

# Apprentissage de gestes en réalité virtuelle avec retours In-Situ

par

Samuël HÉNAULT LEFEBVRE

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE  
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE LA MAÎTRISE  
AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE DES TECHNOLOGIES DE L'INFORMATION  
M. Sc. A.

MONTRÉAL, LE 29 AOÛT 2023

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE  
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Samuël Hénault Lefebvre, 2023



Cette licence Creative Commons signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette oeuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'oeuvre n'ait pas été modifié.

**PRÉSENTATION DU JURY**

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE:

M. Michael J. McGuffin, directeur de mémoire  
Département de génie logiciel et des TI à l'École de technologie supérieure

M. David Labbé, président du jury  
Département de génie logiciel et des TI à l'École de technologie supérieure

M. Vincent Lévesque, membre du jury  
Département de génie logiciel et des TI à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 4 AOÛT 2023

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE



## AVANT-PROPOS

Depuis mon enfance, je suis fasciné par les interactions humain-machine. La dichotomie entre les interfaces utilisateurs présentées dans les films et celles du monde réel, qui peuvent sembler ordinaires en comparaison, a suscité en moi de nombreuses réflexions sur les possibilités d'aller au-delà de ce qui existe.

Je me rappelle avoir imaginé, étant enfant, à quoi pourraient ressembler les interfaces en trois dimensions avec plusieurs fenêtres dans l'espace et, plus importants encore, la manipulation fluide de l'information. Ce n'est que plusieurs années plus tard que la technologie de la réalité virtuelle a commencé à se démocratiser, ravivant mon imagination d'enfant quant aux possibilités de ce domaine.

L'utilisation d'appareils permettant l'usage des mains en trois dimensions a ouvert de nouvelles perspectives pour moi quant à la conception et à l'interaction. L'intégration de tels mécanismes dans divers projets m'a permis d'entreprendre plusieurs réflexions qui ont mené à ce projet de recherche.

Cette maîtrise m'a permis de concrétiser cet intérêt, en me donnant la possibilité d'approfondir les concepts de la réalité virtuelle avec l'utilisation des mains.



## REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier mon directeur de recherche, Michael J. McGuffin, pour sa confiance en mon potentiel et son soutien au long de ce projet de recherche. Son expertise dans le domaine des interactions humains-machines a été d'une grande valeur pendant le développement de ce projet. Je suis reconnaissant d'avoir eu l'opportunité de soumettre mon idée et de la concrétiser grâce à son accompagnement.

Je suis reconnaissant envers mes collègues, Thibault Friedrich et Louis-Pierre Pagé pour leurs précieux échanges d'idées et leurs soutiens en tant qu'étudiant-chercheur.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance envers les membres du personnel de l'ÉTS, en particulier Prasun Lala pour son assistance précieuse à mieux comprendre le monde de la recherche et ses efforts pour unifier la communauté étudiante au cycle supérieur par l'entremise du SARA, ainsi que Geneviève Colard pour son aide quant à la correction de ce mémoire.

Je remercie également Vincent Lévesque et Patrice Robitaille de m'avoir donné l'opportunité d'encadrer des étudiants pendant leur laboratoire. Cette expérience m'a permis de découvrir une passion pour l'enseignement et la formation.

Je souhaite à exprimer ma profonde gratitude envers mes parents. Leurs soutiens indéfectibles et leurs encouragements ont été les piliers de ma réussite. Leur confiance en moi et leurs sacrifices ont été une source d'inspiration. Leurs soutiens ont été essentiels pour que je puisse me concentrer pleinement sur mes études.

Finalement, je souhaite également remercier mon ami de longue date, Samnang Eang pour son soutien, de ses précieux conseils, et de son écoute attentive pendant les moments de ce parcours académique.





## **Apprentissage de gestes en réalité virtuelle avec retours In-Situ**

Samuël HÉNAULT LEFEBVRE

### **RÉSUMÉ**

Cette recherche examine différents types de rétroactions visuelles in situ pour faciliter l'apprentissage et la reproduction des poses des mains en réalité virtuelle. En affichant des indicateurs visuels en temps réel sur la main de l'utilisateur de façon in situ, cela permet aux utilisateurs d'identifier rapidement les erreurs et d'en effectuer les corrections appropriées en regardant seulement la main, sans avoir à effectuer de changement de contexte pour en connaître le résultat.

L'étude explore le potentiel des interactions gestuelles à main nue en utilisant les quatre rétroactions in situ développées dans le cadre de cette recherche. Deux expériences impliquant 32 participants ont été menées dans le but d'analyser les performances des utilisateurs lors de l'utilisation des différentes rétroactions. Les résultats indiquent une amélioration significative de la satisfaction des participants, ainsi qu'une meilleure précision et mémorisation des poses des mains grâce à l'utilisation des rétroactions visuelles in situ qui ont été développées.

**Mots-clés:** Rétroactions in situ, interactions gestuelles à main nue, réalité virtuelle



## **In Situ Visual Feedback to help Learning Hand Poses in Virtual Reality**

Samuël HÉNAULT LEFEBVRE

### **ABSTRACT**

This research investigates different types of in situ visual feedback for facilitating user' learning and reproduction of hand poses in virtual reality. By integrating real-time visual cues directly onto the user's hand in an in situ manner, this study enables users to identify errors promptly and make immediate adjustments by only looking at their hands, thereby minimizing the context switches to know the results.

The study explores the potential of bare-handed gestural interaction of the four in situ feedback mechanisms developed in this research. Two comprehensive studies were conducted, involving a total of 32 participants, aiming to evaluate the impact of varying feedback approaches on users' learning progress and proficiency in executing hand gestures. The findings indicate a significant enhancement in participant satisfaction, as well as improved accuracy and recall in reproducing gestures through the utilization of the developed in situ visual feedback.

While this study does not have a specific end goal at present, the demonstrated effectiveness and potential of in situ visual feedback mechanisms in this research suggest promising possibilities for future practical applications.

**Keywords:** Virtual Reality, Bare-handed gestural interaction, Dynamic feedback



## TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION .....	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE .....	5
1.1 Introduction .....	5
1.2 L'utilisation des mains dans les interactions humains-machines .....	5
1.3 Comparaison des rétroactions visuelles de type in situ et ex situ .....	7
1.3.1 Les rétroactions in situ .....	7
1.3.2 Les rétroactions ex situ .....	8
1.4 Lacunes dans la littérature actuelle .....	9
1.5 Conclusion .....	10
CHAPITRE 2 PROBLÉMATIQUE .....	11
2.1 Présentation .....	11
2.2 Définition du problème et des questions de recherche .....	11
2.3 Portée et limitations .....	12
CHAPITRE 3 DÉVELOPPEMENT .....	15
3.1 Programmation .....	15
3.1.1 Développement d'un système de capture de gestes .....	15
3.1.1.1 La nécessité d'un système de capture fait sur mesure .....	15
3.1.1.2 L'implémentation du système de capture .....	16
3.1.1.3 Enregistrement initial .....	18
3.1.2 Chargement et lecture des poses .....	19
3.1.3 Simulation sans casque .....	20
3.1.3.1 Développement typique d'une application en réalité virtuelle .....	20
3.1.3.2 Développement d'une version hybride de l'application .....	21
3.1.4 Algorithme de reconnaissance de pose .....	25
3.1.4.1 Algorithmes alternatifs .....	26
3.1.5 Visualisation des algorithmes de reconnaissance de poses .....	28
3.1.6 Création des ensembles de données .....	30
3.1.7 Suggestion automatique d'une pose .....	31
3.1.8 Affichage du nom sur la main de façon dynamique .....	32
3.1.9 Menu servant à l'affichage de l'association entre les commandes et les poses .....	34
3.1.9.1 Utilisation de contour pour aider à visualiser les poses dans le menu .....	34
3.1.9.2 Sélection et validation d'une commande dans le menu .....	35
3.1.9.3 Optimisation de la lecture du menu en courbant l'affichage .....	38

3.1.10	L'écran affichant les instructions pendant l'expérience .....	40
3.1.11	L'utilisation de la manette pour la validation d'une pose .....	43
3.1.11.1	Prototypage de validations .....	45
3.2	Conception des différents retours visuels .....	46
3.2.1	Premier prototype .....	46
3.2.2	Sphères de couleur .....	48
3.2.3	Flèches .....	49
3.2.4	Fantôme .....	50
3.2.5	Main en couleur .....	52
3.2.5.1	Technique utilisant le lancer de rayons .....	53
3.2.5.2	Technique de coloration utilisant le modèle de la main .....	54
3.2.5.3	Changement de la palette de couleur .....	55
3.2.6	Marionnette .....	57
CHAPITRE 4 ÉTUDE EXPÉRIMENTALE .....		59
4.1	Expérience 1 .....	59
4.1.1	Tâche expérimentale .....	59
4.1.2	Les conditions de l'expérience .....	60
4.1.3	Ensemble de données .....	61
4.1.4	Design expérimental .....	62
4.1.5	Protocole expérimental .....	63
4.1.6	Participants .....	64
4.2	Résultats de la première expérience .....	65
4.2.1	Les résultats quantitatifs .....	65
4.2.1.1	Vue d'ensemble des variables .....	65
4.2.1.2	Question de recherche 1, la précision des poses .....	68
4.2.1.3	Question de recherche 2, mémorisation des poses .....	70
4.2.1.4	Analyse de la difficulté des poses .....	73
4.2.2	Les résultats de type qualitatifs .....	74
4.2.2.1	Évaluation de la difficulté perçue des différentes condi- tions .....	74
4.2.2.2	Préférence des conditions .....	79
4.2.2.3	Sommaire des préférences des conditions .....	79
4.2.3	Discussion des résultats .....	81
4.2.3.1	Points à améliorer, première expérience .....	82
4.2.4	Résumé des résultats .....	83
4.3	Deuxième expérience .....	84
4.3.1	Tâche expérimentale .....	85
4.3.2	Conditions .....	85
4.3.3	Ensemble de données .....	85
4.3.4	Design expérimental .....	86
4.3.5	Protocole expérimental .....	87
4.3.6	Participants .....	88

4.4	Résultats de la deuxième expérience .....	89
4.4.1	Les résultats quantitatifs .....	89
4.4.1.1	Vue d'ensemble des variables .....	90
4.4.1.2	Hypothèse 1, la précision des poses .....	91
4.4.1.3	Hypothèse 2, la mémorisation des poses .....	94
4.4.1.4	Suggestions automatiques .....	95
4.4.2	Les résultats de type qualitatifs .....	96
4.4.2.1	Évaluation de la difficulté perçue des différentes condi- tions .....	97
4.4.2.2	Préférence des conditions .....	99
4.4.2.3	Sommaire des explications des choix des participants .....	99
4.4.2.4	Stratégie de mémorisation .....	100
4.4.3	Discussion des résultats .....	102
4.4.3.1	Points à améliorer, deuxième expérience .....	104
4.4.4	Résumé des résultats .....	104
	CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS .....	105
	ANNEXE I HISTORIQUE DE DÉVELOPPEMENT .....	107
	ANNEXE II ÉVALUATION DE LA DIFFICULTÉ DES POSES .....	123
	BIBLIOGRAPHIE .....	125





## LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 3.1	Caractéristique des conditions de rétroactions visuelles ..... 57
Tableau 4.1	Sommaire des statistiques descriptives de l'expérience 1 ..... 66
Tableau 4.2	Analyse de variance (ANOVA) des distances entre les conditions ..... 68
Tableau 4.3	Interprétation du facteur de Bayes ..... 69
Tableau 4.4	Analyse post hoc de la distance par condition ..... 69
Tableau 4.5	Signification du nombre d'astérisques et de la valeur p ..... 70
Tableau 4.6	Comparaison de l'état des poses après validation sans l'utilisation du menu ..... 71
Tableau 4.7	Moyenne et écart type de la distance et de la durée lors de la confirmation de poses sans l'aide du menu ..... 71
Tableau 4.8	Analyse post hoc comparant les paires de conditions ..... 72
Tableau 4.9	Évaluation de la difficulté des poses ..... 74
Tableau 4.10	Évaluation de la satisfaction des participants ..... 75
Tableau 4.11	Préférence des participants concernant les différentes conditions ..... 79
Tableau 4.12	Sommaire des raisons des préférences ..... 80
Tableau 4.13	Stratégies de mémorisation ..... 81
Tableau 4.14	Sommaire des statistiques descriptives de l'expérience 2 ..... 90
Tableau 4.15	Tableau d'analyse de variance (ANOVA) des distances entre les conditions Marionnette et Référence ..... 92
Tableau 4.16	Coefficient de Pearson entre la distance et le temps ..... 93
Tableau 4.17	Résultat de la distance et de la durée de validation par conditions et blocs ..... 94
Tableau 4.18	Sommaire des statistiques descriptives de l'expérience 2 avec blocs ..... 95
Tableau 4.19	Liste des suites de suggestion automatique ..... 96

Tableau 4.20	Distance et temps avec l'utilisation des suggestions .....	96
Tableau 4.21	Évaluation de la satisfaction des participants des différentes conditions lors de l'expérience .....	97
Tableau 4.22	Sommaire des explications des préférences des participants suite aux suggestions automatiques .....	100
Tableau 4.23	Stratégie de mémorisation .....	101

## LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 3.1	Image de la main droite avec numérotation des os de la main par rapport à la documentation d'Oculus ..... 17
Figure 3.2	Diagrammes des classes pour la sauvegarde des poses de la main ..... 18
Figure 3.3	Capture d'écran montrant la lecture de deux poses simultanément ..... 20
Figure 3.4	Menu personnalisé pour la configuration de l'application en mode hybride ..... 23
Figure 3.5	Pose de la main virtuelle et de la main de l'utilisateur ..... 26
Figure 3.6	Visualisation de la comparaison de la distance entre deux poses par des lignes rouges ..... 27
Figure 3.7	Écran permettant de comparer visuellement la correspondance d'une pose en utilisant trois algorithmes simultanément ..... 29
Figure 3.8	Poses de la main produites de façon combinatoire ..... 30
Figure 3.9	Exemples de poses de la main produites de façon aléatoire ..... 31
Figure 3.10	Affichage du nom de la commande ..... 34
Figure 3.11	Capture d'écran montrant les poses sans et avec contour ..... 35
Figure 3.12	Sélection et validation d'une commande ..... 37
Figure 3.13	Menu plat affichant les poses dans le format $3 \times 6$ ..... 38
Figure 3.14	Menu courbé montrant les poses dans le format $3 \times 6$ ..... 39
Figure 3.15	Menu montrant la direction des boîtes parallèles au sol en affichant les rayons représentés par des lignes rouges ..... 39
Figure 3.16	Illustration du Menu courbé montrant la direction des boîtes orientées vers l'utilisateur à l'aide de lignes rouges ..... 40
Figure 3.17	Écran affichant le nom de la commande à réaliser ..... 40
Figure 3.18	Minuteur affichant le délai après validation ..... 41

Figure 3.19	Minuteur affichant la fin du délai par une flèche .....	42
Figure 3.20	Écran montrant un avertissement, main droite non visible .....	42
Figure 3.21	Écran montrant un avertissement si le geste sélectionné n'est pas celui demandé .....	43
Figure 3.22	Photo de la manette Zero 2 tenue en main .....	44
Figure 3.23	Croquis de la manette Zero 2 affichant les gâchettes .....	44
Figure 3.24	Croquis de la manette Zero 2 affichant les boutons .....	45
Figure 3.25	Premier prototype de visualisation .....	47
Figure 3.26	Deuxième prototype montrant des sphères .....	47
Figure 3.27	Utilisation de sphères de couleur sur l'extrémité des doigts .....	49
Figure 3.28	Condition flèches montrant deux poses ayant la même position cible à atteindre .....	50
Figure 3.29	Condition fantôme .....	51
Figure 3.30	Illustration de la condition fantôme montrant le z-fighting .....	52
Figure 3.31	Évolution de la condition Couleur en 3 phases .....	53
Figure 3.32	Capture d'écran illustrant l'association de la surface et des os du modèle de la main à l'aide de Blender .....	55
Figure 3.33	Plage de couleur utilisée pour la condition Couleur .....	56
Figure 3.34	Illustration de la condition couleur .....	56
Figure 3.35	Condition marionnette .....	58
Figure 4.1	Distance selon les conditions .....	67
Figure 4.2	Comparaison des conditions avec I.C. ....	67
Figure 4.3	Comparaison des conditions avec intervalle de confiance à 95 % lors des essais de type mémorisation .....	73
Figure 4.4	Avis des participants pour la condition Couleur .....	76
Figure 4.5	Avis des participants pour la condition Fantôme .....	76

Figure 4.6	Avis des participants pour la condition Flèches .....	77
Figure 4.7	Avis des participants pour la condition Marionnette .....	78
Figure 4.8	Avis des participants pour la condition Référence .....	78
Figure 4.9	Comparaison des mesures de distances .....	91
Figure 4.10	Comparaison des conditions Marionnette et Référence avec I.C. ....	92
Figure 4.11	Comparaison de la distance des poses et la durée avant la validation pour la condition Marionnette .....	93
Figure 4.12	Avis des participants pour la condition Marionnette .....	98
Figure 4.13	Avis des participants pour la condition Référence .....	99
Figure 4.14	Exemple de pose avec mémorisation par association .....	102
Figure 4.15	Second exemple de pose avec mémorisation par association .....	103



## **LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES**

ETS	École de Technologie Supérieure
ANOVA	Analyse de la variance
IPD	Distance interpupillaire
I.C.	Intervalle de confiance
RV	Réalité virtuelle
RA	Réalité augmentée





## LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

mm	millimètre
cm	centimètre
s	seconde
$\bar{x}$	moyenne
$s$	écart type
$\Sigma$	somme



## INTRODUCTION

Dans les films de science-fiction, tels que Johnny Mnemonic, Rapport minoritaire, Iron Man et bien d'autres, les personnages interagissent avec des machines de façon naturelle et intuitive grâce à des interfaces gestuelles utilisant les mains. Bien que dans la réalité ces technologies ne soient pas aussi avancées que dans les films, le suivi des mains gagne en popularité, que ce soit par l'utilisation d'applications ou de jeux en réalité virtuelle, les bornes d'accès sans contact, la réalité augmentée, et bien d'autres.

Lors d'une interaction humain-machine, le concept de *mains nues* ou "bare hands", dans une interface à interaction gestuelle signifie un usage libre des mains, sans gants, sans marqueurs, sans capteurs inertiels placés sur les mains, sans équipement entravant un mouvement des mains ou nécessitant une préparation particulière avant l'utilisation.

L'usage des mains présente de nombreux avantages par rapport aux dispositifs d'entrée traditionnels tels que les claviers, les souris ou les contrôleurs sans fil :

1. les mains sont tout le temps disponibles, prêtes à l'utilisation,
2. les utilisateurs connaissent déjà comment utiliser et déplacer leurs mains ; l'apprentissage de nouveaux dispositifs à travers plusieurs systèmes n'est pas nécessaire,
3. l'usage des mains offre davantage de degrés de liberté que le matériel traditionnel grâce à l'utilisation d'une combinaison de plus de 30 muscles et tendons.

Une tendance actuelle de recherche consiste à utiliser l'intelligence artificielle pour avoir une meilleure reconnaissance d'image et d'utiliser différents modèles de données pour reconnaître de plus en plus d'objets avec une meilleure précision tout en étant le plus rapide possible.

Pour faire contraste à cette tendance d'améliorer les algorithmes, ce mémoire s'intéresse à l'amélioration de la réalisation de différentes poses des mains par un utilisateur. Une pose est un

positionnement des doigts qui est fixe, comparativement à un geste qui se définit en tant qu'une suite de poses.

En montrant à un utilisateur comment bien effectuer différents gestes, en affichant ses erreurs et en l'aidant à s'autocorriger, il pourra par la suite utiliser une interface gestuelle avec plus de facilité en ayant développé de nouvelles capacités motrices.

Cet apprentissage pourra aider à reproduire différentes poses des mains plus efficacement, augmenter la précision sur le long terme et diminuer le sentiment de frustration. Une meilleure performance peut ouvrir la voie à de nouveaux ensembles de données de gestes qui sont plus naturels ou innés à reproduire pour un utilisateur.

Un utilisateur ayant maîtrisé l'usage de ses muscles afin de reproduire avec précision une pose pourra permettre d'inclure un plus grand nombre de poses qui seront reconnues par le système.

Les interfaces gestuelles actuelles nécessitent souvent que les utilisateurs apprennent les gestes à reproduire grâce à une assistance telle des images statiques, des animations en boucle, une explication sous forme de texte, une explication hors champ et plusieurs autres techniques.

Cette assistance peut certainement aider, cependant, que se passe-t-il si un utilisateur ne parvient pas à comprendre comment l'assistance transmet le message pour refaire un geste, et qu'il ne parvient même pas à comprendre comment commencer à faire le geste ? Cela peut causer beaucoup de frustration et mener à l'abandon.

Un second scénario est que l'utilisateur parvient à reproduire un geste, mais que ce geste soit sur le seuil d'une bonne reconnaissance. Si l'utilisateur a une perception du système qui semble fonctionner de façon aléatoire, cela peut mener à de la frustration.

Lorsqu'un entraîneur sportif d'expérience observe des athlètes, il peut détecter des erreurs de mouvements en une fraction de seconde et ensuite en proposer différentes corrections en montrant comment bien effectuer les mouvements.

Dans le but de concevoir un système informatique pour aider de la même façon qu'un entraîneur, soit d'observer les erreurs, donner des rétroactions en temps réel et en permettant aux utilisateurs à apprendre par eux-mêmes, la réalisation de retour visuel de type *in situ*, soit d'indiquer des rétroactions à même l'endroit cible, a été conçu. Les deux questions de recherches sont les suivantes :

Q1 Le retour *in situ* augmentera-t-il la précision des poses ?

Q2 Le retour *in situ* aidera-t-il à mémoriser les poses plus rapidement ?

*Apprentissage de gestes en réalité virtuelle avec retours In-Situ* étudie l'utilisation de la rétroaction visuelle en continu pour aider les utilisateurs à réaliser correctement des gestes avec la main. Ce système de rétroaction en temps réel et dynamique aide les utilisateurs à apprendre et à reproduire des gestes plus précisément, ce qui se traduit par moins d'erreurs et une interaction plus intuitive et naturelle avec l'ordinateur.

Les contributions de cette recherche comprennent :

1. la conception de quatre types de conditions de rétroaction *in situ* ayant une aide visuelle directement sur la main pour le placement individuel des doigts,
2. une discussion de la conception liée à la mise en œuvre de cette rétroaction,
3. un système pour enregistrer et rejouer des gestes en réalité virtuelle,
4. les résultats de deux études de réalité virtuelle impliquant au total 32 utilisateurs.

La première étude explore comment les utilisateurs interagissent avec les différentes conditions, par l'entremise d'une expérience en réalité virtuelle et de leurs perceptions sur celle-ci à

la suite d'un questionnaire. La deuxième étude fournit de fortes évidences que la condition **Marionnette** permet aux utilisateurs de reproduire les poses de la main plus précisément que l'état de l'art actuel.

Cette recherche vise à comprendre comment différentes visualisations *in situ* permettent d'améliorer la capacité et les compétences de mémorisation, de vitesse et de précision des utilisateurs, rendant les interactions gestuelles plus intuitives et plus facilement accessibles aux utilisateurs. Les résultats, tels la classification des mnémotechniques utilisées, les différents facteurs facilitant l'apprentissage

# **CHAPITRE 1**

## **REVUE DE LITTÉRATURE**

### **1.1 Introduction**

Cette revue de littérature vise à explorer l'état actuel des recherches dans le domaine de l'apprentissage des gestes de la main en réalité virtuelle. Plusieurs domaines clés seront examinés, notamment l'avancement de la technologie de la réalité virtuelle permettant de faire le suivi du corps, l'apprentissage de mouvements selon différents points de vue du corps, les différents types de rétroactions et comment ces domaines se croisent dans le contexte de l'apprentissage des gestes de la main.

Ce mémoire s'intéresse au positionnement des doigts dans le but de produire une pose de la main précise et reproductible. Aucun article sur le positionnement des doigts avec rétroaction *in situ* en réalité virtuelle n'a été trouvé dans la littérature. Les sections suivantes aborderont séparément différentes recherches permettant d'en connaître plus sur l'état actuel dans le domaine de l'apprentissage des gestes de la main en réalité virtuelle.

### **1.2 L'utilisation des mains dans les interactions humains-machines**

L'utilisation des mains nues dans les interactions humains-machines offre une expérience qui peut être considérée comme étant plus naturelle et intuitive en comparant à des appareils traditionnels, par exemple l'utilisation du clavier et de la souris.

Plusieurs avancées significatives ont contribué à l'évolution du domaine des interactions gestuelles. Par exemple, Baudel & Beaudouin-Lafon (1993) ont développé Charade en utilisant le DataGlove, un gant permettant la capture des mouvements de la main afin de contrôler l'affichage d'une présentation par des gestes de la main. Cependant, l'utilisation du DataGlove « n'est pas une solution viable pour une utilisation quotidienne » [traduction libre] (Baudel & Beaudouin-Lafon, 1993, p. 34), ce qui peut s'expliquer par une complexité d'utilisation ainsi que les différentes limitations techniques liées à cette technologie.

Les progrès des systèmes de vision ont permis la reconnaissance des mains nues (von Hardenberg & Bérard, 2001) et leurs utilisations comme curseur de souris sans avoir besoin de manipuler ou de toucher à des dispositifs physiques. La réalité augmentée (RA) permet de capturer l'image réelle et d'y ajouter des éléments virtuels. Un exemple de RA a été l'utilisation de marqueurs fiduciaires tenus à la main (White, Lister & Feiner, 2007), permettant la manipulation d'un objet réel et d'en observer des éléments virtuels projetés par-dessus l'objet réel.

En combinant la réalité augmentée et la reconnaissance des mains nues, Lee & Hollerer (2007), ont développé Handy AR, un système de suivi ne nécessitant pas de capteurs. Ce système permet, grâce au suivi des extrémités des doigts, de manipuler des objets virtuels dans un espace 3D en utilisant les mains.

Les recherches menées par Wobbrock, Morris & Wilson (2009) ont proposé une taxonomie importante de gestes sur écran tactile, basée sur plus de 1080 gestes réalisés par les participants de leur étude.

La visualisation des gestes à reproduire en utilisant un écran tactile (Freeman, Benko, Morris & Wigdor, 2009) a entraîné un changement de mentalité. Il ne s'agit plus seulement d'utiliser une interface, mais également de montrer comment effectuer les différents gestes. En utilisant l'écran tactile, les utilisateurs laissent une empreinte en deux dimensions de leurs mains pour reproduire les séquences de gestes demandées.

En utilisant le système Kinect de Microsoft en tant que caméra pour capturer la profondeur, Sodhi, Benko & Wilson (2012) ont développé LightGuide, un système de projection qui s'effectue directement sur les mains pour guider l'utilisateur à l'aide de différentes rétroactions visuelles.

L'appareil Leap Motion, qui permet la reconnaissance des doigts de la main (en combinant deux caméras infrarouges), a été utilisé dans de nombreuses recherches sur les mains (Han, Chen, Hsieh, Huang & Hung, 2016) en étant combiné avec différents systèmes de réalité augmentée ou virtuelle.



Les travaux de Han *et al.* (2020) sur l'utilisation de plusieurs caméras infrarouges pour capturer le positionnement des mains ainsi que l'optimisation pour des appareils mobiles ont été utilisés pour intégrer ces fonctionnalités au casque de réalité virtuelle Oculus Quest.

### **1.3 Comparaison des rétroactions visuelles de type in situ et ex situ**

Lors de l'utilisation d'interfaces utilisateurs, les rétroactions visuelles peuvent être regroupées en deux catégories en fonction de leur emplacement : les rétroactions in situ et les rétroactions ex situ.

Les rétroactions in situ font référence aux informations visuelles qui sont affichées directement dans le contexte de l'action. Elles peuvent à leur tour être subdivisées en deux catégories : les rétroactions de type projection, où les informations visuelles sont projetées ou superposées pour guider l'utilisateur, et l'utilisation d'un écran tactile où les rétroactions sont affichées sous les doigts.

Les rétroactions ex situ font référence aux informations visuelles affichées à une position différente de l'interaction en cours. Elles sont souvent d'une position statique et préétablie.

#### **1.3.1 Les rétroactions in situ**

Les travaux menés par Harrison, Tan & Morris (2010) ont développé *Skinput*, un dispositif permettant de déterminer la position des doigts à l'aide des vibrations. Dans leurs exemples d'interface, ils ont utilisé un picoprojecteur pour projeter une interface sur l'avant-bras des utilisateurs, ce qui a permis une interaction en touchant directement la peau.

Utilisant un système de projection combiné à l'appareil Kinect de Microsoft en tant que caméra de profondeur, Sodhi *et al.* (2012) ont développé *LightGuide*, un système de projection sur la main de l'utilisateur qui guide l'utilisateur pour atteindre différentes positions à l'aide de différentes rétroactions visuelles. Ces rétroactions s'effectuent en temps réel pour orienter

l'utilisateur vers la position souhaitée, par exemple en affichant une flèche pointant vers la cible à atteindre.

Les travaux menés par Sousa, Vieira, Medeiros, Arsenio & Jorge (2016) utilisent la projection de rétroaction en temps réel dans le domaine de la réadaptation. Le but de cette recherche est de montrer des rétroactions visuelles lors d'un besoin de faire des exercices à domicile, par exemple des exercices de physiothérapie suite à une hospitalisation. Ces rétroactions aident à visualiser si les exercices sont réalisés correctement.

Les recherches de Kosmalla, Daiber, Wiehr & Krüger (2017) ont développé ClimbVis, qui est un système permettant d'apprendre les mouvements à effectuer pour compléter le parcours en ayant une projection à même le mur d'escalade.

Lors de l'utilisation de rétroactions visuelles *in situ*, les travaux de Freeman *et al.* (2009) ont apporté une avancée significative dans le domaine en permettant aux utilisateurs de voir leurs empreintes laissées sur un écran tactile lorsqu'ils effectuent un geste, ce qui permet d'aider à visualiser les gestes réalisés.

Les recherches de Ghomi, Huot, Bau, Beaudouin-Lafon & Mackay (2013) ont développé Arpège, une interface permettant la sélection de mots à l'aide de combinaisons de touches sur un écran tactile. Leurs recherches ont porté à trouver les positions idéales permettant d'optimiser les différentes positions n'utilisant que l'extrémité des doigts de manière à minimiser la fatigue de l'utilisateur.

### **1.3.2 Les rétroactions ex situ**

En combinant l'utilisation de l'appareil Kinect et d'un écran, Velloso, Bulling & Gellersen (2013) ont développé MotionMA pour reproduire différents mouvements du corps humain réalisés par des experts. Le système capture automatiquement différentes séquences de mouvements exécutées par des experts. Lorsque ces mouvements sont reproduits par les participants, des

rétroactions sont affichées à l'écran, permettant de visualiser les corrections nécessaires à l'aide d'un changement de couleur du squelette représentant l'utilisateur et d'un tableau de bord.

Dans les travaux d'Anderson, Grossman, Matejka & Fitzmaurice (2013), l'utilisation d'un squelette pour représenter l'utilisateur est également utilisée, cependant les rétroactions sont affichées sous forme de flèches indiquant la direction du déplacement à effectuer.

Les travaux menés par Tang, Yang, Bateman, Jorge & Tang (2015) ont abouti au développement Physio@Home, un système combinant plusieurs caméras permettant aux utilisateurs de visualiser leurs corps à l'aide de multiple angle de vue tout en ayant des rétroactions visuelles pendant qu'ils réalisaient différents exercices de physiothérapie

#### **1.4 Lacunes dans la littérature actuelle**

Dans la littérature actuelle sur l'apprentissage des gestes de la main en réalité virtuelle, plusieurs lacunes notables ont été identifiées :

1. **L'apprentissage du positionnement des doigts en réalité virtuelle :** Plusieurs études portent sur l'usage des mains (Lilija, Kyllingsbæk & Hornbæk, 2021), des bras (Han *et al.*, 2016; Dürr, Weber, Pfeil & Reiterer, 2020) ou du corps (Han, Lin, Hsieh, Hsu & Hung, 2018) en réalité virtuelle, mais il existe très peu d'études se concentrant spécifiquement à l'apprentissage précis du positionnement des doigts en réalité virtuelle.
2. **Les rétroactions à même la main en réalité virtuelle pendant l'apprentissage de poses :** L'usage de rétroactions à même les mains à l'aide de projecteurs (Sodhi *et al.*, 2012) existe depuis plusieurs années. Cependant l'usage de rétroactions sur les mains de l'utilisateur en réalité virtuelle (Wang, Hu, Yao & Liu, 2022) reste relativement rare.
3. **L'utilisation de la main nue en réalité virtuelle pour l'apprentissage de gestes :** Bien qu'il existe des travaux antérieurs faisant l'usage de mains nues en réalité augmentée (Piumsomboon, Clark, Billinghamurst & Cockburn, 2013), l'usage des mains hors réalité virtuelle et réalité augmentée a principalement servi, à l'aide du Kinect, en tant que contrôleur à distance (Rovelo, Degraen, Vanacken, Luyten & Coninx, 2015; Delamare, Janssoone,

Coutrix & Nigay, 2016). L'utilisation du Leap Motion a également été utilisée (Han *et al.*, 2016; Arora, Kazi, Kaufman, Li & Singh, 2019), cependant sans utiliser spécifiquement la position des doigts.

## 1.5 Conclusion

Cette revue de littérature a exploré l'état actuel des recherches sur l'apprentissage des gestes de la main en réalité virtuelle avec rétroaction de type *in situ*. Les chapitres suivants présenteront cette nouvelle recherche qui vise à combler certaines des lacunes identifiées dans la littérature existante.

Cette revue de littérature a exploré l'usage des mains ainsi que les rétroactions de types *in situ* et *ex situ* à travers plusieurs recherches. Certaines lacunes ont été identifiées dans la littérature existante, notamment l'apprentissage des doigts en réalité virtuelle, les rétroactions sur les mains virtuelles et l'utilisation des mains nues en réalité virtuelle.

En prenant en compte les lacunes identifiées, cette recherche vise à compléter ces lacunes en proposant une approche novatrice pour l'apprentissage des poses de la main avec des retours *in situ* en réalité virtuelle.

## **CHAPITRE 2**

### **PROBLÉMATIQUE**

#### **2.1 Présentation**

Dans le domaine des interactions humain-machine, l'utilisation des mains pour interagir à distance à une interface est un domaine en pleine expansion. Par exemple, la seconde itération de l'appareil Leap Motion, un dispositif de suivi des mains permettant une utilisation sans contact des mains et permettant d'utiliser différentes interfaces, a été annoncée le 31 mai 2023 (Ultraleap, 2023), soit près de 10 années après la première version de l'appareil.

#### **2.2 Définition du problème et des questions de recherche**

L'utilisation des mains dans le quotidien est aisée pour la grande majorité des personnes. Cependant, savoir comment bien effectuer les mouvements et positionner les mains lors d'utilisation d'interface gestuelle afin de maximiser la reconnaissance par la machine reste encore un défi.

L'apprentissage par essais et erreurs est une méthode ancestrale, cependant lorsqu'il n'y a pas de retour d'information permettant de connaître l'état de réussite ou d'erreurs, il peut être difficile d'apprendre efficacement.

En parcourant la littérature, plusieurs lacunes liées à l'apprentissage des poses des mains en réalité virtuelle ont été identifiées, entre autres l'aide aux positionnements des doigts, les retours *in situ* sur les mains et l'usage des mains nues pendant les expériences.

Pour combler ces lacunes, cette étude porte sur le développement de retours visuels permettant d'obtenir une rétroaction directement sur la main lors de l'apprentissage de pose en réalité virtuelle. Deux questions de recherche seront testées et analysées pour connaître l'implication de tels retours visuels pour l'interaction gestuelle dans le domaine des interfaces humains-machines.

Q1 Le retour *in situ* augmentera-t-il la précision des poses ?

Q2 Le retour *in situ* aidera-t-il à mémoriser les poses plus rapidement ?

