

Titre:	Impacts du comportement d'un agent virtuel sur les sentiments de présence sociale et de co-présence et sur l'apprentissage lors d'une formation médicale multi-utilisateur en réalité augmentée
Auteur:	Maude Carrier
Date:	2018
Type:	Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis
Référence:	Carrier, M. (2018). Impacts du comportement d'un agent virtuel sur les sentiments de présence sociale et de co-présence et sur l'apprentissage lors d'une formation médicale multi-utilisateur en réalité augmentée [Master's thesis, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. https://publications.polymtl.ca/3713/

Document en libre accès dans PolyPublie

Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/3713/>
PolyPublie URL:

Directeurs de recherche: Benoît Ozell
Advisors:

Programme: Génie informatique
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

IMPACTS DU COMPORTEMENT D'UN AGENT VIRTUEL SUR LES SENTIMENTS
DE PRÉSENCE SOCIALE ET DE CO-PRÉSENCE ET SUR L'APPRENTISSAGE LORS
D'UNE FORMATION MÉDICALE MULTI-UTILISATEUR EN RÉALITÉ AUGMENTÉE

MAUDE CARRIER

DÉPARTEMENT DE GÉNIE INFORMATIQUE ET GÉNIE LOGICIEL
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE INFORMATIQUE)
DÉCEMBRE 2018

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

IMPACTS DU COMPORTEMENT D'UN AGENT VIRTUEL SUR LES SENTIMENTS
DE PRÉSENCE SOCIALE ET DE CO-PRÉSENCE ET SUR L'APPRENTISSAGE LORS
D'UNE FORMATION MÉDICALE MULTI-UTILISATEUR EN RÉALITÉ AUGMENTÉE

présenté par : CARRIER Maude

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées
a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. HURTUT Thomas, Ph. D., président

M. OZELL Benoît, Ph. D., membre et directeur de recherche

Mme CHERIET Farida, Ph. D., membre

DÉDICACE

« avatar », nom masculin (Dictionnaire Larousse)
(sanskrit *avatara*, descente sur la terre d'une divinité)

Définition :

Chacune des incarnations de Vishnou, dans la religion hindoue.

Définition en informatique :

Personnage virtuel que l'utilisateur d'un ordinateur choisit pour le représenter graphiquement, dans un jeu électronique ou dans un lieu virtuel de rencontre.

Clin d'oeil à mon séjour en Inde pendant cette maîtrise.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier :

- mon directeur de recherche, M. Benoît Ozell pour ses judicieux conseils, sa patience et sa confiance tout au long des cinq dernières sessions. Un énorme merci de m'avoir accompagné dans cette aventure,
- le comité d'évaluateurs de ce mémoire, formé de M. Thomas Hurtut et de Mme Farida Cheriet,
- toute l'équipe de réalité augmentée chez CAE Santé dirigée par M. Dominic Fraser, plus spécifiquement merci à messieurs Alexandre Gauthier, Étienne Nadeau, Yannick Perron, Éric Boucher, Éric Provencher, Dustin Chertoff et Pierre St-Hilaire pour votre aide technique à la réalisation de cette expérience,
- le programme Mitacs pour l'aide financière essentielle à la réalisation de ce projet,
- et l'Association des Étudiants aux Cycles Supérieurs de Polytechnique pour votre aide au recrutement de candidats.

Sur un plan plus personnel, je tiens également à remercier :

- ma famille pour leur soutien émotionnel, psychologique, financier et alimentaire (merci maman pour tes petits plats pendant ma rédaction finale),
- ma cousine, amie et infirmière Violaine Martin qui m'a grandement aidé à la rédaction du scénario médical et des questions du test,
- mon ami Julien Lemieux pour avoir prêté sa voix à l'agent virtuel,
- mes amis Danika Couture-Peck et Laurent Montreuil pour leurs apparitions dans plusieurs figures de ce mémoire,
- mes colocataires pour leur soutien moral,
- les membres du laboratoire LIRV pour votre soutien moral dans notre local sans fenêtre,
- et un merci spécial aux 64 participants qui ont volontairement donné de leur temps pour la recherche.

RÉSUMÉ

La technologie qu'est la réalité augmentée s'est récemment beaucoup développée, autant au niveau mobile qu'au niveau du port de lunettes de réalité augmentée, et des simulations médicales l'utilise maintenant. Dans une optique de maximiser les apprentissages réalisés par les futurs médecins et de s'adapter aux méthodes d'enseignement et aux classes actuelles, il est pertinent de s'attarder aux concepts de simulations multi-utilisateurs et d'agent virtuel.

Le développement de simulations multi-utilisateurs permet aux étudiants d'apprendre en groupes, d'échanger pendant les simulations et de travailler en équipe sur un même cas. Des instructeurs virtuels, ou agents virtuels, peuvent également intégrer ces simulations afin de guider les étudiants et de leur enseigner divers concepts ou techniques. Afin de maximiser les apprentissages et de faire ressentir un fort sentiment de présence aux étudiants, les comportements d'un agent virtuel et tout ce qui s'y rattache doivent sembler les plus naturels possible.

C'est cet ajout d'un agent virtuel à une simulation multi-utilisateur qui est original et peu abordé par les études de la communauté scientifique. Or, cette étude vise à développer une simulation multi-utilisateur en réalité augmentée avec les lunettes *Hololens* de Microsoft qui intègre un agent virtuel. Ensuite, grâce à la mise sur pied de cette simulation, cette étude vise à mesurer les impacts du comportement d'un agent virtuel sur le sentiment de présence sociale, le sentiment de co-présence et l'apprentissage lors d'une formation médicale multi-utilisateur en réalité augmentée.

Tous les objectifs de cette étude ont été atteints et deux versions d'une simulation ont été développées et testées sur 32 équipes de deux personnes. La moitié des équipes a vécu l'expérience avec des comportements améliorés de l'agent virtuel (version améliorée), alors que l'autre moitié était le groupe témoin (version standard). Les comportements améliorés de l'agent virtuel sont l'occlusion de celui-ci par l'environnement physique et la conscience de celui-ci de tous les participants présents dans la simulation. Cette conscience des autres se traduit par la connaissance de leurs positions et de leurs orientations dans l'environnement, ce qui permet à l'agent virtuel de regarder individuellement chaque participant. Les participants voient dans ce cas le « même » agent virtuel qui bouge de la même façon pour tous et qui réagit à leurs paroles. L'implémentation de ces comportements a requis le développement d'un réseau de communication pouvant supporter le partage des informations nécessaires au mode multi-utilisateur et le développement d'algorithmes en lien avec le partage d'objets 3D. Ces développements, ainsi que tous les différents algorithmes en lien avec les comportements

améliorés de l'agent virtuel, représentent des avancées intéressantes pour la recherche dans le domaine des simulations multi-utilisateurs en réalité augmentée.

Les cinq hypothèses de cette étude sont malheureusement infirmées, mais l'analyse des résultats a tout de même permis de conclure que les équipes qui ont vécu l'expérience en version améliorée ont trouvé que l'agent virtuel les avait davantage aidés dans leurs apprentissages et que celui-ci semblait plus humain, moins contrôlé par un ordinateur, que les équipes de la version standard. Le sentiment de co-présence entre un participant et l'agent virtuel était aussi plus élevé pour les participants de la version améliorée, de même que pour la motivation à l'apprentissage de ces participants, mais nous ne pouvons pas le prouver de manière significative (respectivement $p = 0,0509$ et $p = 0,071$, avec un seuil de signification α de 5%). Plusieurs tentatives d'explications du rejet de toutes les hypothèses sont proposées, telles que le cours théorique trop long et pas assez interactif, les connaissances préalables en anatomie humaine des participants ou encore la taille de l'échantillon.

Cette expérience a permis de valider que les variables étudiées, soit l'effet d'occlusion de l'agent virtuel avec son environnement physique et la conscience par celui-ci de tous les participants présents dans la simulation gagnent à être intégrés aux simulations multi-utilisateurs de façon plus accentuée.

ABSTRACT

Augmented reality has recently developed a lot, both on mobiles or on headsets, and medical simulations are now using it. In order to maximize the learnings of future doctors and to adapt the teaching methods to today's classes, it is relevant to focus on the concepts of multi-user simulations and virtual agent.

Multi-user simulations allow students to learn in groups, to exchange during simulations and to work as a team on the same case. Virtual instructors, or virtual agents, can also integrate these simulations to guide the students and to teach them various concepts or techniques. With a purpose to maximize the students' learnings and to create a strong sense of presence, the behaviors of a virtual agent and everything related to it must be as natural as possible.

It is this adding of a virtual agent to a multi-user simulation that is original and little addressed by the studies of the scientific community. Therefore, this study aims to develop an augmented reality multi-user simulation, with the *Hololens* headset developed by Microsoft, which integrates a virtual agent. Then, thanks to the development of that simulation, this study aims to measure the impacts of a virtual agent's behaviors on the feeling of social presence, the feeling of copresence and the learnings of students during a multi-user medical training in augmented reality.

Every objectives of this study was achieved and two versions of a simulation were developed and tested on 32 teams of two persons. Half of the teams experienced this study with improved virtual agent behaviors (improved version), while the other half was the control group (standard version). The improved behaviors of the virtual agent are the occlusion of this virtual agent by the physical environment and the awareness by it of all the participants in the simulation. This awareness of others comes from the knowledge of their positions and their orientations in the environment, allowing the virtual agent to look at each participant individually. Thus, the participants of the improved version see the "same" virtual agent who moves in the same way for everyone and who reacts to their voice. The implementation of these behaviors has required the development of a communication network that can support the sharing of informations needed for the multi-user mode and the development of algorithms related to the sharing of 3D objects. These developments, as well as all the different algorithms related to the improved behaviors of the virtuel agent, are interesting advances for the research of multi-user simulations in augmented reality.

The five hypotheses of this study are unfortunately invalidated, but the analysis of the results nevertheless led to the conclusion that the teams who experienced the improved version

found that the virtual agent had helped them more in their learning and that it seemed more human, less controlled by a computer, than the teams of the standard version. The feeling of copresence between a participant and the virtual agent was also higher for the participants of the improved version, as well as for the motivation to learn from these participants, but we can't prove it significantly (respectively $p = 0,0509$ and $p = 0,071$, with an α significance threshold of 5%). Several explanations that try to explain the rejection of all the hypotheses are proposed, such as the theoretical course that was too long and not enough interactive, the prior knowledge in human anatomy of the participants or the size of the samples.

