible de les rectifier ou de les supprimer après la fin de votre participation.

Bénéfices de l'étude :

Aucune indemnisation ne vous sera donnée pour votre participation à cette étude.

Les avantages attendus de cette recherche seront d'avoir une meilleure compréhension de l'efficacité des diverses modalités de communication testées, dans le cadre de l'apprentissage de geste techniques se déroulant dans un environnement virtuel.

Ceci permettra à l'avenir de mieux concevoir les environnements virtuels pédagogiques et collaboratifs qui seront utilisés dans différents domaines, tels que l'apprentissage de la chirurgie.

Risques possibles de l'étude :

À notre connaissance, cette recherche n'implique aucun risque ou inconfort autre que ceux de la vie quotidienne.

Les participants utiliseront des casques de réalité virtuelle, ce qui peut induire de la fatigue visuelle et parfois le mal du simulateur. Pour réduire ces effets, la durée du port du casque sera limitée à 30 minutes consécutives et l'environnement virtuel a été conçu pour limiter les déplacements virtuels connus pour augmenter ces effets. Si toutefois vous ressentez de la fatigue ou de l'inconfort pendant cette expérience, vous aurez le droit de prendre une pause sur simple demande à l'expérimentateur.

Diffusion :

Les résultats globaux de cette étude (moyennés sur l'ensemble des participants) sont susceptibles d'être diffusés lors de colloques et d'être publiés dans des revues scientifiques. Vous pouvez consulter ces résultats sur une simple demande.

Vos droits de poser des questions :

Vous pouvez poser des questions au sujet de la recherche en tout temps (avant, pendant et après votre participation) en communiquant avec le responsable scientifique du projet par courrier électronique à amine.chellali@ibisc.fr (ou par téléphone au 01 69 47 75 33).

Consentement à la participation :

En signant le formulaire de consentement, vous certifiez que vous avez lu et compris les renseignements ci-dessus, que le chercheur a répondu à vos questions de façon satisfaisante et qu'il vous a avisé que vous étiez libre d'annuler votre consentement ou de vous retirer de cette recherche à tout moment, sans préjudice.

A remplir par le participant :

« J'ai lu et compris les renseignements ci-dessus et j'accepte de plein gré de participer à cette recherche. »

Nom, Prénom :

Date __/__/_____

Signature

A remplir par l'expérimentateur :

Nom de l'expérimentateur :

Date __/__/_____

Signature

Un exemplaire de ce document vous est remis, un autre exemplaire est conservé par l'expérimentateur.

Formulaire de consentement éclairé étude 2

NOTICE D'INFORMATION ET CONSENTEMENT ECLAIRE

Titre du projet : Instructions multimodales communiquées par un formateur pour l'apprentissage d'un geste technique dans un environnement virtuel immersif

Chercheur titulaire responsable scientifique du projet : Amine Chellali

Mail : amine.chellali@ibisc.fr

Téléphone : 01 69 47 75 33

Fonction : Maître de conférences

Affiliation : Laboratoire IBISC, Univ Évry, Université Paris-Saclay

Adresse postale|:

40 rue du Pelvoux

91020 Evry Cédex

Lieu de la recherche :

Salle EVR@ - Laboratoire IBISC

Bâtiment Pelvoux

40 rue du Pelvoux

91020 Evry Cédex

But du projet de recherche :

L'objectif de cette étude expérimentale est de comparer l'efficacité de quatre combinaisons de modalités de formation pour l'apprentissage d'un geste technique en environnement virtuel immersif.

Ce que l'on attend de vous :

Après avoir rempli un questionnaire démographique, vous serez équipé d'un casque de réalité virtuelle et il vous sera demandé de saisir à l'aide d'un bras à retour de force, un objet virtuel se trouvant à un point de départ et de le déposer à un point d'arrivée, lequel ne vous sera pas visible. Pour ce faire, vous disposerez au départ d'indications concernant la position de ce point d'arrivée selon une des quatre combinaisons de modalités suivantes : verbale-visuelle, verbale-haptique, visuelle-haptique ou verbale-visuelle-haptique. Cette tâche sera répétée 12 fois pour chaque modalité.

Après chaque combinaison, vous répondrez à un questionnaire, puis réitérerez pour chacune des quatre combinaisons de modalités. A la fin, on vous demandera de remplir un questionnaire pour comparer les quatre conditions.

Vos droits de vous retirer de la recherche à tout moment :

Votre contribution à cette recherche est volontaire. Vous pouvez donc vous retirer ou cesser votre participation à n'importe quel moment. Votre décision de participer, de refuser de participer, ou de cesser votre participation n'aura aucun effet sur vos notes, sur votre statut, vos relations futures avec le Laboratoire IBISC ou avec l'Université Paris-Saclay.