### 2.3 Portée et limitations

Portée de l'étude :

- L'étude se concentre sur la réalité virtuelle, les résultats qui seront obtenus peuvent ne pas être généralisables lors d'une utilisation en réalité augmentée ou par d'autres types de visualisation.
- L'étude sera menée avec un nombre limité de participants, ce qui peut limiter la généralisation des résultats à un plus large public.
- Les calculs nécessaires à la reconnaissance de l'image des mains seront effectués par le casque de réalité augmentée Oculus Quest 2. Le développement de ce type d'algorithme n'est pas le but de cette étude.
- Pour faciliter la compréhension des rétroactions sur les mains, la complexité visuelle de l'environnement virtuel est volontairement réduite afin de minimiser de possibles distractions pendant l'expérience.
- L'utilisation d'appareils reposant sur une surface, tel que le clavier ou la souris ne sera pas utilisé pendant l'expérience en réalité virtuelle, afin de donner plus de liberté de mouvement dans l'espace aux participants.

Limitations de l'étude :

- L'équipement se limitera à des appareils communs, afin que la solution puisse être utilisable à un plus large public.
- Les participants utiliseront seulement leur main droite nue, pour reproduire les poses, sans l'utilisation des manettes *Quest 2 Touch*, de gants de capture de mouvements, de marqueurs sur la main ou de caméras externes au casque.
- L'étude se limite à la reconnaissance de poses (position statique des doigts de la main) et non d'un geste (séquence de plusieurs poses et déplacement possible de la position de la main).

- Restreindre l'ensemble des poses à celles reconnaissables par le matériel utilisé.
- La taille de la main virtuelle de l'utilisateur est habituellement mise à l'échelle selon la taille de sa main réelle. Pour assurer une cohérence lors de l'analyse statistique, évitant d'éventuels problèmes de comparaison de mains de taille différente, la main virtuelle ne sera pas mise à l'échelle.





## **CHAPITRE 3**

### **DÉVELOPPEMENT**

L'équipement utilisé pour le développement de l'expérience a été le *casque de RV immersif tout-en-un Oculus Quest 2* ainsi qu'un contrôleur, la manette Zero 2 de 8BitDo. Le casque a quatre caméras intégrées permettant nativement la fonctionnalité de suivi des mains et ne nécessite pas de dispositifs externes pour son usage.

Plusieurs logiciels ont été utilisés pour la réalisation de ce projet. La plateforme de développement pour la réalisation de l'application en réalité virtuelle est Unity 2020.3.15f2. Le module Oculus Integration SDK 38.0 a permis la compatibilité entre Unity et le casque Oculus Quest 2. Enfin, Blender 2.93, un logiciel de modélisation 3D a été utilisé pour la création et la modification d'objets.

Le développement du prototype utilisé lors de l'expérience s'est déroulé sur une période de 14 mois, incluant les phases d'idéation, de prototypage, de test pilote et de validation des différents algorithmes. Au total, environ 16 806 lignes de code ont été écrites pour la conception et la mise en œuvre du prototype utilisé durant l'expérience, et 3633 lignes de code lors de l'analyse des résultats.

Pour plus de détails sur l'historique du développement, voir l'Annexe I.

### **3.1 Programmation**

#### **3.1.1 Développement d'un système de capture de gestes**

##### **3.1.1.1 La nécessité d'un système de capture fait sur mesure**

L'appareil Oculus Quest 2 utilise quatre caméras infrarouges pour effectuer le suivi de mouvements de la tête nécessaire pour répliquer les mouvements dans l'environnement virtuel. Ces caméras permettent une bonne reconnaissance de la position des doigts.

Certaines positions des mains peuvent être mal interprétées par l'Oculus Quest 2 (Han *et al.*, 2020). Ceci a été observé par des poses telles que les doigts croisés ou le signe représentant le « salut vulcain », soit les doigts écartés entre le majeur et l'annulaire.

Afin d'optimiser la reconnaissance des gestes pendant l'expérience, il a été décidé de ne prendre en compte que les gestes de la main qui ont été reconnus par l'appareil. L'utilisation d'une banque de poses des mains, telles que celles utilisées dans le langage des signes, n'a pas été utilisée due à la difficulté de la reconnaissance pour certaines poses parce que le développement d'un tel algorithme de vision est hors de la portée de ce projet.

Pour répondre à ce besoin, la création d'une base de données de gestes a été nécessaire. Cela a impliqué le développement d'un système de capture, de sauvegarde et de visualisation des poses des mains.

### 3.1.1.2 L'implémentation du système de capture

Dans le SDK venant d'Oculus, la classe *OVRSkeleton* contient une énumération des différents os de la main et leurs positions dans l'espace tel que calculé par le casque Oculus Quest 2. L'index des os fait référence à la nomenclature utilisée dans la documentation d'Oculus. Les numéros 19 à 23 indiquent le bout du doigt. Cette énumération est représentée visuellement par la Figure 3.1.

Trois classes ont été créées afin de sauvegarder l'information nécessaire à la recreation d'une pose particulière de la main. Une représentation de ces classes est montrée par la Figure 3.2. Ces classes servent à la sauvegarde de la position et de l'orientation des 26 os de la main. Dans le but de minimiser les calculs nécessaires lors de la relecture, la position et la rotation ont une nouvelle entrée de sauvegarde afin de ne garder que la position ou la rotation dans l'espace local, soit relatif à l'os parent. Par défaut, la position utilisée est celle de l'espace monde.

Dans le but de simplifier le développement tout en ayant des classes plus robustes, la conception de ces classes a été réalisée en respectant, dans la majorité des cas, le *principe de responsabilité unique*, soit de n'avoir qu'une responsabilité par classe.

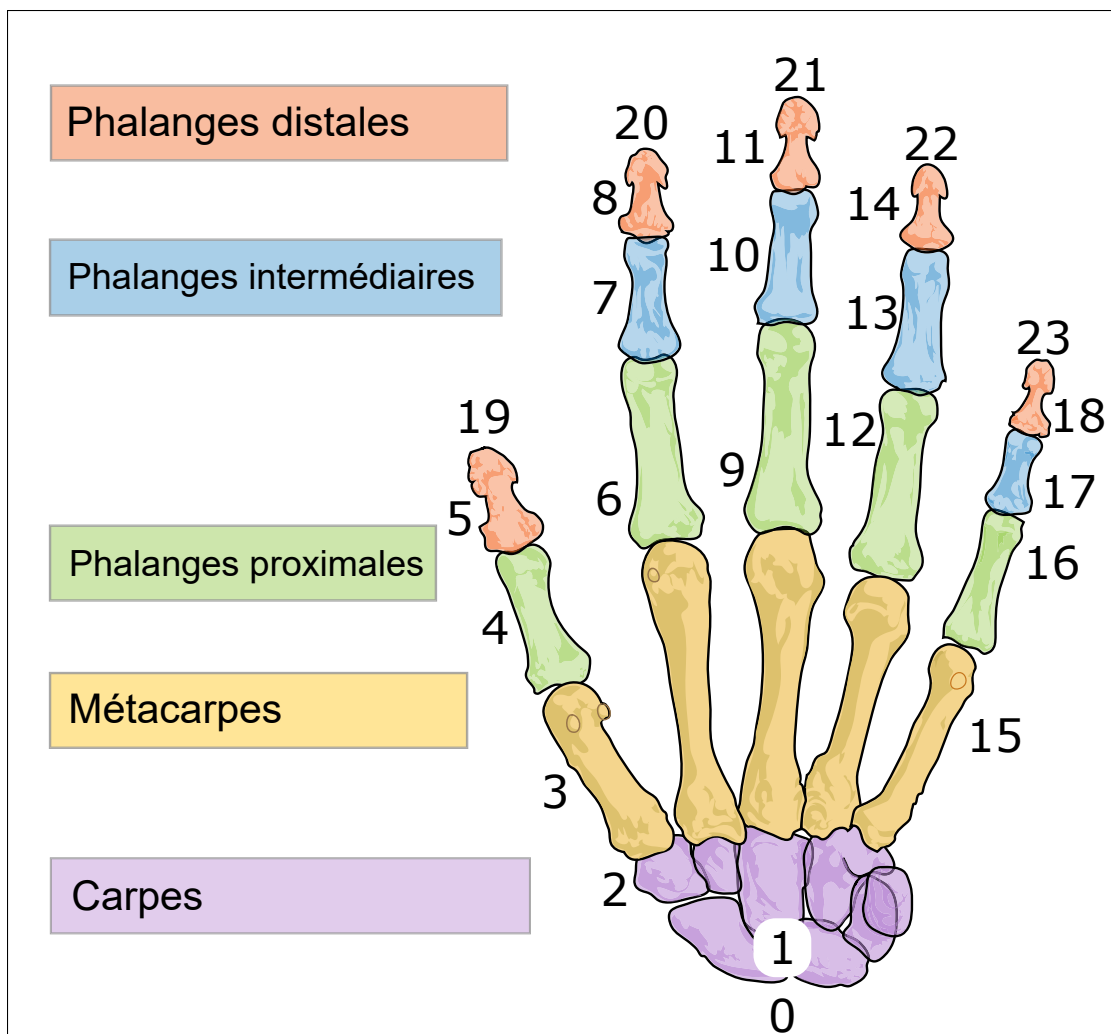


Figure 3.1 Image de la main droite incluant la numérotation des os de la main par rapport à la documentation d'Oculus, adapté de Villarreal (2008)

Pour ce faire, une classe nommée *PoseToOVRHandAdapter* a été créée en tant qu'adaptateur permettant de relier le code venant du SDK d'Oculus, *OVRSkeleton* à la classe permettant la sauvegarde des données. Finalement, une classe nommée *PoseFileManager* sert quant à elle à la sauvegarde du fichier qui se fait sous le format JSON.

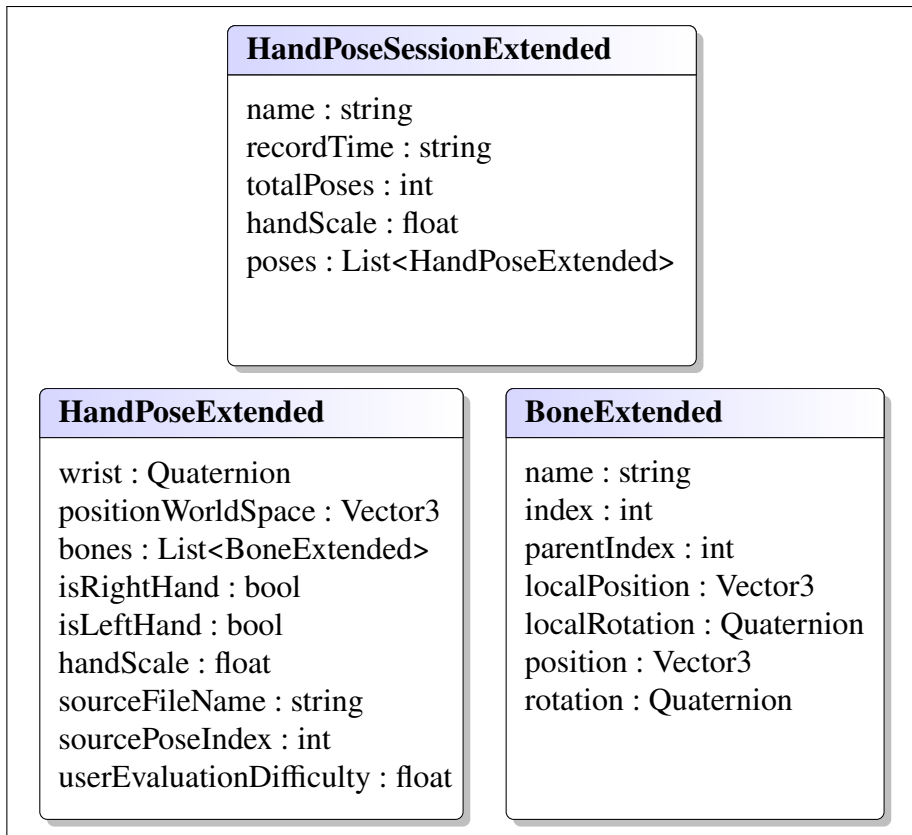


Figure 3.2 Diagrammes des classes servant à la sauvegarde des poses de la main

### 3.1.1.3 Enregistrement initial

Lors de l'enregistrement de la banque de poses, un problème intermittent a été trouvé, soit une déformation du maillage lors de la relecture. Ce problème a été réglé en découplant l'enregistrement de la capture et de l'affichage de la scène (qui s'effectue à une moyenne de 250 images par seconde ou une image à chaque 4 ms). Pour régler ce problème, une coroutine a été créée afin de découpler la capture de la pose de la scène et d'appeler la capture en ajoutant un délai de 0,25 s permettant de traiter complètement la pose avant de passer à la suivante. Ce code est montré par l'Extrait 3.1.

**Extrait 3.1** Ajout de pose à un intervalle de 0,25 s

```
1 IEnumerator SlowAddPose() {  
2     while (isRecording) {  
3         yield return new WaitForSecondsRealtime(0.25f);  
4         handPoses.Add(poseAdapter.GetHandPoseFromHeadset());  
5     }  
6 }
```

**3.1.2 Chargement et lecture des poses**

Le chargement des différentes poses se fait en lisant des fichiers de type JSON contenant les enregistrements.

Au démarrage de l'application, deux modèles de mains sont disponibles : la main droite et la main gauche. Seuls les enregistrements correspondant à la main droite sont chargés, la main gauche n'étant pas utilisée dans le cadre de l'expérience.

Lors de l'initialisation de la scène, le modèle de la main est lu et les différents éléments servant à la transformation du squelette en sont extraits dans une liste. Cela permet d'obtenir une liste de pointeurs aux différents objets de la main, permettant d'en faciliter une manipulation ultérieure.

Chaque référence est organisée dans une liste, permettant de faire correspondre leurs positions à la même numérotation des os du modèle comme montré par la Figure 3.1.

Lors du chargement d'une pose souhaitée, les positions et orientations des os correspondants à l'enregistrement sont assignées au modèle.

Dans la Figure 3.3, deux enregistrements de gestes sont lus en même temps.

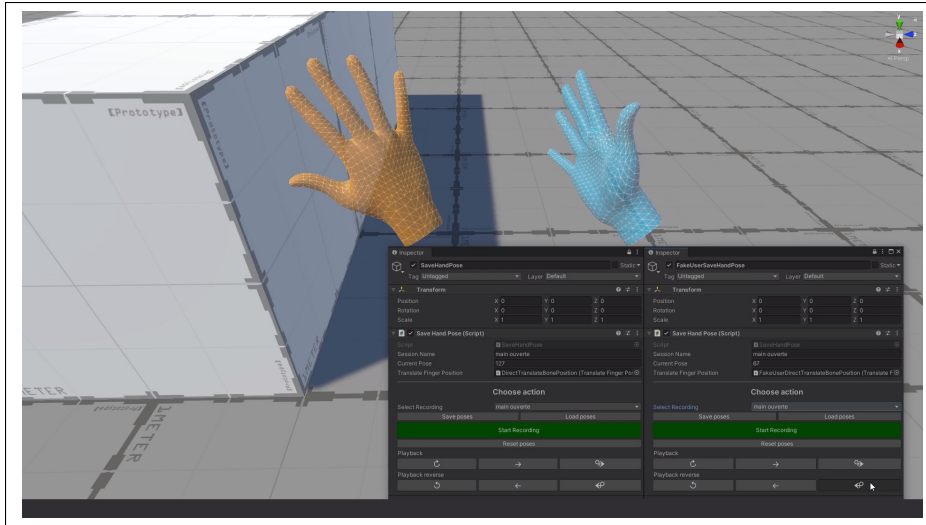


Figure 3.3 Capture d'écran montrant la lecture de deux poses simultanément

### 3.1.3 Simulation sans casque

#### 3.1.3.1 Développement typique d'une application en réalité virtuelle

Lors du développement d'une application en réalité virtuelle à l'aide d'Unity pour un casque Oculus Quest 2, les étapes pour tester une nouvelle fonctionnalité sont habituellement les suivantes :

1. lancer une compilation depuis l'ordinateur de développement en cliquant sur *Play*,
2. valider que le code fonctionne et ne contient pas d'erreurs,
3. choisir la compilation spécifique à la plateforme, dans ce cas-ci *Android (Build)*,
4. valider si le code ne produit pas d'erreurs spécifiques selon la plateforme choisie,
5. transférer l'application de l'ordinateur vers l'appareil de réalité virtuelle,
6. s'assurer d'avoir un espace sécuritaire pour la zone de jeu (périmètre virtuel montrant une barrière afin de ne pas se blesser en accrochant des objets dans le monde réel),
7. mettre le casque, prendre les manettes pour en contrôler l'environnement virtuel,

8. valider ou recréer la zone de jeu <sup>1</sup>,
9. démarrer l'application et tester l'implémentation de la nouvelle fonctionnalité.

Ces étapes peuvent prendre un certain temps, allant de quelques minutes à quelques dizaines de minutes dans certains cas. Pour en optimiser le processus de développement, l'utilisation du câble *Oculus Link* permet de connecter l'environnement de développement directement au casque Oculus Quest 2. Cela permet d'exécuter l'application sur l'ordinateur et d'envoyer l'affichage sur le casque. Ceci évite la compilation d'une application Android et de devoir transférer l'application avant chaque essai. Cela permet d'éviter les étapes 3 à 5.

Après plusieurs mois de développement et en cherchant des moyens d'optimiser les différents processus, un constat en a été remarqué : l'utilisation du casque rallonge le processus de développement, en partie du aux nombreuses manipulations complexes, aux changements de contexte nécessaire entre le développement et les tests en utilisant le casque de réalité virtuelle.

### **3.1.3.2 Développement d'une version hybride de l'application**

Cette section aborde l'implémentation des fonctionnalités qui ont permis de créer un développement hybride de l'application. En effectuant une seule action dans un menu fait sur mesure, la même application change d'une version complètement autonome à une version utilisant les capteurs du casque de réalité virtuelle.

Le développement peut ainsi se faire plus rapidement en utilisant la version autonome. En permettant un changement fluide entre les deux versions, cela minimise les erreurs potentielles pendant la création de l'application.

Deux caméras ont été ajoutées dans la scène principale du projet Unity. La première vient du module préfabriqué (Prefab) venant du SDK d'Oculus, ce qui est nécessaire afin d'utiliser le

---

<sup>1</sup> Une zone de jeu est un espace sécuritaire affichant une barrière en réalité virtuelle lorsque l'utilisateur est trop près d'un obstacle réel.

casque de réalité virtuelle avec les contrôles venant d'Oculus. Cette caméra a été ajoutée dans la hiérarchie des objets de la scène sous un répertoire nommé «Headset».

La seconde caméra a été ajoutée manuellement et du code a été créé afin de contrôler la position et la rotation de la caméra à l'aide du clavier et de la souris, tel un jeu avec une vue à la première personne. Cette caméra a été ajoutée à un second répertoire nommé "No Headset".

En activant un répertoire tout en désactivant l'autre, cela ne laisse qu'une seule caméra active à la fois. Cela permet d'avoir, dans la même scène, deux types de caméras avec leurs contrôleurs associés. Permettant ainsi d'avoir une version hybride fonctionnant à la fois sur le PC et le casque.

Une configuration dans les paramètres est nécessaire, soit *Initialize XR on Startup*. Ce paramètre se trouve à la hiérarchie suivante :



```
File > Build Settings... > Player Settings... > XR Plug-in Management > (PC, Mac & Linux Standalone settings) > Initialize XR on Startup
```

Pour éviter d'éventuelles erreurs de manipulation ou des oublis, un code a été créé afin de modifier l'éditeur d'Unity afin d'automatiser ces changements. De plus, ce code permet d'afficher l'état actuel de la configuration à l'aide d'une case à cocher dans le menu. Une capture d'écran montre à la Figure 3.4 présente la configuration pour le mode « Initialize XR on Startup », soit pour le casque.



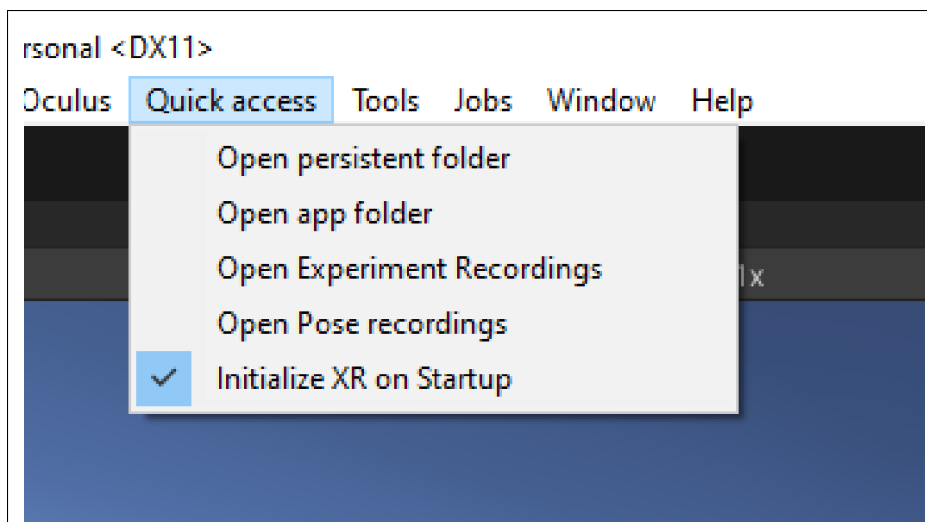


Figure 3.4 Menu personnalisé pour la configuration de l'application en mode hybride

L'Extrait 3.2 montre les modifications nécessaires à la création du menu et des modifications apportées à la scène.

**Extrait 3.2** Code permettant la création d'un menu modifiant les paramètres de l'environnement de développement d'Unity et de la scène en cours

```

1 public class CustomShortcuts : Editor {
2     const string initXRPath = "Quick access/Initialize XR on Startup";
3     [MenuItem(initXRPath, true)]
4     static bool ValidateMenuXRPath() {
5         EditorBuildSettings.TryGetConfigObject(XRGeneralSettings.k_SettingsKey, out ...
6         ↪ XRGeneralSettingsPerBuildTarget buildTargetSettings);
7         XRGeneralSettings settings = buildTargetSettings.SettingsForBuildTarget( ...
8         ↪ BuildTargetGroup.Standalone);
9         Menu.SetChecked(initXRPath, settings.InitManagerOnStart);
10    return true; }
11
12 [MenuItem(initXRPath)]
13 static void ToggleXRActive() {
14     EditorBuildSettings.TryGetConfigObject( XRGeneralSettings.k_SettingsKey, out ...
15     ↪ XRGeneralSettingsPerBuildTarget buildTargetSettings);
16     XRGeneralSettings settings = buildTargetSettings.SettingsForBuildTarget( ...
17     ↪ BuildTargetGroup.Standalone);
18     settings.InitManagerOnStart = !settings.InitManagerOnStart;
19     SetActiveHeadsetInHierarchy(settings.InitManagerOnStart);
20     EditorUtility.SetDirty(settings); // enable save changes
21 }
22 static void SetActiveHeadsetInHierarchy(bool value) {
23     bool includeInactiveObjects = true;
24     var headset = FindObjectsOfType<GameObject>(includeInactiveObjects).Where( ...
25     ↪ x=>x.name == "Headset").FirstOrDefault();
26     var noHeadset = FindObjectsOfType<GameObject>(includeInactiveObjects).Where( ...
27     ↪ x=>x.name == "No Headset").FirstOrDefault();
28     if (headset != null && noHeadset != null) {
29         headset.SetActive(value);
30         noHeadset.SetActive(!value);}
31 }
32 }

```

### 3.1.4 Algorithme de reconnaissance de pose

Pour évaluer les progrès des utilisateurs lors de l'utilisation de ce prototype, la mesure principale qui est la précision, a été calculée en prenant la somme de la distance des os des doigts entre la pose réalisée par l'utilisateur et celle qui est demandée.

Ces calculs de la distance sont inspirés des travaux de Wobbrock, Wilson & Li (2007), sur la reconnaissance de gestes pendant qu'un utilisateur dessine des formes.

La main d'un utilisateur peut bouger de façon aléatoire en prenant une position et une orientation différentes d'un instant à l'autre. Pour combler ce facteur, un calcul est effectué afin de rendre la distance indépendante à la position dans l'espace et à l'orientation.

Avant chaque comparaison de distance, une copie de la pose de la main est copiée en mémoire et est déplacée à l'origine et est réorientée à une orientation neutre en utilisant la matrice identité du quaternion correspondant à la rotation. Par la suite, lorsque la pose de l'utilisateur et la pose à reconnaître correspondent à la même position et orientation par rapport au poignet, le calcul de la distance entre chaque os est mesuré.

#### Algorithme 3.1 Calcul de la distance entre deux poses

```

1 Algorithme : Calcul de la distance par rapport aux bouts des doigts (Fingertips 2 hands)
   Input : Positions du bout des doigts de l'utilisateur  $\mathcal{U} = \{\mathbf{u}_{19}, \dots, \mathbf{u}_{23}\}$ ,
           Positions du bout des doigts de la pose virtuelle  $\mathcal{P} = \{\mathbf{p}_{19}, \dots, \mathbf{p}_{23}\}$ 
   Output : Distance totale  $\mathcal{D} = \{\mathbf{d}\}$ 
2 for les 5 doigts de la main ( $i = 19, \dots, 23$ ) do
3   |  $\mathbf{d} \leftarrow \mathbf{d} + d(\mathbf{u}_i, \mathbf{p}_i)$ ;
4 end for

```

L'algorithme 3.1 présente le calcul de la distance entre deux poses de la main, celui de l'utilisateur et de la pose à reproduire.

La Figure 3.5 présente deux poses de mains différentes, ces deux poses sont combinées à la Figure 3.6 afin de montrer le calcul de la distance qui se fait en prenant seulement en compte le bout des doigts.

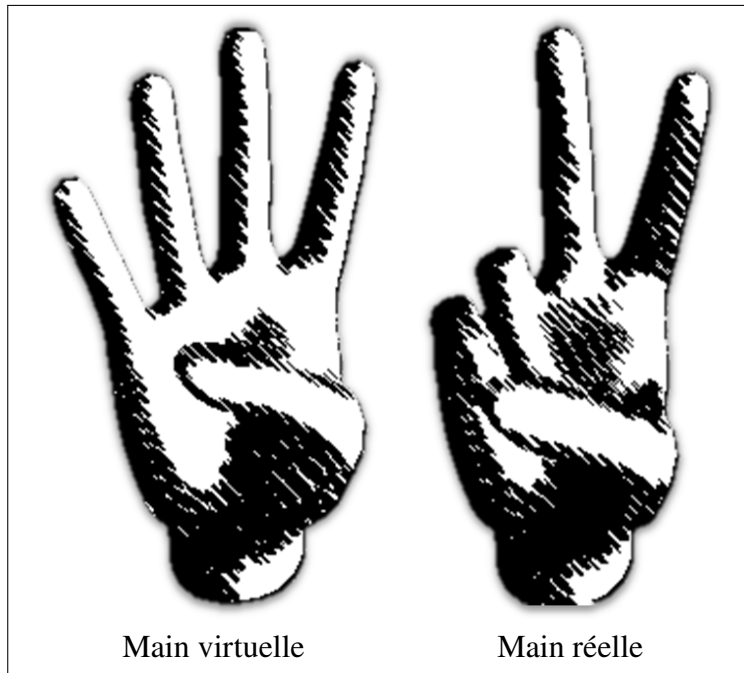


Figure 3.5 Pose de la main virtuelle et de la main de l'utilisateur

#### 3.1.4.1 Algorithmes alternatifs

Deux autres algorithmes ont été développés pour mesurer la distance entre la pose de la main de l'utilisateur et la pose à reproduire. L'Algorithme 3.2 montre un calcul où la distance a été mesurée par rapport à la position du poignet et chaque os de la main, moins la distance entre la position du poignet et chaque os de la pose à reproduire. La différence de la distance est cumulée pour obtenir la distance totale. Un total de 24 calculs est nécessaire pour obtenir la distance.

L'Algorithme 3.3 présente un calcul où la distance est mesurée par un croisement entre chaque os de la main entre la main de l'utilisateur et la pose à reproduire. Un total de  $\frac{24 \cdot 23}{2} = 276$  calculs est nécessaire afin d'obtenir la distance.

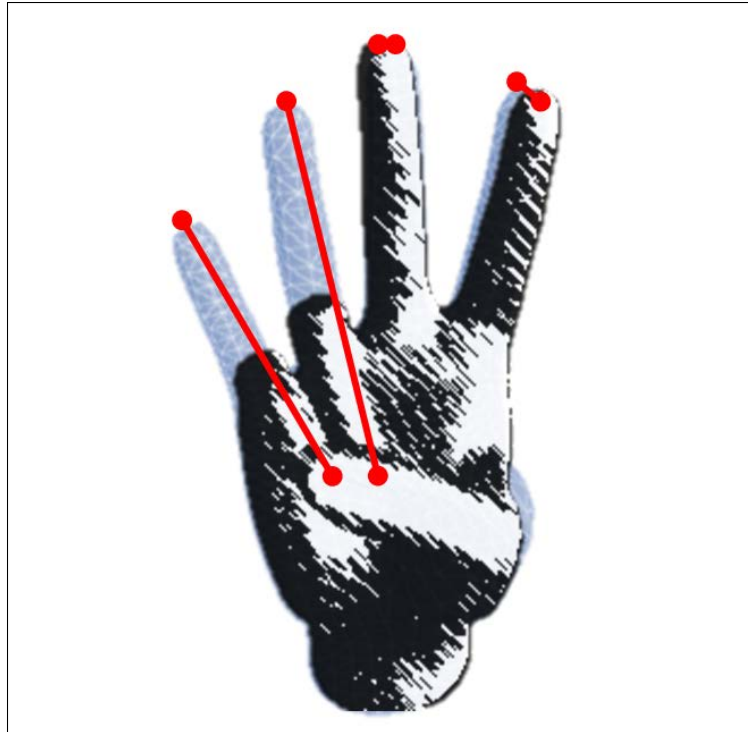


Figure 3.6 Visualisation de la comparaison de la distance entre deux poses par des lignes rouges

Algorithme 3.2 Calcul de la distance entre deux poses et l'origine

```

1 Algorithme : Calcul de la distance par rapport à l'origine (Bones to origin)
   Input : Positions des os de la main de l'utilisateur  $\mathcal{U} = \{\mathbf{u}_0, \dots, \mathbf{u}_{23}\}$ ,
           Positions des os de la main virtuelle  $\mathcal{P} = \{\mathbf{p}_0, \dots, \mathbf{p}_{23}\}$ 
   Output : Distance totale  $\mathcal{D} = \{\mathbf{d}\}$ 

2 for les 24 os de la main ( $i = 0, \dots, 23$ ) do
3   |  $\mathbf{d} \leftarrow \mathbf{d} + |\mathbf{d}(\mathbf{u}_i, \mathbf{u}_0) - \mathbf{d}(\mathbf{p}_i, \mathbf{p}_0)|;$ 
4 end for
  
```

Après avoir comparé les différents algorithmes, l'Algorithme 3.1 a été retenu en fonction de sa simplicité de compréhension et d'implémentation.

### Algorithme 3.3 Calcul de la distance entre deux poses et chaque os

```

1 Algorithme : Calcul de la distance par rapport à chaque os (Between bones)
   Input : Positions des os de la main de l'utilisateur  $\mathcal{U} = \{\mathbf{u}_0, \dots, \mathbf{u}_{23}\}$ ,
           Positions des os de la main virtuelle  $\mathcal{P} = \{\mathbf{p}_0, \dots, \mathbf{p}_{23}\}$ 
   Output : Distance totale  $\mathcal{D} = \{\mathbf{d}\}$ 

2 for les 24 os de la main de l'utilisateur  $u_i \in \mathcal{U}$  ( $u = 0, \dots, 23$ ) do
3   |   for les 24 os de la main virtuelle  $p_j \in \mathcal{P}$  ( $p = 0, \dots, 23$ ) do
4   |   |    $\mathbf{d} \leftarrow \mathbf{d} + d(\mathbf{u}_i, \mathbf{p}_{i+j});$ 
5   |   |   end for
6 end for

```

#### 3.1.5 Visualisation des algorithmes de reconnaissance de poses

Afin de mieux comprendre les résultats des différents algorithmes de reconnaissance de poses, un outil de visualisation a été développé pour comparer visuellement les résultats des trois algorithmes développés à la Section 3.1.4.

Le premier algorithme à avoir été conçu et implémenté est l'Algorithme 3.1. Afin de valider les autres algorithmes qui ont été conçus tardivement durant le cycle de développement, l'outil de visualisation a été utilisé pour comparer les algorithmes entre eux. En raison de contrainte liée au temps de développement et d'observations préliminaires ne montrant pas d'améliorations significatives, seul le premier algorithme a été utilisé lors des expériences avec les participants.

Dans la Figure 3.7, les trois algorithmes sont représentés par les mains en bleu, vert et rouge pour le premier, second et troisième algorithme. La pose de référence, la main en jaune, est située à gauche. Chaque algorithme utilise le même ensemble de données pour effectuer la comparaison.

Seuls les cinq premiers résultats sont affichés dans cette comparaison. Le pourcentage dans la figure correspond au pourcentage de variation ( $\frac{A-B}{A}$ ) entre la distance maximale de l'ensemble (A) et la distance de la pose (B).

Dans cet écran, la pose la plus similaire est déterminée par un système de vote. Si plusieurs algorithmes trouvent la même pose (par exemple, la pose *e-2-c-1345* en bleu et rouge), la police de caractère affiche le nom en gras indiquant la sélection, cela même si un autre algorithme trouve une pose avec un pourcentage de correspondance plus élevé (par exemple, la pose *206* dans la rangée verte avec un pourcentage de correspondance de 90,88 %). Si les trois algorithmes trouvent des poses différentes, seule celle ayant le pourcentage le plus élevé est retenue.

Cette approche a été pensée dans le but d'augmenter la robustesse et la cohérence de la pose retournée. Cependant, une telle implémentation aurait complexifié l'analyse des résultats en nécessitant de prendre en compte si une pose a été identifiée par un, deux ou trois algorithmes différents. Ainsi, cette approche n'a pas été implémentée pour l'expérience.



Figure 3.7 Écran permettant de comparer visuellement la correspondance d'une pose en utilisant trois algorithmes simultanément

### 3.1.6 Création des ensembles de données

L'ensemble des données de poses de la main a été créé à l'aide du même casque de réalité virtuelle que celui de l'expérience afin de maximiser la comptabilité de la reconnaissance lors de l'expérience.

Le premier jeu de données a été créé manuellement en générant différentes combinaisons où chaque doigt de la main est soit replié vers la paume ou étendu vers l'extérieur. Cette combinaison a généré 32 poses possibles. La Figure 3.8 montre un exemple de deux poses créées de cette façon.

Dans le but d'obtenir des poses qui sont plus naturelles, c'est-à-dire des poses qui ne sont pas exécutées consciemment, mais spontanément, une série de gestes aléatoires ont été enregistrés par les participants lors d'une phase pilote de l'expérience. De cette série, des poses ont été extraites de manière aléatoire, tout en validant un critère d'unicité (distance d'au moins 15 cm entre deux poses) afin de s'assurer d'obtenir des poses différentes les unes des autres. Cette extraction a produit 69 poses pour le deuxième jeu de données. La Figure 3.9 montre deux poses créées de façon spontanée.

En combinant ces deux jeux de données, cela a donné l'ensemble des 101 poses disponibles lors de la première expérience.