This experiment allowed us to validate that the studied variables, which are the effects of occlusion of the virtual agent by his physical environment and the consciousness by this virtual agent of all the participants in the simulation, gain to be integrated in future multi-user simulations and in a more accentuated way.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE	iii
REMERCIEMENTS	iv
RÉSUMÉ	v
ABSTRACT	vii
TABLE DES MATIÈRES	ix
LISTE DES TABLEAUX	xii
LISTE DES FIGURES	xiii
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	xv
LISTE DES ANNEXES	xvi
CHAPITRE 1 INTRODUCTION	1
1.1 Plan du mémoire	2
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE	3
2.1 Introduction	3
2.2 Définition de la réalité augmentée (RA)	3
2.3 Apprentissage dans un environnement virtuel (EV)	5
2.3.1 Utilisation de la réalité augmentée (RA) pour des simulations médicales	6
2.4 Sentiment de présence	8
2.4.1 Présence sociale	10
2.4.2 Présence et apprentissage	11
2.5 Modulateurs du sentiment de présence	12
2.5.1 Amélioration des indices de profondeur	13
2.5.2 Ajout d'un aspect social	14
2.6 Agents virtuels (AV) dans un environnement virtuel (EV)	16
2.6.1 Multi-utilisateur	18
2.7 Partage d'objets 3D	20
2.7.1 Partage de la position physique initiale d'un objet virtuel	20

2.7.2	Propagation des transformations d'un objet virtuel entre les utilisateurs	22
2.8	Méthodes d'évaluation de la présence	22
2.8.1	Méthodes subjectives	23
2.8.2	Méthodes objectives	25
2.9	Objectifs	27
2.9.1	Objectifs spécifiques	27
2.10	Contexte de cette recherche	28
2.11	Hypothèses	29
CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE DE LA SIMULATION		30
3.1	Matériel	30
3.1.1	Visiocasque de RA : lunettes <i>Hololens</i> de Microsoft	30
3.1.2	<i>Clicker</i>	33
3.1.3	Mannequin	34
3.1.4	Logiciels utilisés	34
3.2	Scénario	35
3.3	Procédures	39
3.4	Réseau de communication	42
3.4.1	Version A	43
3.4.2	Version B	44
3.5	Simulation	45
3.5.1	Sous-composantes de la scène Unity	46
3.5.2	Animations	47
3.5.3	Chronologie de la simulation	47
3.5.4	Positionnement des hologrammes pour tous les utilisateurs	48
3.5.5	Instance joueur	49
3.6	Implémentation des différents comportements de l'AV	49
3.6.1	$\theta_{occlusion}$: Occlusion (version améliorée seulement)	50
3.6.2	$\theta_{conscience}$: Conscience des tous les participants et de leurs positions, de leurs orientations et de leurs paroles par l'AV (version améliorée seulement)	52
3.7	Calibration	54
CHAPITRE 4 MÉTHODOLOGIE DE LA PRISE DE DONNÉES		56
4.1	Signification statistique	56
4.2	Participants	57
4.3	Choix des différentes mesures d'évaluation	59

4.3.1	Questionnaire d'évaluation du sentiment de présence sociale	59
4.3.2	Questionnaire d'évaluation du sentiment de co-présence	59
4.3.3	Questionnaire d'évaluation de la motivation à l'apprentissage	60
4.3.4	Échanges verbaux entre coéquipiers	60
4.3.5	Résultat au test	60
4.3.6	Effet de l'occlusion	61
4.3.7	Travail d'équipe pour relever la jaquette	61
4.3.8	Considération des remises en question de l'AV	61
4.4	Synthèse	62
CHAPITRE 5 ANALYSE DES RÉSULTATS		63
5.1	Variables et causalité	63
5.2	Choix des tests statistiques	64
5.2.1	Comparaison de deux moyennes pour des échantillons indépendants .	66
5.2.2	Comparaison de deux variables catégorielles	67
5.3	Analyse des résultats	67
5.3.1	Questionnaire d'évaluation du sentiment de présence sociale	68
5.3.2	Questionnaire d'évaluation du sentiment de co-présence	70
5.3.3	Questionnaire d'évaluation de la motivation à l'apprentissage	72
5.3.4	Échanges verbaux entre coéquipiers	74
5.3.5	Résultat au test	76
5.3.6	Effet de l'occlusion	77
5.3.7	Travail d'équipe pour relever la jaquette	77
5.3.8	Considération des remises en question de l'AV	77
CHAPITRE 6 DISCUSSION		78
6.1	Vérification des hypothèses	80
6.2	Limitations de l'étude et biais	86
CHAPITRE 7 CONCLUSION		88
7.1	Synthèse des travaux	88
7.2	Améliorations futures	89
RÉFÉRENCES		91
ANNEXES		99

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1	Modèle de tableau : Éléments ajoutés par la chercheuse à la simulation en lien avec les hypothèses	30
Tableau 3.2	Synthèse des manifestations des différences entre les deux versions de la simulation	50
Tableau 4.1	Hypothèses et mesures associées	62
Tableau 5.1	Analyse statistique des résultats du test d'évaluation du sentiment de présence sociale. * : $p < 0.05$	68
Tableau 5.2	Analyse statistique du résultat global du test d'évaluation du sentiment de présence sociale	69
Tableau 5.3	Analyse statistique des résultats du test d'évaluation du sentiment de co-présence. * : $p < 0.05$; ** : $p < 0.01$; *** : $p < 0.001$	70
Tableau 5.4	Analyse statistique du résultat global du test d'évaluation du sentiment de présence sociale. * : $p < 0.05$; ** : $p < 0.01$; *** : $p < 0.001$	71
Tableau 5.5	Analyse statistique des résultats du test d'évaluation de la motivation à l'apprentissage. * : $p < 0.05$	72
Tableau 5.6	Analyse statistique du résultat global du test d'évaluation de la motivation à l'apprentissage	73
Tableau 5.7	Analyse statistique de la durée des échanges verbaux entre les coéquipiers pendant le test donné par l'AV	74
Tableau 5.8	Analyse statistique des résultats au test	76
Tableau 5.9	Analyse statistique de l'effet d'occlusion. * : $p < 0.05$	77
Tableau 5.10	Analyse statistique du travail en équipe	77
Tableau 5.11	Analyse statistique des remises en question de l'AV	77

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1	Échelle de virtualité (Milgram et Kishino, 1994) ©2017IEICE, permission 17RB0086	4
Figure 2.2	Différents mannequins utilisés par l'industrie	7
Figure 2.3	Système de coordonnées d'une image détectée par le logiciel <i>Vuforia</i> (Vuforia, 2017a)	21
Figure 2.4	Analyse spatiale d'un environnement (Microsoft, 2018d)	21
Figure 2.5	Agent virtuel (AV)	28
Figure 3.1	Visiocasque <i>Hololens</i> de Microsoft. Crédit photo : microsoft.com/hololens	31
Figure 3.2	<i>Clicker</i> (Microsoft, 2018e)	33
Figure 3.3	Mannequin	35
Figure 3.4	Préparation au commencement de la simulation	36
Figure 3.5	Occlusion ou non de l'AV par les objets physiques pour chaque version	37
Figure 3.6	Occlusion ou non des organes par la jaquette pour chaque version . .	37
Figure 3.7	Explications de l'AV accompagnées d'éléments visuels qui aident à la mémorisation de l'information	38
Figure 3.8	Choix de réponse à une question du test	38
Figure 3.9	Arrangement de la scène où se déroule l'expérience	40
Figure 3.10	Sphère blanche au-dessus des lunettes <i>Hololens</i> de chaque utilisateur	40
Figure 3.11	Exemple d'un environnement de communication pour une simulation à trois utilisateurs	43
Figure 3.12	Composantes virtuelles de la scène Unity	45
Figure 3.13	Ligne du temps de la présentation de l'AV	48
Figure 3.14	Exemple d'occlusion d'une chaise réelle avec un hologramme pour deux affichages subséquents avec l'utilisation de la cartographie spatiale . .	51
Figure 3.15	Hologrammes noirs qui rendent possible l'occlusion	52
Figure 3.16	Regard et orientation de l'AV pour chaque version	53
Figure 3.17	Sélection d'une session	54
Figure 3.18	Calibration du mannequin et de la table	55
Figure 5.1	Distribution normale et représentation des zones d'acceptations et de rejet (inspiré de Thietart (2014))	65
Figure 5.2	Arbre décisionnel de la méthode d'analyse statistique à choisir pour une comparaison entre deux moyennes expérimentales (inspiré de STHDA (2018))	67

Figure 5.3	Réponses au questionnaire d'évaluation de la présence sociale	68
Figure 5.4	Réponses au questionnaire d'évaluation du sentiment de co-présence .	71
Figure 5.5	Réponses au questionnaire d'évaluation de la motivation à l'apprentissage	73
Figure 5.6	Somme de la durée des échanges verbaux entre coéquipiers entre les questions du test donné par l'AV	74
Figure 5.7	Résultats au test	76
Figure 6.1	Influence de chaque personne, physique ou virtuelle, sur les différentes hypothèses	79
Figure A.1	Étapes de l'expérience et durées associées	100

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

AV	Agent virtuel
EV	Environnement virtuel
RA	Réalité augmentée
RV	Réalité virtuelle
2D	Deux dimensions
3D	Trois dimensions

LISTE DES ANNEXES

Annexe A	FORMULAIRE D'INFORMATION ET DE CONSENTEMENT	99
Annexe B	FORMULAIRE DE RENSEIGNEMENTS	104
Annexe C	QUESTIONNAIRE DE PRÉSENCE SOCIALE	105
Annexe D	QUESTIONNAIRE DE CO-PRÉSENCE	106
Annexe E	QUESTIONNAIRE DE MOTIVATION À L'APPRENTISSAGE	107
Annexe F	RECRUTEMENT	108
Annexe G	SCÉNARIO COMPLET	109
Annexe H	FICHIER DE CODE - AnchorNetworkTransform	118
Annexe I	TEST DE SHAPIRO-WILK	119
Annexe J	TEST DE COMPARAISON DE DEUX VARIANCES	120
Annexe K	TEST DE STUDENT	121
Annexe L	TEST DE WILCOXON	122
Annexe M	TEST DE KHI-2	123

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

Comme dans tous les domaines universitaires, une grande partie des apprentissages se fait par les ouvrages et par les manuels ou par les cours magistraux. Ces méthodes traditionnelles d'apprentissage s'adaptent tranquillement aux avancées technologiques et aux nouvelles générations d'étudiants, particulièrement pour ce qui a trait au domaine de la médecine. Bien que les futurs médecins reçoivent une longue formation théorique et participent à des stages pratiques avant d'intégrer le marché du travail, les actes que leur réserve leur métier peuvent être lourds de conséquences si jamais ils sont mal exécutés. De multiples produits ont vu le jour depuis quelques dizaines d'années afin de permettre aux futurs médecins de mieux s'entrainer et d'être totalement à l'aise avec leur profession avant leur arrivée en milieu hospitalier.

Le mannequin médical, de nos jours bien présent dans les écoles, est un bon exemple. Des mannequins à la simple forme humaine ont d'abord été conçus, puis ces mannequins n'ont cessé d'évoluer afin d'imiter encore plus un réel patient. Il est maintenant possible pour un étudiant de pratiquer, entre autres, des techniques de réanimation, d'échographie, d'accouchement ou d'opération sur un mannequin qui cligne des yeux, bouge, respire et même parle parfois. Dans cette mission de simuler avec le plus de réalisme possible des cas médicaux et de maximiser la rétention d'information pour les étudiants que se sont lancées les entreprises de simulation, plusieurs simulations médicales se tournent maintenant vers l'intégration d'éléments virtuels.