Vos droits à la confidentialité et au respect de la vie privée :

Les données obtenues suite à votre participation seront traitées avec la confidentialité la plus entière. Votre identité sera masquée à l'aide d'un numéro aléatoire. Aucun autre renseignement ne pourra révéler votre identité. Toutes les données seront gardées dans un endroit sécurisé et seuls le responsable scientifique et les chercheurs adjoints y auront accès. Les données obtenues suite à votre participation étant strictement anonymes, il ne sera pas possible de les rectifier ou de les supprimer après la fin de votre participation.

Bénéfices de l'étude :

Aucune indemnisation ne vous sera donnée pour votre participation à cette étude.

Les avantages attendus de cette recherche seront d'avoir une meilleure compréhension de l'efficacité des diverses modalités de communication testées, dans le cadre de l'apprentissage de geste techniques se déroulant dans un environnement virtuel.

Ceci permettra à l'avenir de mieux concevoir les environnements virtuels pédagogiques et collaboratifs qui seront utilisés dans différents domaines, tels que l'apprentissage de la chirurgie.

Risques possibles de l'étude :

À notre connaissance, cette recherche n'implique aucun risque ou inconfort autre que ceux de la vie quotidienne.

Les participants utiliseront des casques de réalité virtuelle, ce qui peut induire de la fatigue visuelle et parfois le mal du simulateur. Pour réduire ces effets, la durée du port du casque sera limitée à 30 minutes consécutives et l'environnement virtuel a été conçu pour limiter les déplacements virtuels connus pour augmenter ces effets. Si toutefois vous ressentez de la fatigue ou de l'inconfort pendant cette expérience, vous aurez le droit de prendre une pause sur simple demande à l'expérimentateur.

Diffusion :

Les résultats globaux de cette étude (moyennés sur l'ensemble des participants) sont susceptibles d'être diffusés lors de colloques et d'être publiés dans des revues scientifiques. Vous pouvez consulter ces résultats sur une simple demande.

Vos droits de poser des questions :

Vous pouvez poser des questions au sujet de la recherche en tout temps (avant, pendant et après votre participation) en communiquant avec le responsable scientifique du projet par courrier électronique à amine.chellali@ibisc.fr (ou par téléphone au 01 69 47 75 33).

Consentement à la participation :

En signant le formulaire de consentement, vous certifiez que vous avez lu et compris les renseignements ci-dessus, que le chercheur a répondu à vos questions de façon satisfaisante et qu'il vous a avisé que vous étiez libre d'annuler votre consentement ou de vous retirer de cette recherche à tout moment, sans préjudice.

A remplir par le participant :

« J'ai lu et compris les renseignements ci-dessus et j'accepte de plein gré de participer à cette recherche. »

Nom, Prénom :

Date __/__/____

Signature

A remplir par l'expérimentateur :

Nom de l'expérimentateur :

Date __/__/____

Signature

Un exemplaire de ce document vous est remis, un autre exemplaire est conservé par l'expérimentateur.

Formulaire de consentement éclairé étude 3

NOTICE D'INFORMATION ET CONSENTEMENT ECLAIRE

Titre du projet : Feedbacks augmentés multimodaux pour l'apprentissage d'un geste technique dans un environnement virtuel immersif

Chercheur titulaire responsable scientifique du projet : Amine Chellali

Mail : amine.chellali@ibisc.fr

Téléphone : 01 69 47 75 33

Fonction : Maître de conférences

Affiliation : Laboratoire IBISC, Univ Évry, Université Paris-Saclay

Adresse postale :

40 rue du Pelvoux

91020 Evry Cédex

Lieu de la recherche :

Salle EVR@ - Laboratoire IBISC

Bâtiment Pelvoux

40 rue du Pelvoux

91020 Evry Cédex

But du projet de recherche :

L'objectif de cette étude expérimentale est de comparer l'efficacité des retours fournis par un expert pendant l'apprentissage d'un geste technique en environnement virtuel immersif.

Ce que l'on attend de vous :

Après avoir rempli un questionnaire démographique, vous serez équipé d'un casque de réalité virtuelle et vous recevrez une instruction pour réaliser un geste technique pour tracer une trajectoire de référence. Après cette instruction, il vous sera demandé de refaire le geste par vous-même afin de mesurer votre performance de départ. Ensuite, il vous sera demandé de refaire le geste dix fois par vous-même mais cette fois-ci vous serez corrigé par l'expert en cas d'erreur. Après cette phase, vous serez emmené à répondre à deux questionnaires. Enfin, on vous demandera de refaire à nouveau le geste à deux reprises par vous-même et sans l'aide de l'expert afin de mesurer votre performance finale.