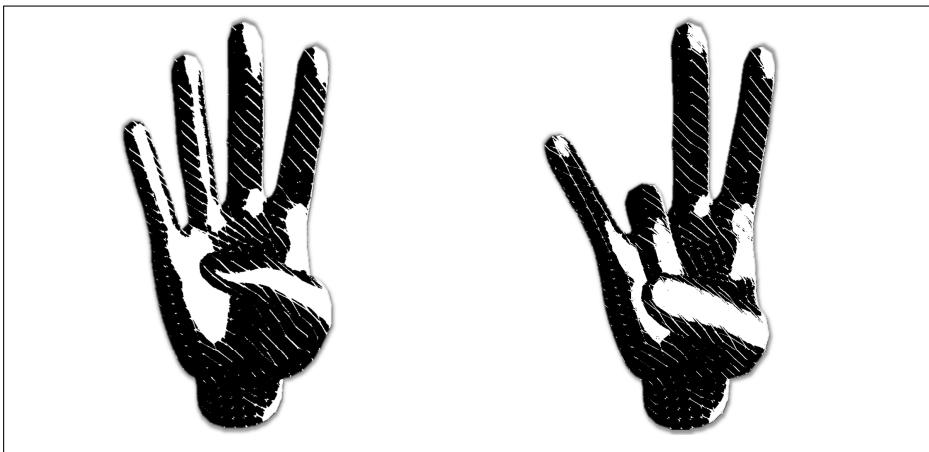


Figure 3.8 Poses de la main produites de façon combinatoire



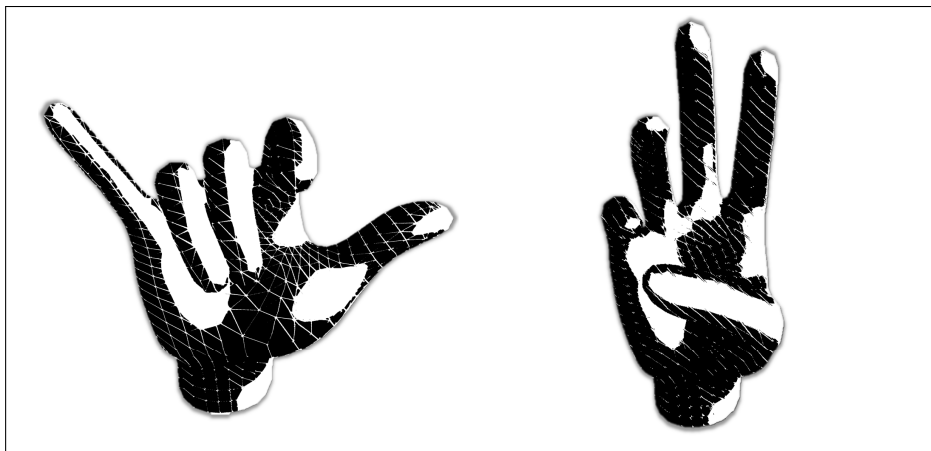


Figure 3.9 Exemples de poses de la main produites de façon aléatoire

### 3.1.7 Suggestion automatique d'une pose

Pour activer le retour visuel associé à une pose, l'utilisateur doit normalement suivre plusieurs étapes : ouvrir le menu, effectuer la sélection en orientant la tête, confirmer la sélection et finalement fermer le menu. Dans le cas où l'utilisateur s'aperçoit qu'il n'a pas sélectionné le bon choix, il doit recommencer la sélection dans le menu.

Dans le but d'optimiser et d'améliorer le processus de sélection, un système de suggestions automatiques a été développé. Ce système permet à l'utilisateur de sélectionner la pose souhaitée sans avoir à ouvrir le menu.

Lorsque l'utilisateur maintient une pose de sa main qui est similaire (d'une distance inférieure à 12,6 cm) d'une des poses à reproduire, et la maintient pendant une durée minimale de 1 000 ms, le système active automatiquement la rétroaction visuelle correspondante à la pose choisie.

Lors de la deuxième expérience, deux changements ont été apportés :

1. une réduction du temps d'activation à 500 ms, permettant d'accélérer le processus de sélection et obtenir les retours visuels plus rapidement,
2. après une sélection utilisant les suggestions automatiques, le nom de la commande associé à la pose s'écrit directement sur la main, donnant une confirmation visuelle *in situ*.

À noter que la fonctionnalité de suggestions automatiques ne s'applique pas pour la condition Référence, car dans cette condition, aucun retour visuel supplémentaire n'est affiché lors d'une sélection.

### 3.1.8 Affichage du nom sur la main de façon dynamique

Une fonctionnalité permettant d'afficher le nom de la commande directement sur la main a été développée à la fin de la première expérience et implémentée pour la deuxième expérience. Cette fonctionnalité affiche la commande après une activation du système de suggestions automatiques.

Le nom de la commande est écrit au dos et au verso (la paume) de la main. La Figure 3.10 montre la même pose de la main avec le mot « Éléphant », écrit au recto en blanc et au verso en cyan.

La méthode standard permettant d'afficher une image sur un modèle déformable utilisant Unity est l'utilisation de projection, qui permet de projeter une image qui se déforme par rapport à l'objet cible. Cette méthode n'a pas été utilisée pour éviter de projeter sur les doigts et de déformer le texte affiché, le rendant difficile à lire.

La solution qui a été développée a pour but la création dynamique d'images de type texture, pouvant être placée sur la main. De cette façon, les images sont générées automatiquement, ce qui évite la création manuelle des 600 images nécessaires à l'affichage des différentes commandes (300 mots différents multipliés par les images du dos et verso la main).

La création dynamique de l'image utilise le composant *TextMeshPro* pour en produire l'affichage, une « capture d'écran » du composant est prise et l'image ainsi capturée est appliquée sur le modèle de la main.

Le code permettant la « capture d'écran » a été développé en utilisant la bibliothèque graphique de bas niveau d'Unity (GL) afin d'accélérer le traitement d'image. Une partie de ce code est présenté à l'Extrait 3.3.

**Extrait 3.3** Code permettant la création dynamique de l'image du nom de la commande

```

1  private void DrawTextureFront() {
2      var size = new Vector2(100, 100);
3      var tex = RenderTexture.GetTemporary(1000, 1000, 24, RenderTextureFormat.ARGB32);
4
5      GL.PushMatrix(); // copy current camera matrix settings
6      GL.LoadIdentity();
7      var proj = Matrix4x4.Ortho(-size.x / 2.0f, size.x / 2.0f, -size.x / 2.0f, ...
      ↪ size.y / 2.0f, -10, 100);
8
9      Quaternion rot = Quaternion.Euler(0, 0, angleFront);
10     Matrix4x4 m = new Matrix4x4();
11     m.SetTRS(Vector3.zero, rot, Vector3.one);
12     proj *= m;
13
14     GL.LoadProjectionMatrix(proj);
15     RenderTexture currentActiveRT = RenderTexture.active;
16     Graphics.SetRenderTarget(tex);
17     GL.Clear(false, true, new Color(0, 0, 0, 0));
18
19     textFront.renderer.material.SetPass(0);
20     Graphics.DrawMeshNow(textFront.mesh, Matrix4x4.identity);
21     GL.PopMatrix(); // Restore camera
22     RenderTexture.active = currentActiveRT;
23
24     Texture2D dest = new Texture2D(tex.width, tex.height, TextureFormat.ARGB32, ...
      ↪ false);
25     Graphics.CopyTexture(tex, dest);
26     hand.GetComponent<SkinnedMeshRenderer>().materials[3].mainTexture = dest;
27
28     RenderTexture.ReleaseTemporary(tex);
29 }

```

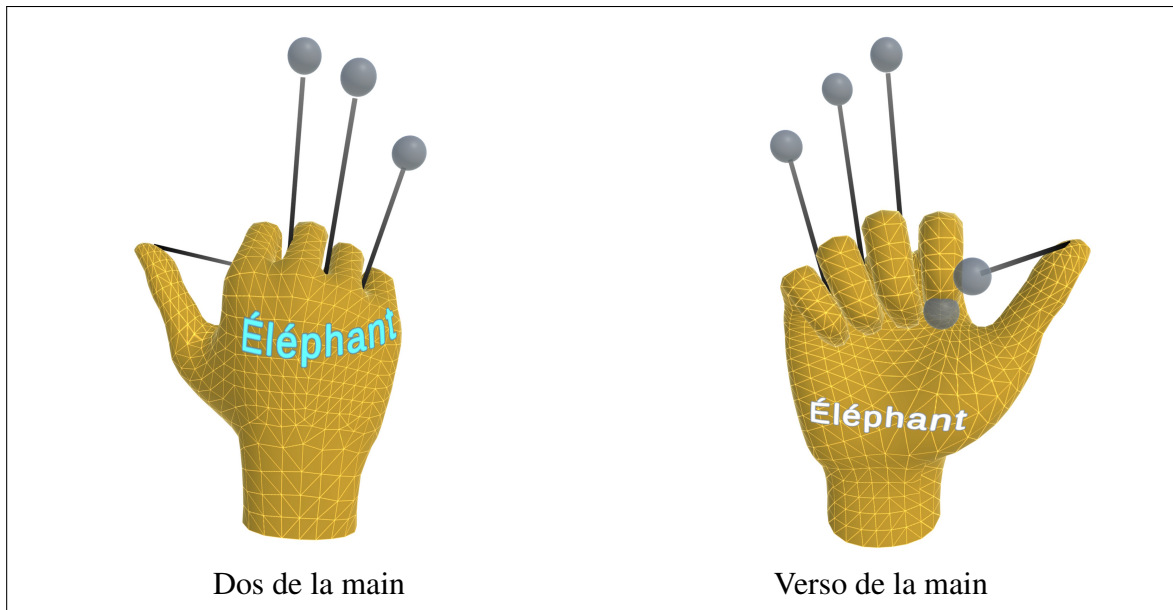


Figure 3.10 Affichage du nom de la commande au dos et au verso de la main de l'utilisateur

### 3.1.9 Menu servant à l'affichage de l'association entre les commandes et les poses

Durant l'expérience, le participant est invité à ouvrir le menu pour visualiser la pose correspondante à la commande à reproduire. Le menu peut s'apparenter visuellement à une grille ou une armoire à trophée contenant des modèles 3D des poses des mains. Les poses sont affichées dans une boîte creuse avec le nom écrit en bas de la boîte.

Afin d'optimiser la visualisation du menu, celui-ci se repositionne dynamiquement en hauteur selon la position de la tête de l'utilisateur afin d'être à un angle de vision de  $15^\circ$ . Selon le Centre canadien d'hygiène et de sécurité au travail (2023), pour avoir une position ergonomique devant un écran, le champ de vision devrait se situer entre  $15^\circ$  et  $30^\circ$  par rapport à la hauteur de l'écran.

#### 3.1.9.1 Utilisation de contour pour aider à visualiser les poses dans le menu

Lors des premiers essais de la visualisation des modèles affichés dans la grille, une difficulté a été observée quant à la distinction de la position des doigts. La forme générale de la main était

relativement bien perçue grâce au contour donné par la différence entre la main et l'image en arrière-plan. Cependant, la perception de la position des doigts à l'intérieur de la main ou devant la main restait difficile.

Afin de diminuer cette difficulté, un contour (outline) a été développé et mis en place pour améliorer la visualisation des doigts. La Figure 3.11 présente deux captures d'écran, l'une sans contour et l'autre avec l'ajout du contour. Par exemple, en incluant le contour, il est possible de mieux distinguer la position du pouce pour la commande intitulée « Souris ».

Le contour a été développé en créant un nuanceur (shader) à l'aide du Shader Graph d'Unity.



Figure 3.11 Capture d'écran montrant les poses sans l'utilisation du contour (image du haut) et avec l'utilisation du contour (image du bas)

### 3.1.9.2 Sélection et validation d'une commande dans le menu

La sélection d'une commande dans le menu permet d'activer une rétroaction visuelle sur la main droite correspondant à la pose associée à la commande. Vu que la main droite sert à reproduire une pose et la main gauche tient le contrôleur, la sélection du menu se fait en utilisant

l'orientation de la tête, en visant l'objet voulu. Pour aider à la visualisation, l'élément visé change de couleur pour le mettre en évidence.

Suite à des observations pendant le développement, il a été constaté que les utilisateurs effectuaient parfois un léger mouvement de la tête juste avant la fermeture du menu (moins de 100 millisecondes), ce qui entraînait un changement de sélection involontaire dont les utilisateurs n'étaient pas conscients.

Pour remédier à ce problème occasionnel, une étape de validation de la sélection a été développée. Lorsqu'une commande est visée avec la tête pendant plus de 500 ms, le modèle de la main change de couleur indiquant que la pose est confirmée et sera utilisée pour la rétroaction. Pour aider à la fluidité de l'expérience, la couleur de la main indique s'il s'agit de la commande qui est demandée à reproduire (vert) ou si elle ne correspond pas (violet).

La Figure 3.12 montre cinq étapes possibles dans le menu, allant du haut vers le bas :

1. couleurs par défaut, aucune sélection n'a été effectuée,
2. sélection sans que la validation ait été effectuée,
3. sélection d'une commande lorsqu'une autre commande a été validée,
4. sélection et validation d'une mauvaise commande en mauve,
5. sélection et validation d'une bonne commande en vert.



Figure 3.12 Sélection et validation d'une commande en utilisant le menu. Les cinq états (aucune sélection, sélection sans validation, sélection autre qu'une validation, validation erronée et validation correcte) sont représentés du haut vers le bas

### 3.1.9.3 Optimisation de la lecture du menu en courbant l’affichage

Afin d’optimiser la lisibilité du menu, des ajustements ont été apportés en courbant l’affichage. Pendant la phase de développement, le menu a été conçu pour pouvoir afficher plusieurs items de façon rectangulaire. La Figure 3.13 montre le menu affichant 18 boîtes en format grille de  $3 \times 6$  boîtes.



Figure 3.13 Menu plat affichant les poses dans le format  $3 \times 6$ , une occlusion partielle est à noter parmi les poses aux extrémités du menu

Il a été constaté que les éléments aux extrémités, par exemple la commande « Kangourou » en haut à gauche, étaient partiellement obstrués, tant par la boîte servant à l’affichage de la pose que par l’angle de rotation.

Pour régler cette situation, les boîtes ont été orientées pour faire face au participant, améliorant ainsi la lisibilité des commandes, comme présentées dans la Figure 3.14.

La Figure 3.15 montre une visualisation de l’affichage plat, à l’aide de lignes rouges parallèles au sol et la Figure 3.16 montre l’écran avec les boîtes qui sont courbées afin de faire face à l’utilisateur.



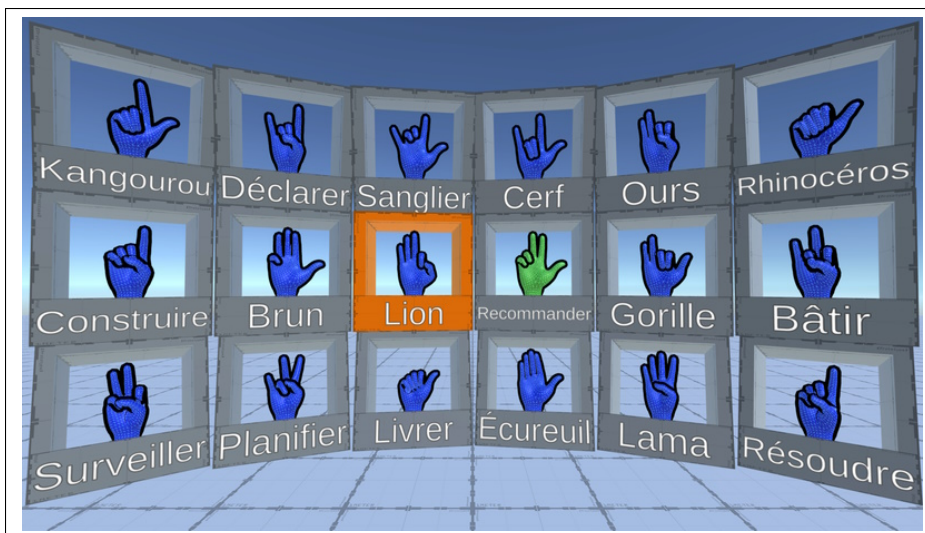


Figure 3.14 Menu courbé montrant les poses dans le format  $3 \times 6$

Dans un but de visualiser la direction des boîtes, des lignes rouges ont été ajoutées afin de représenter visuellement les directions des boîtes. Permettant d'observer des lignes rouges parallèles et ceux qui convergent vers l'utilisateur.

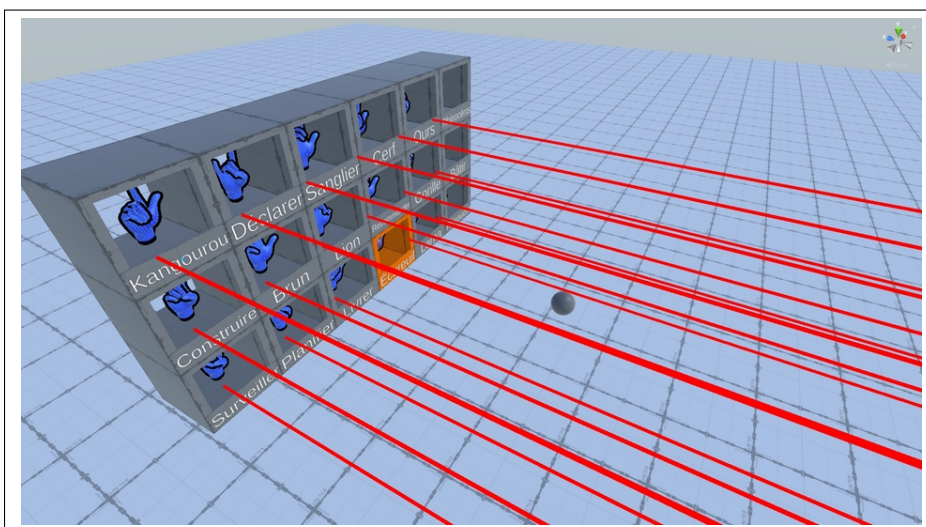


Figure 3.15 Menu montrant la direction des boîtes parallèles au sol en affichant les rayons représentés par des lignes rouges

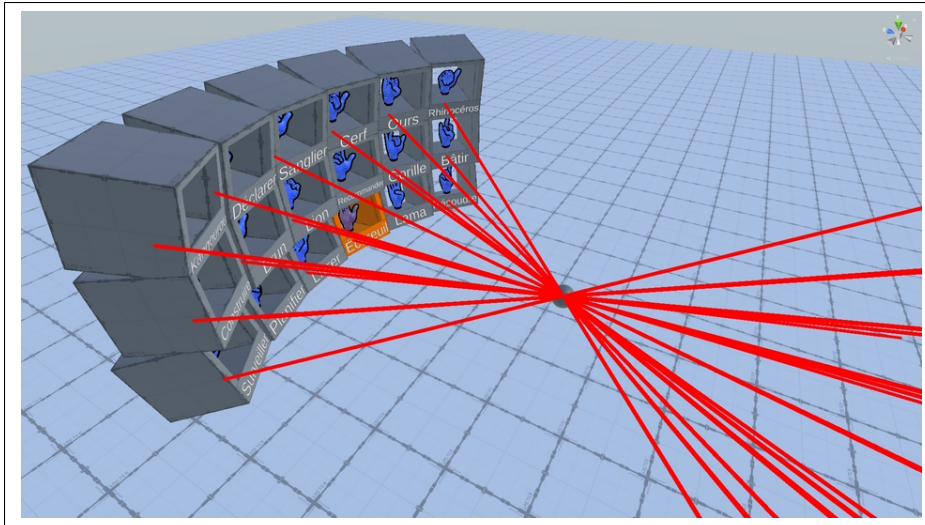


Figure 3.16 Illustration du Menu courbé montrant la direction des boîtes orientées vers l'utilisateur à l'aide de lignes rouges, permettant de diminuer les risques d'occlusions

### 3.1.10 L'écran affichant les instructions pendant l'expérience

Le nom de la commande à réaliser est affiché sur un écran qui est devant les participants, tel que représenté par la Figure 3.17.

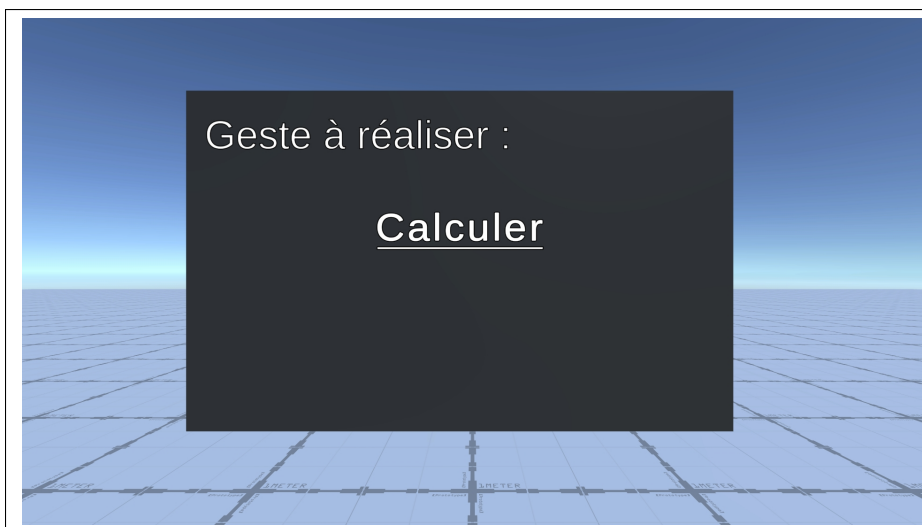


Figure 3.17 Écran affichant le nom de la commande à réaliser qui est associé à la pose de la main

Lorsqu'une pose de la main est validée, le système affiche le nom de la prochaine commande à réaliser. Pendant le développement, il a été constaté qu'il était possible d'effectuer plusieurs validations de façon subséquentes et ainsi terminer l'expérience en quelques secondes.

Afin de prévenir les abus potentiels, une période d'attente est imposée à l'utilisateur. Dans le but de maintenir une fluidité dans l'interaction avec l'utilisateur, l'attente est affichée à l'utilisateur à l'aide d'un minuteur de type compte à rebours en forme d'anneau à remplissage progressif (allant de vide à plein), tel que représenté par la Figure 3.18.

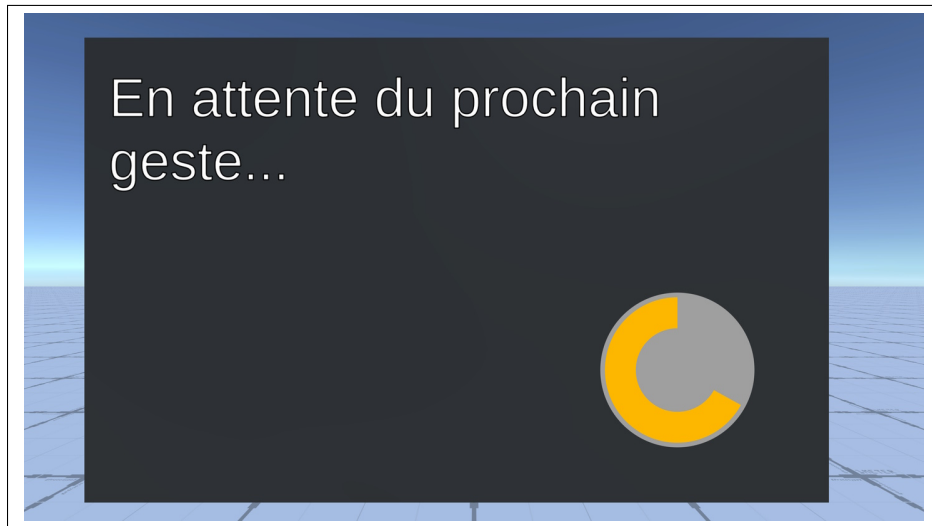


Figure 3.18 Minuteur affichant le délai après validation

Le temps d'attente (entre 1 et 10 secondes) de la durée du minuteur varie en fonction de la précision (allant entre 1 et 35 cm) de la pose qui a été validée par l'utilisateur. La formule suivante :  $\text{clamp} \left( \frac{10-1}{35-1} (d - 1) + 1, 1, 10 \right)$  permet d'en calculer la durée.

Lorsque la durée du délai s'est écoulée, une flèche s'affiche à l'intérieur de l'anneau pour indiquer à l'utilisateur que la période d'attente est terminée. La Figure 3.19 montre la flèche à l'intérieur de l'anneau.

Afin de s'assurer que la main droite soit visible lors de la validation de la pose, un avertissement s'affiche lorsque la main droite n'est plus détectée par l'appareil de réalité virtuelle, ce qui

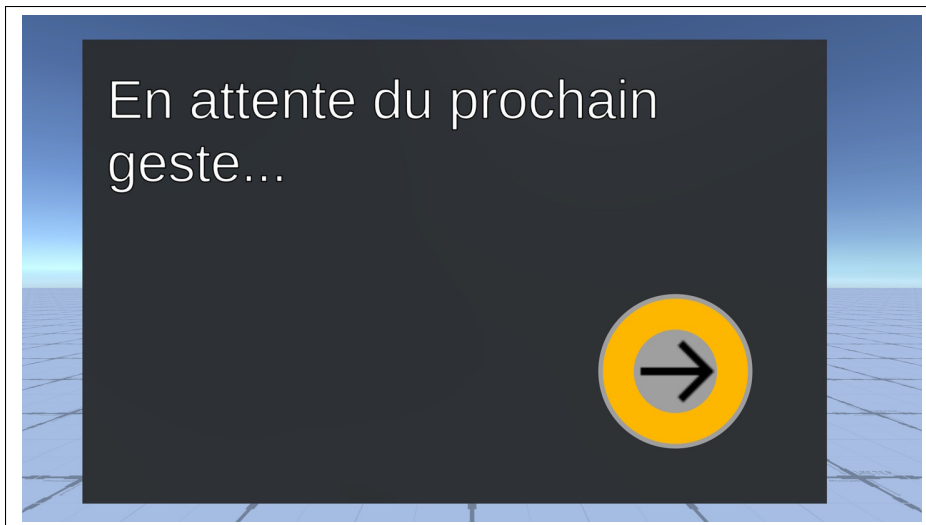


Figure 3.19 Minuteur affichant la fin du délai par une flèche

empêche alors la validation jusqu'à ce que celle-ci redevienne visible. L'avertissement inclut un message explicatif et une image rouge symbolisant un arrêt, montré par la Figure 3.20.

Si l'utilisateur ne sélectionne pas correctement la commande dans le menu, un avertissement s'affiche pour montrer une erreur de sélection, ceci est représenté par la Figure 3.21.



Figure 3.20 Écran montrant un avertissement expliquant que la main droite n'est plus visible



Figure 3.21 Écran montrant un avertissement si le geste sélectionné n'est pas celui demandé

### 3.1.11 L'utilisation de la manette pour la validation d'une pose

La validation de la pose de la main sert de moyen de confirmation lorsque l'utilisateur estime avoir réussi à reproduire correctement la pose demandée. La validation est effectuée à l'aide d'un contrôleur Bluetooth, la manette Zero 2 de 8Bitdo. La caractéristique principale de ce contrôleur est son utilisation à une seule main, accompagnée de boutons tactiles de différentes formes qui permettent une utilisation sans avoir besoin de regarder le contrôleur. Ne pas avoir à regarder le contrôleur est une caractéristique importante lors d'une expérience en réalité virtuelle.

Les confirmations (aller à l'étape suivante, valider la pose de la main) s'effectuent en appuyant la gâchette (shoulders buttons) de la manette. Les gâchettes sont montrées par la Figure 3.23. La gâchette gauche et de droite effectue la même action.

L'utilisation du menu s'effectue en appuyant sur un des quatre boutons « X Y A B ». Ces quatre boutons effectuent la même action. Les boutons sont montrés par la Figure 3.24.



Figure 3.22 Photo de la manette Zero 2 tenue en main

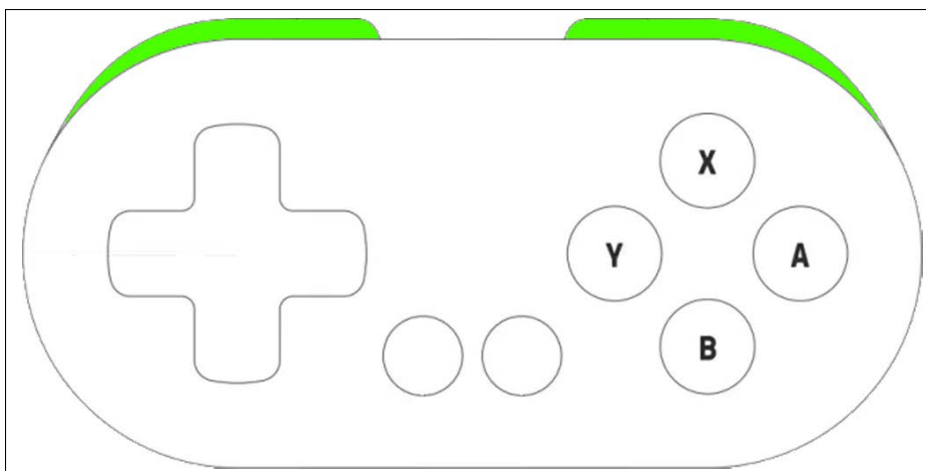


Figure 3.23 Croquis de la manette Zero 2 montrant en vert les gâchettes

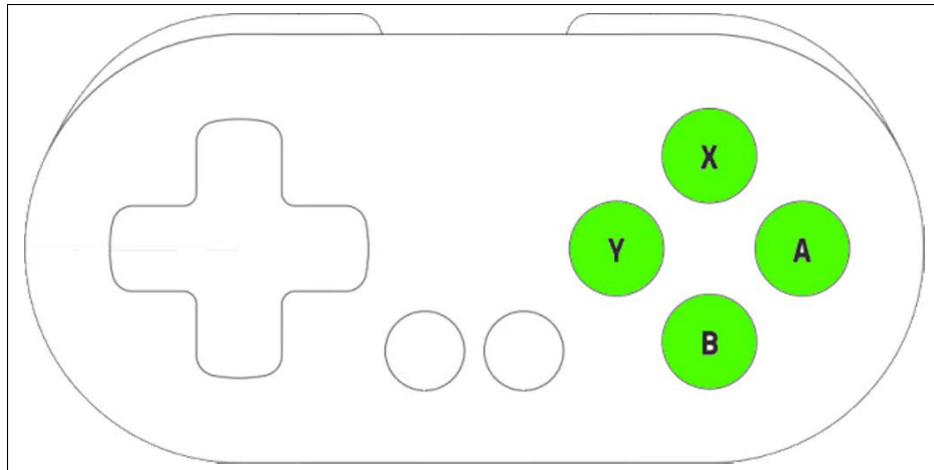


Figure 3.24 Croquis de la manette Zero 2 montrant en vert les boutons

### 3.1.11.1 Prototypage de validations

La validation d'une pose a demandé plusieurs itérations afin de trouver la solution la plus appropriée et simple d'utilisation. Plusieurs prototypes de validation d'une pose ont été programmés et implémentés, mais n'ont pas été retenus. Voici différentes méthodes qui ont été testées lors du développement et *qui n'ont pas été utilisées* pour la version finale :

- Utiliser le clavier. Cette façon a été utilisée lors du développement de l'application. Les utilisateurs n'ont pas testé cette méthode, car elle demande de se souvenir de la position des touches sans pouvoir regarder le clavier.
- Maintenir la position en place jusqu'à l'attente de la disparition d'un chronomètre placé sur la main. Cette solution n'a pas été gardée, car elle imposait un délai supplémentaire et n'avait pas une validation immédiate.
- Effectuer un mouvement rapide avec la main de gauche. Une brusque variation de l'accélération, soit un à-coup ou une saccade (jerk ou jolt en anglais). Lors d'observations, il a été constaté que la main de droite qui servait à reproduire la pose bougeait légèrement lors d'une telle validation, rendant la pose différente de celle souhaitée. Aussi un tel mouvement

rapide de la main causait une plus grande fatigue musculaire, rendant difficile la validation à plusieurs reprises.

- L'utilisation d'une souris pour cliquer sur les boutons. Dû aux risques d'échapper la souris lorsqu'elle était tenue dans la main, sans être reposée sur une table, cette méthode a été écartée.

## **3.2 Conception des différents retours visuels**

### **3.2.1 Premier prototype**

Le premier prototype a été créé en ajoutant des sphères dans la main virtuelle et en les positionnant de façon à faire correspondre leurs positions aux os du squelette du modèle de la main. La main a été rendue semi-transparente afin que les sphères soient facilement visibles.

Un système simple de détection a été mis en place afin d'observer un premier type de retour d'information. Un changement de couleur des sphères se produit lors d'une collision, passant du rouge à vert, présenté à la Figure 3.25 où la main traverse une sphère bleue.

Le second prototype, comme montré à la Figure 3.26, a été l'ajout de poses à reproduire. L'ajout d'une pose a été réalisé manuellement en notant la position des 24 os du modèle de la main et en les ajoutant à une liste avec le nom d'une pose dans le code. Bien que fonctionnel, ce système ne permet pas de généraliser les différences de grandeur de main d'un utilisateur à un autre ni d'en automatiser la lecture ou la sauvegarde de geste dans des fichiers externes.

Les sphères représentent un geste à atteindre, en passant du rouge lorsque la position de l'os correspondant de la main est éloignée de la cible au vert lorsque la position de l'os est proche de la cible.

La couleur a été calculée en mesurant la distance entre la position de l'os et de la cible. En utilisant une interpolation inverse (entre 1 cm et 10 cm) et la distance qui a été mesurée, un pourcentage allant de 0% (pour 1 cm ou moins) et 100% (pour 10 cm ou plus) a été calculé. Le



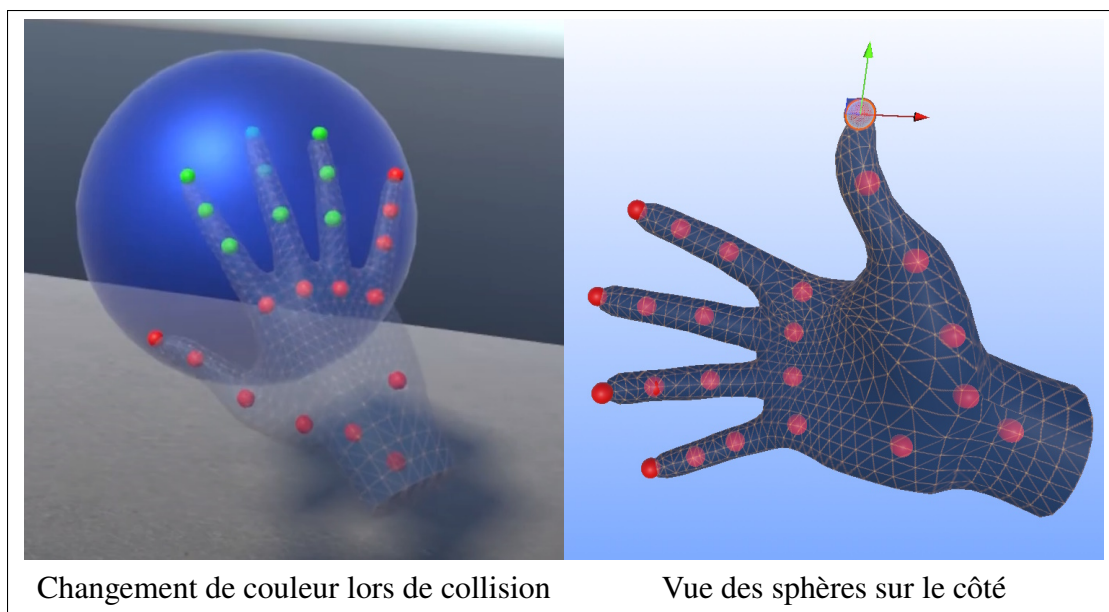


Figure 3.25 Premier prototype testant la visualisation de collision par sphères placées sur le squelette de la main

pourcentage ainsi obtenu a servi à obtenir la couleur, allant du rouge au vert. La valeur de 10 cm a été trouvée en approximant la moyenne de déplacement de l'extrémité des doigts.