La technologie qu'est la réalité augmentée s'est récemment beaucoup développée, autant au niveau mobile qu'au niveau du port de lunettes de réalité augmentée, et des simulations médicales l'utilisent désormais. Il est effet très intéressant pour un étudiant de visualiser, par exemple, les organes en trois dimensions « à l'intérieur » d'un mannequin. D'autres éléments virtuels peuvent également intégrer une simulation médicale en vue de reproduire le plus fidèlement possible le sentiment de traiter un vrai cas. Ce sentiment de « traiter un vrai cas » décrit en fait le concept de sentiment de présence. Il est intuitif de penser que plus un étudiant a l'impression de traiter un vrai patient, avec le sentiment de stress et d'urgence que cela engendre, plus l'apprentissage de celui-ci sera grand.

Toujours dans une optique de maximiser les apprentissages réalisés par les futurs médecins et de s'adapter aux méthodes d'enseignement et aux classes actuelles, il est pertinent de s'attarder aux concepts de simulations multi-utilisateurs et d'agent virtuel. D'abord, comme dans une classe ou dans un stage, les étudiants sont rarement seuls avec un patient. Le développement de simulations multi-utilisateurs permet aux étudiants d'apprendre en groupes,

d'échanger pendant les simulations et de travailler en équipe sur un même cas.

Dans une vision un peu plus moderne, des instructeurs virtuels peuvent également intégrer ces simulations afin de guider les étudiants et de leur enseigner divers concepts ou techniques. Dans un contexte de réalité augmentée et d'environnement virtuel, un instructeur virtuel se nomme un « agent virtuel ». Les agents virtuels peuvent souvent sembler être robotiques et être contrôlés par ordinateur, ce qui est peu souhaitable dans une simulation qui tente d'être la plus réaliste possible. Afin de maximiser l'apprentissage et de faire ressentir un fort sentiment de présence aux étudiants, les comportements et tout ce qui a trait à un agent virtuel doivent sembler les plus naturels possible.

La présente vise à évaluer les impacts des comportements d'un agent virtuel sur le sentiment de présence sociale, le sentiment de co-présence et l'apprentissage lors d'une formation médicale multi-utilisateur en réalité augmentée. Les sentiments de présence sociale et de co-présence sont très liés au sentiment de présence standard, mais sont davantage adaptés à une simulation multi-utilisateur. Autrement dit, cette étude a pour but ultime de rendre un agent virtuel plus réaliste afin de créer un fort sentiment de présence et afin de maximiser l'apprentissage des étudiants. Pour ce faire, une simulation en réalité augmentée ainsi que les différents comportements de l'agent virtuel seront développés.

1.1 Plan du mémoire

Le prochain chapitre de ce mémoire, la revue de littérature, présente les études déjà publiées par les auteurs de la communauté scientifique en lien avec le présent sujet de recherche. Ce même chapitre définit également tous les concepts à connaître et annonce les objectifs et les hypothèses en lien avec la question de recherche. Les chapitres 3 et 4 expliquent la méthodologie de cette expérience. Premièrement, le chapitre 3 décrit la simulation que vivent les participants dans le cadre de cette étude ainsi que la méthodologie en lien avec la construction et le développement de cette simulation. Deuxièmement, le chapitre 4 décrit la méthodologie en lien avec la prise des données pendant et après la simulation.

Le chapitre 5 analyse ensuite les résultats obtenus à l'aide de différentes méthodes statistiques, puis les résultats analysés sont discutés et approfondis au chapitre 6. Finalement, le tout est conclu et des améliorations à l'étude sont présentées à la conclusion au chapitre 7.

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

2.1 Introduction

Un visiocasque est un casque à vision stéréoscopique avec un écran miniature ou une projection d'hologrammes devant chaque oeil. L'affichage des deux écrans est légèrement différent pour s'adapter au point de vue décalé de chacun des deux yeux et ainsi permettre au cerveau de reconstruire une image en trois dimensions (3D), d'où l'appellation du casque à vision « stéréoscopique ». Dans ce contexte, un hologramme représente un objet virtuel 3D visible avec le port d'un visiocasque.

Cette revue de littérature met en lumière ce qui a déjà été fait par la communauté scientifique. D'abord, le sentiment de présence et tout ce qui l'influence seront définis, puisqu'une des caractéristiques des visiocasques est de plonger son utilisateur dans un environnement virtuel (EV) et de créer chez celui-ci un certain sentiment de présence.

Ensuite, l'influence du sentiment de présence sur l'apprentissage sera abordée. L'intégration d'un visiocasque dans une simulation médicale ferait en effet ressentir un sentiment de présence aux utilisateurs et cet aspect est souhaitable. L'apprentissage d'un étudiant qui se sent « présent » dans une simulation y sera bonifié.

Finalement, les simulations en mode multi-utilisateur et tous les défis qu'elles comportent ainsi que l'intégration d'un agent virtuel (AV) seront traités. Ce type de simulation, encore peu abordée par les auteurs de la communauté scientifique, est une avenue intéressante pour les simulations en réalité augmentée.

2.2 Définition de la réalité augmentée (RA)

Les définitions des concepts de réalité virtuelle (RV), de réalité mixte, de réalité augmentée (RA) et de virtualité augmentée ont été définies par la communauté scientifique, mais divergent parfois d'une étude à l'autre. Dans le cadre de cette recherche, les définitions avant-gardistes établies par Milgram et Kishino (1994) seront utilisées. L'échelle de virtualité (*virtuality continuum*) de Milgram et Kishino (1994), présentée à la figure 2.1, est d'ailleurs toujours très actuelle et illustre bien les différences entre le « réel » et le « virtuel » lorsqu'il est question d'environnements.

Selon cette échelle, l'extrême gauche correspond à l'environnement réel dans lequel nous vivons tous les jours ou encore au contenu filmé par une caméra traditionnelle sans artifice.



Figure 2.1 – Échelle de virtualité (Milgram et Kishino, 1994)
©2017 IEICE, permission 17RB0086

L'extrême droite correspond à un environnement complètement virtuel. Milgram et Kishino (1994) abordent l'EV comme un environnement dans lequel se trouvent uniquement des objets virtuels. Cela correspond à un environnement en RV, par exemple.

Lorsqu'une même technologie (un visiocasque par exemple) présente à la fois des objets réels et virtuels, il est alors question de réalité mixte. Il existe désormais plusieurs types de visiocasques qui entrent dans la catégorie de réalité mixte, et ils se divisent généralement en deux sous-catégories : les dispositifs de réalité augmentée et les dispositifs de virtualité augmentée.

La différence majeure entre la réalité augmentée et la virtualité augmentée réside dans la nature de la scène de départ. Lorsqu'un visiocasque utilise un environnement réel pour y ajouter des objets virtuels, il est question de réalité augmentée. Un bon exemple d'un visiocasque de RA est un dispositif à vision transparente (*see-through device*) qui ajoute des hologrammes à la vision, comme les lunettes *Hololens* de Microsoft présentées à la section 3.1.1. À l'inverse, si un visiocasque tente de rendre un EV plus réaliste en y ajoutant des objets réels, il s'agit de virtualité augmentée. Autrement dit, un visiocasque de virtualité augmentée est une lunette avec des écrans devant les yeux qui affiche un EV et ajoute en superposition des images d'un environnement réel. De tels systèmes existent, comme l'interface pour engins volants conçu par Rackliffe (2005) qui consiste à afficher un paysage virtuel, jusqu'à ce que l'utilisateur s'approche d'un aéroport, dans lequel cas une photographie de l'aéroport en question se superpose partiellement à l'EV.

La distinction entre réalité augmentée et virtualité augmentée n'est cependant pas toujours facile à faire et dans certains cas particuliers, il peut être question de « réalité hybride » afin de mieux caractériser un système qui se situe exactement au centre de l'échelle de Milgram et Kishino (1994). Quoi qu'il en soit, l'appellation « réalité mixte » pourra toujours être utilisée pour caractériser les dispositifs qui se trouvent dans la zone grise entre un environnement réel et virtuel.

Dans le cadre de cette recherche, il est question de réalité augmentée (RA).

2.3 Apprentissage dans un environnement virtuel (EV)

Dans une optique d'apprentissage en milieu médical, les livres sont un outil clé. À l'université, les enseignants les utilisent comme référence et comme support visuel. D'autres supports éducatifs font leur apparition avec le temps, comme les documentaires vidéos, les cours en ligne, les mannequins, etc. Les technologies comme la réalité virtuelle et la réalité mixte ont également le potentiel de devenir des outils d'apprentissage dans de multiples domaines, dont le domaine médical. Il est d'ailleurs prouvé que de suivre des instructions dans un environnement virtuel ou réel produit les mêmes résultats sur les performances de l'étudiant lorsque celui-ci applique ses connaissances à une tâche dans le monde réel (Choi et Clark, 2006; Ganier et al., 2014). C'est la motivation à apprendre qui varie, comme le confirme l'étude de Tobar-Muñoz et al. (2017), qui vise à comparer la compréhension de jeunes étudiants qui lisent un livre standard ou un livre avec la RA.

D'ailleurs, l'utilisation de ce nouvel outil d'apprentissage qu'est l'EV médical conviendrait davantage à la nouvelle génération d'étudiants (Ijaz et al., 2017). En effet, les futurs étudiants universitaires sont, comparativement aux générations avant eux, nés dans l'ère technologique des communications rapides et de l'internet ainsi que dans l'abondance d'informations. Ils font donc preuve d'un grand sens multitâches, peuvent traiter beaucoup d'informations en parallèle, sont socialement très connectés, sont habitués à obtenir des résultats ou des gratifications instantanément et prennent des décisions rapidement (Prensky, 2003). Vassileva (2008) a défini deux enjeux majeurs qui doivent être respectés afin d'adapter l'éducation à la nouvelle génération connectée :

1. Les plateformes d'apprentissages doivent aider l'utilisateur à trouver la bonne information ou la bonne ressource (et non donner les réponses) ;
2. Les outils d'apprentissages doivent motiver l'étudiant.

Donner tout le matériel nécessaire à l'apprentissage d'un concept ne sera plus suffisant. Toujours selon Prensky (2003), cette génération apprend en étant stimulée et en cherchant par elle-même. Par exemple, ces nouveaux étudiants peuvent rester des heures devant un jeu vidéo, mais ont rarement la même patience en classe à l'école. Pourquoi alors ne pas appliquer les stratégies d'apprentissage utilisées dans les environnements virtuels des jeux vidéos dans un contexte académique ?

Ijaz et al. (2017) ont d'ailleurs effectué une recherche à ce sujet dans un contexte d'éducation historique. Une réplique d'une civilisation ancienne a été recréée dans un EV pour la RV. Les participants sélectionnés pour l'étude étaient séparés en trois groupes : le premier devait lire un livre portant sur la civilisation en question, le deuxième devait regarder un documentaire

vidéo à son sujet et le troisième visitait la civilisation et interagissait avec ses habitants en RV. Les informations transmises par les trois médiums étaient toutes identiques. Tous les participants complétaient un test à la fin de l'expérience afin de tester leurs nouvelles connaissances. Les résultats de l'étude de Ijaz et al. (2017) montrent que le groupe qui a effectué l'expérience en RV a eu des notes environ 20% plus élevées que les deux autres groupes.