Vos droits de vous retirer de la recherche à tout moment :

Votre contribution à cette recherche est volontaire. Vous pouvez donc vous retirer ou cesser votre participation à n'importe quel moment. Votre décision de participer, de refuser de participer, ou de cesser votre participation n'aura aucun effet sur vos notes, sur votre statut, vos relations futures avec le Laboratoire IBISC ou avec l'Université Paris-Saclay.

Vos droits à la confidentialité et au respect de la vie privée :

Les données obtenues suite à votre participation seront traitées avec la confidentialité la plus entière. Votre identité sera masquée à l'aide d'un numéro aléatoire. Aucun autre renseignement ne pourra révéler votre identité. Toutes les données seront gardées dans un endroit sécurisé et seuls le responsable scientifique et les chercheurs adjoints y auront accès. Les données obtenues suite à votre participation étant strictement anonymes, il ne sera pas possible de les rectifier ou de les supprimer après la fin de votre participation.

Bénéfices de l'étude :

Aucune indemnisation ne vous sera donnée pour votre participation à cette étude.

Les avantages attendus de cette recherche seront d'avoir une meilleure compréhension de l'efficacité des feedbacks augmentés, dans le cadre de l'apprentissage de geste techniques se déroulant dans un environnement virtuel.

Ceci permettra à l'avenir de mieux concevoir les environnements virtuels pédagogiques et collaboratifs qui seront utilisés dans différents domaines, tels que l'apprentissage de la chirurgie.

Risques possibles de l'étude :

À notre connaissance, cette recherche n'implique aucun risque ou inconfort autre que ceux de la vie quotidienne.

Les participants utiliseront des casques de réalité virtuelle, ce qui peut induire de la fatigue visuelle et parfois le mal du simulateur. Pour réduire ces effets, la durée du port du casque sera limitée à 30 minutes consécutives et l'environnement virtuel a été conçu pour limiter les déplacements virtuels connus pour augmenter ces effets. Si toutefois vous ressentez de la fatigue ou de l'inconfort pendant cette expérience, vous aurez le droit de prendre une pause sur simple demande à l'expérimentateur.

Diffusion :

Les résultats globaux de cette étude (moyennés sur l'ensemble des participants) sont susceptibles d'être diffusés lors de colloques et d'être publiés dans des revues scientifiques. Vous pouvez consulter ces résultats sur une simple demande.

Vos droits de poser des questions :

Vous pouvez poser des questions au sujet de la recherche en tout temps (avant, pendant et après votre participation) en communiquant avec le responsable scientifique du projet par courrier électronique à amine.chellali@ibisc.fr (ou par téléphone au 01 69 47 75 33).

Consentement à la participation :

En signant le formulaire de consentement, vous certifiez que vous avez lu et compris les renseignements ci-dessus, que le chercheur a répondu à vos questions de façon satisfaisante et qu'il vous a avisé que vous étiez libre d'annuler votre consentement ou de vous retirer de cette recherche à tout moment, sans préjudice.

A remplir par le participant :

« J'ai lu et compris les renseignements ci-dessus et j'accepte de plein gré de participer à cette recherche. »

Nom, Prénom :

Date __/__/____

Signature

A remplir par l'expérimentateur :

Nom de l'expérimentateur :

Date __/__/____

Signature

Un exemplaire de ce document vous est remis, un autre exemplaire est conservé par l'expérimentateur.

Questionnaire démographique utilisé pour interroger les participants des expérimentations

Informations générales.

1. Âge : _____
2. Sexe : Masculin _____ ; Féminin _____
3. Portez-vous des lentilles/lunettes correctrices ? OUI _____ ; NON _____
 - a. Si OUI, les portez-vous pendant l'expérience ? OUI _____ ; NON _____

Expérience avec les jeux vidéos.

1. Avez-vous déjà joué à des jeux vidéo ? OUI _____ ; NON _____
 - a. Si OUI, il y a combien d'années avez-vous commencé à jouer à des jeux vidéo? _____
 - b. Si OUI, à quelle fréquence jouez-vous aux jeux vidéos ?
 - i. Tous les jours _____
 - ii. Une fois par semaine _____
 - iii. Une fois par mois _____
 - iv. Une fois par an _____
 - v. Une fois tous les quelques années _____
 - c. Si OUI, quand était la dernière fois ? _____ ; et quel jeu était-il ? _____

Expérience avec la réalité virtuelle.