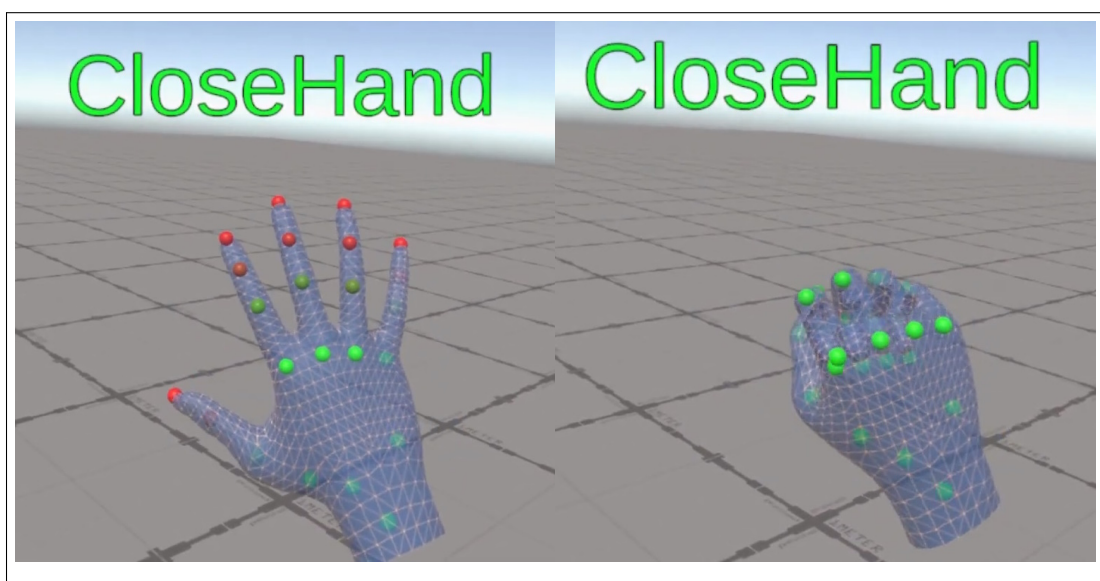


Figure 3.26 Deuxième prototype affichant des sphères de couleurs allant de rouge à vert selon la distance des os entre la main cible et la main de l'utilisateur

### 3.2.2 Sphères de couleur

Cette condition a été développée en itérant le premier prototype qui consistait à placer des sphères sur chacune des articulations.

Le changement entre le premier prototype et celui-ci est l'affichage de la main, passant de semi-transparent à opaque. Les sphères à l'intérieur de la main n'étant plus visibles ont été enlevées.

Les sphères de cette condition sont placées sur le bout des doigts. Tout comme le deuxième prototype, la couleur des sphères est calculée selon la distance entre les os de la pose à effectuer et de la main de l'utilisateur. Afin d'aider l'utilisateur à comprendre la direction pour effectuer une correction, une courte ligne est orientée vers la direction à atteindre.

Après avoir effectué des tests pré pilotes, plusieurs utilisateurs ont eu de la difficulté à comprendre le fonctionnement de ce retour visuel. Cette condition a été retirée et n'a pas été utilisée lors de l'expérience.

La Figure 3.27 montre deux gestes, celui à gauche avec les sphères vertes montre le geste cible et celui à droite montre une position différente de la main ayant les mêmes positions cibles.

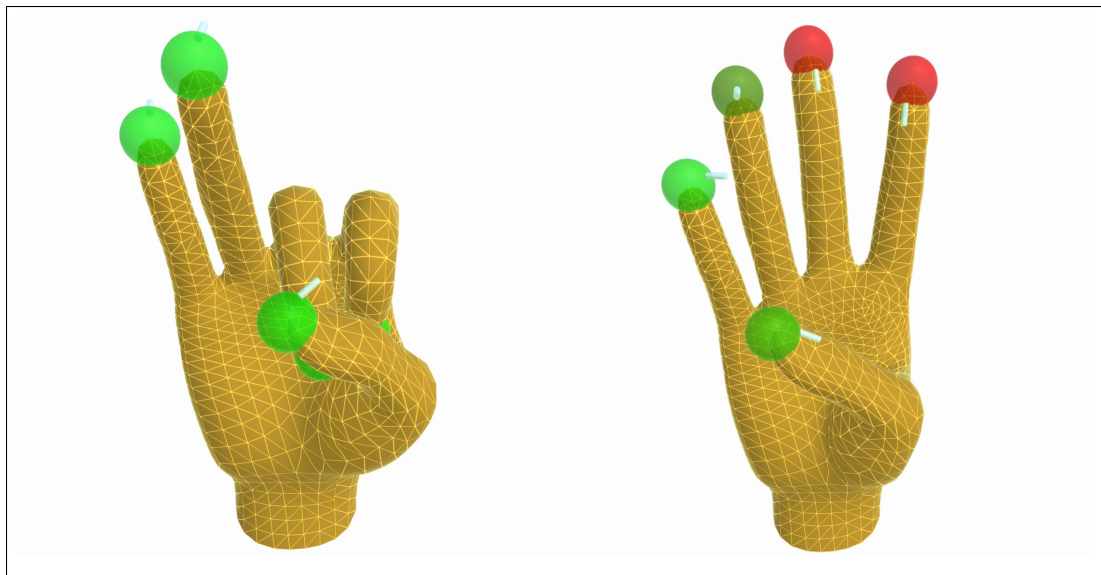


Figure 3.27 Utilisation de sphères de couleur sur l'extrémité des doigts, les deux mains ont la même cible. L'image de gauche est bien positionnée et celle de droite affiche deux doigts avec les sphères en rouge indiquant qu'un déplacement est suggéré

### 3.2.3 Flèches

La condition Flèches consiste à utiliser des flèches (Freeman *et al.*, 2009; Sodhi *et al.*, 2012) comme retour visuel pour aider l'utilisateur à visualiser la direction à suivre sans montrer précisément la position de la cible.

Les flèches sont placées à l'extrémité des doigts et pointent vers la cible à atteindre. Les flèches peuvent prendre plusieurs orientations selon les positions des doigts de l'utilisateur. Ce qui peut aider l'utilisateur à créer une image mentale de la représentation de position de la cible à atteindre.

La taille de la flèche est dynamique et ajustée au fur et à mesure que l'utilisateur bouge sa main. La base de la flèche est placée sur l'extrémité des doigts et pointe vers la cible. Lorsque la longueur de la flèche est inférieure à 3 cm, elle devient invisible pour minimiser les distractions visuelles causées par une flèche partiellement visible.

Dans la Figure 3.28, les deux mains montrent deux poses différentes où les flèches sont dirigées vers la même cible.

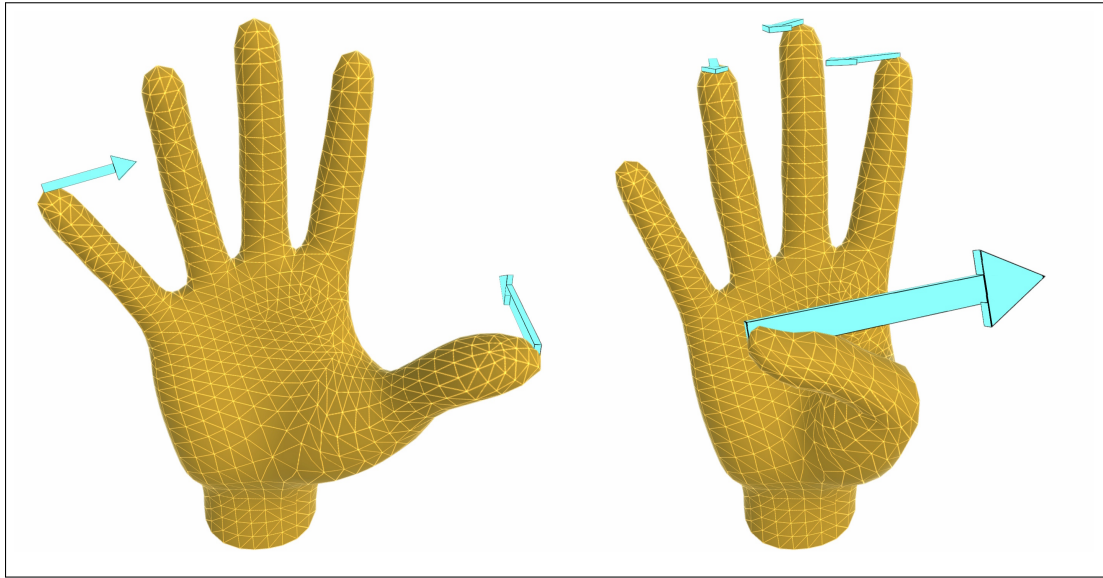


Figure 3.28 Condition flèches montrant deux poses ayant la même position cible à atteindre

### 3.2.4 Fantôme

La condition de visualisation Fantôme s'inspire d'une représentation de type fantôme. C'est-à-dire un objet transparent et sans collision. Cette visualisation a été inspirée des travaux par White *et al.* (2007); Freeman *et al.* (2009).

Lorsque deux éléments graphiques sont positionnés exactement au même endroit, un phénomène de scintillement des éléments partageant une même intersection se produit. Ce phénomène est nommé le z-fighting.

Lors de phases pilotes, un problème d'affichage a été observé lorsque la main de l'utilisateur et la main fantôme étaient positionnées exactement au même endroit, cela créait une erreur de z-fighting.

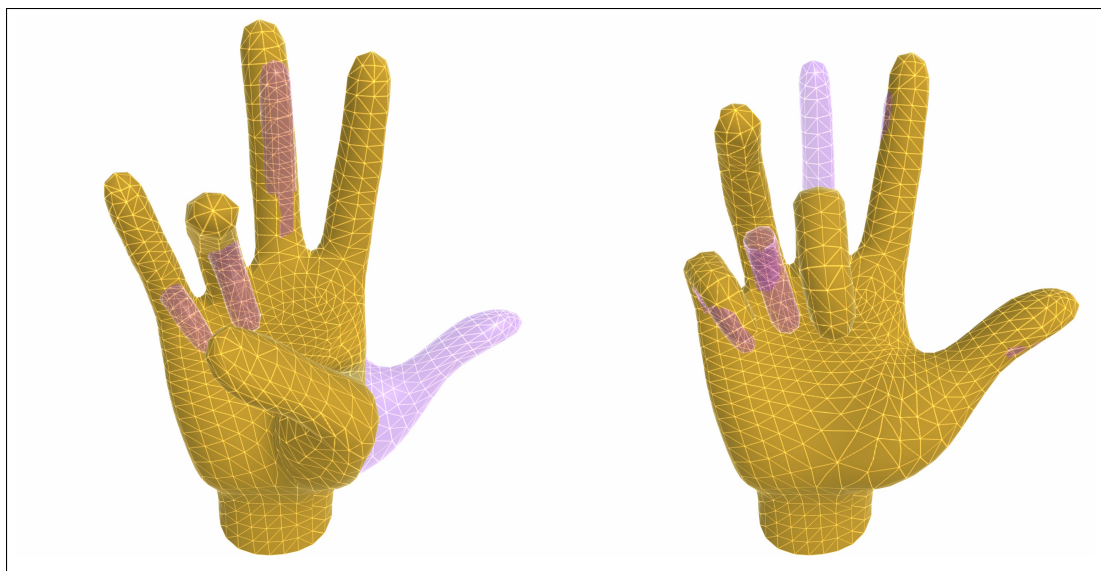


Figure 3.29 Condition fantôme montrant la même pose cible

Pour réaliser correctement un geste, l'utilisateur positionne sa main par rapport à la main virtuelle. Afin de renforcer le sentiment d'accomplissement et de minimiser les distractions dues au z-fighting, la main fantomatique est réduite de 5% par rapport à la main de l'utilisateur. De cette façon, lorsque la main de l'utilisateur enveloppe complètement la main fantôme, cela donne un indice signifiant que la pose de sa main est bien réalisée.

La Figure 3.30 montre une représentation d'un "z-fighting" où les éléments apparaissent de façon aléatoire sur la main. Ce qui illustre le besoin d'avoir une taille différente pour la main fantôme.

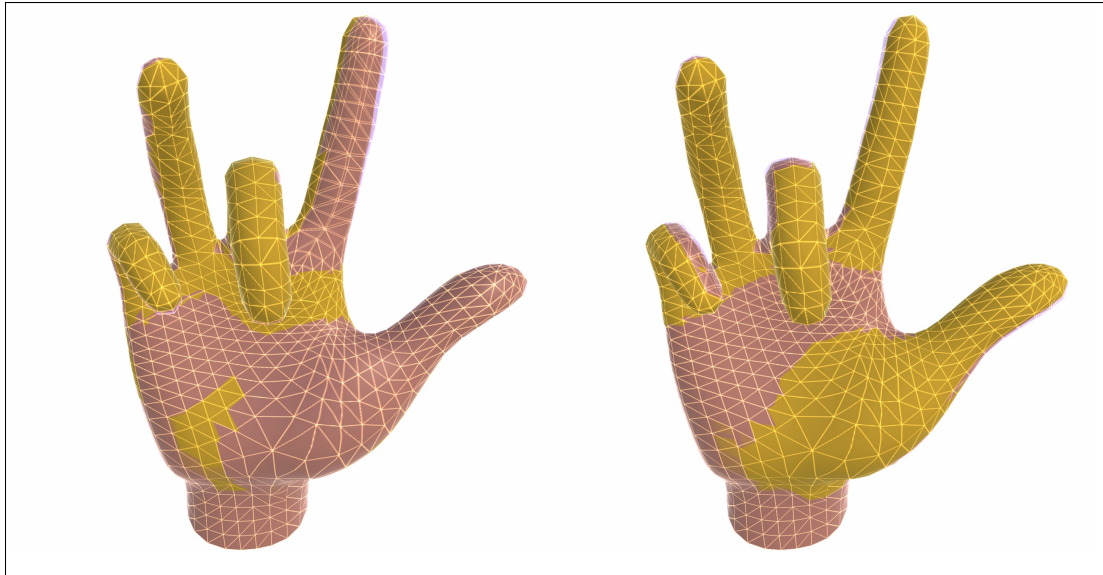


Figure 3.30 Illustration de la condition fantôme affichant le phénomène de z-fighting. Les deux images présentent la même pose de la main. Les deux images ont été prises l'une à la suite de l'autre. Le z-fighting est un changement visuel aléatoire qui est représenté par le mauve sur la main

### 3.2.5 Main en couleur

Dans la condition Couleur, la rétroaction visuelle a été imaginée en tant que dessin dynamique de type *in situ*, soit un affichage directement sur la peau de la main.

En s'inspirant de l'idée d'avoir une indication directement sur la main, une question complexe a été de trouver comment représenter une direction spécifique afin d'aider un utilisateur à positionner ses doigts à l'extérieur de la main. Une première tentative a été l'utilisation d'un dégradé de couleur, montrant les différences entre la pose de la main de l'utilisateur et la pose à reproduire.

La Figure 3.31 montre l'évolution du prototype en trois phases (de gauche à droite), une coloration en vert et rouge, une coloration par zone créée en utilisant les poids des os du modèle de la main et en utilisant une nouvelle palette de couleur.

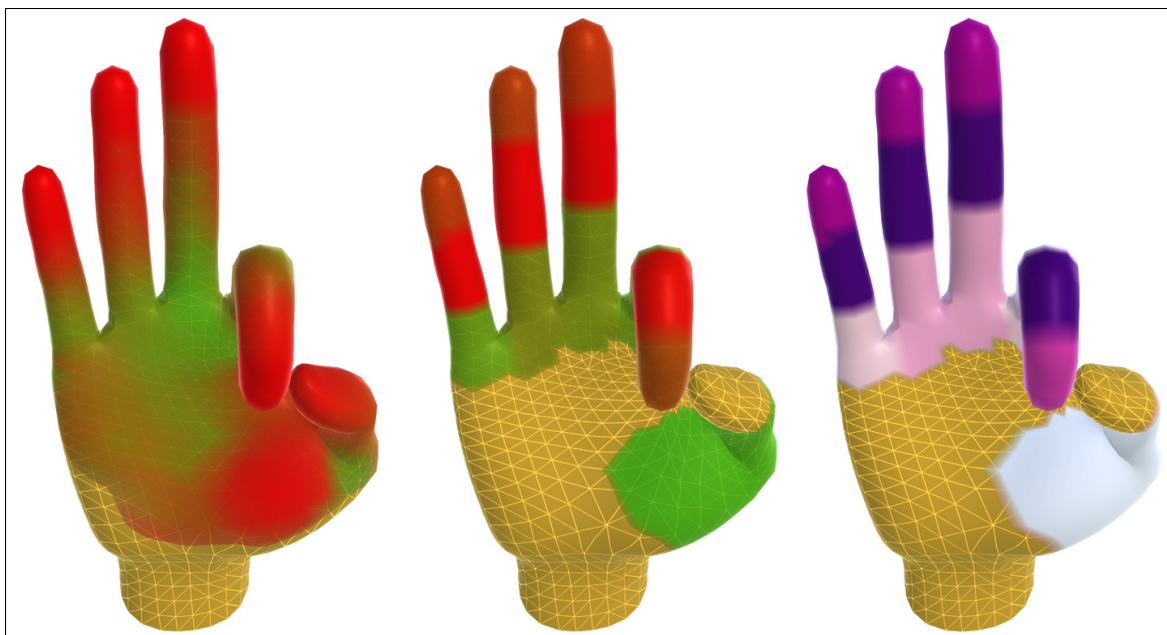


Figure 3.31 Évolution de la condition Couleur en trois phases. Coloration de la totalité de la main avec une interpolation de couleurs (gauche). Zone de couleurs en utilisant le poids des os du modèle de la main (centre). Utilisation d'une nouvelle palette de couleur aidant à la perception des différences de couleur (droite)

La première version utilise une technique de lancer de rayons pour trouver dynamiquement la position sur la main à colorier, la deuxième version utilise les zones d'influence des sommets du modèle par rapport aux os de la main qui sont à même le modèle et la troisième utilise une palette de couleur permettant d'aider à voir les nuances de couleurs.

### 3.2.5.1 Technique utilisant le lancer de rayons

La première version a nécessité la création d'un nuanceur (shader) afin de pouvoir spécifier la couleur de chacun des 1365 sommets du modèle.

Afin de connaître la position dynamique des différents sommets, un lancer de rayon de type sphère d'un diamètre de 5 cm (Physics.SphereCastAll) est effectué de chacun des points d'intersection de la main cible à la main de l'utilisateur afin de connaître la position de chaque sommet. La distance séparant ces deux gestes est utilisée pour la coloration du sommet.

Le modèle de la main utilise un composant de type `SkinnedMeshRenderer` afin de pouvoir suivre la peau qui s'étire sur la main lors de différents mouvements. Ce type de `Renderer` n'a pas en temps normal une zone de collision, car l'objet change de forme à chaque mouvement de la main de l'utilisateur.

Pour l'utilisation du lancer de rayon, un composant de type `MeshCollider` a dû être ajouté pour obtenir une collision entre le modèle de la main et le rayon.

Le `Renderer` de type `SkinnedMeshRenderer` crée le maillage de collision (`MeshCollider`) de la main au démarrage de l'application et ne met pas à jour automatiquement le maillage durant le fonctionnement de l'application. Ceci est problématique lorsque la main de l'utilisateur bouge et que le maillage de collision ne correspond plus à la main.

Pour obtenir un nouveau maillage de collision, un calcul du maillage est effectué lors de l'exécution de l'application. L'utilisation de la commande « `BakeMesh()` » permet d'utiliser la forme actuelle de la main et en calculer un nouveau maillage. Pour réduire le nombre de calculs nécessaire, qui peut être exigeant lorsqu'ils sont effectués sur un casque de réalité virtuelle, une attente de 10 frames a été implémentée à l'aide d'une coroutine avant d'appeler « `BakeMesh()` ».

### **3.2.5.2 Technique de coloration utilisant le modèle de la main**

Une deuxième technique a été élaborée afin de colorier une zone complète et non seulement l'endroit où une différence apparaît.

L'affichage de la main a été divisé en différentes zones représentant les poids des os venant du modèle de la main. Soit les phalanges distales, intermédiaires et proximales, ainsi que les métacarpes pour chaque doigt. L'association entre les os et la surface a été réalisée en récupérant les informations du modèle de la main en utilisant la commande `Mesh.boneWeights` d'Unity. Cette fonction retourne la liste des sommets de la surface et leurs associations aux os du modèle de la main.



La Figure 3.32 illustre l'association des os et de la surface du modèle à l'aide de l'application Blender.

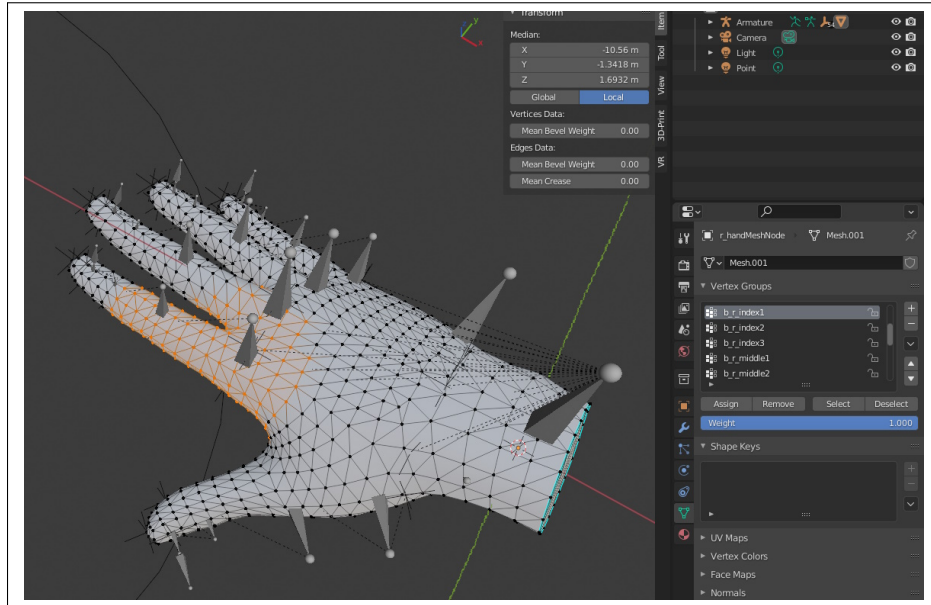


Figure 3.32 Capture d'écran de Blender montrant le modèle de la main en affichant la sélection des sommets (en orange) par rapport aux os (pyramide attachée à une sphère), servant à la coloration automatique de la main

### 3.2.5.3 Changement de la palette de couleur

Suite à des remarques reçues lors de la phase pilote, une remarque générale a été constatée d'une difficulté de compréhension de la progression lorsque la couleur se situait entre le vert et le rouge. Lorsque le système de couleur RVB est utilisé, le mélange de vert et de rouge donne une couleur proche du brun. Les utilisateurs étaient confus entre les différentes nuances de brun.

Deux modifications ont été apportées. Premièrement, une diminution du nombre de couleurs disponible lors de la transition entre le vert et le rouge afin d'afficher de façon plus distinctive la progression à l'utilisateur. Deuxièmement, l'interpolation entre le rouge et le vert a été enlevée et remplacée par une palette de couleur venant de ColorBrewer (Harrower & Brewer, 2003). Les

palettes de couleurs de ColorBrewer offrent des couleurs prédéfinies qui permettent d'obtenir une différenciation claire et distinctive d'une couleur à l'autre.

La plage de couleur « RdPu » représentée par la Figure 3.33 a été celle qui a été implémentée suite à l'avis d'utilisateurs lors de tests pilotes.

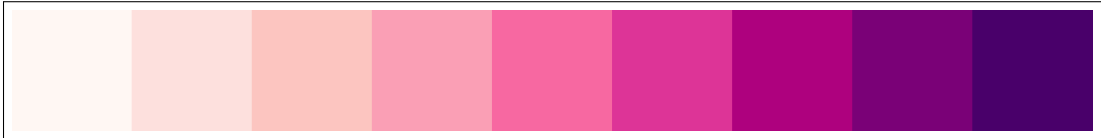


Figure 3.33 Plage de couleur utilisée, montrant peu de changement à effectuer (en blanc à gauche) vers de grande variation à effectuer (en violet à droite)

La Figure 3.34 montre une comparaison de la condition Couleur montrant deux mains et la même cible.

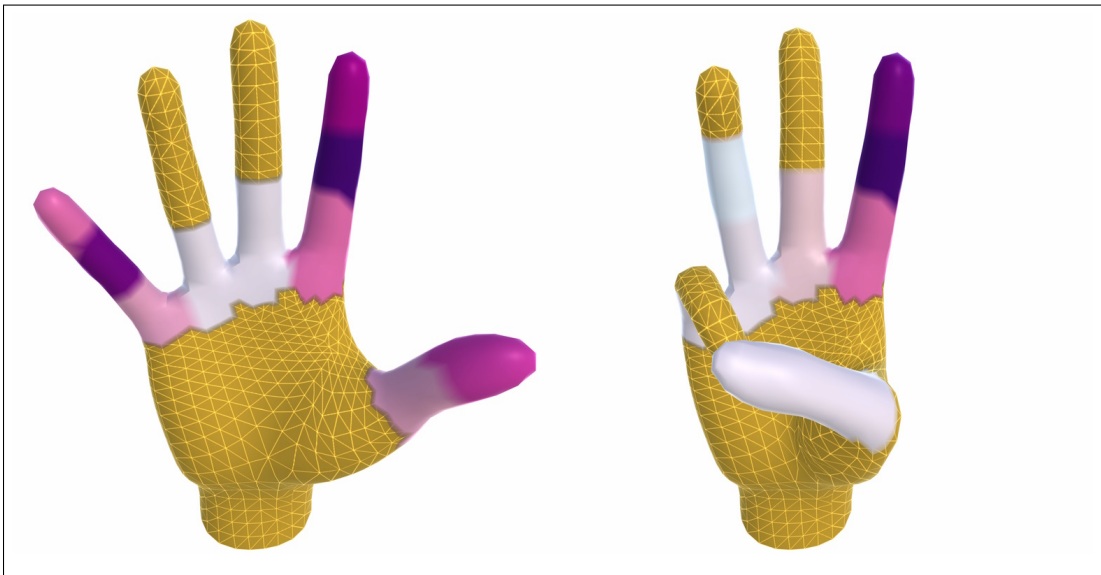


Figure 3.34 Illustration de la condition couleur affichant deux poses différentes et la même cible

### 3.2.6 Marionnette

La condition **Marionnette** est composée de sphères statiques fixées dans l'espace de la main de l'utilisateur. L'espace de la main correspond à la région du poignet et les sphères sont positionnées pour garder la même distance, peu importe la position ou la rotation du poignet.

Les sphères représentent les extrémités des doigts de la pose à réaliser. Pour assurer une bonne correspondance entre la sphère et le doigt associé, une ligne relie les deux.

La condition **Marionnette** a été créée en combinant la condition **Sphères** à une position statique comme **Fantôme**. Une ligne pour relier les sphères au bout des doigts a été implémentée telle que la condition **Flèches**. Une semi-transparence des sphères a été utilisée tel que **Fantôme** et finalement un léger dégradé (de gris à noir) a été mis sur la ligne pour faciliter l'utilisation lors de croisement de lignes, ce qui a été inspiré de la condition **Couleur**.

Le Tableau 3.1 montre une comparaison des différentes conditions.

Tableau 3.1 Caractéristique des conditions de rétroactions testé au cours de l'expérience

Conditions	Type de visualisation		Type d'information affichée pour réaliser la tâche demandée		Rétroaction utilisant la	
	Dynamique	Statique	Position	Direction	Forme	Couleur
Sphères	✓			faible		✓
Flèches	✓		indirecte	✓	✓	
Fantôme		✓	✓			
Couleur	✓			✓		✓
Marionnette	✓	✓	✓	✓	✓	✓

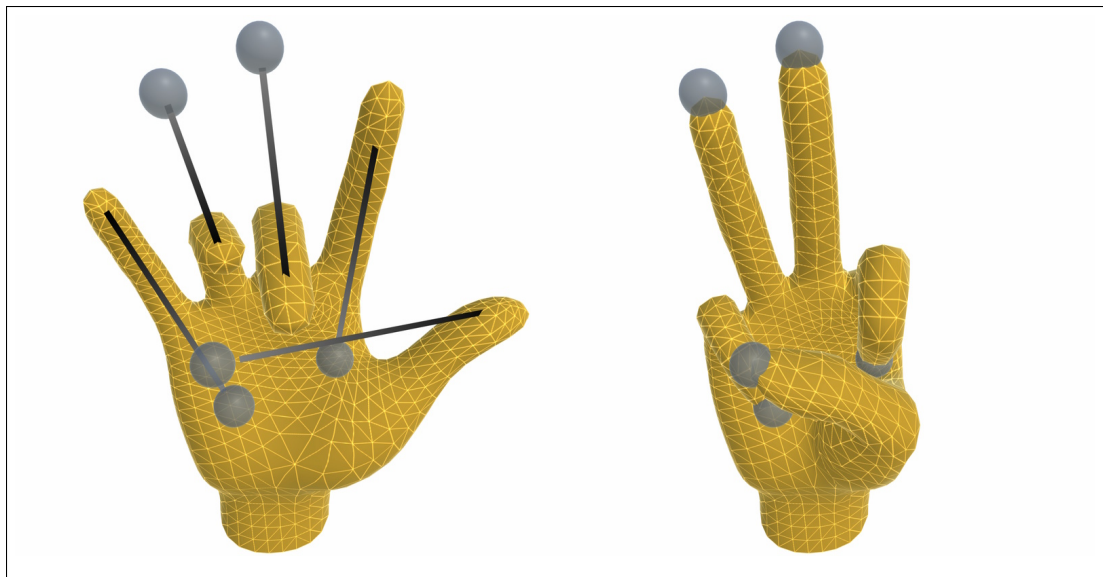


Figure 3.35 Condition marionnette affichant deux poses différentes et la même pose cible

## **CHAPITRE 4**

### **ÉTUDE EXPÉRIMENTALE**

#### **4.1 Expérience 1**

L'objectif de l'expérience est de comparer différents types de retours de visualisation *in situ* sur la performance d'apprentissage de gestes en réalité virtuelle.

L'expérience a été conçue afin de répondre à ces questions de recherche, soit :

- Q1 Le retour *in situ* augmentera-t-il la précision des poses ?
- Q2 Le retour *in situ* aidera-t-il à mémoriser les poses plus rapidement ?
- Q3 Dans quelle condition le retour *in situ* est-il le plus efficace selon la précision des gestes et la mémorisation ?

##### **4.1.1 Tâche expérimentale**

L'expérience vise à évaluer la précision et la mémorisation des utilisateurs en reproduisant une position avec leur main droite en réalité virtuelle. L'utilisateur commence l'essai en appuyant sur l'une des gâchettes de la manette, illustrée à la Figure 3.23, qu'il tient avec la main gauche.

Ensuite, le système affiche le nom de la commande à effectuer, que les utilisateurs peuvent soit effectuer immédiatement, soit afficher le menu contenant les poses à reproduire. En maintenant appuyé l'un des boutons de la manette, illustrée à la Figure 3.24, le menu contenant les poses s'affiche en montant lentement du sol, jusqu'à la hauteur des yeux de l'utilisateur. La durée pour l'ouverture du menu est de 2500 ms. L'utilisateur mémorise la pose correspondant à la commande demandée, avant de fermer le menu en relâchant le bouton de la manette.

La pose de la main ne peut être confirmée que lorsque le menu est fermé et n'est plus visible. Les utilisateurs doivent alors reproduire la pose demandée, la maintenir temporairement devant eux

jusqu'à ce qu'ils choisissent d'effectuer une validation en appuyant sur l'une des gâchettes de la manette. La validation met fin à l'essai, ce qui déclenche un minuteur, illustré par la Figure 3.18.

Lors d'une condition autre que la condition Référence, les utilisateurs peuvent sélectionner l'une des poses dans le menu afin d'activer le retour visuel correspondant à leur sélection. Cette sélection se fait avec la direction de la tête dans le but de libérer la main gauche tenant le contrôleur et la main droite étant utilisée pour reproduire le geste.

À la fin de l'expérience en réalité virtuelle, les utilisateurs remplissent le post-questionnaire ainsi qu'une évaluation sur la difficulté des gestes à l'aide d'un écran et d'un clavier.

#### **4.1.2 Les conditions de l'expérience**

Cinq conditions ont été testées au cours de cette expérience :

1. Couleur ;
2. Fantôme ;
3. Flèches ;
4. Marionnette ;
5. Référence.

Les conditions Couleur, Fantôme, Flèches et Marionnette ont toutes une visualisation distincte permettant l'apprentissage de gestes en utilisant des retours visuels propres à chacun. La condition Référence quant à elle n'a pas de retour visuel, ceci dans le but de valider les conditions précédemment énumérées avec une variable qui représente le statu quo.

En d'autres termes, la condition Référence est utilisée comme condition de référence ou de contrôle afin de comparer les résultats des autres conditions à savoir s'il y a un effet significatif sur la distance des gestes et à la mémorisation par rapport à la condition Référence.

### 4.1.3 Ensemble de données

Afin de s'assurer de la reproductibilité des gestes des participants, l'ensemble du jeu des gestes a été enregistré à l'aide du même équipement qu'ils ont utilisé lors de l'expérience, soit le casque de réalité virtuelle Oculus Quest 2.

Les détails de la création et de l'implémentation du système de capture des poses se trouvent à la section 3.1.1.

Le jeu de données pour l'étude contient 101 éléments et a été généré en deux étapes. Tout d'abord, un premier ensemble de 32 poses a été généré pour couvrir l'ensemble des combinaisons binaire de la position des doigts de la main, c'est-à-dire le fait d'avoir un doigt replié vers la paume ou un doigt étendu. Cette combinaison des deux possibilités des cinq doigts de la main droite a donné  $2^5$  (32) poses. Ce qui a permis de créer, de façon canonique, un premier ensemble de départ.

Cependant, ce premier ensemble ne représente pas les gestes tels qu'ils sont réalisés naturellement dans des situations quotidiennes. Par exemple, lorsqu'une personne prend un objet, elle n'a normalement pas besoin de positionner consciemment chaque doigt afin d'optimiser sa préhension de l'objet. Pour combler ce manquement, des gestes plus naturels ont été nécessaires.

La deuxième étape de la création de ce jeu de données a été de capturer en temps réel un large éventail de gestes faits de façon aléatoire (plus de 600) pour ensuite être filtrés utilisant un algorithme permettant de créer automatiquement un sous-ensemble de poses. Le filtre a permis des gestes aléatoires tout en éliminant les poses semblables. Ce processus de filtrage a permis d'obtenir un sous-ensemble contenant 69 poses.

L'ensemble des 101 poses a été utilisé durant la phase pilote de l'expérience. Durant le pilote, un des participants a exprimé un malaise quant à la reproduction d'une pose spécifique. Il s'agit de la pose formée par les doigts repliés avec le majeur tendu. Cette pose se nomme dans la culture populaire, le « doigt d'honneur » et est perçue comme obscène. En conséquence, cette pose, ainsi qu'une de ses variantes ont été retirées du jeu de données lors de l'expérience en réalité virtuelle.

#### 4.1.4 Design expérimental

Les cinq conditions principales qui ont été étudiées {Référence, Fantôme, Flèches, Couleur, Marionnette} sont précédées par une phase de réchauffement. Les données de la phase de réchauffement n'ont pas été comptabilisées lors des statistiques. Les deux phases {réchauffement, principale}, se composent des éléments suivants :

1. la phase de **réchauffement**, comprend 2 poses  $\times$  2 répétitions  $\times$  1 bloc,
2. la phase **principale**, comprend 4 poses  $\times$  2 répétitions  $\times$  4 blocs.

Un bloc est une séquence de poses, une répétition est le nombre de fois qu'une pose est dans une séquence. Chaque condition utilise des poses différentes. Exemple, dans cette suite, les poses 2,7,11 et 18 sont répétées deux fois et contiennent quatre blocs.

2,7,18,11,11,18,2,7

18,7,11,11,18,2,2,7

7,11,18,2,18,7,11,2

18,7,7,11,2,2,18,11

Au démarrage de l'application, chaque condition est initialisée de façon séquentielle {Référence\_réchauffement, Référence, Fantôme\_réchauffement, Fantôme, Flèches\_réchauffement, Flèches, Couleur\_réchauffement, Couleur, Marionnette\_réchauffement, Marionnette}

Pour la première condition, Référence\_réchauffement, une première pose est sélectionnée aléatoirement parmi le jeu de données des 99 poses. La pose sélectionnée (G1) est enlevée du jeu de données.

La deuxième pose de cette condition est sélectionnée en prenant une pose temporaire (T2) et en validant la distance avec la première pose (G1). Si la distance est supérieure à 15 cm<sup>2</sup>, la pose temporaire est transformée en pose sélectionnée (G2) et est enlevée des poses disponibles. Si la

---

<sup>2</sup> Distance moyenne trouvée lors des expériences pilotes.



distance est inférieure à 15 cm, une nouvelle pose est sélectionnée aléatoirement et est validée à nouveau.