Park et Catrambone (2008) ont poussé le concept d'apprentissage dans un EV en testant si la pression créée par l'observation d'un enseignant lorsque celui-ci évalue un étudiant peut être reproduite dans un scénario avec un agent virtuel (AV). De façon générale, un étudiant qui est observé pendant qu'il effectue une tâche facile obtient de meilleurs résultats que lorsqu'il effectue cette même tâche seul. À l'opposé, un étudiant observé lorsqu'il effectue une tâche complexe présente des résultats inférieurs que s'il avait effectué cette même tâche seul. Or, comme l'expliquent Park et Catrambone (2008), ce phénomène, appelé facilitation sociale, peut également être observé si un AV affiché sur un moniteur 2D observe l'étudiant.

2.3.1 Utilisation de la réalité augmentée (RA) pour des simulations médicales

Le but d'un simulateur médical est de permettre à des étudiants en médecine d'apprendre leur métier sans toutefois faire courir des risques inutiles aux patients dus à leur inexpérience. L'utilisation de simulateurs médicaux assure la sécurité des patients cobayes et des futurs patients des étudiants. Cela permet aussi aux étudiants de se pratiquer de nombreuses fois, car les pratiques sur des patients vivants sont souvent limitées et de voir des pathologies qui ne sont pas toujours présentes sur les patients « disponibles ».

De nos jours, de nombreux types de simulateurs médicaux existent, dont le traditionnel mannequin. Les mannequins tentent d'approcher la réalité le plus fidèlement possible en imitant les réponses corporelles des humains. Par exemple, il est aujourd'hui possible avec un mannequin de prendre sa pression sanguine, d'observer le mouvement de sa cage thoracique ou de voir ses pupilles se dilater. Plusieurs mannequins permettent aussi d'insérer différents types de sondes à l'intérieur d'eux pour simuler, par exemple, un cathéter. Certains simulateurs utilisent même des systèmes de retour de force (retour haptique). Différents types de mannequins utilisés dans l'industrie sont illustrés aux figures 2.2a à 2.2d.

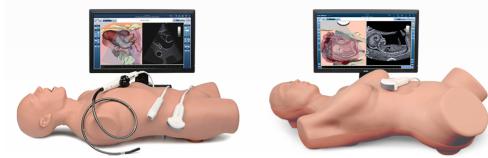
Dû à l'utilisation d'un mannequin lors de certaines simulations médicales, les simulations ne peuvent pas toujours être purement virtuelles. C'est en fait cet univers hybride entre le virtuel (les hologrammes) et le réel (le mannequin) qui fait la force de la RA et qui va distinguer les simulations en RA de celles en RV. Aussi, la littérature scientifique est très riche en ce qui concerne les simulations médicales, ce qui ajoute de la crédibilité à cette recherche.



(a) Mannequin médical traditionnel.
Crédit photo : CAE Santé



(b) Mannequin pour les simulations d'accouchements. Crédit photo : CAE Santé



(c) Mannequin pour les simulations de traitements d'imagerie. Crédit photo : CAE Santé



(d) Mannequin pour les simulations haptiques d'interventions neurologiques.
Crédit photo : CAE Santé

Figure 2.2 – Différents mannequins utilisés par l'industrie

De plus en plus, les simulateurs médicaux tentent de stimuler davantage les sens des étudiants, en particulier leur vision. Il est intéressant, par exemple, d'illustrer les organes du mannequin en superposition avec celui-ci, de changer complètement l'environnement dans lequel se trouvent les étudiants ou encore de simuler le sang. Les technologies que sont la réalité mixte et la réalité virtuelle peuvent produire ce genre d'effets.

Plusieurs études portant sur l'intégration de la RA dans une simulation médicale ont déjà été effectuées. Un exemple de l'utilisation de la RA sans l'utilisation d'un visiocasque a été réalisé par Samosky et al. (2012). Ils ont développé *Body Explorer AR*, un simulateur médical qui projette des images sur un mannequin. Plus précisément, il s'agit d'un mannequin fixe qui repose sur une table autour de laquelle peuvent se trouver plusieurs étudiants. À l'aide d'un projecteur suspendu au plafond, des images d'organes, de muscles ou encore du système sanguin se superposent sur le thorax du mannequin.

Bien que l'usage d'un projecteur soit intéressant et considéré comme de la RA, un tout autre niveau de réalisme peut être atteint dans les simulations médicales qui utilisent un visiocasque. Par exemple, Bichlmeier et al. (2007) ont développé une simulation (avec un

visiocasque de RA développé par Sauer et al. (2002)) sur de véritables patients afin d'assister le personnel médical dans diverses opérations. Les médecins pouvaient donc voir les différents os et organes d'un patient directement superposés sur leur peau (la disposition des os et des organes était préalablement calibrée afin que tout concorde avec le patient en question). Ainsi, lors d'une intervention chirurgicale, il est possible de voir en temps réel la position d'un os et même de voir la projection des instruments utilisés à l'intérieur du corps du patient. Bichlmeier et al. (2007) se sont surtout penchés sur différentes techniques pour afficher convenablement les images des organes et des os sur le corps humain, sans que ceux-ci subissent de distorsion due à une perspective ou à un calcul inexact de la profondeur.

Plusieurs autres études ont également utilisé des lunettes de RA dans un contexte de formation médicale, notamment Rosenthal et al. (2002) qui ont développé une assistance pour les chirurgiens qui effectuent des biopsies à l'aiguille.

2.4 Sentiment de présence

Le sentiment de présence réfère à la perception psychologique d'être « là » dans un environnement (Heeter, 1992; Sheridan, 1992; Witmer et Singer, 1998). Il est la plupart du temps question d'un EV lorsqu'il est question de sentiment de présence, mais ce n'est pas une condition nécessaire. Un sentiment de présence peut être ressenti dans d'autres types d'environnement. comme un rêve, tel que souligné par Witmer et Singer (1998). Cette définition générale du sentiment de présence semble être acceptée par la communauté scientifique, mais de multiples chercheurs y ajoutent des nuances et des précisions et certains critiquent même la validité de ce métrique (Kalawsky, 2000).

La communauté scientifique a, entre autres, différentes opinions sur ce qui serait à la source de ce sentiment de présence. Riva (2009) a notamment lié les concepts de présence, d'action, d'espace et d'intention. D'abord, il avance qu'un sujet est présent dans un monde (réel ou virtuel) si il ou elle peut agir dans celui-ci. Ensuite, outre la connexion entre l'action et le sentiment de présence, Riva (2009) accorde beaucoup d'importance aux intentions des sujets et à la réalisation de ces intentions. Plusieurs types d'intention existent, soit l'intention future, présente et motrice (Pacherie, 2006). Le fait de vivre tous ces différents types d'intention contribue au sentiment de présence. En fait, un niveau de présence maximal serait atteint lorsqu'un environnement supporte tous les stades de la chaîne d'intentions. Conséquemment, plus une action posée par un sujet dans un environnement donné est complexe, plus l'environnement doit réussir à supporter des niveaux d'intentions élevés pour donner au sujet un sentiment de présence optimal.

D'un autre point de vue, Witmer et Singer (1998) avancent que la présence dans un environnement virtuel dépend de l'attention et de la concentration de l'utilisateur qui passe du monde physique au monde virtuel. Le niveau d'attention accordé à une tâche varie généralement en fonction de la nature de cette tâche. Par exemple, l'attention nécessaire n'est pas le même pour tenir une conversation au téléphone ou pour lire un livre. Ce serait donc ce niveau de « focus » dans l'EV qui causerait différents niveaux de présence. Cependant, il n'est pas nécessaire d'avoir un niveau d'attention aussi élevé que lors de la lecture d'un livre pour ressentir un sentiment de présence.

Différemment, Heeter (1992) avance que le sentiment de présence proviendrait en fait de la combinaison de trois sentiments, ou les « trois dimensions de la présence » :

1. Présence personnelle. Il s'agit de la facilité avec laquelle un utilisateur peut se projeter dans un EV. Par exemple, est-il possible de voir un corps qui ressemble au sien ou de relier des éléments de l'EV avec ses propres souvenirs ?
2. Présence sociale. Le sentiment de présence sociale est grand lorsque d'autres personnes (réelles ou virtuelles) partagent l'EV avec l'utilisateur et interagissent avec celui-ci. Cette dimension de la présence, particulièrement en lien avec cette recherche, sera définie plus précisément à la section suivante ;
3. Présence environnementale. Un fort sentiment de présence environnementale est ressenti si l'EV dans lequel se trouve l'utilisateur réagit aux actions de celui-ci. Il s'agit aussi du niveau de réalisme de l'environnement.

Les environnements virtuels peuvent être tirés d'un monde « imaginaire », comme dans un jeu vidéo fantastique, ou peuvent être une réplique du monde réel, comme dans une simulation médicale. Selon Mccall et al. (2011), il est plus facile de ressentir un sentiment de présence dans un environnement irréel (magique) que réel, car on accepte déjà que ce soit virtuel. Dans le cas d'une simulation médicale, l'environnement n'a rien de virtuel pour les étudiants. La création d'un fort sentiment de présence est donc d'autant plus complexe.

Le sentiment de présence est à ne pas confondre avec la sensation d'immersion, qui est l'état psychologique de se sentir présent physiquement « dans » un environnement ou encore de se sentir « enveloppé par » ou « inclus dans » un environnement (Witmer et Singer, 1998). Les deux concepts de sentiment de présence et de sensation d'immersion sont différents, mais étroitement reliés. En effet, plus la sensation d'immersion produite par un EV est grande, plus le sentiment de présence risque d'être grand (Witmer et Singer, 1998). Or, la création d'un EV très immersif contribue à augmenter le sentiment de présence de l'utilisateur.

L'appellation « sentiment de présence » sera utilisée dans cette recherche, faute d'un nou-

veau terme plus adapté à la RA. Comme le soulignent Pütten et al. (2012), la présence fait référence à la sensation d'être dans un environnement différent de celui dans lequel l'utilisateur se trouve réellement, alors que la RA demande à ce qu'on reste à la fois accroché à son environnement réel, mais en y ajoutant des éléments virtuels, ce qui peut parfois être contradictoire à la définition initiale de la présence.

2.4.1 Présence sociale

Dans la même optique que pour le sentiment de présence, le sentiment de présence sociale est la perception d'être socialement connecté avec les autres (Blascovich, 2002). Les « autres » sont, dans ce cas, virtuels. Dans le domaine de l'informatique, il y a trois appellations possibles pour représenter un personnage virtuel :

1. **Avatar.** Personnage virtuel que l'utilisateur choisit pour le représenter dans le monde virtuel. Un avatar est contrôlé par son propriétaire ;
2. **Agent virtuel (AV).** Personnage virtuel qui ne représente pas une personne physique, mais bien un personnage purement imaginaire. Cette entité n'est pas contrôlée par un humain comme c'est le cas pour un avatar : il est autonome ;
3. **Humain virtuel.** Semblable à un agent virtuel, mais de forme humaine.

Dans la présente étude, il est question d'un agent virtuel (AV).

Selon Heeter (1992), la présence sociale peut être ressentie majoritairement de deux manières. Dans un environnement purement virtuel, un utilisateur peut se sentir présent socialement si d'autres personnes, AV ou avatars y sont également présents. Mieux encore, la présence sociale est plus forte si ceux qui « existent » dans l'EV réalisent que l'utilisateur est également présent dans le même EV qu'eux. Or, comme expliqué plus tôt à la section 2.4, Heeter (1992) avance que la présence sociale est un des trois types de présence qui construit le sentiment de présence. L'aspect social d'un EV est donc un des facteurs modulateurs de la présence.