1. Avez-vous déjà utilisé des environnements virtuels 3D ? OUI _____ ; NON _____
 - a. Si OUI, à quelle fréquence utilisez-vous des environnements virtuels 3D ?
 - i. Tous les jours _____
 - ii. Une fois par semaine _____
 - iii. Une fois par mois _____
 - iv. Une fois par an _____
 - v. Une fois tous les quelques années _____
 - b. Si OUI, quand était la dernière fois ? _____ ; et dans quelle occasion était-il ? _____
2. Avez-vous déjà utilisé des casques de réalité virtuelle ? OUI _____ ; NON _____
 - a. Si OUI, à quelle fréquence utilisez-vous des casques de réalité virtuelle ?
 - i. Tous les jours _____
 - ii. Une fois par semaine _____
 - iii. Une fois par mois _____
 - iv. Une fois par an _____
 - v. Une fois tous les quelques années _____
 - b. Si OUI, pendant combien de temps les portez-vous à chaque occasion ?
 - i. Moins de 10 minutes _____
 - ii. Entre 10 et 30 minutes _____
 - iii. Plus de 30 minutes _____
 - c. Si OUI, quand était la dernière fois ? _____ ; et dans quelle occasion était-il ? _____
3. Avez-vous déjà utilisé des dispositifs à retour haptique ? OUI _____ ; NON _____
 - a. Si OUI, quand était la dernière fois ? _____ ; et dans quelle occasion était-il ? _____

Pré-test

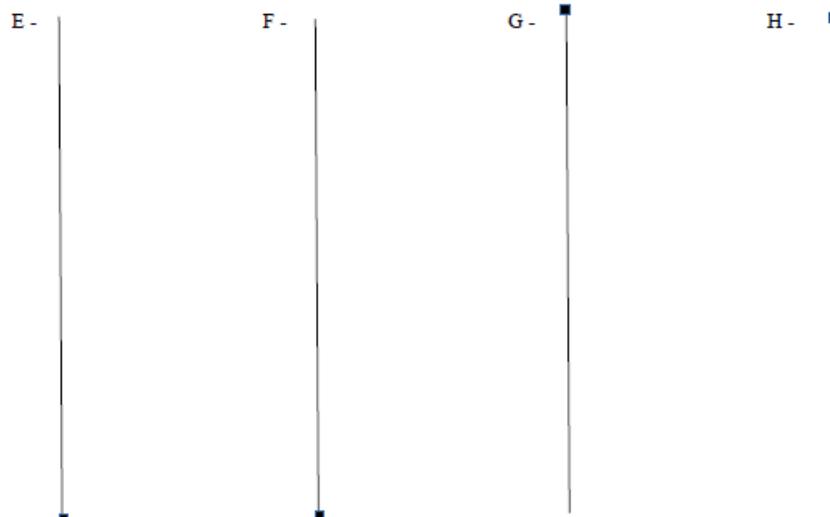
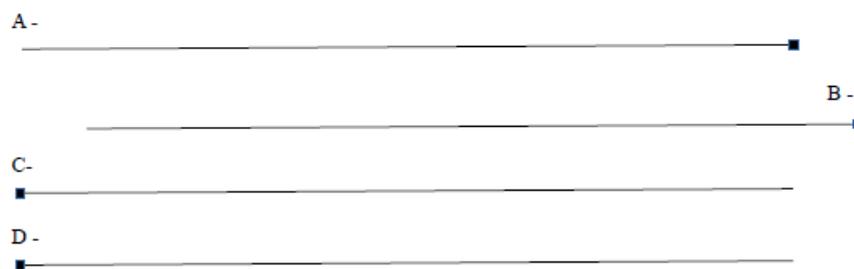
N° Participant:

Date:

Veillez marquer la position à une distance précise à partir du point initial du segment de droite selon chacun des cas suivants:

A - 4 cm vers la gauche
B - 6 cm vers la gauche
C - 8 cm vers la droite
D - 10 cm vers la droite

E - 8 cm vers le haut
F - 6 cm vers le haut
G - 4 cm vers le bas
H - 10 cm vers le bas



NASA-TLX

N° Participant : _____ N° Condition: _____ Date : _____

NASA Task Load Index

Pour chaque question, mets une croix (X) dans la case qui correspond à ce que tu ressens

Pression mentale

La tâche a-t-elle exigé beaucoup d'activité mentale ?

<input type="checkbox"/>																			
--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------

Peu

Beaucoup

Pression physique

La tâche a-t-elle exigé beaucoup d'activité physique ?

<input type="checkbox"/>																			
--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------

Peu

Beaucoup

Pression temporelle

Est-ce que tu t'es senti pressé par le temps ?

<input type="checkbox"/>																			
--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------

Peu

Beaucoup

Performance

Comment estimes-tu ta performance pour cette tâche ?

<input type="checkbox"/>																			
--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------

Très mauvaise

Très bonne

Effort

Penses-tu que cette tâche était difficile à accomplir (mentalement ou physiquement) ?

<input type="checkbox"/>																			
--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------

Peu

Beaucoup

Frustration

T'es-tu senti frustré, découragé, irrité, stressé pendant la tâche ?

<input type="checkbox"/>																			
--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------

Peu

Beaucoup