#### **4.1.5 Protocole expérimental**

L'expérience consiste à reproduire des poses de la main à l'aide du casque de réalité virtuelle Oculus Quest 2 et d'en effectuer la confirmation à l'aide de la manette sans fil Zero 2 de 8BitDo®.

Au début, le participant reçoit une description complète de l'expérience ainsi que ses droits associés à la participation de cette étude. Le participant est invité à lire et à signer le formulaire de consentement. Un préquestionnaire identifié seulement par le numéro du participant est utilisé afin de recueillir des informations relatives au participant.

Les informations recueillies sont : le sexe, l'âge, la main dominante, la main avec laquelle est utilisée la souris, la pratique d'une activité demandant de la dextérité, le daltonisme, l'occupation courante, l'expérience avec des logiciels 3D, l'expérience préalable avec des appareils de réalité virtuelle ou augmentée, ainsi que la distance interpupillaire qui a été mesurée par l'expérimentateur.

Par la suite, une explication des différents écrans de l'expérience et de l'utilisation du matériel est donnée au participant. Le casque est ajusté à la tête du participant et celui-ci est invité à commencer l'expérience en réalité virtuelle.

Une consigne a été dite à chaque participant, en voici le verbatim : « Essaie de mémoriser le geste et de le faire du mieux que tu peux, sans passer trop de temps dessus ».

Le casque est calibré manuellement (en appuyant sur une touche pendant trois secondes) par l'expérimentateur pour ajuster la hauteur et la rotation du monde virtuel afin de rendre plus confortable le participant durant l'expérience.

À la fin de l'expérience en réalité virtuelle, le participant est invité à enlever doucement le casque et de prendre une pause avant de remplir le post-questionnaire. Le post-questionnaire

recueille les données sur la difficulté perçue de chaque condition, la condition préférée et la moins aimée, la préférence avec ou sans les suggestions automatiques, une explication de leur préférence, les stratégies de mémorisation des gestes et les commentaires généraux.

Après le départ du participant, la housse d'hygiène jetable de VRCover qui était sur le casque a été jetée. Un nettoyage à l'aide de lingettes désinfectantes a été effectué sur le casque, le contrôleur ainsi que le bureau utilisé par le participant.

Chaque essai a été classifié en tant que *réussi* : le participant a effectué la pose associée à la commande demandée ou *non réussi* : la pose réalisée par le participant ne correspond pas à la commande demandée. À noter, la main de l'utilisateur doit être visible afin de confirmer une pose, chaque essai contient une pose qui a été reconnue par le système. La pose sélectionnée dans le menu aide à la reproduction d'une pose, mais n'est pas prise en compte lors de classification de l'essai.

#### **4.1.6 Participants**

Les étudiants et le personnel de l'ÉTS ont été invités à participer à l'expérience qui s'est déroulée dans un laboratoire de l'ÉTS. Les conditions pour être admissible étaient : ne pas être facilement sujet au mal des transports ou au cybermalaise, ne pas porter des lunettes dépassant 142 mm de largeur ou 50 mm de hauteur en raison de limitations physiques pour le port du casque Oculus Quest 2. De plus, afin de garantir la santé et le bien-être de tous les participants, ne pas présenter de symptômes liés au COVID-19.

Douze participants ont été recrutés pour l'étude avec une composition démographique de neuf hommes et trois femmes. Les participants étaient de préférence manuelle diverses : dix droitiers, un gaucher et un ambidextre. Tous utilisaient habituellement la souris avec la main droite.

La moyenne d'âge des participants était de 27,42 ans, allant de 20 à 46 ans, et l'écart type était de 6,79. La distance interpupillaire (IPD) des participants avait une valeur moyenne de 61,0 mm, avec un écart type de 4,42 et variait de 54 à 65 mm.

Tous les participants avaient une expérience préalable de l'utilisation de logiciels 3D, notamment les jeux vidéo et les logiciels de modélisation, ainsi que l'utilisation de casques de réalité virtuelle ou augmentée. Onze participants ont répondu avoir utilisé un logiciel de modélisation 3D, huit participants ont répondu avoir déjà effectué du développement d'application avec un casque de réalité virtuelle.

Enfin, dix participants sur douze ont répondu pratiquer des activités impliquant une dextérité manuelle.

## **4.2 Résultats de la première expérience**

Cette première expérience, menée entre le 17 juillet 2022 et le 4 août 2022, présente les résultats de l'analyse des données. Les résultats quantitatifs qui sont présentés à la section 4.2.1, montrent une vue globale de l'expérience et des réponses à la première et à la seconde question de recherche. S'en suivent à la section 4.2.2 les résultats qualitatifs et une discussion des résultats à la section 4.2.3. Enfin, un résumé des résultats de l'expérience se trouve à la section 4.2.4.

### **4.2.1 Les résultats quantitatifs**

L'analyse des résultats est présentée en filtrant les essais de type réchauffement. De plus, une agrégation a été effectuée au niveau des utilisateurs et des conditions.

#### **4.2.1.1 Vue d'ensemble des variables**

Il y a eu au total 2160 essais où les participants ont reproduit les gestes, 240 essais de réchauffement préalable aux conditions et 1920 essais passé la période de réchauffement.

La durée d'une séance avec les participants a été d'environ 1 h 30 min, en incluant la durée de l'expérience en réalité virtuelle qui a été de 50 min 30 s.

Le Tableau 4.1 montre une vue d'ensemble des données récoltées lors de l'expérience selon les conditions. La colonne distance représente la distance entre le geste réalisé et celui demandé,

durée est le temps d'un essai, erreur est le nombre de fois qu'une d'erreur de validation a eu lieu et finalement, Menu est le nombre de fois où le menu a été utilisé.

Les trois conditions ayant les plus petites distances sont Marionnette avec 8,40 cm, Fantôme avec 9,23 cm et Flèches avec 11,46 cm.

La durée moyenne d'un essai a été de 10,07 s avec un écart type de 2,34 s et un intervalle de confiance à 95 % de [9,78; 10,39] s. Le temps minimum a été de 0,03 s et le temps maximum a été de 80,23 s. Aucune limite de temps n'a été mentionnée ni imposée aux participants.

L'intervalle de confiance de la mesure de la distance des différentes conditions a été calculé en utilisant la technique *bootstrap* avec un niveau de confiance de 95 %, à l'aide de 100 000 rééchantillonnages. La simulation a été réalisée avec la méthode de correction du biais et d'accélération *BCa* ("bias-corrected and accelerated").

Tableau 4.1 Sommaires des statistiques descriptives des variables les plus représentatives lors l'expérience

Condition	Distance (cm)			Durée (s)		Erreur	Menu
	$\bar{x}$	$s$	I.C. à 95%	$\bar{x}$	$s$		
Couleur	12,77	6,98	[ 11,12 ; 14,65]	11,25	7,31	53	288
Fantôme	9,23	4,73	[ 8,07 ; 10,42]	9,35	5,96	15	291
Flèches	11,46	6,93	[ 10,25 ; 13,42]	11,39	8,56	55	305
Marionnette	8,40	5,36	[ 7,05 ; 9,63]	10,46	6,06	25	316
Référence	13,03	5,47	[ 11,70 ; 14,10]	7,91	5,17	30	285

La Figure 4.1 représente une visualisation de la distance par rapport aux conditions par un diagramme en boîte.

La Figure 4.2 représente les intervalles de confiance des différentes conditions. L'intervalle de la condition Référence est montré en pointillé gris, les conditions qui sont dans le même intervalle sont en rouge et ceux n'en faisant pas partie sont en vert.

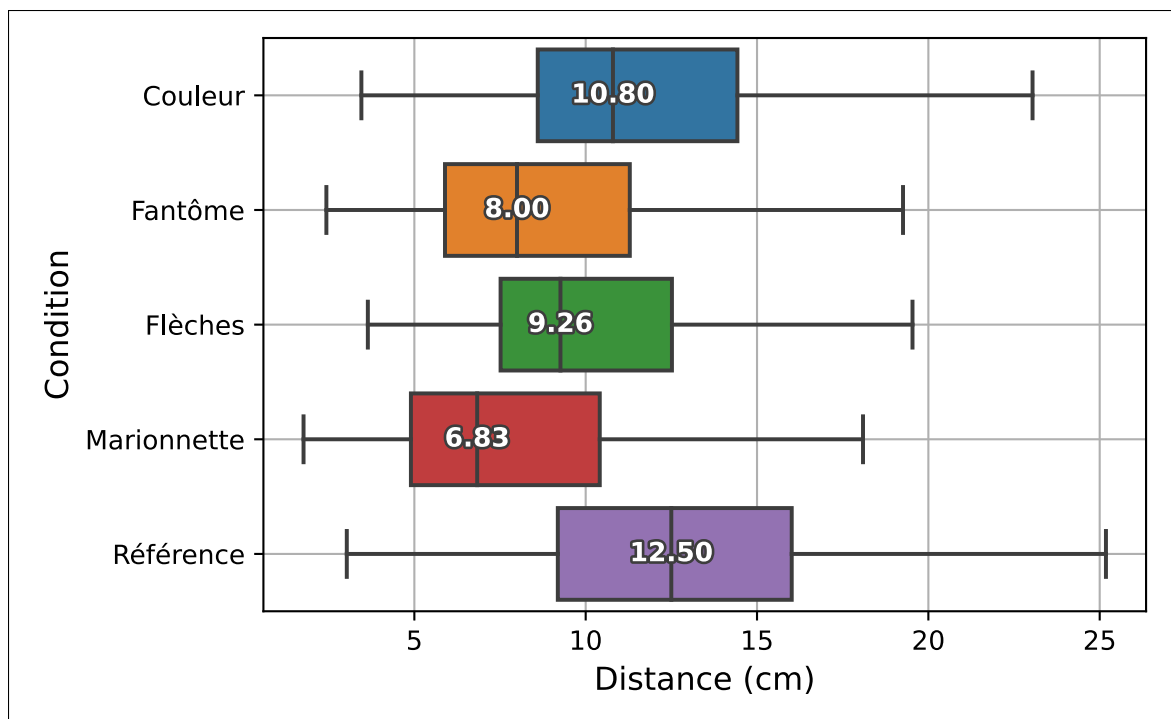


Figure 4.1 Diagramme en boîte à moustaches, représentant la distance en centimètre de la pose de l'utilisateur comparativement à la pose demandée

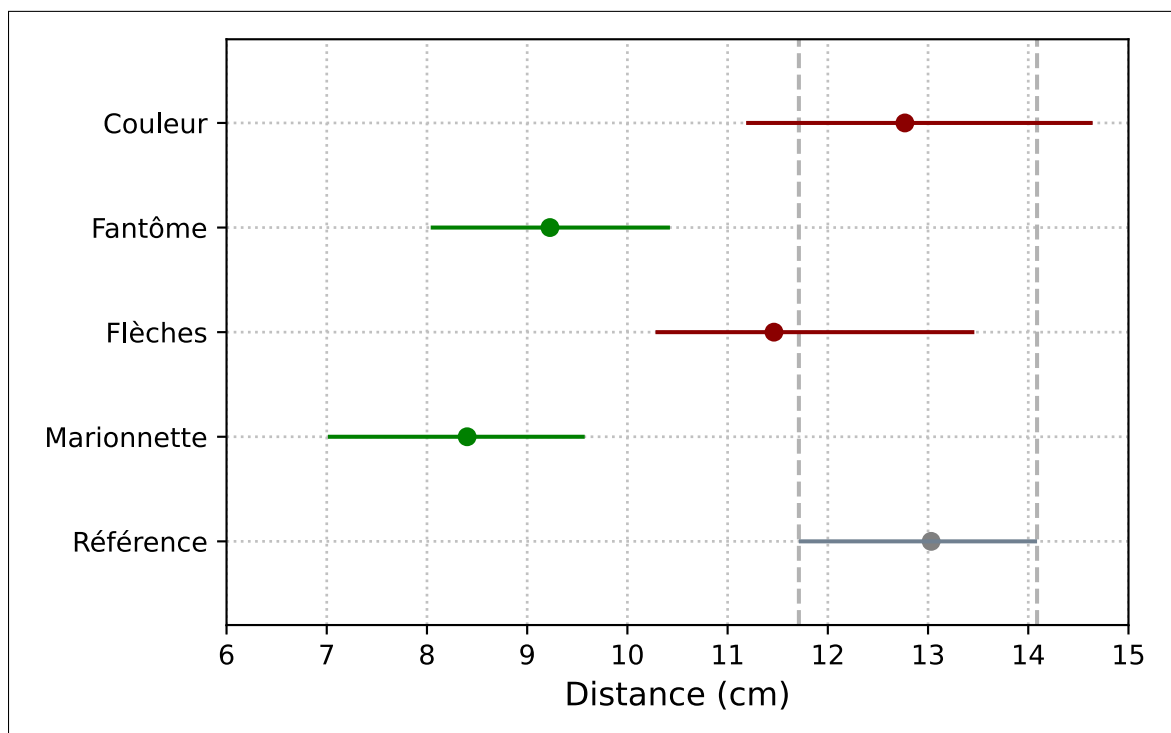


Figure 4.2 Comparaison des conditions avec intervalle de confiance à 95 %

#### 4.2.1.2 Question de recherche 1, la précision des poses

Rappel de la première question de recherche :

Q1 Le retour *in situ* augmentera-t-il la précision des poses ?

L'ANOVA sera utilisée afin de vérifier la variance des différentes conditions afin de répondre à la première question de recherche.

Afin d'utiliser une méthode ANOVA, il est d'usage de connaître si l'ensemble de données suit une loi normale. Le test de normalité de Shapiro-Wilk ( $W = 0,66, p = 0,62$ ) ne trouve aucune indication que la normalité est violée, car  $p > 0,05$ . L'ANOVA ( $F_{4,55} = 7,79, p = 4,80 \times 10^{-5}$ ) montre un effet significatif entre les distances des différentes conditions avec  $p < 0,05$ .

Tableau 4.2 Analyse de variance (ANOVA) des distances entre les conditions

Source de la variance	Sommes des carrés des écarts	Degrés de liberté	Variance	F	p-value
Inter-classes	208,36	4	52,09	7,79	$4,80 \times 10^{-5}$
Intra-classe	367,88	55	6,69		
Total	576,24				

L'ANOVA montrant un effet significatif, un test post hoc a été effectué afin de calculer s'il existe une différence significative entre les différentes conditions. Une correction de Holm a été utilisée afin d'ajuster  $p$ .

Les résultats du test post hoc de Holm, tels que présentés au Tableau 4.4, montrent que les moyennes des conditions Marionnette et Fantôme diffèrent significativement de la condition Référence ( $p < 0,005$ ). Les moyennes des conditions Couleur et Flèches ne permettent pas de montrer une différence significative avec la condition de Référence ( $p > 0,05$ ).

Les résultats indiquent que les conditions Marionnette et Fantôme ont eu un effet significativement différent sur la distance par rapport à la condition Référence, tandis que les conditions

Couleur et Flèches n'ont pas eu un effet significativement différent sur la distance par rapport à la condition Référence.

Finalement le facteur de Bayes (représenté par BF10) représente le risque relatif en faveur de l'alternative. Les données présentées par le Tableau 4.5 montrent que le facteur de comparaison entre Marionnette et Référence est de 315:1, ce qui indique une très forte évidence contre l'hypothèse nulle. Le facteur entre Fantôme et Référence est de 77:1, indiquant également une évidence forte contre l'hypothèse nulle. L'interprétation du facteur de Bayes, selon Kass & Raftery (1995) est montrée au Tableau 4.3.

Tableau 4.3 Interprétation du facteur de Bayes selon Kass & Raftery (1995). (Traduction libre)

<b>BF10</b>	<b>Évidence contre <math>H_0</math></b>
1 à 3	Faible
3 à 20	Positive
20 à 150	Forte
>150	Très forte

Tableau 4.4 Analyse post hoc de la distance par condition avec correction Holm

<b>A</b>	<b>B</b>	<b>T</b>	<b>p (corrigé)</b>	<b>BF10</b>	<b>Sig.</b>
Couleur	Fantôme	3,17	$3,10 \times 10^{-2}$	9,50	*
Couleur	Flèches	1,06	0,90	0,56	
Couleur	Marionnette	3,79	$8,00 \times 10^{-3}$	30,48	*
Couleur	Référence	-0,23	0,90	0,38	
Fantôme	Flèches	-2,17	0,20	1,89	
Fantôme	Marionnette	0,89	0,90	0,50	
Fantôme	Référence	-4,26	$2,86 \times 10^{-3}$	77,34	**
Flèches	Marionnette	2,87	$5,34 \times 10^{-2}$	5,62	
Flèches	Référence	-1,52	0,57	0,85	
Marionnette	Référence	-4,95	$5,96 \times 10^{-4}$	315,14	**

L'abréviation **Sig.** est utilisée pour indiquer qu'une valeur p est significative. La nomenclature des astérisques est indiquée au Tableau 4.5.

Tableau 4.5 Signification entre nombre d'astérisques et la valeur p associée

<b>Sigle</b>	<b>Valeur p</b>
(vide)	$p > 0.05$
*	$p < 0.05$
**	$p < 0.005$
***	$p < 0.0005$

#### 4.2.1.3 Question de recherche 2, mémorisation des poses

Rappel de la deuxième question de recherche :

Q2 Le retour *in situ* aidera-t-il à mémoriser les poses plus rapidement ?

Pour évaluer si le retour *in situ* favorise la mémorisation, les participants ont reçu la consigne avant l'expérience de privilégier davantage la mémorisation que la vitesse. Aucune contrainte au niveau de la mémorisation n'a été imposée aux participants durant l'expérience, afin de promouvoir un sentiment de libre arbitre. Les utilisateurs étaient libres d'essayer de se souvenir de la pose à réaliser ou d'utiliser l'aide intégrée (le menu) selon leur préférence.

L'évaluation du facteur de mémorisation a été calculée uniquement sur les essais où les participants ont tenté de se souvenir de la pose à réaliser, sans utiliser le menu.

Les poses qui ont été validées sans l'utilisation du menu ont été regroupées en deux catégories distinctes, les poses réussies et les poses non réussies. Une pose est considérée comme réussie lorsqu'elle correspond à la pose demandée et qui est validée par le participant. Pour connaître si les poses correspondent, la distance entre la pose de la main de l'utilisateur et chaque pose à reproduire est mesurée afin de trouver celle qui a la plus petite distance. Celle qui a la plus petite distance est alors considérée comme celle qui correspond à la pose de l'utilisateur. Les résultats des poses réussies et les poses non réussies sont présentés dans le Tableau 4.6.



Tableau 4.6 Comparaison de l'état des poses après validation sans l'utilisation du menu

Condition	Poses réussies	Poses non réussies
Couleur	108	34
Fantôme	121	9
Flèches	99	40
Marionnette	112	19
Référence	133	13

Les résultats de la moyenne, de l'écart type ainsi que l'intervalle de confiance, pour les observations n'utilisant pas le menu, sont disponibles au Tableau 4.7. L'intervalle de confiance a été calculé en utilisant la méthode *bootstrap*, avec un niveau de confiance de 95 % avec 100 000 rééchantillonnages.

Tableau 4.7 Moyenne et écart type de la distance et de la durée lors de la confirmation de poses sans l'aide du menu

Condition	Distance (cm)			Durée (s)	
	$\bar{x}$	$s$	I.C. à 95%	$\bar{x}$	$s$
Couleur	10,50	4,70	[ 9,75 ; 11,43]	5,75	3,73
Fantôme	9,86	4,40	[ 8,98 ; 10,47]	4,43	2,77
Flèches	10,25	3,63	[ 9,85 ; 11,43]	4,48	3,52
Marionnette	8,04	3,77	[ 7,42 ; 8,84]	5,10	3,42
Référence	12,32	5,56	[ 11,41 ; 13,21]	3,31	1,93

Le test de normalité de Shapiro-Wilk ( $W = 0,94, p = 5,81 \times 10^{-3}$ ) permet de supposer que la normalité est violée, pour  $p < 0.05$ , tandis que le test de variance de Levene quant à lui ( $W = 2,33, p = 6,85 \times 10^{-2}$ ) permet de supposer que les données sont de variance égale pour  $p > 0.05$ .

Le test de normalité étant violé, le test non paramétrique de Kruskal-Wallis ( $H = 20.39$ ,  $p = 4,18 \times 10^{-4}$ ) permet avec  $H$  et  $p < 0.05$ , de supposer qu'il existe une différence significative pour au moins une des paires de conditions.

L'ensemble étant homogène, un test post hoc a été effectué avec une correction de Holm pour ajuster  $p$ . Les résultats de ce test sont présentés au Tableau 4.8.

Tableau 4.8 Analyse post hoc de type Mann-Whitney-Wilcoxon comparant les paires de conditions, avec correction Holm lors d'essai de type mémorisation

<b>A</b>	<b>B</b>	<b>U</b>	<b>p (corrigé)</b>	<b>Sig.</b>
Couleur	Fantôme	91	0,24	
Couleur	Flèches	89	0,52	
Couleur	Marionnette	105	$3,09 \times 10^{-2}$	*
Couleur	Référence	61	0,78	
Fantôme	Flèches	49	0,62	
Fantôme	Marionnette	84	0,52	
Fantôme	Référence	17	$2,55 \times 10^{-2}$	*
Flèches	Marionnette	102	0,17	
Flèches	Référence	29	$9,90 \times 10^{-2}$	
Marionnette	Référence	9	$5,06 \times 10^{-3}$	**

Les résultats du test ont montré que les moyennes des conditions **Marionnette** et **Fantôme** diffèrent significativement de la condition **Référence** ( $p < 0.05$ ). Les moyennes des conditions **Couleur** et **Flèches** ne permettent pas de montrer une différence significative ( $p > 0.05$ ).

Les résultats suggèrent que les conditions **Marionnette** et **Fantôme** ont eu un effet significativement différent sur la distance des gestes par rapport à la condition **Référence** lors des essais basés sur la mémorisation. Les conditions **Couleur** et **Flèches** n'ont pas eu un effet significativement différent par rapport à la condition **Référence**.

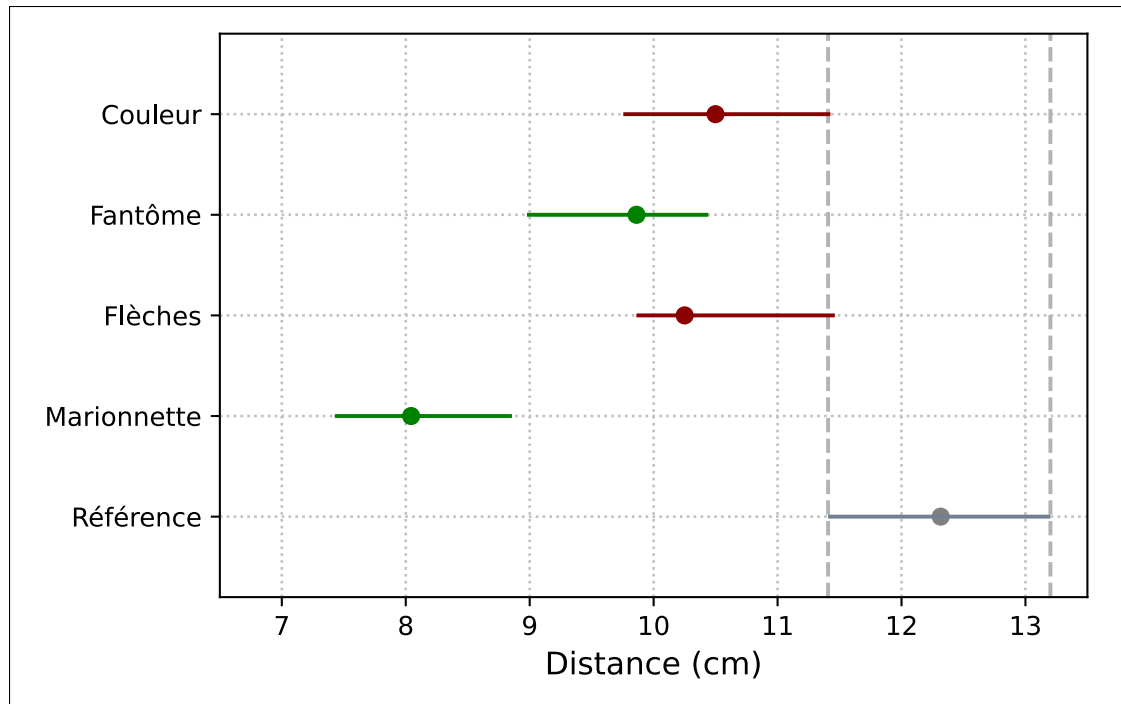


Figure 4.3 Comparaison des conditions avec intervalle de confiance à 95 % lors des essais de type mémorisation

#### 4.2.1.4 Analyse de la difficulté des poses

À la fin de l'expérience en réalité virtuelle, les participants ont été invités à noter leurs perceptions de difficulté pour reproduire les différentes poses du jeu de données. Les poses ont été notées selon quatre niveaux de difficulté, facile, moyen, difficile et impossible lorsque la pose leur semblait non réalisable. Les 12 participants  $\times$  101 poses ont permis d'obtenir un total de 1212 observations.

En regroupant les observations par poses, cela a permis de calculer la moyenne de difficulté par pose. La moyenne globale donne une difficulté de 1,62 avec un écart type de 0,50. La fréquence des poses par niveau de difficulté est montrée au Tableau 4.9.

Tableau 4.9 Évaluation de la difficulté des poses

Niveau de difficulté	Poids de la difficulté	Nombre de poses
Facile	1	669
Moyen	2	363
Difficile	3	154
Impossible	4	26

## 4.2.2 Les résultats de type qualitatifs

### 4.2.2.1 Évaluation de la difficulté perçue des différentes conditions

Les participants ont eu à répondre aux questions suivantes du post-questionnaire :

- Quel était l'effort mental ou intellectuel requis ?
- Quel était l'effort physique requis ?
- Est-ce que l'interface vous a permis d'accomplir votre tâche ?
- Combien de frustration avez-vous ressentie ?

Le Tableau 4.10 présente les résultats de l'analyse du post-questionnaire sur la satisfaction des conditions en utilisant une échelle de Likert où les symboles  $\bar{x}$  et  $s$  sont utilisé pour représenter, respectivement, la moyenne et l'écart type. L'échelle de Likert est graduée de 1 à 7 et comporte les niveaux suivants : {Très faible, Faible, Plutôt faible, Neutre, Plutôt élevé, Élevé, Très élevé}.

Tableau 4.10 Évaluation de la satisfaction des participants des conditions lors de l'expérience

Condition	Effort Mental		Effort Physique		Accomplir Tâche		Frustration	
	$\bar{x}$	<i>s</i>	$\bar{x}$	<i>s</i>	$\bar{x}$	<i>s</i>	$\bar{x}$	<i>s</i>
Couleur	4,67	1,30	4,00	1,86	4,17	1,47	4,08	1,83
Fantôme	2,83	1,19	3,67	1,56	5,83	1,27	2,17	1,64
Flèches	3,50	1,31	3,50	1,73	5,58	1,00	2,25	1,42
Marionnette	3,08	1,16	3,17	1,53	5,83	0,83	2,00	1,13
Référence	5,58	1,44	3,58	1,38	3,83	2,04	3,25	2,01

Les résultats indiquent que la condition **Couleur** a été évaluée à 4,23, ce qui correspond à un avis approximativement neutre.

Les conditions **Fantôme**, **Flèches** et **Marionnette** ont été évalués ayant un niveau d'effort perçu, tant mental que physique, plutôt faible à neutre, tandis que le sentiment d'avoir bien accompli la tâche était plutôt élevé à élevé. De plus, la frustration ressentie était faible pour ces trois conditions.

La condition **Référence** a été évaluée comme ayant un niveau d'effort mental de plutôt élevé à élevé, tandis que l'effort physique était plutôt faible à neutre. Les participants ont rapporté un sentiment de pouvoir bien accomplir la tâche faible à neutre et une faible sensation de frustration.

#### 4.2.2.1.1 Couleur

Les résultats de l'analyse du questionnaire par rapport à la condition **Couleur**, présentés à la Figure 4.4, indiquent que l'ensemble des participants ont perçu cette condition en tant que légèrement neutre avec 58 % trouvant que l'effort mental était de plutôt élevé à élevé.

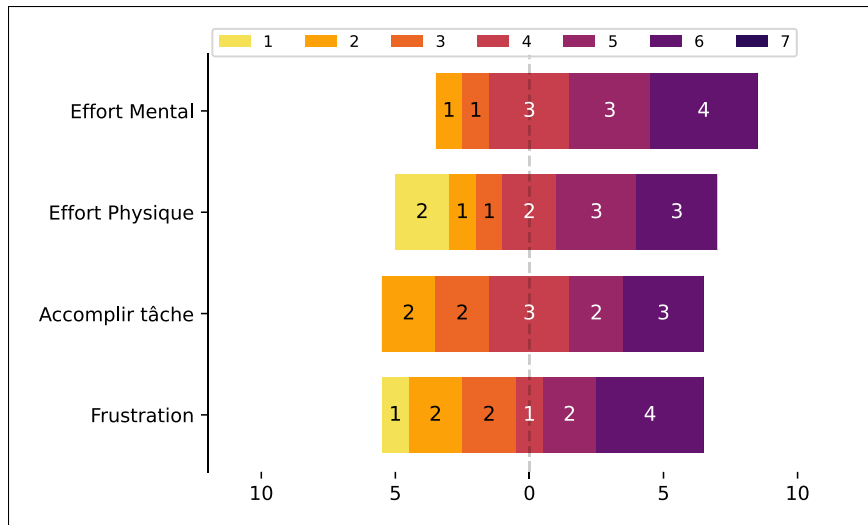


Figure 4.4 Avis des participants pour la condition Couleur

#### 4.2.2.1.2 Fantôme

Les résultats de la condition Fantôme disponibles à la Figure 4.5 montre que 50 % des participants ont perçu l'effort mental comme étant très faible à faible, 92 % ont trouvé que la condition Fantôme a aidé à accomplir la tâche de façon plutôt élevée à très élevée, ainsi que 92 % ont ressenti très faiblement à faiblement de la frustration.

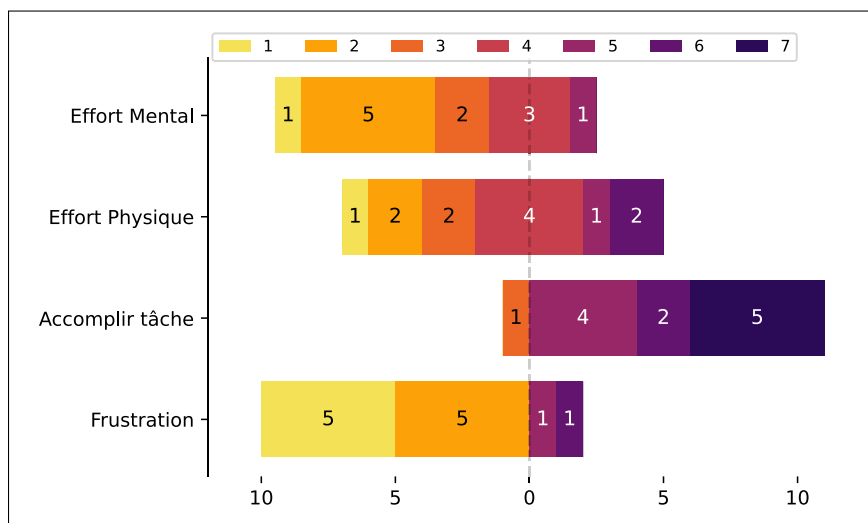


Figure 4.5 Avis des participants pour la condition Fantôme

#### 4.2.2.1.3 Flèches

La condition Flèches, telle que présentée à la Figure 4.6, montre une perception neutre de l'effort. De plus, 83 % des participants ont trouvé que la condition les ont aidés à accomplir la tâche, de façon plutôt élevée à très élevée. La frustration était très faible à plutôt faible pour 83 % des participants.

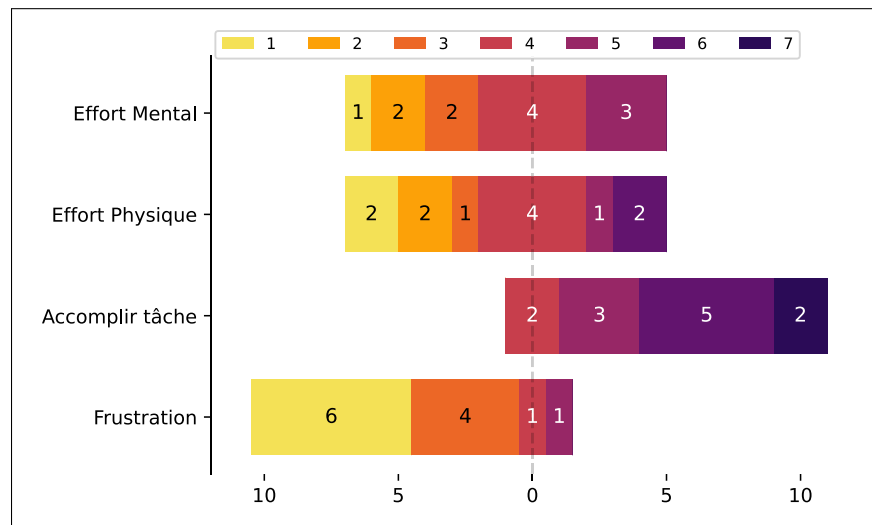


Figure 4.6 Avis des participants pour la condition Flèches

#### 4.2.2.1.4 Marionnette

La Figure 4.7 montre la condition Marionnette dont 58 % des participants ont indiqué que l'effort nécessaire perçu était très faible à plutôt faible. Tous les participants ont trouvé que la condition les ont aidés à accomplir la tâche, allant de plutôt élevée à très élevée. Une frustration allant de très faible à faible a été ressentie pour 75 % des participants.

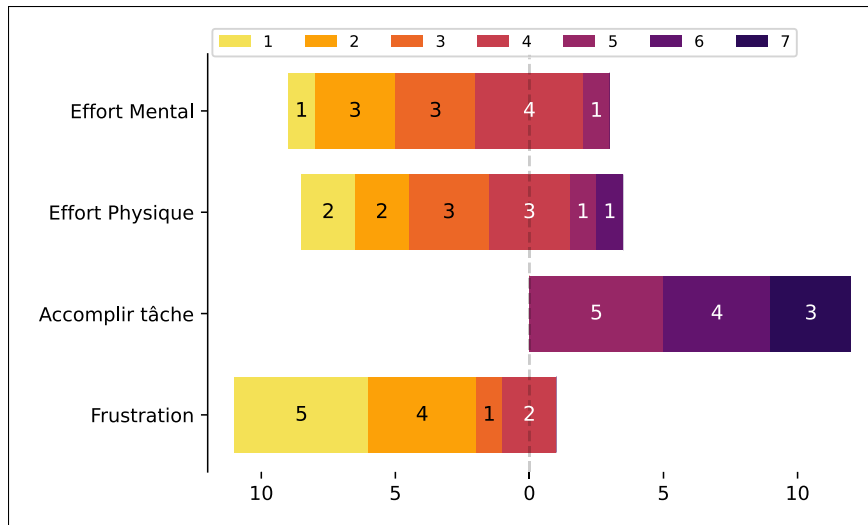


Figure 4.7 Avis des participants pour la condition Marionnette

#### 4.2.2.1.5 Référence

Les résultats de l'analyse de la condition Référence montrent à la Figure 4.8 que 67 % des participants ont perçue que l'effort mental était entre élevé et très élevé. L'effort physique et l'aide à accomplir la tâche étaient plutôt neutres et 67 % ont ressenti une frustration très faible à faible lors de l'utilisation de cette condition.