Plus précisément Harms et Biocca (2004) ont défini six dimensions à la présence sociale afin de faciliter son évaluation :

1. Co-présence : degré auquel le participant est conscient des autres et ne se croit pas seul. C'est également, en sens inverse, le degré de perception avec lequel les autres considèrent le participant comme étant présents avec « eux » ;
2. Attention : quantité d'attention reçue et donnée à un AV ;
3. Compréhension du message perçu : capacité pour un participant à se faire comprendre par un AV et aussi de comprendre ce que l'AV tente de communiquer ;

4. Compréhension affective : compréhension émotionnelle des AV par le participant et vice-versa ;
5. Interdépendance affective : mesure qui traduit le niveau d'influence mutuelle de l'état émotionnel entre un participant et un AV ;
6. Interdépendance comportementale : mesure qui traduit l'influence qu'ont les comportements du participant ou de l'AV sur l'autre (réponse comportementale cohérente suite à une action).

Toujours selon Harms et Biocca (2004), c'est cette combinaison des six dimensions de la présence sociale qui permet d'évaluer convenablement le sentiment de présence sociale. La rédaction d'un questionnaire d'évaluation de la présence sociale en six sous-questionnaires est la conclusion de l'étude de Harms et Biocca (2004). Ce questionnaire sera d'ailleurs utile à cette étude pour évaluer le sentiment de présence sociale, tel qu'expliqué à la section 2.8.1.

L'application du concept de présence sociale pour une simulation multi-utilisateur, comme c'est le cas pour la simulation qui fait l'objet de cette recherche, est expliquée plus bas à la section 2.6.1.

2.4.2 Présence et apprentissage

Dans le cas d'une simulation médicale éducative, il est important de faire le lien entre le sentiment de présence et les résultats académiques, car il est souhaitable que ces derniers soient les meilleurs possible. Or, le sentiment de présence est proportionnel à l'apprentissage (Lester et al., 2013). C'est dans un EV destiné à l'apprentissage des sciences pour des adolescents du secondaire créé par Lester et al. (2013), qu'une corrélation a été démontrée entre l'*engagement* (la présence, l'intérêt de l'étudiant ainsi que ses performances dans le jeu) et l'apprentissage. Les étudiants qui étaient davantage présents dans l'environnement ont retenu plus d'information.

Similairement, Georgiou et Kyza (2018) ont trouvé un lien entre l'immersion et l'apprentissage. Cette expérience éducative scientifique pour enfants en RA se déroulait sur des tablettes et avait pour but d'analyser les relations entre l'immersion, la motivation et les résultats académiques. Une conclusion de cette étude est que le niveau d'immersion et l'apprentissage sont positivement corrélés. Le niveau d'immersion est différent du sentiment de présence, mais comme établi précédemment à la section 2.4, la sensation d'immersion contribue au sentiment de présence. Des conclusions très semblables, mais cette fois liant le sentiment de présence et l'apprentissage, ont été publiées par Chen et Wang (2018), également pour une application sur tablettes pour des jeunes.

2.5 Modulateurs du sentiment de présence

Les auteurs ne s'accordent pas toujours sur les facteurs qui contribuent à la modulation du sentiment de présence, mais la plupart du temps, ceux-ci se ressemblent et comportent des éléments communs.

Slater et al. (2009b) parlent davantage de conditions nécessaires à la présence que de modulateurs. Toujours selon Slater et al. (2009b), trois conditions doivent être nécessairement rencontrées afin de permettre à un utilisateur d'un EV d'être présent dans une simulation. Premièrement, les réponses (ou rétroactions) des différents sens d'un participant (vue, toucher, ouïe, odorat et parole) doivent être en accord avec ce que celui-ci voit dans l'EV. Par exemple, en RV, si un participant déplace son bras réel, son bras virtuel doit également bouger dans l'EV.

Deuxièmement, le contenu visuel présenté à un participant doit être assez réaliste afin de ne pas briser le sentiment d'immersion. De produire un contenu réaliste ne veut cependant pas dire un contenu de haute qualité visuelle. Comme le mentionnent Slater et al. (2009b) et Sanchez-Vives et Slater (2005) avant eux, les simulations les plus simples peuvent produire un grand sentiment de présence si le participant est capable de compléter les flous et le manque de qualité par des choses qu'il connaît déjà et s'il y a assez de rétroaction provenant de l'EV (il s'agit du concept psychologique de plausibilité statistique). Cette hypothèse que la qualité du contenu visuel n'est pas un facteur qui influence le sentiment de présence est également confirmée par l'expérience de Lee et al. (2013), qui consiste à une quête dans un environnement de réalité mixte avec, pour trois groupes de participants, des niveaux de réalisme visuel des éléments virtuels différents. Un niveau de réalisme visuel élevé se traduit par une meilleure luminosité et un meilleur niveau de détail. Or, comme l'avait avancé Slater et al. (2009b) avant eux, Lee et al. (2013) n'ont pas vu de différence au niveau du sentiment de présence en fonction du réalisme virtuel.

Troisièmement, l'ultime condition nécessaire à la présence, selon Slater et al. (2009b), est qu'afin de produire un sentiment de présence à long terme chez l'utilisateur, l'EV doit répondre correctement aux actions et aux intentions de celui-ci.

Faire ressentir un fort sentiment de présence à l'utilisateur d'un EV donné est généralement souhaitable. Certains facteurs, présentés ci-dessous, peuvent faire varier l'intensité du sentiment de présence (Stanney, 2002).

1. Qualité des indices de profondeur (Slater et al., 2009a; Liu et Uang, 2016; Kim et al., 2017);
2. Ajout d'un aspect social à un EV (Heeter, 1992; Mccall et al., 2011; Kim et al., 2017);

Daher et al., 2017) ;

3. Stimulation de plusieurs sens tel que l'ouïe, le toucher et l'odorat (Witmer et Singer, 1998) ;
4. Représentation réaliste du corps (Witmer et Singer, 1998) ;
5. Contrôle de l'EV par l'utilisateur (Riva, 2009) ;
6. Considération des caractéristiques personnelles de l'utilisateur (Sacau et al., 2008) et de son expérience avec la technologie utilisée (Leo et al., 2014) ;
7. Absence de cybermalaises et durée de l'exposition à l'EV (Witmer et Singer, 1998; Kennedy et al., 2000) ;
8. Performance de la technologie utilisée, comme le taux de rafraîchissement, le système de repérage ou le champ de vision (Barfield et Hendrix, 1995; Lin et al., 2002; Buttussi et Chittaro, 2017).

Dans le cadre de cette recherche, ce sont les modulateurs de présence « indices de profondeur » et « ajout d'un aspect social » qui seront étudiés. Ils font l'objet des deux prochaines sections de cette revue de littérature.

2.5.1 Amélioration des indices de profondeur

Le système visuel et le système auditif utilisent différents indices pour percevoir la profondeur, autant en 2D qu'en 3D. Plusieurs études ont d'ailleurs prouvé l'importance des indices de profondeur visuels énoncés ci-dessous et leur influence sur le sentiment de présence et sur l'apprentissage.

1. 2D

- (a) Perspective,
- (b) Taille des objets,
- (c) Niveau de détail,
- (d) Occlusion,
- (e) Éclairage et ombres,
- (f) Mouvement relatif.

2. 3D

- (a) Indices binoculaires. Ces indices de la profondeur sont liés au fait que l'image provenant à chacun des deux yeux qui est transmise au cerveau n'est pas exactement

la même : un décalage est introduit. Ce genre d'indice découle de la stéréoscopie, le phénomène par lequel deux images, présentant chacune un léger décalage, superposées l'une sur l'autre produit un effet de 3D et permet ainsi la visualisation de la profondeur.

D'abord, Rovelo et al. (2012) ont lié l'importance de l'occlusion sur l'apprentissage à l'aide d'un jeu de RA qui consiste à passer un anneau réel à travers un fil rigide virtuel sans qu'il y ait contact entre les deux. Tous les participants devaient faire l'expérience en 2D puis avec la RA. L'hypothèse initiale de l'expérience était que les résultats de l'expérience avec RA seraient meilleurs, car la profondeur y était mieux représentée. Or, les conclusions sont qu'il n'y a pas de différence au niveau des résultats avec les rendus monoscopiques ou stéréoscopiques. Les auteurs expliquent ce résultat par des indices de profondeur conflictuels (occlusion non-réaliste entre l'anneau et le contrôleur).

Une récente étude a démontré que la qualité des indices de profondeur est liée au sentiment de présence. En effet, cette expérience de Liu et Uang (2016) évalue les effets d'indices de profondeur et des différents types d'affichage sur, entre autre, le sentiment de présence chez des personnes âgées dans un environnement de commerce virtuel. Les types d'affichage étudiés sont l'affichage 2D, l'affichage stéréoscopique et l'affichage autostéréoscopique. Une des conclusions de cette recherche, est que pour un affichage stéréoscopique, comme dans le cas de la présente recherche, une meilleure qualité des indices de profondeur produit un plus grand sentiment de présence. Liu et Uang (2016) entendent par « mauvais » indices de profondeur des objets virtuels sans perspective et sans stéréoscopie.

Les expériences de Kim (2018) et de Kim et al. (2017), décrites plus tard à la section 2.5.2, prouve aussi l'impact de la qualité des indices de profondeur dans un contexte de RA, notamment sur le sentiment de présence sociale.

D'autres sens peuvent aider à l'évaluation de la profondeur, comme l'ouïe et le toucher. En effet, un son qui change d'intensité peut donner un indice sur la profondeur d'un objet, tout comme la proximité des objets au toucher.

2.5.2 Ajout d'un aspect social

Dans un EV, un utilisateur peut être :

1. seul,
2. accompagné d'un ou de plusieurs autre(s) utilisateur(s),
3. accompagné d'un ou de plusieurs personnage(s) virtuel(s),

4. accompagné d'un ou de plusieurs autre(s) utilisateur(s) ET d'un ou de plusieurs personnage(s) virtuel(s).

Cette étude poprose un EV avec une combinaison de compagnons virtuels et humains. Dans tous les cas, la situation sociale de l'utilisateur a un impact sur le sentiment de présence de celui-ci, comme le confirment les études détaillées ci-dessous.

Mccall et al. (2011) ont effectué une expérience intéressante lors d'une situation multi-utilisateur. L'étude visait à analyser les effets de différents facteurs sur le sentiment de présence lors d'un jeu de RA sur appareil mobile. Le but du jeu était de poursuivre une quête magique (ajouts d'éléments virtuels visibles à partir d'un appareil mobile) tout en parcourant une ville à pied (environnement réel). Ce jeu se joue en équipe de deux joueurs ; l'un possède un appareil mobile qui gère l'aspect géographique du jeu (localisation dans la ville, prochaine destination, etc.) tandis que le second joueur possède un appareil mobile qui gère l'aspect « quête » du jeu.

Bien que cette expérience de Mccall et al. (2011) utilise une forme de RA « légère » (l'utilisateur doit consciemment porter l'appareil mobile devant ses yeux pour voir les éléments virtuels), les conclusions de l'expérience sur les aspects influençant le sentiment de présence sont pertinentes. Les résultats de cette recherche avancent que l'aspect du jeu qui a fait ressentir le plus grand sentiment de présence à ces sujets est l'aspect social. En effet, le fait de devoir partager certaines informations avec un coéquipier qui est dans le même monde virtuel et réel a eu un impact positif sur le sentiment de présence des joueurs.

Sur une autre note, l'ajout d'un humain virtuel à une simulation intéresse beaucoup la communauté scientifique pour leur potentiel dans n'importe quelle simulation en RA. Contrairement à l'étude de Mccall et al. (2011), l'étude de Kim (2018) expliquée ci-dessous ajoute un humain virtuel comme « stimuli » social et au lieu de véritables participants. Kim (2018) a cherché à connaître l'influence des réactions d'un humain virtuel et de l'EV lors de perturbations physiques de l'environnement réel sur le sentiment de co-présence (une composante de la présence sociale, tel qu'expliqué à la section 2.4.1). La simulation utilisant le visiocasque *Hololens* de Microsoft voulait qu'un participant s'assoie à une table avec un humain virtuel pour discuter, alors qu'un ventilateur en marche en mode rotationnel se trouve dans la même pièce. L'humain virtuel avait devant lui des papiers virtuels et des rideaux virtuels se trouvaient derrière lui. Certains participants ont vécu l'expérience avec un humain virtuel et un EV qui ne réagissait pas aux effets du vent (pas de feuilles qui volent au vent ou de rideaux qui s'agitent), alors que d'autres ont vécu l'expérience avec un humain virtuel qui tenait ses feuilles pour ne pas qu'elles partent au vent et avec des rideaux qui s'agitent au vent. Les résultats de cette étude de Kim (2018) sont que les participants qui ont vécu l'expérience

avec un humain virtuel réactif au vent ont ressenti un plus grand sentiment de co-présence.

Plus tôt, ce même laboratoire avait réalisé une expérience qui allie présence sociale et occlusion également avec le *Hololens*. En effet, l'expérience de Kim et al. (2017) veut mesurer l'impact sur la présence sociale des aspects « spatiaux » et « comportementaux » d'un humain virtuel. La moitié des participants ont vécu l'expérience avec les effets « spatiaux et comportementaux » alors que l'autre moitié non.

Pour le premier groupe, une dame virtuelle dans un fauteuil roulant entre dans une pièce fermée où se trouve le participant par une porte déjà ouverte. Celle-ci demande de l'aide pour déplacer une chaise disposée à sa place à la table afin qu'elle puisse s'approcher du bureau avec son fauteuil. Finalement, dans cette version de l'expérience, l'humaine virtuelle est occluse par la table. Pour le deuxième groupe, l'humaine virtuelle passe « à travers » la porte à la manière d'un fantôme et passe « à travers » la chaise pour s'approcher de la table. L'humaine virtuelle n'est pas occluse par la table.

Les conclusions de l'expérience de Kim et al. (2017) sont que la présence sociale est plus grande chez les participants qui ont vécu la simulation avec les indices d'occlusion. L'enregistrement des déplacements des participants par les chercheurs a, entre autres, permis d'évaluer la présence sociale. En effet, deux des onze participants qui ont vécu l'expérience sans occlusion ont passé « au travers » de l'humaine virtuelle lorsqu'ils sont retournés s'asseoir à leur propre chaise. Ceci démontre qu'ils considéraient l'humaine virtuelle comme un simple hologramme et pas comme une personne. Les autres participants ont contourné l'humaine virtuelle, comme ils le feraient avec une véritable consœur humaine. Cela a permis de confirmer que le réalisme dans la physique entourant un AV a une influence sur le sentiment de présence sociale. Cette conclusion a aussi été confirmée par Guadagno et al. (2007) dans la partie de son expérience portant sur les comportements réalistes des avatars.

Dans le cas présent, l'aspect social de l'expérience est un modèle hybride entre les expériences de Mccall et al. (2011) et Kim et al. (2017) : il y aura deux participants qui vivent l'expérience au même moment et au même endroit (multi-utilisateur) et un AV qui guidera ces participants.

2.6 Agents virtuels (AV) dans un environnement virtuel (EV)

Il est important qu'un AV dans un EV ne brise pas le sentiment de présence. Plusieurs études se sont penchées sur cette question avec diverses conclusions concernant le comportement, l'intelligence et l'apparence d'un AV. Même le sexe d'un AV influence l'attitude d'un participant envers celui-ci, positivement s'ils sont du même sexe (Guadagno et al., 2007).

Des recherches ont démontré que l'attitude des AV a un impact sur la présence. À ce point, il est désormais question de sentiment de présence sociale, quoique le sentiment de présence et le sentiment de présence sociale sont tous deux liés, comme expliqué à la section 2.4.1. Le sentiment de présence sociale dans un contexte avec un avatar ou avec un AV est défini différemment selon les études. Il est généralement question d'une combinaison de l'immédiateté des interactions (un délai dans les interactions sociales démontre un recul ou une appréhension à communiquer tandis qu'une interaction instantanée démontre de l'enthousiasme) et de l'aptitude à créer des liens sociaux, ou encore du degré avec lequel l'utilisateur peut accéder à l'intelligence, aux intentions et à l'état émotionnel d'un autre (Cafaro et al., 2016; Biocca, 1997).

Certaines conditions pré-expérience peuvent influencer la perception qu'a un utilisateur d'un AV. Par exemple, le sentiment de présence sociale est plus fort si un participant reçoit une « formation » avant d'entrer en contact avec un AV. C'est ce que prouve l'expérience de Daher et al. (2017) avec une « formation » qui consiste à observer deux agents virtuels discuter entre eux à l'arrivée du participant.

Une autre étude en lien avec le comportement des AV est publiée par Cafaro et al. (2016). Elle porte sur les effets des indices sociaux émis par les AV d'un EV sur le sentiment de présence sociale de l'utilisateur. Dans l'EV de cette expérience, l'utilisateur contrôle son avatar à l'aide d'un clavier et le visualise sur un écran standard. Le contexte veut que l'utilisateur virtuel se trouve à quelques mètres d'un groupe d'AV. Le groupe d'AV peut se comporter de deux façons : amicalement ou hostilement. Par exemple, des AV au comportement amical entrent en contact visuel avec l'utilisateur, lui sourient et orientent leur corps avec un angle qui incite à la conversation. Une conclusion de cette étude est que le sentiment de présence sociale est plus grand lorsqu'un AV qui entre en contact avec l'utilisateur montre un accueil chaleureux (un comportement amical).

Barange et al. (2017) ont, quant à eux, approfondi le concept de comportement de l'AV dans un contexte pédagogique. Deux comportements ont été testés dans cette expérience, un à la suite de l'autre, soit proactif ou réactif. Un agent proactif est un AV qui participe à la conversation et aide l'étudiant sans que l'étudiant ait toujours à le lui demander, tandis qu'un AV réactif donne de l'information que lorsqu'on lui demande. Les résultats d'un questionnaire complété à la fin de l'expérience montrent que ceux qui ont commencé l'expérience avec un AV proactif ont davantage ressenti de l'*engagement*, ont trouvé que l'AV était utile pour leur apprentissage et ont été plus attentifs. Dans l'ensemble, les participants avec un agent proactif ont appris plus rapidement.

2.6.1 Multi-utilisateur

Le mode multi-utilisateur a déjà été expérimenté en RV, la plupart du temps dans un contexte de jeu. Les jeux de type collaboratif requièrent deux joueurs ou plus et demandent aux joueurs de collaborer entre eux pour faire avancer le jeu. La collaboration en RA est cependant différente de celle traditionnellement présente dans les jeux vidéos 2D ou encore en RV, car les joueurs doivent partager le même espace physique. Il est important ici de ne pas confondre un mode multi-utilisateur avec l'utilisation d'un AV. Un AV ne remplace pas un joueur dans le mode multi-utilisateur, c'est un ajout au contenu virtuel. Deux situations physiques peuvent survenir lorsque deux personnes partagent une expérience de RA :

1. Les deux utilisateurs sont dans un environnement physique différent ;
2. Les deux utilisateurs sont dans le même environnement physique (la même pièce).

Dans la première situation, un utilisateur A se trouve dans un environnement physique X et un utilisateur B dans un environnement Y. L'utilisateur B est représenté dans l'environnement X de l'utilisateur A par un avatar. Puisque l'environnement des deux utilisateurs n'est pas le même, la position de l'avatar dans l'environnement X ne sera pas toujours fidèle à la réelle position de l'utilisateur B dans son environnement Y. Par exemple, si l'utilisateur B est placé à deux mètres derrière un hologramme, mais que dans l'environnement X un meuble se trouve à cet endroit, un conflit survient. Or, la position de l'avatar de l'utilisateur B ne traduira pas toujours la position réelle de cette personne aux yeux de l'utilisateur A : il faudrait placer l'avatar en tenant compte des contraintes de l'environnement physique X.

D'autres contraintes s'imposent en lien avec la situation 1 : l'avatar d'un utilisateur représenté aux yeux de l'autre doit traduire en temps réel les gestes et les paroles du participant qu'il représente. La voix peut se transmettre facilement, mais les gestes sont plus complexes à enregistrer avec le seul port de lunettes de RA.

La deuxième situation évite plusieurs conflits présents dans la première situation, car les deux participants partagent le même environnement physique. En effet, les utilisateurs sont représentés par eux même et non par des avatars, donc aucune collision entre un avatar et un objet physique ou entre un avatar et un utilisateur n'est possible. Cette situation présente cependant des défis différents. Un défi majeur est que les hologrammes affichés doivent être positionnés aux mêmes endroits pour les deux utilisateurs. Le repère d'un des utilisateurs doit donc être partagé aux autres utilisateurs. Plusieurs recherches, présentées à la section 2.7 portent sur le développement de méthodes pour partager des objets 3D.

Quelques recherches portent aussi sur la collaboration en RA, comme l'étude de Pütten et al. (2012), de Oh et al. (2018) ou de Georgiou et Kyza (2018). Dans l'étude de Pütten et al.

(2012), les participants se promènent en binôme dans une ville afin de poursuivre une quête, un peu comme dans l'expérience de Mccall et al. (2011) décrite plus tôt à la section 2.5.2. Ces derniers sont filmés lors d'un moment précis du jeu afin d'évaluer certains comportements physiques (voir section 2.8.2 pour plus de détails). Une des conclusions de cette étude est qu'une grande présence sociale ressentie par rapport au coéquipier (au fait que celui-ci partage le même EV) ne distrait pas le participant du contenu virtuel et ne diminue pas le sentiment de présence lié à l'AV non plus, sans toutefois l'augmenter. Le lien entre la présence ressentie par les coéquipiers d'une expérience multi-utilisateur et la relation entre ceux-ci ou encore leur sexe reste encore à prouver (Pütten et al., 2012).