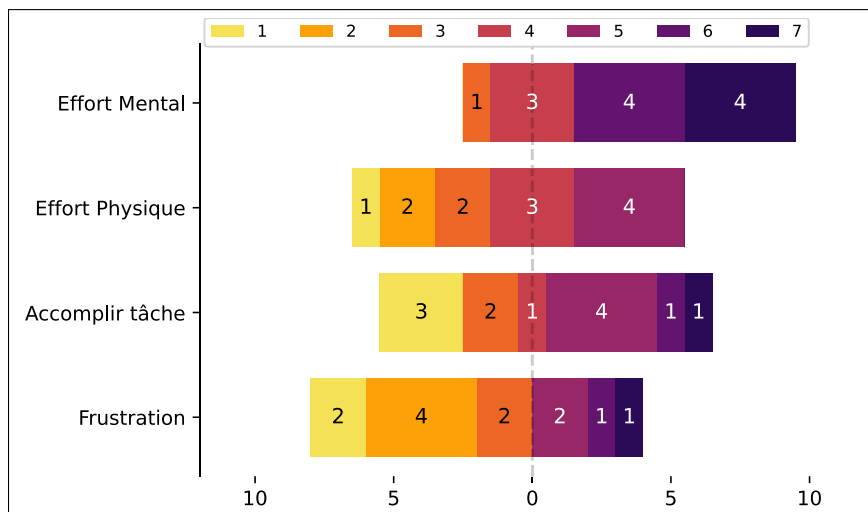


Figure 4.8 Avis des participants pour la condition Référence



#### 4.2.2.2 Préférence des conditions

Le Tableau 4.11 présente les résultats venant du post-questionnaire sur la condition préférée et la moins appréciée. Une seconde question concernant les suggestions automatiques a permis de trouver que 83 % (10/12) l'ont trouvée utile.

Tableau 4.11 Préférence des participants concernant les différentes conditions

Condition	Préférée	Moins appréciée
Couleur	1	4
Fantôme	6	3
Flèches	1	1
Marionnette	4	0
Référence	0	4

#### 4.2.2.3 Sommaire des préférences des conditions

Les participants ont été invités à répondre à la question ouverte du questionnaire : « Quelles sont les raisons que vous avez préféré certaines conditions plus ou moins que d'autres ? » Un sommaire des réponses se trouve au Tableau 4.12. L'opinion des participants a été regroupée en différentes catégories et leurs avis ont été comptabilisés en relation d'un avis similaire ou contraire à la catégorie. Par exemple si une personne a trouvé qu'une des conditions était facile d'utilisation, cela ajoute +1 à la catégorie *Facilite l'utilisation*, si une personne a écrit que la condition était difficile d'utilisation, cela donne -1 à cette catégorie.

Tableau 4.12 Sommaire des raisons des préférences des participants.  
Les nombres positifs et négatifs indiquent respectivement le nombre de participants en accord ou en désaccord avec chacune des catégories

Catégories	Couleur	Fantôme	Flèches	Marionnette	Référence
Facilite l'utilisation	2 / -1	1 / -2	2	1	-2
Facilite la compréhension	1 / -2	2 / -1	-1		
Montre la correction	1 / -1	2	1	1	
Moins d'effort demandé		4	-1	2	1
Intuitif, rapide ou naturel d'utilisation	1 / -1	4	1	2	

#### 4.2.2.3.1 Stratégies de mémorisation

Les participants ont été invités à répondre à la question ouverte :

*Avez-vous utilisé des stratégies de mémorisation pour vous aider à vous rappeler des gestes ? (Mnémotechniques, compter sur les doigts, etc.).*

Les participants ont répondu à l'aide du post-questionnaire sur les stratégies qu'ils ont utilisées pour se souvenir de l'association entre les poses de la main et des commandes. Les différentes conditions n'ont pas été prises en compte pour cette question. Les résultats ont été regroupés en trois grandes catégories, qui sont présentées dans le Tableau 4.13.

La première stratégie identifiée est la *répétition des poses*, c'est-à-dire le fait de répéter et de reproduire les mêmes poses de façon mécanique. Deux participants ont mentionné l'utilisation de cette stratégie.

La deuxième stratégie est l'*association imaginaire*, qui consiste à créer des associations mentales ou des modèles mentaux en relation avec les poses ou les commandes en se basant sur des souvenirs. Deux participants ont associé leurs souvenirs utilisant des mots populaires et deux

ont fait appel aux souvenirs liés à des formes physiques, tels que des formes, des symboles ou des animaux.

La troisième stratégie identifiée est la *mémorisation spatiale*. Cette stratégie consiste en une observation des différentes poses pour en tirer des stratégies liées au positionnement des poses. Un participant a pris en compte la distance entre les doigts, deux participants comptaient le nombre de doigts levés et un observait les différences entre les poses.

Tableau 4.13 Stratégies de mémorisation

<b>Stratégies</b>	<b>Nombre</b>
Répétition des poses	2
Association imaginaire	
Mots populaires	2
Formes, symboles, animaux	2
Mémorisation spatiale	
Distance entre les doigts	1
Nombre de doigts levé	2
Différence d'une pose à l'autre	1

### 4.2.3 Discussion des résultats

Il a été intéressant d'observer que le temps pris pour confirmer une pose a été en moyenne de 10 secondes, sans qu'aucune contrainte de temps ne soit imposée aux utilisateurs pendant l'expérience. Les participants ont jugé du temps nécessaire par eux-mêmes. La mesure de la distance quant à elle a permis de démontrer deux conditions étant plus bas dans l'intervalle de confiance de la condition Référence, soit Fantôme et Marionnette.

Par rapport à la question 1, les mêmes deux conditions, soit Fantôme et Marionnette ont démontré un effet significatif par rapport à la distance en relation à la condition Référence.

En lien avec la question 2, il est possible de constater pour les essais réalisés sans l'utilisation du menu, c'est-à-dire où les participants devaient se remémorer de la pose à reproduire, les

conditions Fantôme et Marionnette ont démontré un effet significatif par rapport à la distance en relation à la condition Référence.

#### 4.2.3.1 Points à améliorer, première expérience

Après avoir analysé les résultats et les commentaires des participants, plusieurs possibilités d'amélioration ont été ressorties :

1. **Déséquilibre dans la fréquence d'utilisation des poses :** L'analyse des résultats a révélé une disparité dans la fréquence d'utilisation des différentes poses durant l'expérience. Certaines poses ont été demandées plus fréquemment que d'autres, tandis que certaines n'ont pas été demandées du tout. Il est recommandé de s'assurer d'une probabilité statistique équivalente lors de la génération aléatoire de la liste de poses à reproduire. Une alternative serait de réduire le nombre de poses dans le jeu de données au nombre de pose requise pendant l'expérience, ce qui permettra de garantir une utilisation uniforme de toutes les poses pendant une expérience.
2. **Répartition inégale de la difficulté des poses :** Une répartition inégale de la difficulté des poses entre les différentes conditions a été observée. Certains participants ont mentionné avoir perçu une difficulté plus importante pour certains blocs de poses et que d'autres blocs n'avaient que des poses simples à reproduire.
3. **Conception d'une expérience portant sur la mémorisation :** Une expérience portant sur la mémorisation, implique souvent les étapes d'entraînement, de rétention et de transfert (training, retention, and transfer) (Anderson & Bischof, 2013). S'assurer que de chacune de ces étapes soient réalisées est important à tenir compte lors de l'élaboration de l'expérience.
4. **Dépendance excessive au menu :** Certains participants ont recouru systématiquement au menu sans tenter de se rappeler des poses. L'introduction des renforcements négatifs pour limiter ce comportement pourrait être bénéfique afin d'encourager les participants à se souvenir des poses plutôt que d'avoir à utiliser le menu d'aide.
5. **Confusion liée au matériel et à la compréhension des conditions :** Lors de l'expérience, certains participants ont éprouvé de la difficulté à comprendre le fonctionnement, soit de la

manette, de certaines conditions, soit des deux en même temps. Afin d'éviter les confusions et les erreurs de manipulation, il serait judicieux de s'assurer d'une bonne compréhension de la part des utilisateurs avant le début de l'expérience en réalité virtuelle.

6. **Charge cognitive élevée :** Le nombre de conditions testées lors de l'expérience, la complexité unique de chaque condition, combinée à la nécessité pour les participants d'apprendre leur fonctionnement, de même que la manipulation précise des muscles de leur main afin de placer simultanément chaque doigt à une position précise, peut avoir entraîné une charge cognitive élevée, limitant la capacité des participants à apprendre efficacement toutes les conditions. Il serait pertinent de limiter le nombre de conditions testées au cours d'une expérience en réalité virtuelle pour favoriser un apprentissage plus efficace.

Il serait intéressant de mener une étude en prenant en compte les points mentionnés ci-haut afin d'en examiner davantage les effets des retours *in situ* sur la mémorisation et la reproduction de poses de la main en réalité virtuelle.

#### 4.2.4 Résumé des résultats

Cette expérience de type expérimentale a eu pour but d'examiner les effets et l'usage de différents retours visuels de type *in situ* et égocentrique, lors de l'apprentissage de gestes de la main en réalité virtuelle. Les résultats ont démontré que certaines conditions de retours visuels ont réduit la distance pour effectuer un geste de façon significative en les comparant avec une condition de référence.

Afin de répondre à la première question de recherche, soit :

Q1 Le retour *in situ* augmentera-t-il la précision des poses ?

Il a été possible de trouver que oui, la distance est diminuée significativement en utilisant des retours visuels de type *in situ*, par l'utilisation des conditions Fantôme ainsi que Marionnette.

Afin de répondre à la deuxième question de recherche, soit :

Q2 Le retour *in situ* aidera-t-il à la mémorisation des gestes ?

Il a été possible de trouver que oui, en se souvenant du geste à réaliser, la distance est diminuée significativement en utilisant des retours visuels de type *in situ* comparativement à une condition de référence. Les deux conditions qui se sont démarquées sont *Fantôme* ainsi que *Marionnette*.

Q3 Dans quelle condition le retour *in situ* est-il le plus efficace selon la précision des gestes et la mémorisation ?

La condition *Marionnette* présente de meilleurs résultats par rapport à la précision et mémorisation. De plus, cette condition a été perçue comme étant celle nécessitant le moins d'effort physique et entraînant le moins de frustration.

### 4.3 Deuxième expérience

La conception de cette expérience vise à s'appuyer sur les résultats de l'étude précédente en prenant en compte les points qui ont été soulevés. Dans le but d'améliorer la puissance statistique, seule une condition avec retour *in situ* a été conservée : *Marionnette*. La condition de référence, *Référence*, a été maintenue afin de valider les résultats.

L'expérience a été conçue dans le but de pouvoir répondre aux hypothèses suivantes :

H1 La condition *Marionnette* aidera à la précision des poses en diminuant la distance.

H2 Le retour *in situ* aidera à la mémorisation des poses.

La difficulté des gestes est maintenant soigneusement contrôlée afin d'en maintenir une cohérence dans la complexité lors de l'expérience. L'étude vise également à approfondir la compréhension du rôle de la visualisation lors de l'apprentissage d'un geste en réalité virtuelle, en utilisant le retour visuel interactif *in situ* ainsi que le système de suggestions automatiques.

### **4.3.1 Tâche expérimentale**

La tâche expérimentale consiste à reproduire des poses à l'aide de la main droite en réalité virtuelle. Les utilisateurs commencent en appuyant sur la gâchette de la manette qu'ils tiennent avec leur main gauche. Un écran demande de reproduire différents mots et les utilisateurs peuvent utiliser le bouton de la manette pour afficher le menu d'aide pour connaître les mots associés aux poses à reproduire. Les utilisateurs doivent reproduire la pose avec leur main droite et la valider avec la gâchette de la manette.

La différence entre la première expérience consiste à l'évaluation de la difficulté des poses après l'expérience en réalité virtuelle qui n'a pas eu lieu.

### **4.3.2 Conditions**

Deux conditions ont été testées lors du déroulement de cette expérience :

1. Marionnette ;
2. Référence.

La condition *Marionnette* permet de visualiser un retour interactif *in situ* permettant l'apprentissage de poses. La condition *Référence* sert en tant que condition de référence.

### **4.3.3 Ensemble de données**

L'ensemble initial des 101 poses créé lors de la première expérience a été utilisé pour créer un sous-ensemble plus restreint de poses.

En utilisant 12 poses par conditions et deux conditions, un nouvel ensemble de 24 poses a été créé dans le but de réduire la variabilité de la difficulté à travers les poses. De plus, cette réduction du nombre d'éléments permet d'offrir à chaque participant le même ensemble de poses à réaliser.

Le sous-ensemble de poses a été choisi de façon semi-aléatoirement tout en respectant des contraintes de difficulté facile (entre 1.0 et 1.33) et moyenne (1.5 et 2.0). Ces critères ont été utilisés afin d'obtenir une distribution plus représentative des données qui est présentée dans le Tableau 4.9 de la Section 4.2.1.4.

#### 4.3.4 Design expérimental

Les deux conditions qui ont été étudiées, {Référence, Marionnette}, ont été précédées d'une phase de réchauffement. Les données provenant de la phase de réchauffement n'ont pas été prises en compte lors de l'analyse statistique. Les deux phases, {réchauffement, principale}, sont composées des éléments suivants :

1. la phase de **réchauffement**, comprend 2 poses  $\times$  2 répétitions  $\times$  1 bloc,
2. la phase **principale**, comprend 4 poses  $\times$  2 répétitions  $\times$  4 blocs.

Les conditions Référence ainsi que Marionnette ont été répétées deux fois de façon aléatoire lors de l'expérience.

Pour chaque utilisateur, l'ordre d'apparition des poses est trié de manière semi-aléatoire en respectant deux contraintes de sélection. La première contrainte est de respecter une distance minimale de 15 cm entre chaque pose, expliquée en détail dans la section 4.1.4. La deuxième contrainte est d'avoir un niveau de difficulté uniforme pour chaque condition.

La moyenne de l'ensemble des 24 poses choisies pour l'expérience donne une difficulté de  $\bar{x} \approx 1,40$ . Pour chaque condition, le sous-ensemble de poses doit respecter la contrainte d'être à  $\pm 5\%$  de la difficulté moyenne multipliée par le nombre de poses. Par exemple, pour un ensemble contenant  $n = 4$  poses, la valeur doit être entre  $[4 \cdot 1,40 \cdot 0,95; 4 \cdot 1,40 \cdot 1,05]$  ou  $[n \cdot \bar{x} \cdot 0,95; n \cdot \bar{x} \cdot 1,05]$  donnant un intervalle de  $[5,32; 5,88]$  cm.

Si un sous-ensemble ne respecte pas la contrainte de difficulté, la sélection sera recommencée pour la condition. Dans l'impossibilité de compléter le sous-ensemble, par exemple en étant la dernière condition à être remplie, la sélection des poses pour l'ensemble des conditions



sera recommencée. Cette validation des critères prend en moyenne 24,44 ms au démarrage de l'application.

Le délai avant l'activation des suggestions automatiques diminue de 1000 ms à 500 ms.

L'ouverture du menu passe d'un délai de 2500 ms à un délai proportionnel à la progression dans une condition au nombre d'ouvertures du menu en ajoutant un délai de 300 ms supplémentaires. Le temps d'ouverture du menu utilise la formule :  $(2500 + 300 \cdot (b_i + m_i))$  ms, où  $b_i$  est le numéro du bloc en cours et  $m_i$  est le nombre d'ouvertures du menu à l'intérieur d'une condition. L'ajout du délai a pour but de dissuader une dépendance à l'utilisation du menu en augmentant la période d'attente après chaque utilisation.

#### 4.3.5 Protocole expérimental

L'objectif de cette deuxième expérience est de connaître à quel point la rétroaction visuelle Marionnette aide à l'apprentissage des poses de la main et avec quelle précision.

Le matériel utilisé lors de l'expérience :

- le casque de réalité virtuelle Oculus Quest 2,
- le contrôleur Zero 2 de 8BitDo®.

La procédure utilisée :

##### 1. Introduction :

- Expliquer aux participants des objectifs de l'étude, les détails de l'expérience, les consignes de sécurité, les données qui seront récoltées et leurs utilisations pour fin de recherche.
- Recueillir le formulaire de consentement des participants pour leur participation à l'étude.
- Recueillir le préquestionnaire après avoir été rempli par les participants.

##### 2. Prise en main :

- Fournir une explication de l'interface et de son utilisation.

- Permettre aux participants de valider leurs compréhensions pour la réalisation d'une pose de la main à l'aide de captures d'écran sur un document imprimé.
- Permettre aux participants de s'habituer à l'utilisation du contrôleur avant de commencer l'expérience.
- Fournir une explication quant à l'usage de l'environnement virtuel, plus particulièrement l'affichage du menu latéral (menu hamburger) qui s'affiche sur la main.

### 3. Tâches expérimentales :

- Afficher le nom d'une commande à réaliser.
- À l'aide d'un menu, présenter aux participants plusieurs poses de la main qui ont chacun le nom d'une commande associée
- Laisser le participant valider manuellement lorsqu'il pense avoir reproduit avec succès la pose demandée.
- Effectuer plusieurs répétitions de chaque pose de la main.

### 4. Questionnaires :

- Après avoir terminé les tâches expérimentales, demander aux participants de remplir la suite du questionnaire sur leurs préférences, la raison de la préférence, les stratégies de mémorisation, ainsi que leurs commentaires généraux.

Le matériel utilisé lors de l'expérience sera nettoyé à l'aide de lingettes désinfectantes avant et après chaque participant.

#### **4.3.6 Participants**

Le recrutement a été effectué à l'aide de communication par courriel à des groupes d'étudiants de l'ÉTS. Cette expérience était ouverte à tous et s'est déroulée dans un laboratoire de l'ÉTS. La participation s'est réalisée sur une base volontaire et 40\$ a été remis à chaque participant.

Les conditions pour être admissible étaient : ne pas être facilement sujet au mal des transports ou au cybermalaise, ne pas porter des lunettes dépassant 142 mm de largeur ou 50 mm de hauteur.

Vingt participants ont été recrutés pour l'étude, dix hommes et dix femmes. Tous les participants étaient tous droitiers et utilisaient la souris avec la main droite.

L'âge moyen des participants était de 22,55 ans, variant de 20 à 39 ans et 3,99 d'écart type. Il n'y avait pas de participant daltonien. La distance interpupillaire moyenne était de 59,85 mm, variant entre 55 à 70 mm et 3,65 d'écart type.

Treize participants ont répondu avoir déjà fait l'essai d'un casque de réalité virtuelle, dont huit dans le cadre de loisirs, quatre lors d'expériences et cinq pour du développement logiciel.

Quatorze participants ont répondu avoir de l'expérience dans l'usage d'applications 3D, sept pour la modélisation 3D, six dans le cadre lucratif et dix dans le cadre de développement d'applications. Huit participants ont répondu pratiquer différentes activités demandant de la dextérité manuelle, notamment la musique et le dessin.

#### **4.4 Résultats de la deuxième expérience**

Les résultats de cette deuxième expérience, qui s'est déroulée du 19 septembre 2022 au 30 septembre 2022, sont présentés dans les sections suivantes.

Les résultats quantitatifs sont présentés à la Section 4.4.1, tandis que les résultats qualitatifs à la Section 4.4.2. Une discussion des résultats se trouve à la Section 4.4.3, et un résumé récapitulatif se trouve à la Section 4.4.4.

##### **4.4.1 Les résultats quantitatifs**

Les résultats quantitatifs proviennent de l'analyse des mesures collectées de manière automatique pendant l'expérience. Ces mesures objectives permettent d'en apprendre plus sur le comportement des utilisateurs lors du déroulement de l'expérience, sans que les utilisateurs aient conscience des données récoltées, minimisant le biais de leur propre perception de leurs performances pendant l'expérience.

L'analyse des résultats est présentée en filtrant les essais de type réchauffement. De plus, une agrégation a été effectuée au niveau des utilisateurs et des conditions.

#### 4.4.1.1 Vue d'ensemble des variables

Au total, les participants ont confirmé 2880 poses, dont 320 durant la phase de réchauffement, donnant un total de 2560 observations.

La durée moyenne des séances avec les participants a été de 1 h 15 min, incluant l'expérience en réalité virtuelle d'environ 33 min 48 s.

Les résultats, tels que présentés au Tableau 4.14, montre que la distance moyenne pour la condition **Marionnette** est de 7,28 cm avec un écart type de 5,03 cm. La condition **Référence** a comme moyenne 11,80 cm avec un écart type de 6,49 cm.

Les intervalles de confiance mesurant les distances des différentes conditions ont été calculés en utilisant la technique *bootstrap* avec un  $\alpha$  de 5 %, donnant un niveau de confiance de 95 %. Un échantillonnage avec 10 000 simulations a été utilisé avec la méthode de correction *BCa*.

Le nombre d'erreurs, représenté par **Err.** indique le nombre de confirmations des poses qui ne correspondait pas aux poses demandées, le nombre de fois que le menu a été utilisé est indiqué par la colonne **Menu** et le nombre de déclenchements des suggestions automatiques est indiqué par **S.A.**

Tableau 4.14 Sommaires des statistiques descriptives des variables les plus représentatives lors l'expérience 2

Condition	Distance (cm)			Durée (s)		Err.	Menu	S.A.
	$\bar{x}$	$s$	I.C. à 95%	$\bar{x}$	$s$	$\Sigma$	$\Sigma$	$\Sigma$
Marionnette	7,28	5,03	[ 6,43 ; 8,18]	9,80	8,91	35	563	1178
Référence	11,80	6,49	[ 10,96 ; 12,62]	6,32	6,52	111	583	

La Figure 4.10 représente les intervalles de confiance des différentes conditions. L'intervalle de la condition Référence est montré en pointillé gris, les conditions qui sont dans le même intervalle sont en rouge et ceux n'en faisant pas partie sont en vert.

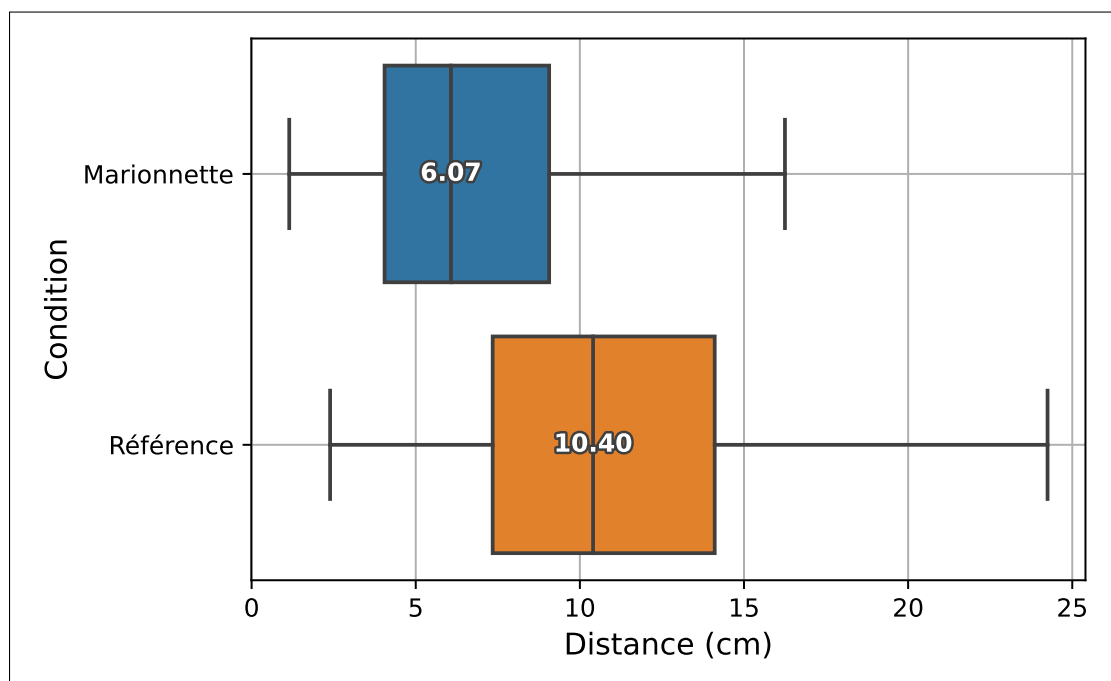


Figure 4.9 Comparaison des mesures de distances de la condition Marionnette et Référence à l'aide de deux diagrammes en boîte à moustaches

#### 4.4.1.2 Hypothèse 1, la précision des poses

Un rappel de l'hypothèse 1 :

H1 Le retour *in situ* aidera à la précision des gestes en diminuant la distance.

Le test de normalité de Shapiro-Wilk ( $W = 0.98$ ,  $p = 0.64$ ) ne trouve aucune indication que la normalité est violée, car  $p > 0,05$ . Le test de variance de Levene quant à lui ( $W = 0.02$ ,  $p = 0.88$ ) permet de laisser supposer que les données sont de variance égale, car  $p > 0,05$ .

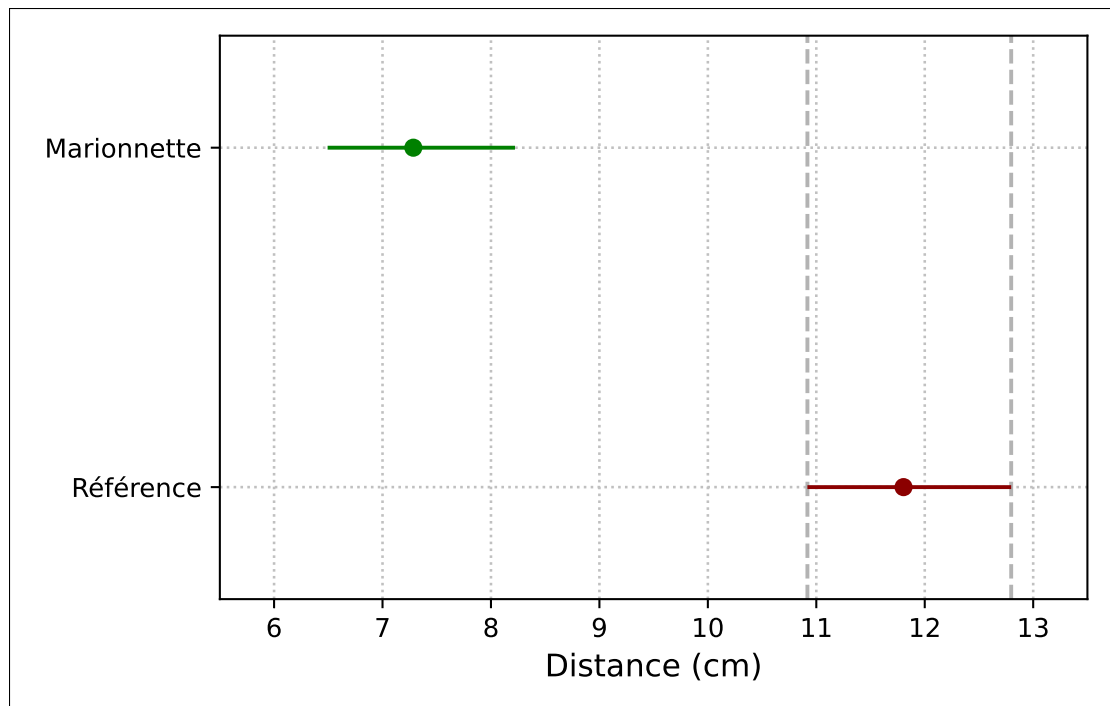


Figure 4.10 Comparaison de la distance avec intervalle de confiance à 95 % des conditions Marionnette et Référence

L'ANOVA ( $F_{1,38} = 50,64$ ,  $p < 0,001$ ) montre un effet significatif entre la distance de la condition Marionnette et la condition Référence avec  $p < 0,05$ .

Tableau 4.15 Tableau d'analyse de variance (ANOVA) des distances entre les conditions Marionnette et Référence pour la deuxième expérience

Source de la variance	Sommes des carrés des écarts	Degrés de liberté	Variance	F	p-value
Inter-classes	204,32	1	204,32	50,64	$1,71 \times 10^{-8}$
Intra-classe	153,32	38	4,03		
Total	357,64				

Le Tableau 4.16 montre le résultat du calcul du coefficient de Pearson entre la distance des gestes et la durée avant confirmation. La valeur  $r = -0.52$  indique une corrélation négative entre la distance et le temps avec un  $p < 0.05$ .

Tableau 4.16 Coefficient de Pearson entre la distance et la durée

Condition	méthode	n	r	CI95%	p-val	BF10	power
Marionnette	pearson	20	-0,52	[-0,78 ; -0,11]	0,02	3,80	0,69
Référence	pearson	20	0,05	[-0,40 ; 0,48]	0,83	0,28	0,06

La Figure 4.11 présente la moyenne par utilisateurs de la distance des poses ainsi que la durée en seconde avant la validation.

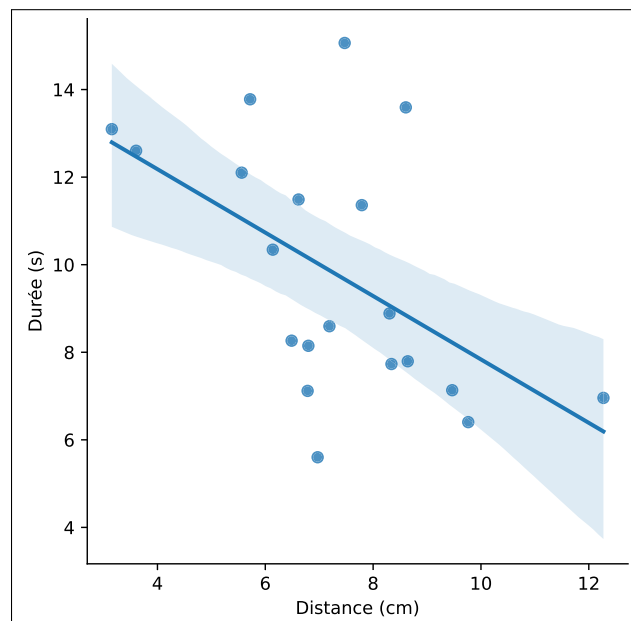


Figure 4.11 Comparaison de la distance des poses et la durée avant la validation pour la condition Marionnette

#### 4.4.1.3 Hypothèse 2, la mémorisation des poses

La deuxième hypothèse est la suivante :

H2 Le retour *in situ* aidera à la mémorisation des poses.

Le Tableau 4.17 montre une vue d'ensemble des résultats montrant par conditions et par blocs la distance des poses réalisées ainsi que le temps avant la validation de l'essai.

Le Tableau 4.18 montre le nombre d'erreurs de validation, le nombre d'essais où le menu a été utilisé, le nombre de sélections de poses qui ont été utilisées dans le menu, le nombre d'essais où les suggestions automatiques ont été utilisées ainsi que le nombre de propositions de poses qui ont été affichées aux utilisateurs.

Tableau 4.17 Résultat de la distance des gestes et de la durée de validation par conditions et blocs

Conditions	Blocs	Distance (cm)			Durée (s)		
		$\bar{x}$	$s$	I.C. à 95%	$\bar{x}$	$s$	I.C. à 95%
Marionnette	0	7,37	4,81	[ 6,36; 8,58]	14,21	12,15	[ 12,74; 17,10]
	1	7,53	5,15	[ 6,55; 8,51]	9,41	7,09	[ 8,31; 10,62]
	2	7,18	4,89	[ 6,31; 8,33]	8,20	7,05	[ 6,83; 9,88]
	3	7,06	5,26	[ 6,18; 7,94]	7,39	6,54	[ 6,23; 8,67]
Référence	0	11,94	6,80	[ 11,07; 12,92]	9,66	9,76	[ 8,72; 11,07]
	1	12,03	6,51	[ 11,02; 13,04]	6,19	4,69	[ 5,49; 7,09]
	2	11,92	6,61	[ 10,95; 12,85]	4,80	3,98	[ 4,21; 5,58]
	3	11,33	6,04	[ 10,50; 12,26]	4,64	4,58	[ 4,06; 5,58]



Tableau 4.18 Sommaire du nombre d'erreurs, l'utilisation du menu ainsi que les suggestions automatiques (S.A.) par conditions et blocs

Conditions	Blocs	Erreurs	Activation du menu	Sélection avec menu	Essais avec S.A.	Affichage total des S.A.
		$\Sigma$	$\Sigma$	$\Sigma$	$\Sigma$	$\Sigma$
Marionnette	0	11	214	669	295	526
	1	8	107	307	292	538
	2	9	59	169	291	509
	3	7	49	134	300	523
Référence	0	31	216	209	-	-
	1	37	127	103	-	-
	2	25	77	61	-	-
	3	18	53	45	-	-

#### 4.4.1.4 Suggestions automatiques

Le Tableau 4.19 présente les tentatives de suggestions automatiques en rapport à la commande demandée avant la validation de la pose. La valeur « Vrai » représente que la suggestion automatique qui a été activée par le participant est celle correspondante à la pose demandée. La valeur « Faux » représente que la suggestion automatique qui a été activée par le participant ne correspond pas à la pose demandée.

Une suite telle que {Faux, Faux, Vrai} indique, lors d'un même essai, que l'utilisateur a activé à trois reprises la suggestion automatique où les deux premières suggestions ne correspondaient pas et que la troisième correspondait à la commande demandée à reproduire.

Parmi les 1280 poses réalisées utilisant la condition *Marionnette*, l'utilisation de la fonctionnalité de suggestions automatiques a été activé pour 1234 poses, ce qui représente un taux d'utilisation de 96,41 %.

Le nombre de suggestions automatiques qui ont été affichées aux participants totalise 2096 suggestions, soit un taux d'utilisation de 163,75 % par rapport aux 1280 poses réalisées.

Tableau 4.19 Liste des suites de suggestion automatique avant leurs validations, les fréquences de moins de 10 ne sont pas montrées

Liste des suites des suggestions automatiques avant validation d'un essai	Fréquences
Faux, Vrai	581
Vrai	495
Faux, Faux, Vrai	61
Faux	36
Faux, Faux	14
Faux, Faux, Faux, Vrai	12
Faux, Vrai, Faux, Vrai	12

La Tableau 4.20 présente le résultat, par bloc de la distance en centimètres et de la durée de la validation lors de l'utilisation des suggestions automatiques en seconde. La moyenne ( $\bar{x}$ ), l'écart type (s), l'erreur type ( $\sigma_{\bar{x}}$ ) ainsi que la médiane (**Med**) sont présentés pour la distance ainsi que la durée.

Tableau 4.20 Distance et temps avec l'utilisation des suggestions

Bloc	Distance (cm)					Durée (s)			
	n	$\bar{x}$	s	$\sigma_{\bar{x}}$	Med	$\bar{x}$	s	$\sigma_{\bar{x}}$	Med
0	526	7,72	2,69	0,12	7,98	5,81	5,14	0,22	4,44
1	538	7,94	2,62	0,11	8,12	4,38	4,31	0,19	2,85
2	509	7,61	2,65	0,12	7,91	3,91	3,66	0,16	2,70
3	523	7,90	2,71	0,12	8,12	3,49	3,78	0,17	2,32

#### 4.4.2 Les résultats de type qualitatifs

Ces résultats proviennent du questionnaire dont les participants ont rempli au début et à la fin de l'expérience. Ces données subjectives permettent de comprendre ce que les participants ont perçu lors de l'expérience.

#### 4.4.2.1 Évaluation de la difficulté perçue des différentes conditions

Le Tableau 4.21 montre le résultat de l'évaluation de la satisfaction des deux conditions. Le symbole  $\bar{x}$  est utilisé pour la moyenne et  $s$  pour l'écart type. Les participants ont répondu entre 1 et 7 pour respectivement Très faible et Très élevé. La gradation de l'échelle de Likert pour représenter les nombres de 1 à 7 est : {Très faible, Faible, Plutôt faible, Neutre, Plutôt élevé, Élevé, Très élevé}.

Les questions venant du post-questionnaire sont les suivantes :

- Quel était l'effort mental ou intellectuel requis ?
- Quel était l'effort physique requis ?
- Est-ce que l'interface vous a permis d'accomplir votre tâche ?
- Combien de frustration avez-vous ressentie ?

Tableau 4.21 Évaluation de la satisfaction des participants des différentes conditions lors de l'expérience

Condition	Effort Mental		Effort Physique		Accomplir tâche		Frustration	
	$\bar{x}$	$s$	$\bar{x}$	$s$	$\bar{x}$	$s$	$\bar{x}$	$s$
Marionnette	3,35	1,35	4,8	1,40	6,30	0,66	3,95	1,54
Référence	4,40	1,43	3,65	1,23	5,40	1,19	2,80	1,54

##### 4.4.2.1.1 Marionnette

Le résultat de l'analyse du questionnaire sur la charge cognitive pour la condition **Marionnette**, présenté sous forme de fréquence des participants par choix de difficulté, est présenté à la Figure 4.12.