Multi-utilisateur et présence sociale

La section 2.4.1 définit le concept de sentiment de présence sociale pour des situations simples utilisateurs avec ou sans AV. Des précisions restent toutefois à apporter lorsqu'il est question de présence sociale dans un contexte multi-utilisateur. L'aspect social d'une simulation peut venir de la présence d'un AV, mais aussi de la présence d'un coéquipier présent dans le même environnement physique que l'utilisateur. Dans le cadre de cette expérience, un AV est présent dans l'EV de l'utilisateur et un coéquipier est présent dans l'environnement réel de l'utilisateur.

Plusieurs expériences décrites plus tôt dans cette revue de littérature ont testé individuellement le lien entre la présence d'un AV et le sentiment de présence ou de présence sociale (Cafaro et al., 2016; Daher et al., 2017; Kim et al., 2017; Kim, 2018) ou le lien entre la présence d'un coéquipier dans le même environnement physique et le sentiment de présence ou de présence sociale (Mccall et al., 2011; Pütten et al., 2012). Cependant, aucune étude n'étudie le concept de sentiment de présence ou de sentiment de présence sociale dans une situation avec à la fois un AV et un coéquipier.

Multi-utilisateur et apprentissage

Pour faire suite aux sections 2.3 et 2.4.2 portant sur les effets des EV et sur les impacts du sentiment de présence sur l'apprentissage, il est important de souligner que le mode multi-utilisateur peut également influencer l'apprentissage. En effet, selon Abele (2013), qui appuie l'ouvrage de Laughlin (2011), pour un même contexte d'apprentissage, les membres d'une équipe apprennent davantage qu'individuellement. De la même façon, les capacités de résolution de problèmes sont plus grandes en groupe.

Sachant cela, il est pertinent dans un contexte d'apprentissage de favoriser les groupes. Dans

un contexte d'apprentissage dans un EV, il est cependant question de « multi-utilisateur » et non de « groupes ».

2.7 Partage d'objets 3D

Un environnement multi-utilisateur en RA nécessite un partage des hologrammes entre les utilisateurs, spécialement si ceux-ci se trouvent dans le même environnement physique. C'est ce partage qui fait en sorte que tous les utilisateurs voient les hologrammes aux mêmes endroits. Cependant, ce partage d'objets 3D comporte plusieurs défis et est relativement nouveau et peu connu.

Deux étapes sont cruciales pour le partage d'objets 3D en RA :

1. Le partage de la position physique initiale d'un objet virtuel à tous les nouveaux utilisateurs (calibration) ;
2. La propagation des transformations de l'objet virtuel à tous les utilisateurs.

2.7.1 Partage de la position physique initiale d'un objet virtuel

C'est souvent cette première étape qui est la plus difficile, bien que plusieurs techniques existent afin de partager la position d'un objet en 3D en RA. Une première technique consiste à utiliser des stratégies de vision par ordinateur pour reconnaître des cibles 2D placées à des positions connues. Par exemple, en plaçant des images 2D choisies et connues aux quatre coins d'une table, il est ensuite simple de placer un hologramme exactement au centre de cette table. Tous les utilisateurs d'une même application peuvent donc se calibrer eux-mêmes à leur entrée dans une application en regardant simplement les quatre coins d'une table.

L'ensemble de développement logiciel (SDK) *Vuforia* disponible en ligne offre, entre autres, un système de détection d'images 2D en RA (Vuforia, 2017b). Le logiciel identifie une image en analysant les contrastes de cette image et accorde ainsi une position dans l'espace au centre de l'image, tel qu'illustré à la figure 2.3.

C'est cette technique qu'utilisent Grandi et al. (2018) dans leur étude utilisant la RA mobile (à l'aide de tablettes) qui permet à plusieurs utilisateurs de modifier la position ou l'orientation en temps réel d'un hologramme placé au même endroit pour tous. En effet, à l'aide du logiciel *Vuforia* et de plusieurs images 2D placées à des endroits prédéfinis, chaque utilisateur de l'application de Grandi et al. (2018) peut envoyer la position réelle de sa tablette dans l'espace au serveur à l'aide d'une connexion wifi dédiée.

Une autre technique de partage de position physique initiale nécessite de faire une analyse

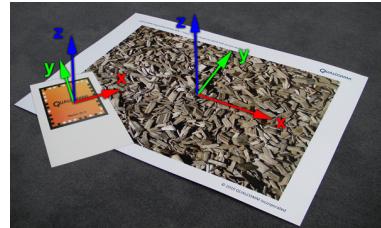


Figure 2.3 – Système de coordonnées d'une image détectée par le logiciel *Vuforia* (Vuforia, 2017a)

spatiale de l'environnement avec une caméra infrarouge ou une caméra temps de vol, tel qu'illustré à la figure 2.4. Une fois cette analyse faite, les objets virtuels peuvent être placés relativement aux différentes caractéristiques physiques et spatiales de l'environnement. Ainsi, chaque nouvel utilisateur qui désire joindre une expérience analyse également l'environnement pour reconstruire un plan 3D du même environnement. Un serveur peut donc envoyer à tous les nouveaux clients les coordonnées d'un objet virtuel dans l'environnement. Par exemple, un premier utilisateur place un objet virtuel sur une table basse d'environ 1m² de surface et de 50cm de hauteur, située à 2m d'un sofa et à 1m d'une chaise. Un deuxième utilisateur qui balaie et reconstruit ce même environnement peut alors faire concorder ces coordonnées réelles et placer l'objet virtuel au bon endroit.

Sluganovic et al. (2017) ont utilisé cette technique pour partager des hologrammes dans leur expérience *HoloPair* utilisant les lunettes *Hololens* de Microsoft. Grâce à la caméra de profondeur des *Hololens* (voir section 3.1.1 pour plus de détails) cet appareil est en mesure de faire une la cartographie spatiale (*spatial mapping*) de l'environnement dans lequel il se trouve (Microsoft, 2018a). L'étude de Sluganovic et al. (2017) visait d'abord à développer une méthode de transfert de coordonnées spatiales d'un *Hololens* à un autre, puis d'étudier les possibles failles de sécurité lors de ce transfert par connexion wifi.

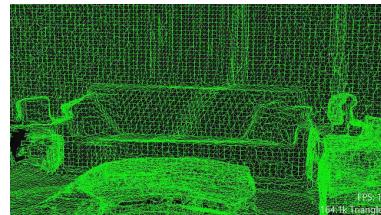


Figure 2.4 – Analyse spatiale d'un environnement (Microsoft, 2018d)

2.7.2 Propagation des transformations d'un objet virtuel entre les utilisateurs

La deuxième étape du partage d'objets 3D, une fois les objets initialement bien placés dans l'environnement pour tous les utilisateurs, est de mettre à jour et d'appliquer les différentes transformations relatives à un objet. Un déplacement, une rotation ou une mise à l'échelle sont des transformations géométriques standards qui peuvent nécessiter un ajustement à chaque rafraîchissement de l'affichage.

Typiquement, dans une simulation multi-utilisateur, l'environnement serveur-client est utilisé dans un réseau wifi, quoique d'autres environnements peuvent fonctionner. Le serveur peut être dédié ou peut également être un client. Considérons le cas d'un environnement client-serveur dans un réseau wifi dédié, comme ont d'ailleurs utilisé Grandi et al. (2018) pour leur expérience expliquée plus tôt. Dans ce cas, les transformations appliquées à un objet 3D doivent être envoyées d'un client au serveur afin que celui-ci transmette l'information à tous les utilisateurs.

Deux méthodes ou formats peuvent être utilisés afin de transmettre les informations nécessaires pour appliquer les transformations. Une première méthode consiste à envoyer les transformations aux utilisateurs sous la forme de matrices, après quoi elles sont multipliées à la matrice de modélisation courante de l'objet en question chez le client. C'est d'ailleurs cette méthode qui est utilisée pour l'expérience de Grandi et al. (2018). Une simple multiplication de matrices est possible seulement si la première étape du partage d'objets 3D, décrite à la section 2.7.1, a bien été effectuée.

Une deuxième méthode serait d'envoyer aux clients la position, l'orientation et le vecteur qui pointe vers le haut de l'objet par rapport à un point commun et connu. Dans un contexte comme celui de l'expérience de Sluganovic et al. (2017) expliquée plus tôt, tous les clients connaissent les coordonnées d'un même point dans l'espace. Sachant cela, le serveur peut envoyer les nouvelles positions et orientations d'un objet en fonction de ce point commun. Il est alors facile pour les clients de bien placer les objets en effectuant une transformation inverse avec les coordonnées du point commun dans leur référentiel.

Bien entendu, d'autres transformations peuvent modifier un objet, comme un changement de couleur, mais ce genre de transformation peut être appliquée par un envoi de message standard sur le réseau.

2.8 Méthodes d'évaluation de la présence

Sur un tout autre ordre d'idées, cette section aborde les différentes méthodes pour évaluer le sentiment de présence et plusieurs sous-composantes de la présence. Puisque cette étude vise

à évaluer le sentiment de présence sociale et le sentiment de co-présence, il est important de préalablement analyser les différentes méthodes d'évaluation qu'ont mis sur pied les auteurs de la communauté scientifique au fil des années afin de choisir la bonne méthode pour cette recherche.

Il existe deux types de méthodes d'évaluation de la présence : subjectives et objectives. Les méthodes subjectives se traduisent généralement par des questionnaires remplis à la fin d'une expérience (très répandu), des commentaires, des échelles de notation, des comparaisons, etc. La subjectivité de ces méthodes provient du fait que plusieurs participants peuvent noter différemment un même élément, par exemple un sentiment dans le cas de cette expérience, selon différents facteurs comme l'accomplissement d'une tâche ou leur humeur (Slater, 2004). Aussi, une autre limite aux méthodes d'évaluation subjectives est que les participants essaient de deviner ce que le chercheur tente d'évaluer et ce qu'ils sont censés répondre, ce qui influence les résultats (Pütten et al., 2012).

Les méthodes objectives d'évaluation sont quant à elles plus fiables, mais souvent plus difficiles à mettre en pratique. De bons exemples de méthodes d'évaluation objectives sont la prise de signaux biologiques (pouls, rythme respiratoire, etc.) et le relevé des comportements physiques (cligner des yeux, éternuer, pointer, trajectoire de marche, voix, etc.).

Le sentiment de présence peut être mesuré pendant l'expérience ou après, sans impact sur les résultats (Wissmath et al., 2010).

2.8.1 Méthodes subjectives

Évaluation de la présence

La méthode la plus répandue d'évaluation du sentiment de présence et la plus facile est l'évaluation à l'aide d'un questionnaire. Plusieurs questionnaires existent et chacun présente des caractéristiques différentes.

Un questionnaire très fréquemment utilisé pour évaluer le sentiment de présence est celui de Witmer et Singer (1998).

Plus récemment, un questionnaire portant sur différents aspects de la présence a également été publié (Vorderer et al., 2004). Ce questionnaire est davantage en lien avec le médium utilisé qu'avec l'AV présent dans la simulation. Les aspects de la présence étudiés par ce test de Vorderer et al. (2004) sont présentés ci-dessous (évaluation avec une échelle Likert de cinq points allant de 1 à 5) :

1. Attention,

2. Situation spatiale,
3. Présence spatiale,
4. Implication cognitive,
5. Suspension délibérée de l'incrédulité,
6. Intérêt,
7. Imagination visuelle.