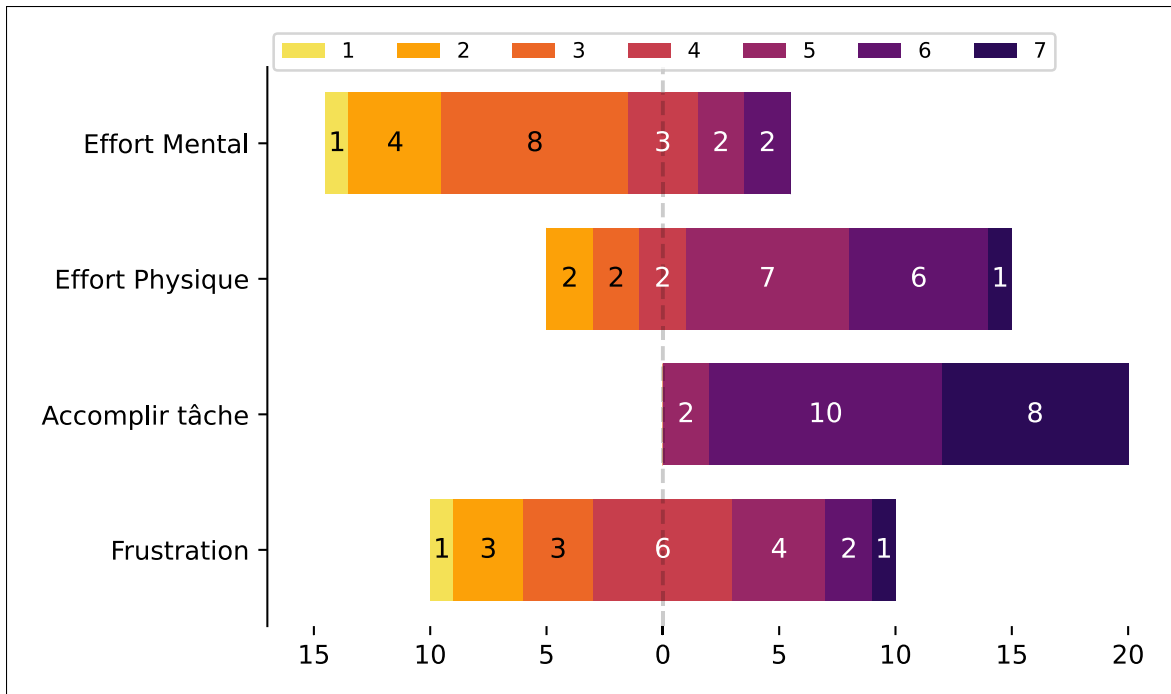


Figure 4.12 Échelle de Likert montrant l'avis des participants pour la condition Marionnette

Les résultats indiquent que 100 % des participants ont trouvé que la condition Marionnette leur ont aidé à d'accomplir la tâche, dont 90 % de façon élevé à très élevé. Plus de la moitié des participants, 65 %, ont rapporté que la demande d'effort mental était très faible à plutôt faible, tandis que 70 % ont jugé que l'effort physique requis était plutôt élevé à élevé.

#### 4.4.2.1.2 Référence

Le résultat de l'analyse du questionnaire de la condition Référence est présenté à la Figure 4.13.

Les participants ont rapporté un niveau d'effort mental se situant entre plutôt élevé à élevé pour la condition Référence. 80 % des participants ont trouvé que la condition les avait aidés à accomplir la tâche de manière plutôt élevée à très élevée. 65 % des participants ont rapporté avoir ressenti la frustration de façon très faible à faible.

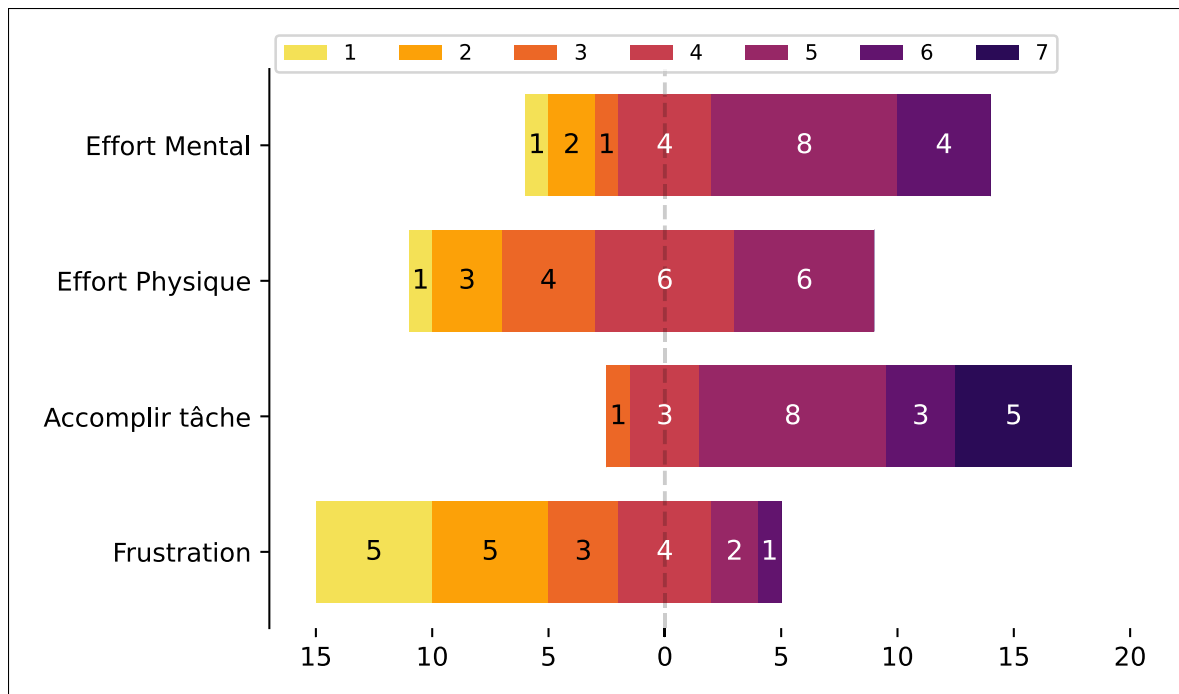


Figure 4.13 Échelle de Likert montrant l'avis des participants pour la condition Référence

#### 4.4.2.2 Préférence des conditions

À la question demandant la préférence des conditions, 15 des 20 participants ont indiqué préférer la condition Marionnette. La question demandant s'ils ont trouvé utile la fonctionnalité des suggestions automatiques a été répondue par oui par 17 participants. L'affichage du nom de la commande en cours directement sur la main a été jugé utile d'après 19 des participants.

#### 4.4.2.3 Sommaire des explications des choix des participants

Les participants ont été invités à écrire de façon libre une explication de leurs choix suite aux questions portant à l'utilité de la fonctionnalité de suggestions automatiques et de l'utilité de l'affichage des commandes sur la main. Une analyse des commentaires est présentée dans le Tableau 4.22.

Tableau 4.22 Sommaire des explications des préférences des participants suite aux suggestions automatiques

Catégories	Marionnette	Référence	Suggestion automatique	Affichage sur la main
Aide à la réalisation	5	-1	3	1
Aide à la confirmation	2		4	3
Montre les erreurs	3		1	5
Évite le doute	1		1	1
Mémorisation simple	3	2	4	2
Simple d'utilisation	1 / -3	1		1
Gain de temps		1	1	1

#### 4.4.2.4 Stratégie de mémorisation

Les participants ont été invités à répondre dans le questionnaire, à la question : *Avez-vous utilisé des stratégies de mémorisation pour vous aider à vous rappeler des gestes ? (Mnémotechniques, compter sur les doigts, etc.)*. Dix-sept des vingt participants ont indiqué avoir utilisé différentes stratégies de mémorisation, trois ont indiqué n'avoir pas utilisé de stratégie particulière.

L'analyse des réponses des 17 participants a permis de comprendre que la visualisation mentale du geste pour se souvenir de la commande (mot) associée a été utilisée à 16 reprises. Le rappel de la commande pour se souvenir du geste a été utilisé à 8 reprises. Le Tableau 4.23 résume les différentes stratégies de mémorisation qui ont été utilisées durant l'expérience.

Tableau 4.23 Stratégie de mémorisation

<b>Stratégies employées</b>	<b>Total</b>
Mémorisation par association imaginaire	
Formes, symboles, animaux, instrument	4
Mots populaires	8
Mémorisation par signification	
Symbolique du geste	1
Signification du mot	1
Première lettre du mot	2
Mots semblables phonétiquement	1
Mémorisation spatiale	
Différence d'un geste à l'autre	4
Position dans le menu	3
Position des doigts dans un plan 2D imaginaire	1
Mémorisation mathématique	
Associer le numéro du doigt à plier au mot	1
Compter le nombre de doigts plié ou levé	2
Mémorisation mécanique	
Répétition des gestes	2
Prononcer le mot à voix basse ou dans la tête	2
Décrire le geste dans la tête	1
Mémoriser un geste à la fois, ensuite un autre	2
Mémoriser par ordre d'apparition	2

Un exemple de la catégorie *Mots populaires* se retrouve à la Figure 4.14 et 4.15 montrant un geste ayant souvent été associé avec les mots « Rock » et à « Spider-Man » et un second au mot « Arrêt ».

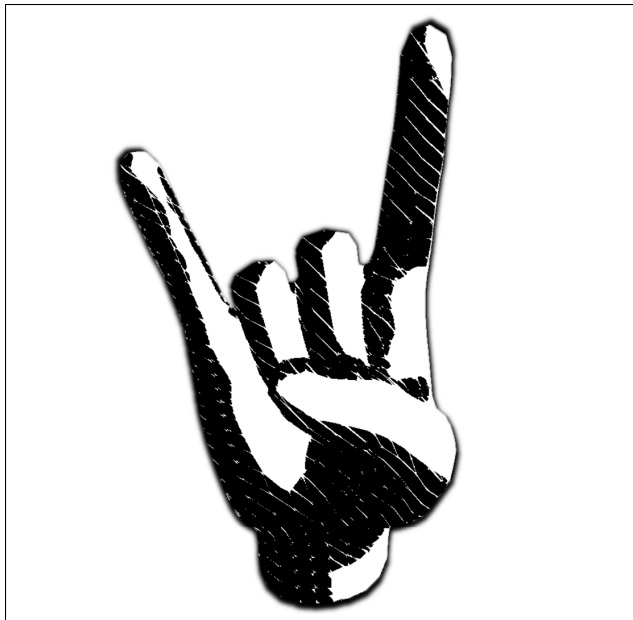


Figure 4.14 Exemple de pose avec mémorisation par association ayant été associée à « Rock » et à « Spider-Man »

#### 4.4.3 Discussion des résultats

Pour répondre à la première hypothèse, il est possible d'observer, par rapport à la distance, la condition Marionnette est significativement inférieure à la condition Référence, ce qui permet de confirmer cette hypothèse.

Pour vérifier la deuxième hypothèse, il est possible d'observer que pour la condition Marionnette, la durée pour effectuer les gestes, le nombre d'erreurs ainsi que l'utilisation du menu a diminué d'un bloc à un autre. Par contre, l'utilisation du système de suggestions automatiques semble avoir été utilisée de façon excessive. Ce qui en rend complexe l'analyse des résultats pour confirmer l'hypothèse.

Les résultats du test de perception de la difficulté ont permis d'observer pour la condition Marionnette, l'effort mental était moins élevé que l'effort physique.





Figure 4.15 Exemple de pose avec mémorisation par association ayant été associé à « Arrêt »

Ceci peut s'expliquer en partie par le fait que de suivre un guide visuel demande moins d'effort mental, cependant la visualisation des rétroactions affiche les erreurs à l'utilisateur, l'invitant à effectuer les corrections physiquement, ce qui demande un effort physique. Le sentiment d'avoir accompli la tâche a été ressenti pour l'ensemble des participants.

La condition Référence a demandé plus d'effort mental, car les participants devaient se souvenir des gestes à effectuer sans retour visuel pour les guider.

En ce qui concerne la perception d'aide à accomplir la tâche, la condition Référence a été bien perçue pour l'ensemble des participants et la frustration ressentie était en moyenne faible. Ceci peut s'expliquer par le fait qu'il est généralement moins frustrant de ne pas savoir que l'on a tort. Sans rétroactions montrant les erreurs, il est facile de penser que l'on exécute correctement ce qui a été demandé.

#### 4.4.3.1 Points à améliorer, deuxième expérience

Le nombre d'affichages du nom de la commande sur les mains utilisant les suggestions automatiques a été de 2096 occurrences, ce qui équivaut à une utilisation de 163,75 % par rapport au nombre de poses à réaliser. Considérant que le temps d'activation a diminué de moitié, ce facteur pourrait avoir influencé l'effort cognitif porté à la mémorisation des gestes. Il serait recommandé de réduire la facilité avec laquelle les utilisateurs peuvent obtenir des suggestions automatiques lorsqu'il est question d'expérience reliée à la mémorisation.

#### 4.4.4 Résumé des résultats

Cette expérience a examiné les effets de deux conditions distinctes : la condition Marionnette faisant l'usage des suggestions automatiques, et la condition Référence.

La première hypothèse était la suivante :

H1 Le retour *in situ* aidera à la précision des poses en diminuant la distance.

En comparant la distance de l'intervalle de confiance à 95 % de la condition Marionnette [6,43 ; 8,18] cm et celle de Référence [10,96 ; 12,62] cm, il est possible de constater que l'utilisation d'un retour *in situ* aide à diminuer la distance.

La deuxième hypothèse était la suivante :

H2 Le retour *in situ* aidera à la mémorisation des poses.

L'analyse du nombre d'erreurs de validation de poses au cours de l'expérience dans chacun des blocs, a montré une diminution des erreurs, tant pour la condition Marionnette {11, 8, 9, 7} que Référence {31, 37, 25, 18}. Cependant, compte tenu de l'utilisation excessive (163,75 %) des suggestions automatiques pendant l'expérience, les résultats ne permettent ni de confirmer ni d'infirmer cette hypothèse.

## CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Cette recherche a exploré différents concepts de rétroactions visuelles *in situ* pour l'apprentissage et la reproduction des poses de mains en réalité virtuelle. En analysant les différentes conditions expérimentales, les résultats obtenus et leur interprétation, il est possible de tirer plusieurs conclusions significatives pour ce domaine prometteur des interfaces gestuelles « à main nue » dans le contexte de la réalité virtuelle. Bien que certaines lacunes aient été identifiées lors des expériences, il est important d'en tenir compte pour en formuler des recommandations appropriées pour l'amélioration de futures recherches dans ce domaine.

Les résultats obtenus ont démontré l'efficacité des différentes conditions de rétroactions visuelles dans l'amélioration des performances des utilisateurs. Tant à la première qu'à la deuxième expérience, les participants ont atteint une plus grande précision dans la reproduction des poses des mains.

Lors de la première expérience, un déséquilibre dans la suggestion des poses à reproduire entre les participants a été observé (1), ainsi qu'une répartition inégale de la complexité des poses parmi les différentes séquences de blocs (2). Ces lacunes ont été corrigées lors de la deuxième expérience, mais démontrent l'importance de la sélection du jeu de données de manière équilibrée et d'une répartition uniforme dans la complexité des poses.

Pour la deuxième expérience, une lacune concerne la surutilisation de l'affichage du nom de la pose sur la main, combinée à la réduction du temps d'activation pour les suggestions automatiques (3). Bien que cette fonctionnalité ait apporté un gain en fluidité par rapport aux interactions lors de l'expérience, elle a également soulevé des questions quant à l'effort requis et fourni pour mémoriser les poses de manière autonome. Pour de futures recherches, il est recommandé de trouver un équilibre adéquat par rapport à l'affichage de l'aide visuelle, afin de promouvoir l'effort requis pour une mémorisation à long terme.

En conclusion, cette recherche a présenté cinq rétroactions visuelles *in situ* qui facilitent l'apprentissage du positionnement des doigts des mains en réalité virtuelle. Les rétroactions visuelles qui ont été développées, les résultats et les recommandations peuvent être utilisés pour approfondir le domaine des interfaces gestuelles « à main nue » en réalité virtuelle, en réalité augmentée et d'autres technologies encore à découvrir.

La conception de rétroaction dynamique *in situ* pourrait amener à de nouvelles conceptions d'interactions gestuelles plus intuitives, efficaces et accessibles pour les utilisateurs. L'intégration de ces rétroactions à des applications en tant que tutoriel, pour l'entraînement, la rééducation musculaire, l'apprentissage du langage des signes, et d'autres domaines, serait des sujets de recherches pertinents pour le futur.

Un des nombreux défis à relever réside dans l'apprentissage de gestes dynamiques avec les doigts. La réalisation d'une pose statique de la main en positionnant précisément chaque doigt, nécessite quelques secondes pour l'interprétation du retour *in situ* et du déplacement des doigts. Trouver des méthodes permettant la réalisation précise de poses dans une séquence dans le temps pour réaliser un geste de façon fluide et naturelle, constitue une problématique intéressante à explorer.

## ANNEXE I

### HISTORIQUE DE DÉVELOPPEMENT

L'évolution de l'interface est présentée en ordre chronologique en incluant de courtes vidéos présentant le fonctionnement.

#### 1. Première itération

La Figure I-1 montre l'un des premiers prototypes réalisés montrant une visualisation de l'état *avec collision* en vert et *sans collision* en rouge. La sphère bleue représente l'objet donnant la collision. Des sphères de couleurs variables entre vert et rouge sont placées à la position des os de la main.

Présentation vidéo : <https://www.youtube.com/watch?v=jJaUon-uHPI>

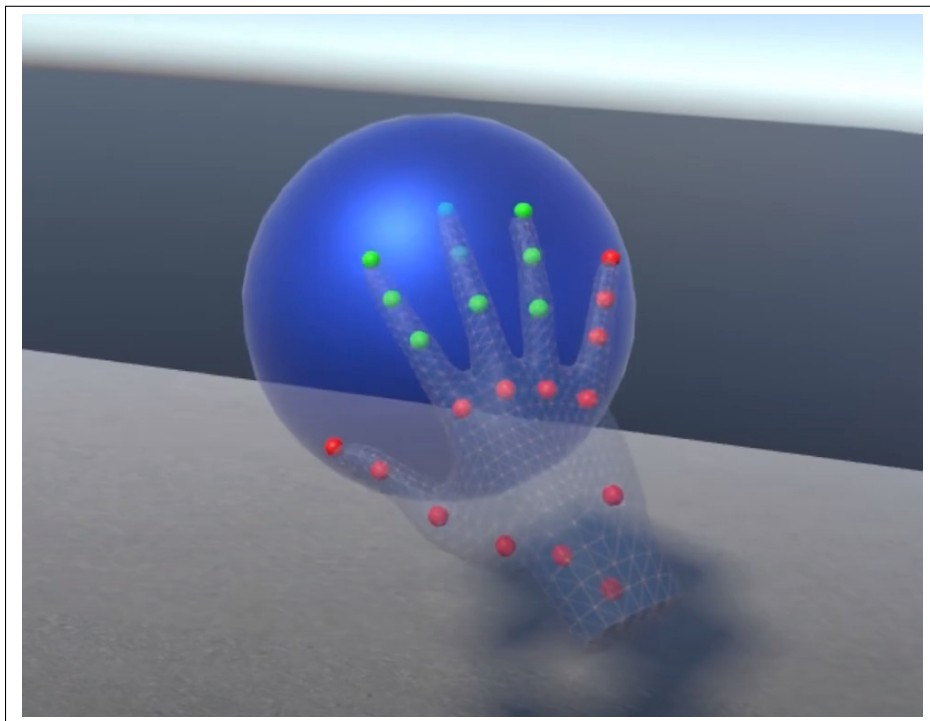


Figure-A I-1 Première itération testant la visualisation de collision par sphères placées sur les os de la main

## 2. Ajout de commandes à reproduire

Dans la Figure I-2, le système demande de reproduire la commande *CloseHand* pour la main fermée. Les sphères dans la main montrent l'état de succès par un changement de couleur entre le vert et rouge.

Présentation vidéo : <https://www.youtube.com/watch?v=9uVaIWUFJP4>

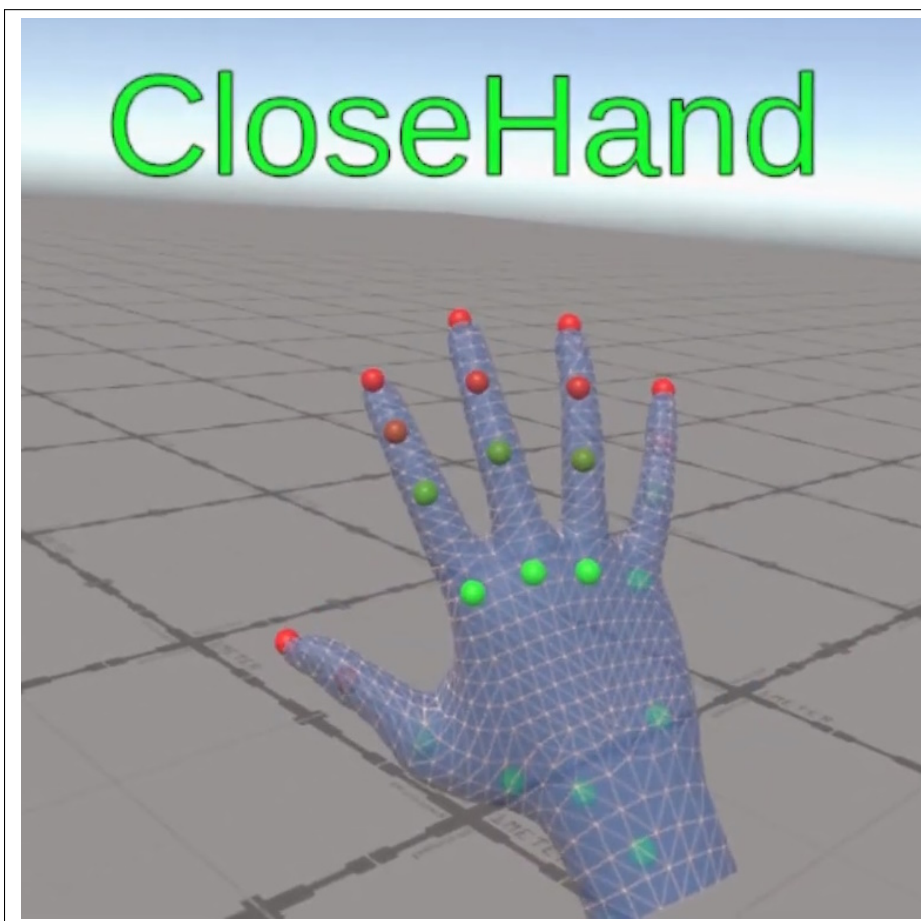


Figure-A I-2 Reproduction d'un geste avec le nom de la commande

### 3. Ajout de contrôles au niveau de l'interface d'Unity

Dans la Figure I-3, une modification a été effectuée à l'interface d'Unity afin d'enregistrer les mouvements et d'en effectuer une relecture.

Présentation vidéo : <https://www.youtube.com/watch?v=84ZhOx0MFLk>

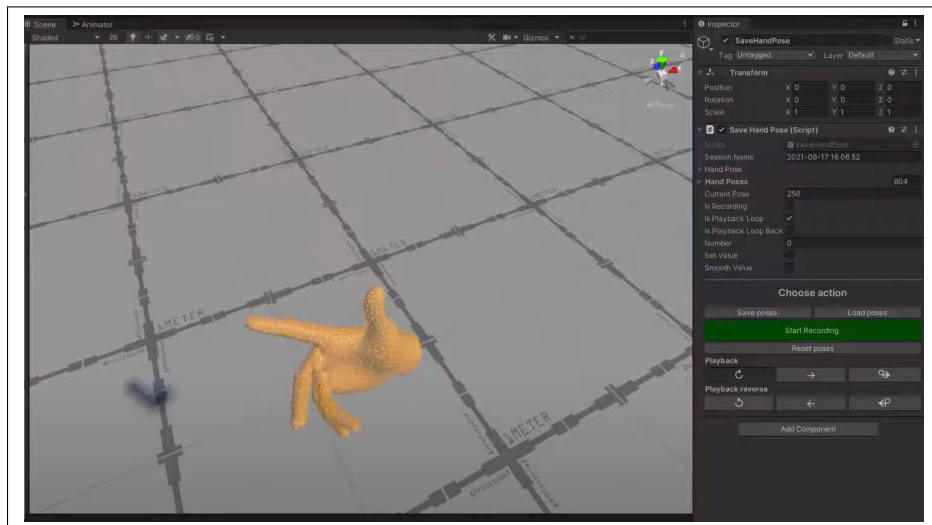


Figure-A I-3 Écran permettant d'enregistrer les mouvements et d'en effectuer une relecture

#### 4. Lecture de plusieurs enregistrements de façon simultanée

Dans la Figure I-4, deux enregistrements de gestes sont lus en même temps.

Présentation vidéo : <https://www.youtube.com/watch?v=nQzR7LkFsfI>

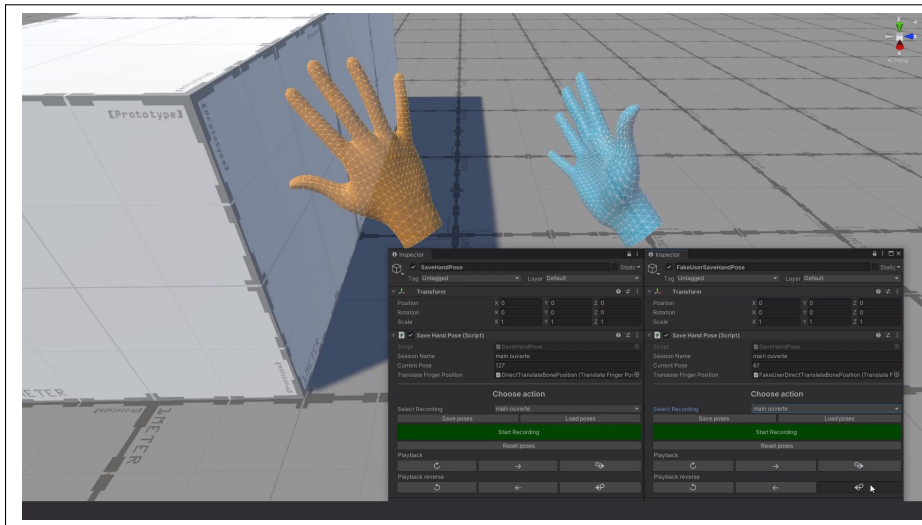


Figure-A I-4 Écran permettant la relecture de deux mains simultanément

#### 5. Affichage de lignes vers la position des doigts

Dans la Figure I-5, des lignes affichent le déplacement à effectuer sur la main bleue selon la position établie par la main de gauche.

Présentation vidéo : <https://www.youtube.com/watch?v=NqG-5PK5jJI>



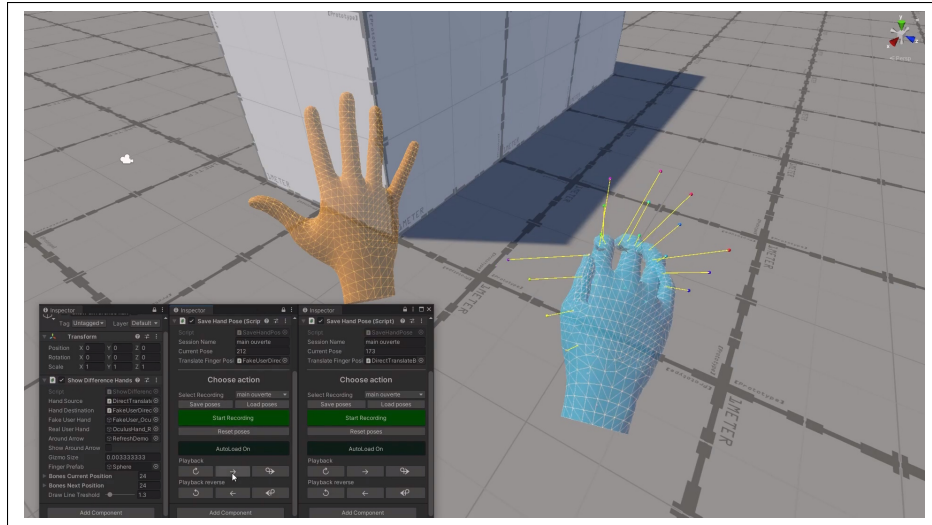


Figure-A I-5 Écran permettant la relecture de deux mains simultanément et de l’affichage de lignes comme aide pour reproduire la pose

## 6. Coloration de la main selon la position des doigts

Dans la Figure I-6, les l’extrémité des doigts sont de couleur rouge, car la pose n’est pas identique à la main en beige. La Figure I-7 montre la main d’origine (beige) dans une position différente, alors les couleurs aux extrémités des doigts changent pour le vert.

Présentation vidéo : <https://www.youtube.com/watch?v=paW9hw3D2mo>

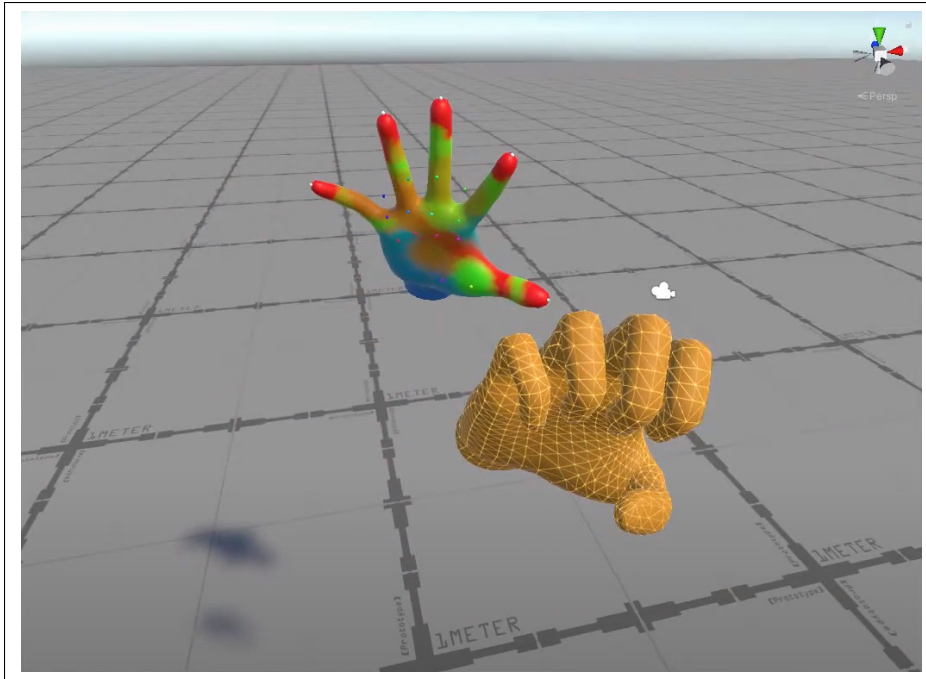


Figure-A I-6 Prototype permettant la visualisation par changement de couleur sur la main

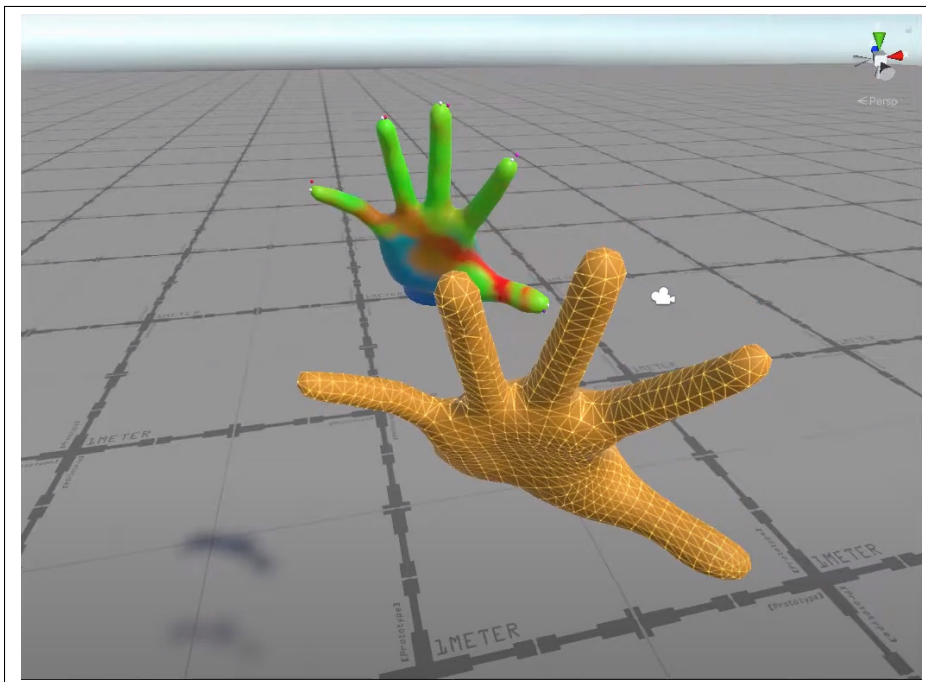


Figure-A I-7 Prototype permettant la visualisation par changement de couleur sur la main

## 7. Développement du menu dynamique

Le menu a été développé afin d'être dynamique, afin qu'il puisse s'adapter à un nombre de rangées et de colonnes différentes pendant l'utilisation. La courbure du menu, qui était jusqu'alors plat, illustré par la Figure I-8. Afin de rendre le menu visuellement plus immersif, la Figure I-9 présente le menu pouvant être courbé verticalement et horizontalement. Présentation vidéo : <https://www.youtube.com/watch?v=5UsNpvnLcy0>



Figure-A I-8 Illustration du Menu sans courbure, montrant 15 boîtes dans un format 3 × 5. Les différentes couleurs des boîtes servent d'identificateur pendant le développement

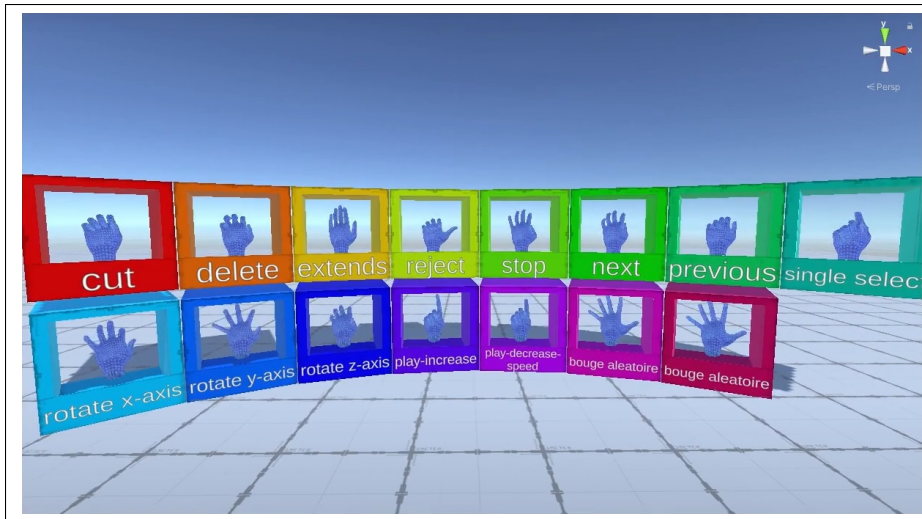


Figure-A I-9 Illustration du Menu avec courbure, montrant 15 boîtes dans un format 2 × 8.

## 8. Couleur sur la main et progression

Dans ce prototype, une barre de progression se remplissant de plus en plus rapidement (commençant à 12 secondes jusqu'à 2 secondes) a été implémentée afin de mesurer si une progression dans la diminution de la distance sera mesurée. Une illustration de ce prototype se trouve à la Figure I-10. Le but était de créer un système de ludification affichant la progression à l'utilisateur. Ce prototype a été retiré.

Présentation vidéo : <https://www.youtube.com/watch?v=1aBg00Sb0BU>

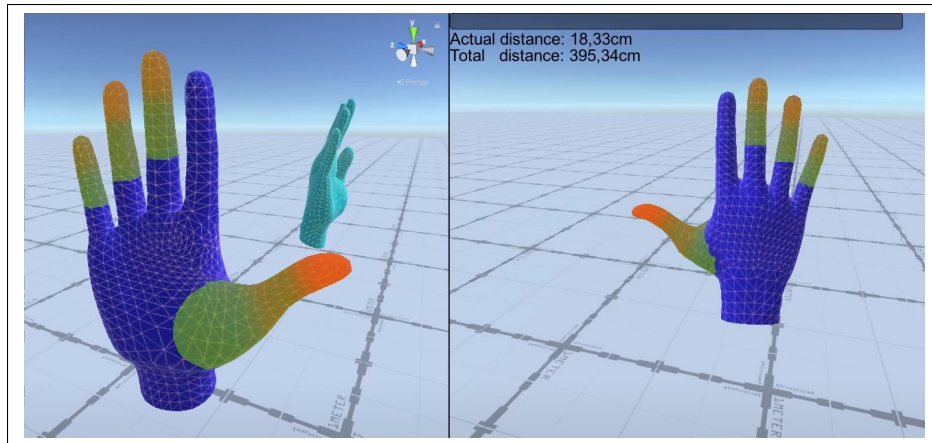


Figure-A I-10 Main en couleur avec progression

## 9. Utilisation du casque de réalité virtuelle et les rétroactions sur la main de l'utilisateur

Une validation utilise le casque de réalité virtuelle avec des rétroactions sur les mains. Les rétroactions ont toutes été affichées en même temps, soit l'utilisation des couleurs, un fantôme et une ligne jaune reliant l'index entre la main droite de l'utilisateur et la main fantôme.

Présentation vidéo : <https://www.youtube.com/watch?v=uneXfjKuZcg>

La Figure I-11 montre le dos de la main et la Figure I-12 le verso.

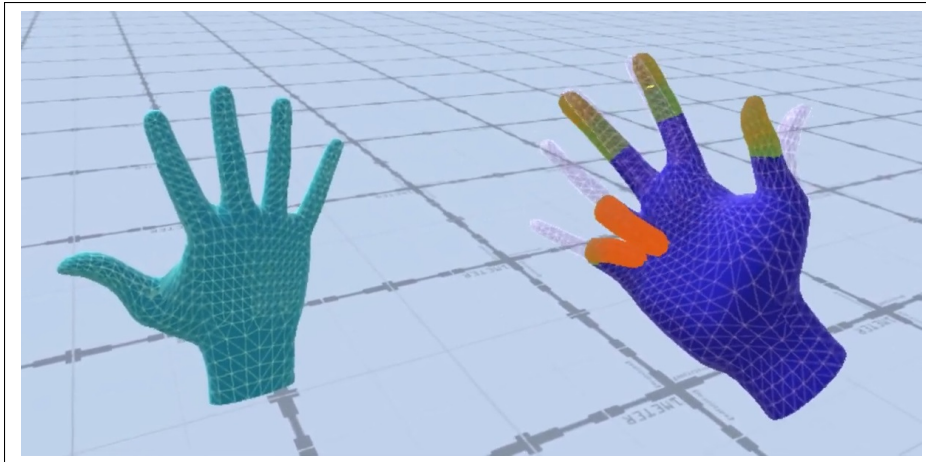


Figure-A I-11 Combinaison des rétroactions en utilisant le casque de réalité virtuelle montrant le dos de la main

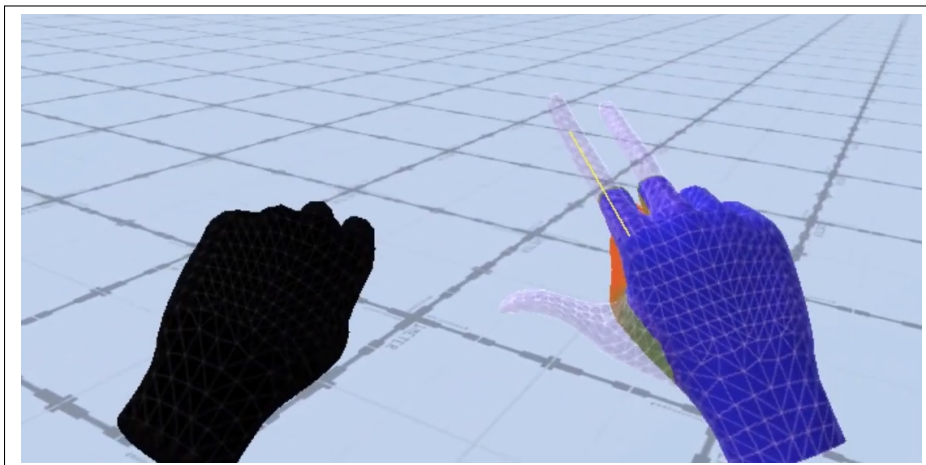


Figure-A I-12 Combinaison des rétroactions en utilisant le casque de réalité virtuelle montrant le verso de la main

## 10. Comparaison de plusieurs poses à la fois

Les versions précédentes comparaient la main de l'utilisateur qu'avec une seule pose à la fois. Avec cette nouvelle implémentation, la main de l'utilisateur est comparée parmi toutes les poses venant du jeu de données.

Présentation vidéo : [https://youtu.be/\\_I5e7qcsOA8](https://youtu.be/_I5e7qcsOA8)

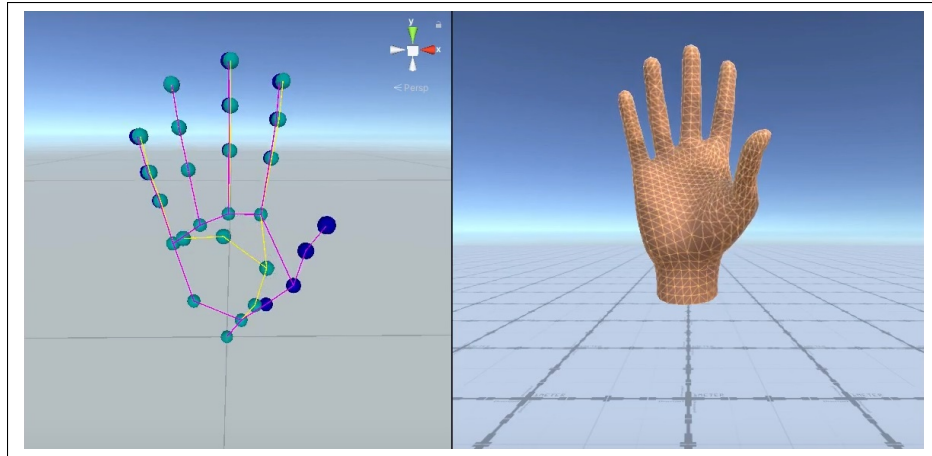


Figure-A I-13 Comparaison de plusieurs poses à la fois, en se basant sur le squelette de la main

## 11. Comparaison des poses en utilisant des couleurs du menu

Dans cette version, les cinq poses les plus similaires sont affichées par différentes teintes de couleurs dans le menu.

Présentation vidéo : <https://www.youtube.com/watch?v=s7Jz6gVRiIs>

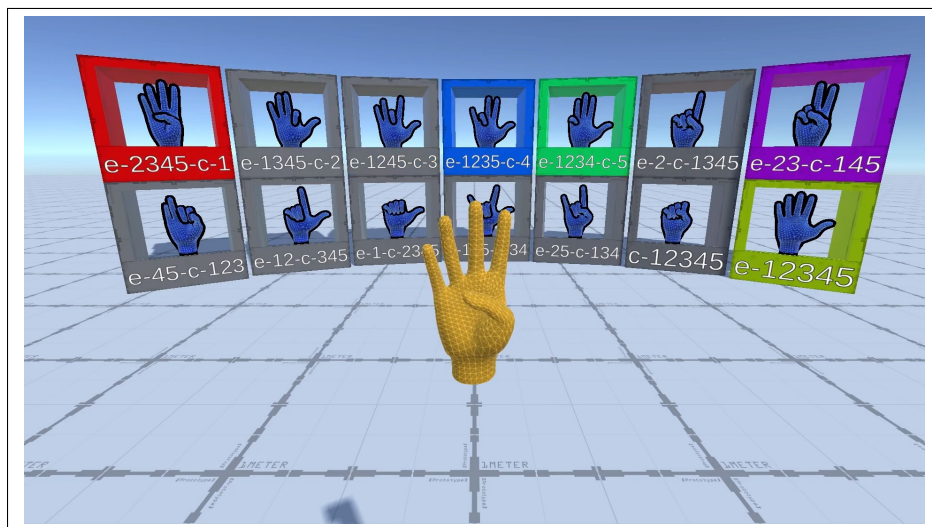


Figure-A I-14 Comparaison des poses en coloriant le menu

## 12. Comparaison des poses en utilisant des couleurs du menu avec limite de temps

Dans cette version, une limite de temps pour reproduire une pose a été mise en place.

Présentation vidéo : <https://www.youtube.com/watch?v=XWhgskKyIL8>

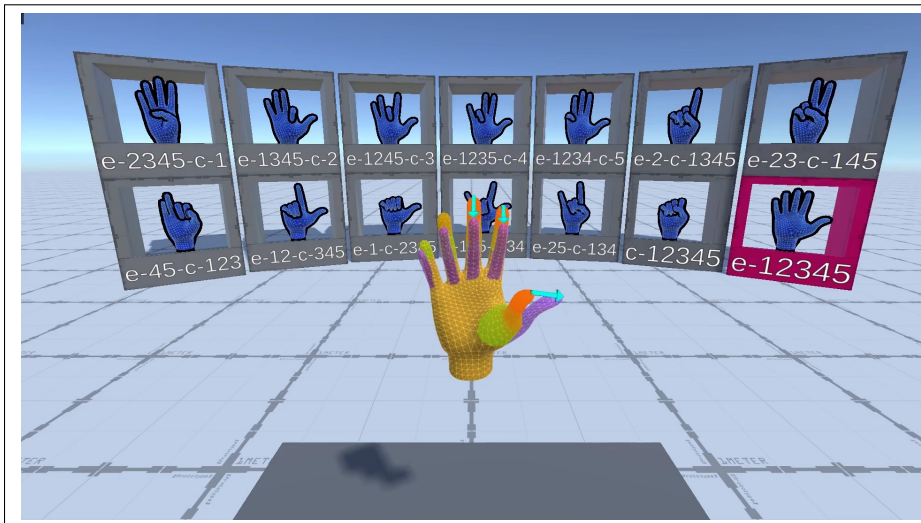


Figure-A I-15 Écran montrant le menu et la comparaison à l'aide de plusieurs retours à la fois

## 13. Visualisation des différents algorithmes

Deux écrans ont été développés afin de visualiser la différence entre des algorithmes calculant l'angle entre les doigts et la distance entre les doigts.

Présentations vidéo :

- [https://www.youtube.com/watch?v=kB\\_B-l-yEpc](https://www.youtube.com/watch?v=kB_B-l-yEpc)
- <https://www.youtube.com/watch?v=W-p4hPPmvns>



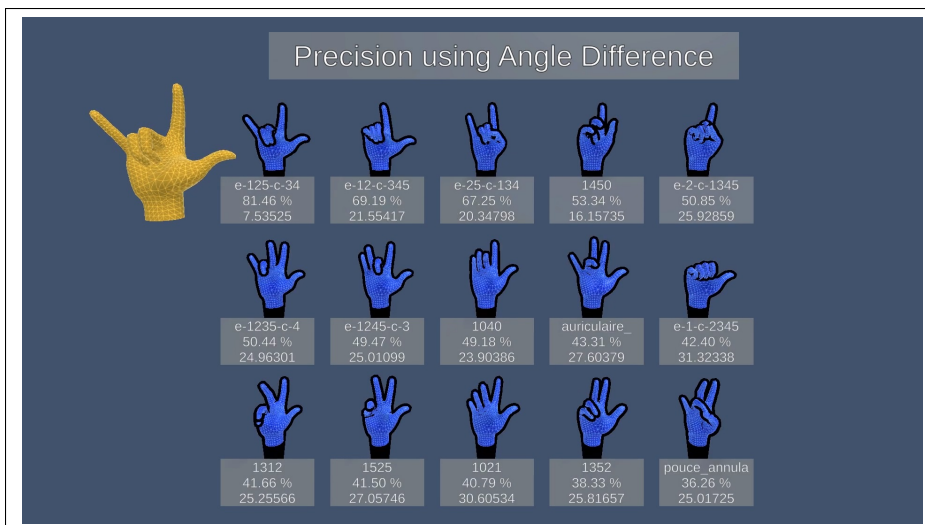


Figure-A I-16 Écran permettant de visualiser les résultats d'un algorithme calculant l'angle entre les poses

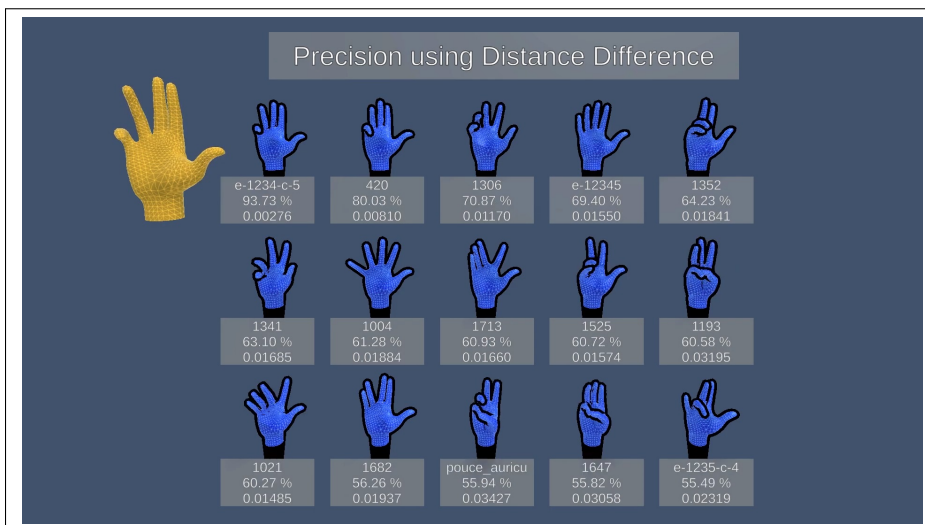


Figure-A I-17 Écran permettant de visualiser les résultats d'un algorithme calculant la distance entre les poses

#### 14. Démonstration de l'expérience

Une présentation de la première expérience a été réalisée de façon accélérée.

Présentation vidéo : [https://www.youtube.com/watch?v=4pAtz\\_pdJOw](https://www.youtube.com/watch?v=4pAtz_pdJOw)

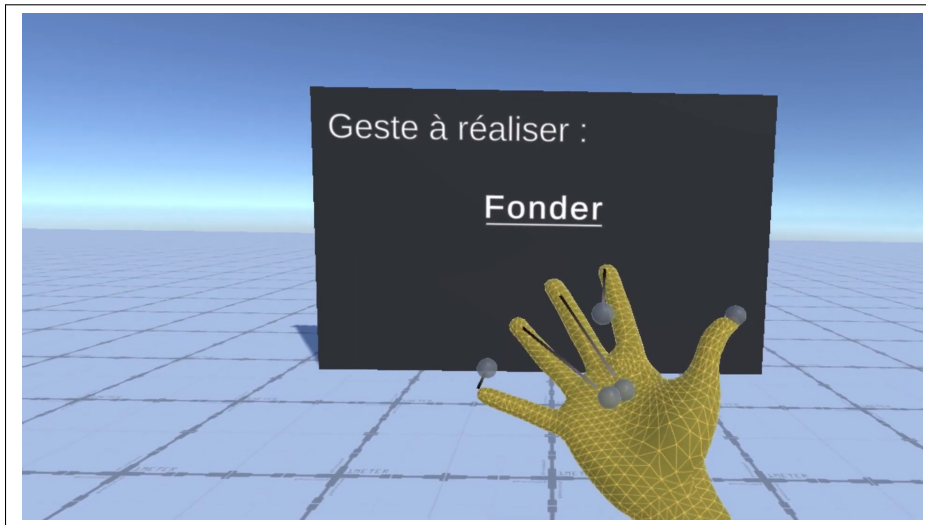


Figure-A I-18 Démonstration accélérée de la première expérience

## 15. Comparaison de différents algorithmes de calcul de la distance

Une comparaison visuelle de différents algorithmes pour le calcul de la distance a été créée afin de valider l’algorithme qui sera utilisé au cours de l’expérience.

Présentation vidéo : <https://www.youtube.com/watch?v=8s9ZoSL3R7g>

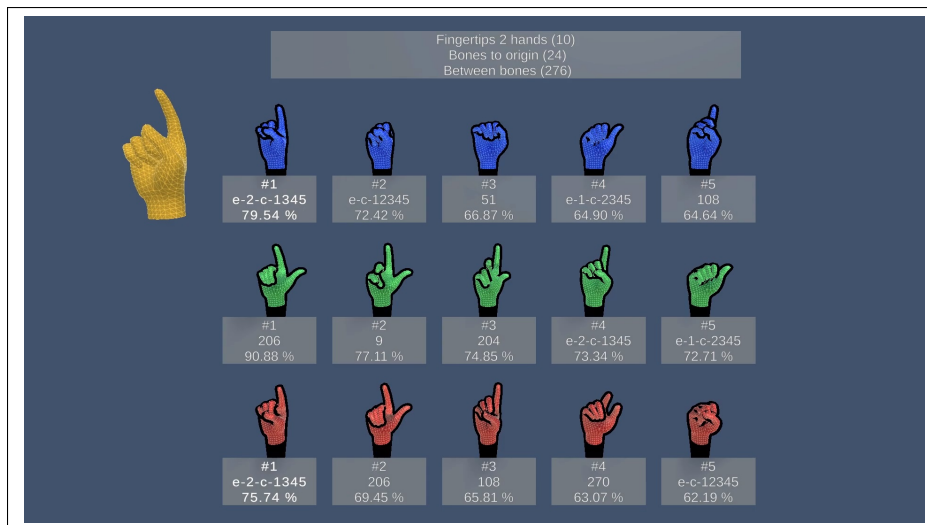


Figure-A I-19 Comparaison d’algorithmes de distance



## ANNEXE II

### ÉVALUATION DE LA DIFFICULTÉ DES POSES

À la fin de la première expérience en réalité virtuelle, les participants ont été invités à évaluer les poses du jeu de données.

Sur le clavier, deux types d'entrées sont possibles, soit avec la main gauche ou avec la main droite. Lorsque les touches 1, 2, 3, espace (  ,  ,  ,  ) sont utilisées avec la main gauche, la main droite est libre, ce qui peut aider à comprendre la difficulté en reproduisant la pose demandée. Si l'utilisateur désire effectuer l'entrée avec sa main droite, les touches du pavé numérique 1, 2, 3, 0 sont utilisées.

Les touches directionnelles de gauche ou de droite (  ,  ) sont utilisées comme moyens de navigation pour aller à l'élément précédent ou suivant du jeu de données.

Lorsqu'une touche est activée, autre que directionnelle, l'évaluation est enregistrée et la prochaine pose est affichée. Lorsque la dernière pose (101/101) est notée, le système indique au participant que l'évaluation est terminée.

La Figure II-2 montre l'écran d'évaluation des poses. Le rectangle du bas affiche l'évaluation de la pose par le participant.

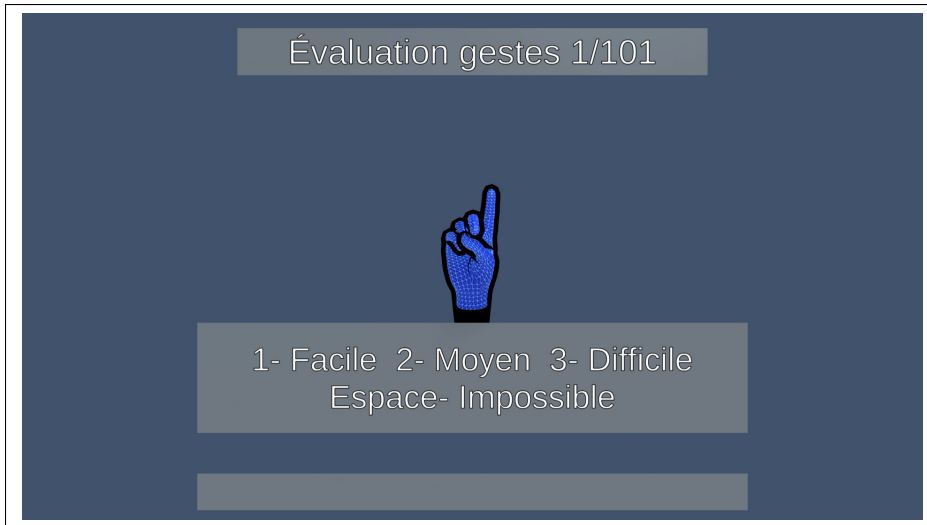


Figure-A II-1 Évaluation des poses

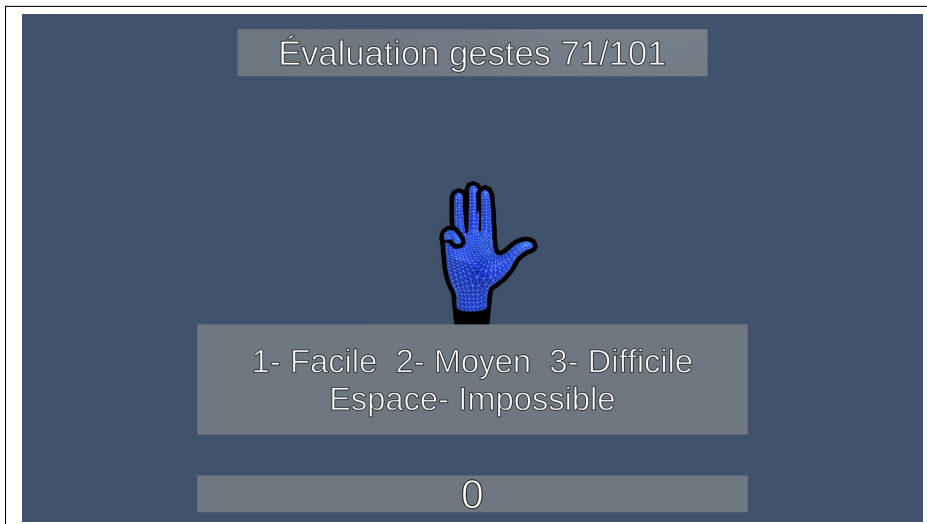


Figure-A II-2 Écran pour l'évaluation des poses, le nombre 0 indique une pose impossible à réaliser

## BIBLIOGRAPHIE

- Anderson, F. & Bischof, W. F. (2013). Learning and Performance with Gesture Guides. *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, (CHI '13), 1109–1118. doi : 10.1145/2470654.2466143.
- Anderson, F., Grossman, T., Matejka, J. & Fitzmaurice, G. (2013). YouMove : Enhancing Movement Training with an Augmented Reality Mirror. *Proceedings of the 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, (UIST '13), 311–320. doi : 10.1145/2501988.2502045.
- Arora, R., Kazi, R. H., Kaufman, D. M., Li, W. & Singh, K. (2019). MagicalHands : Mid-Air Hand Gestures for Animating in VR. *Proceedings of the 32nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 463–477. doi : 10.1145/3332165.3347942.
- Bau, O. & Mackay, W. E. (2008). OctoPocus : A Dynamic Guide for Learning Gesture-Based Command Sets. *Proceedings of the 21st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology - UIST '08*, pp. 37. doi : 10.1145/1449715.1449724.
- Baudel, T. & Beaudouin-Lafon, M. (1993). Charade : Remote Control of Objects Using Free-Hand Gestures. *Commun. ACM*, 36(7), 28–35. doi : 10.1145/159544.159562.
- Bragdon, A., Zeleznik, R., Williamson, B., Miller, T. & LaViola, J. J. (2009). GestureBar : Improving the Approachability of Gesture-Based Interfaces. *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, (CHI '09), 2269–2278. doi : 10.1145/1518701.1519050.
- Bragdon, A., Uguray, A., Wigdor, D., Anagnostopoulos, S., Zeleznik, R. & Feman, R. (2010). Gesture Play : Motivating Online Gesture Learning with Fun, Positive Reinforcement and Physical Metaphors. *ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces*, (ITS '10), 39–48. doi : 10.1145/1936652.1936661.
- Buxton, B. & Billinghamurst, M. (2018). Gesture Based Interaction. Dans *Haptic Input* (pp. 35).
- Centre canadien d'hygiène et de sécurité au travail. (2023). CCHST : Ergonomie au bureau - Disposition de l'écran. Repéré à [https://www.cchst.ca/oshanswers/ergonomics/office/monitor\\_positioning.html](https://www.cchst.ca/oshanswers/ergonomics/office/monitor_positioning.html).
- Delamare, W., Janssoone, T., Coutrix, C. & Nigay, L. (2016). Designing 3D Gesture Guidance : Visual Feedback and Feedforward Design Options. *Proceedings of the International Working Conference on Advanced Visual Interfaces*, pp. 152–159. doi : 10.1145/2909132.2909260.

- Dürr, M., Weber, R., Pfeil, U. & Reiterer, H. (2020). EGuide : Investigating Different Visual Appearances and Guidance Techniques for Egocentric Guidance Visualizations. *Proceedings of the Fourteenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, (TEI '20), 311–322. doi : 10.1145/3374920.3374945.
- Fennedy, K., Hartmann, J., Roy, Q., Perrault, S. T. & Vogel, D. (2021). OctoPocus in VR : Using a Dynamic Guide for 3D Mid-Air Gestures in Virtual Reality. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 24(12), 4425–4438. doi : 10.1109/TVCG.2021.3101854.
- Freeman, D., Benko, H., Morris, M. R. & Wigdor, D. (2009). ShadowGuides : Visualizations for in-Situ Learning of Multi-Touch and Whole-Hand Gestures. *Proceedings of the ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces*, (ITS '09), 165–172. doi : 10.1145/1731903.1731935.
- Funk, M., Bächler, A., Bächler, L., Korn, O., Krieger, C., Heidenreich, T. & Schmidt, A. (2015). Comparing Projected In-Situ Feedback at the Manual Assembly Workplace with Impaired Workers. *Proceedings of the 8th ACM International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments*, (PETRA '15), 1–8. doi : 10.1145/2769493.2769496.
- Ghomi, E., Huot, S., Bau, O., Beaudouin-Lafon, M. & Mackay, W. E. (2013). Arpège : Learning Multitouch Chord Gestures Vocabularies. *Proceedings of the 2013 ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces*, (ITS '13), 209–218. doi : 10.1145/2512349.2512795.
- Grossman, T., Dragicevic, P. & Balakrishnan, R. (2007). Strategies for Accelerating On-Line Learning of Hotkeys. *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1591–1600. doi : 10.1145/1240624.1240865.
- Han, P.-H., Chen, K.-W., Hsieh, C.-H., Huang, Y.-J. & Hung, Y.-P. (2016). AR-Arm : Augmented Visualization for Guiding Arm Movement in the First-Person Perspective. *Proceedings of the 7th Augmented Human International Conference 2016*, (AH '16), 1–4. doi : 10.1145/2875194.2875237.
- Han, P.-H., Lin, J.-W., Hsieh, C.-H., Hsu, J.-H. & Hung, Y.-P. (2018). tARget : Limbs Movement Guidance for Learning Physical Activities with a Video See-through Head-Mounted Display. *ACM SIGGRAPH 2018 Posters*, (SIGGRAPH '18), 1–2. doi : 10.1145/3230744.3230776.
- Han, S., Liu, B., Cabezas, R., Twigg, C. D., Zhang, P., Petkau, J., Yu, T.-H., Tai, C.-J., Akbay, M., Wang, Z., Nitzan, A., Dong, G., Ye, Y., Tao, L., Wan, C. & Wang, R. (2020). MEgATrack : Monochrome Egocentric Articulated Hand-Tracking for Virtual Reality. *ACM Trans. Graph.*, 39(4), 87 :87 :1–87 :87 :13. doi : 10.1145/3386569.3392452.



- Harrison, C., Tan, D. & Morris, D. (2010). Skinput : Appropriating the Body as an Input Surface. *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, (CHI '10)*, 453–462. doi : 10.1145/1753326.1753394.
- Harrower, M. & Brewer, C. A. (2003). ColorBrewer.Org : An Online Tool for Selecting Colour Schemes for Maps. *The Cartographic Journal*, 40(1), 27–37. doi : 10.1179/000870403235002042.
- Hattie, J. & Timperley, H. (2007). The Power of Feedback. *Review of Educational Research*, 77(1), 81–112. doi : 10.3102/003465430298487.
- Henderson, S. J. & Feiner, S. K. (2011). Augmented Reality in the Psychomotor Phase of a Procedural Task. *2011 10th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, pp. 191–200. doi : 10.1109/ISMAR.2011.6092386.
- Igarashi, T. & Hughes, J. F. (2001). A Suggestive Interface for 3D Drawing. *Proceedings of the 14th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, (UIST '01)*, 173–181. doi : 10.1145/502348.502379.
- Jeanne, F. (2017). *Métaphore d'interaction gestuelle en environnement virtuel : application à l'apprentissage de gestes*. (Thèse de doctorat, Université de Technologie de Compiègne).
- Jeanne, F., Thouvenin, I. & Lenglet, A. (2017). A Study on Improving Performance in Gesture Training through Visual Guidance Based on Learners' Errors. *Proceedings of the 23rd ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology, (VRST '17)*, 1–10. doi : 10.1145/3139131.3139144.
- Kass, R. E. & Raftery, A. E. (1995). Bayes Factors. *Journal of the American Statistical Association*, 90(430), 773–795. doi : 10.1080/01621459.1995.10476572.
- Khadka, R. & Banić, A. (2020). Effects of Egocentric Versus Exocentric Virtual Object Storage Technique on Cognition in Virtual Environments. *2020 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces Abstracts and Workshops (VRW)*, pp. 205–209. doi : 10.1109/VRW50115.2020.00044.
- Kosmalla, F., Daiber, F., Wiehr, F. & Krüger, A. (2017). ClimbVis : Investigating In-situ Visualizations for Understanding Climbing Movements by Demonstration. *Proceedings of the 2017 ACM International Conference on Interactive Surfaces and Spaces, (ISS '17)*, 270–279. doi : 10.1145/3132272.3134119.
- Kurtenbach, G., Moran, T. P. & Buxton, W. (1994). Contextual Animation of Gestural Commands. *Computer Graphics Forum*, 13(5), 305–314. doi : 10.1111/1467-8659.1350305.

- Lee, T. & Hollerer, T. (2007). Handy AR : Markerless Inspection of Augmented Reality Objects Using Fingertip Tracking. *2007 11th IEEE International Symposium on Wearable Computers*, pp. 83–90. doi : 10.1109/ISWC.2007.4373785.
- Li, Z., Chan, J., Walton, J., Benko, H., Wigdor, D. & Glueck, M. (2021). Armstrong : An Empirical Examination of Pointing at Non-Dominant Arm-Anchored UIs in Virtual Reality. *Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 1–14. doi : 10.1145/3411764.3445064.
- Lilija, K., Kyllingsbæk, S. & Hornbæk, K. (2021). Correction of Avatar Hand Movements Supports Learning of a Motor Skill. *2021 IEEE Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, pp. 1–8. doi : 10.1109/VR50410.2021.00069.
- Norman, D. A. (2010). Natural User Interfaces Are Not Natural. *Interactions*, 17(3), 6–10. doi : 10.1145/1744161.1744163.
- Piumsomboon, T. (2015). *Natural Hand Interaction for Augmented Reality*. (Thèse de doctorat, University of Canterbury, Christchurch, Nouvelle-Zélande).
- Piumsomboon, T., Clark, A., Billingham, M. & Cockburn, A. (2013). User-Defined Gestures for Augmented Reality. *Human-Computer Interaction – INTERACT 2013*, 8118, 282–299. doi : 10.1007/978-3-642-40480-1\_18.
- Rovelo, G., Degraen, D., Vanacken, D., Luyten, K. & Coninx, K. (2015). Gestu-Wan - An Intelligible Mid-Air Gesture Guidance System for Walk-up-and-Use Displays. *Human-Computer Interaction – INTERACT 2015*, (Lecture Notes in Computer Science), 368–386. doi : 10.1007/978-3-319-22668-2\_28.
- Schlünsen, R., Ariza, O. & Steinicke, F. (2019). A VR Study on Freehand vs. Widgets for 3D Manipulation Tasks. *Proceedings of Mensch Und Computer 2019*, (MuC'19), 223–233. doi : 10.1145/3340764.3340791.
- Schmidt, R. A. & Bjork, R. A. (1992). New Conceptualizations of Practice : Common Principles in Three Paradigms Suggest New Concepts for Training. *Psychol Sci*, 3(4), 207–218. doi : 10.1111/j.1467-9280.1992.tb00029.x.
- Sodhi, R., Benko, H. & Wilson, A. (2012). LightGuide : Projected Visualizations for Hand Movement Guidance. *Proceedings of the 2012 ACM Annual Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI '12*, pp. 179. doi : 10.1145/2207676.2207702.
- Sousa, M., Vieira, J., Medeiros, D., Arsenio, A. & Jorge, J. (2016). SleeveAR : Augmented Reality for Rehabilitation Using Realtime Feedback. *Proceedings of the 21st International Conference on Intelligent User Interfaces*, (IUI '16), 175–185. doi : 10.1145/2856767.2856773.

- Tang, R., Yang, X.-D., Bateman, S., Jorge, J. & Tang, A. (2015). Physio@Home : Exploring Visual Guidance and Feedback Techniques for Physiotherapy Exercises. *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 4123–4132. doi : 10.1145/2702123.2702401.
- Ultraleap. (2023). Ultraleap Launches Second Generation of Iconic Hand Tracking Camera – Leap Motion Controller 2 | Ultraleap. Repéré à <https://www.ultraleap.com/company/news/press-release/leap-motion-controller-2/>.
- Velloso, E., Bulling, A. & Gellersen, H. (2013). MotionMA : Motion Modelling and Analysis by Demonstration. *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, (CHI '13), 1309–1318. doi : 10.1145/2470654.2466171.
- Villarreal, M. R. (2008). File :Scheme Human Hand Bones-Fr.Svg - Wikimedia Commons [AAAA]. Repéré à [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Scheme\\_human\\_hand\\_bones-fr.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Scheme_human_hand_bones-fr.svg).
- von Hardenberg, C. & Bérard, F. (2001). Bare-Hand Human-Computer Interaction. *Proceedings of the 2001 Workshop on Perceptive User Interfaces*, (PUI '01), 1–8. doi : 10.1145/971478.971513.
- Wang, Y., Hu, Z., Yao, S. & Liu, H. (2022). Using Visual Feedback to Improve Hand Movement Accuracy in Confined-Occluded Spaces in Virtual Reality. *Vis. Comput.*, 39(4), 1485–1501. doi : 10.1007/s00371-022-02424-2.
- White, S., Lister, L. & Feiner, S. (2007). Visual Hints for Tangible Gestures in Augmented Reality. *2007 6th IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, pp. 1–4. doi : 10.1109/ISMAR.2007.4538824.
- Wobbrock, J. O., Wilson, A. D. & Li, Y. (2007). Gestures without Libraries, Toolkits or Training : A \$1 Recognizer for User Interface Prototypes. *Proceedings of the 20th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology - UIST '07*, pp. 159. doi : 10.1145/1294211.1294238.
- Wobbrock, J. O., Morris, M. R. & Wilson, A. D. (2009). User-Defined Gestures for Surface Computing. *Proceedings of the 27th International Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI 09*, pp. 1083. doi : 10.1145/1518701.1518866.
- Xiao, R., Cao, T., Guo, N., Zhuo, J., Zhang, Y. & Harrison, C. (2018). LumiWatch : On-Arm Projected Graphics and Touch Input. *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, (CHI '18), 1–11. doi : 10.1145/3173574.3173669.

Yang, U. & Kim, G. J. (2002). Implementation and Evaluation of “Just Follow Me” : An Immersive, VR-Based, Motion-Training System. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 11(3), 304–323. doi : 10.1162/105474602317473240.