Un autre questionnaire, développé par Chertoff et al. (2010) et nommé « VET » (*Virtual Experience Test*), est utilisé pour évaluer des expériences virtuelles. Ce questionnaire se base sur cinq critères de design, soit l'expérience sensorielle, cognitive, affective, active et relationnelle. Chertoff et al. (2010) ont adapté ce questionnaire afin de s'en servir pour évaluer le sentiment de présence dans un EV. Le questionnaire VET comporte 24 questions et chaque question s'évalue sur une échelle de cinq points.

Évaluation du sentiment de présence sociale et de co-présence

Chronologiquement, Bailenson et al. (2001) ont d'abord mis sur pied un questionnaire pour évaluer la présence sociale dans une situation d'EV avec un personnage virtuel. Ce questionnaire comporte cinq questions (évaluation avec une échelle Likert allant de -3 à +3). Au même moment et dans le même ordre d'idées, Biocca et al. (2001) ont mis au point un questionnaire évaluant la présence sociale beaucoup plus généralement, avec 38 questions se répondant avec une échelle Likert de sept gradations allant de 1 à 7.

Quelques années plus tard, Harms et Biocca (2004) ont testé la validité de questions entourant l'évaluation du sentiment de présence social en lien avec les six dimensions de la présence sociale (voir section 2.4.1) établies préalablement par les mêmes auteurs lors d'interactions humain-humain. Le résultat est un questionnaire complet de 36 questions, chacune pouvant être répondue à l'aide d'une échelle Likert graduée de 1 à 7. De ces 36 questions, six ciblent à évaluer plus spécifiquement le sentiment de co-présence.

Il est à noter que cette appellation « co-présence » est récente et des études antérieures font référence à ce concept en tant que « sentiment d'être ensemble ». Basdogan et al. (2000) ont d'ailleurs élaboré un questionnaire de huit questions visant à évaluer ce sentiment.

Évaluation de la motivation à l'apprentissage

L'expérience de Barange et al. (2017) décrite plus tôt à la section 2.6 a évalué les types de comportements d'AV à l'aide d'un questionnaire inspiré de Soliman et Guetl (2014). Le

questionnaire évalue la motivation d'apprendre et l'opinion du participant face à l'AV.

2.8.2 Méthodes objectives

L'étude de Pütten et al. (2012) abordée plus haut à la section 2.6.1 a tenté de relier des comportements objectifs des participants avec leur niveau de présence (évalué à l'aide d'un questionnaire). Ces derniers sont filmés lors d'un moment en particulier de la quête, ce qui permet de recenser des données comportementales des participants pendant l'expérience. Les dix comportements étudiés sont présentés ci-dessous.

- C.1 Rire en réaction à un événement virtuel ;
- C.2 Réagir avec un dialogue à un événement virtuel ;
- C.3 Commenter ;
- C.4 Sourire ;
- C.5 S'exclamer en réaction à un événement virtuel ;
- C.6 Orienter son corps vers un élément virtuel ;
- C.7 Pointer vers un élément virtuel ;
- C.8 Donner des indications verbales ;
- C.9 Parler au « je » ou au « nous » ;
- C.10 Regarder les autres participants.

Seulement cinq des dix comportements étudiés sont corrélés, faiblement, à une des dimensions de la présence, soit les comportements C.1, C.3, C.4, C.5 et C.6. Cependant la corrélation de ces cinq comportements avec la présence est souvent négative, alors que, par exemple, l'action de pointer avait auparavant été corrélée positivement à la présence par Slater et al. (1995). Les auteurs tiennent cependant à préciser que ces résultats peuvent comporter des erreurs, car les sujets ont pu par exemple sourire, même s'ils ne sentaient pas un fort sentiment de présence.

Les expériences de Daher et al. (2017) et de Pütten et al. (2012) mentionnées plus tôt aux sections 2.6 et 2.6.1 se rattachent aussi à une méthode objective pour évaluer la présence : l'enregistrement vidéo. En effet, pour l'expérience de Daher et al. (2017), lors de la discussion entre deux AV au début de l'expérience, la trajectoire des participants était observée afin de voir s'ils avaient interrompu les deux AV en marchant dans leur ligne de communication ou s'ils avaient attendu que la discussion des AV se termine avant de briser leur ligne de communication pour se diriger vers le siège prévu pour eux. Par « ligne de communication »,

il est question de l'espace physique entre les deux AV qui se parlent. Il est habituellement impoli de « couper » deux personnes en marchant « entre » eux lorsqu'ils discutent. Une méthode d'évaluation objective semblable est utilisée par Kim et al. (2017) pour leur expérience expliquée à la section 2.5.2, mais cette fois seulement la trajectoire a été enregistrée. Un peu comme pour l'expérience de Daher et al. (2017), l'étude de la trajectoire du participant pour cette expérience visait à observer si le participant passait « au travers » de l'AV ou s'il le contournait.

2.9 Objectifs

L'objectif principal de cette recherche est de mesurer les impacts des comportements d'un agent virtuel (AV) sur les sentiments de présence sociale et de co-présence ressentis par un utilisateur et sur l'apprentissage de celui-ci lors d'une formation médicale multi-utilisateur en réalité augmentée (RA). Plus précisément, les éléments à l'étude sont le sentiment de présence sociale, le sentiment de co-présence, la motivation à l'apprentissage et les communications entre les membres d'un binôme.

2.9.1 Objectifs spécifiques

- O.1 Construire un scénario médical comportant l'enseignement des organes majeurs de l'abdomen humain suivi d'un test portant sur les apprentissages réalisés.
- O.2 Incorporer un AV à une simulation médicale multi-utilisateur en RA.
- O.3 Modifier le comportement physique de l'AV en ajoutant la reconnaissance de l'environnement physique de la simulation et la reconnaissance de la position, de l'orientation et des paroles des utilisateurs.
- O.4 Effectuer une étude, impliquant quelques dizaines de volontaires regroupés en binômes, afin d'évaluer les impacts des comportements améliorés de l'AV sur les sentiments de présence sociale et de co présence et sur l'apprentissage des participants pendant la simulation.

2.10 Contexte de cette recherche

Afin d'atteindre les objectifs énoncés dans la section précédente, des participants vivront une simulation médicale en RA. La moitié de ces participants vivra une expérience « standard », alors que l'autre moitié vivra une expérience avec des comportements « améliorés » de l'AV. Cette expérience se réalise en équipe de deux participants (binôme).

Pendant la première partie de l'expérience, l'AV se présente et enchaîne avec un « cours » sur les organes de l'abdomen pendant environ huit minutes. Suite à ces apprentissages, les participants doivent valider leurs connaissances en répondant à treize questions posées par l'AV, le tout toujours en RA. La simulation se termine ensuite et les participants doivent remplir trois questionnaires portant sur la présence sociale, la co-présence et la motivation à l'apprentissage, soit :

1. Présence sociale (Bailenson et al., 2001) - voir Annexe C ;
2. Co-présence (Harms et Biocca, 2004) - voir Annexe D ;
3. Motivation à l'apprentissage (Barange et al., 2017; Soliman et Guel, 2014) - voir Annexe E.

L'AV est programmé et autonome, mais sans intelligence. Autrement dit, il ne pourra pas converser avec les étudiants (mis à part ce qui a préalablement été programmé) ou changer le cours de la simulation. Il est cependant important que cet AV ne brise pas le sentiment de présence.

Les « comportements améliorés de l'AV » sont en fait les deux variables étudiées dans cette recherche, soit :

- $\theta_{occlusion}$: l'occlusion de l'AV par les objets de l'environnement physique,
- $\theta_{conscience}$: la conscience de tous les participants, de leurs positions, de leurs orientations et de leurs paroles par l'AV.

Plus d'informations ou précisions sur le scénario sont données à la section 3.2.



Figure 2.5 – Agent virtuel (AV)

2.11 Hypothèses

Les hypothèses de cette expérience découlent toutes de l'amélioration des comportements physiques de l'AV et des impacts qu'ont ces comportements sur le sentiment de présence sociale, le sentiment de co-présence, la motivation à l'apprentissage, l'apprentissage et la communication entre les participants de la simulation. Les hypothèses alternatives sont :

- H_{a1} L'amélioration des comportements de l'AV augmente le sentiment de présence sociale ressenti par le participant.
- H_{a2} L'amélioration des comportements de l'AV augmente le sentiment de co-présence ressenti par le participant.
- H_{a3} L'amélioration des comportements de l'AV augmente la motivation à l'apprentissage ressentie par le participant.
- H_{a4} L'amélioration des comportements de l'AV impacte positivement l'apprentissage du participant.
- H_{a5} L'amélioration des comportements de l'AV incite les participants à communiquer davantage entre eux pendant la simulation.

Les hypothèses nulles qui découlent de ces hypothèses alternatives sont donc :

- H₀₁ L'amélioration des comportements de l'AV n'augmente pas le sentiment de présence sociale ressenti par le participant
- H₀₂ L'amélioration des comportements de l'AV n'augmente pas le sentiment de co-présence ressenti par le participant
- H₀₃ L'amélioration des comportements de l'AV n'augmente pas la motivation à l'apprentissage ressentie par le participant
- H₀₄ L'amélioration des comportements de l'AV n'impacte pas positivement l'apprentissage du participant
- H₀₅ L'amélioration des comportements de l'AV n'incite pas les participants à communiquer davantage entre eux pendant la simulation

CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE DE LA SIMULATION

L'explication de la méthodologie se fait en deux chapitres : ce premier chapitre explique la méthodologie relative à la simulation développée, alors que le prochain chapitre explique la méthodologie en lien avec la prise des données.

Plus précisément, ce chapitre fait état du matériel utilisé dans la première section, puis explique le scénario et décrit les procédures suivies par la chercheuse pendant l'expérience aux sections 2 et 3. La quatrième section détaille le réseau de communication qui supporte cette expérience. La simulation (entièrement construite et développée par la chercheuse) et la calibration du système sont explicitées aux sections 5 et 6. Finalement, les différents comportements de l'AV sont également expliqués en profondeur à la dernière section.

Tout au long de l'expérience que vivent les participants, différents éléments, aspects ou événements ont été pensés et développés pour des raisons précises en lien avec les hypothèses testées (voir section 2.11). Ces éléments sont à ne pas confondre avec les variables étudiées $\theta_{occlusion}$ et $\theta_{conscience}$, qui elles varient d'une version à l'autre.

Afin de bien mettre en évidence les éléments qui ont été ajoutés tout au long de la simulation par la chercheuse pour tenter de faire croître le sentiment de présence sociale, le sentiment de co-présence ou l'apprentissage des participants, ceux-ci sont présentés sous forme de tableau à l'endroit dans le texte où ils sont abordés pour la première fois. Le modèle de tableau est construit comme suit :

Tableau 3.1 – Modèle de tableau : Éléments ajoutés par la chercheuse à la simulation en lien avec les hypothèses

Ajout	Élément	Impact et explication
x	Comportement, dialogue, aspect, événement ou élément présent dans les deux versions de la simulation	Comment cet ajout par la chercheuse impacte le sentiment de présence sociale, le sentiment de co-présence ou l'apprentissage des participants ? En lien avec quelle hypothèse ?
...

3.1 Matériel

3.1.1 Visiocasque de RA : lunettes *Hololens* de Microsoft

Le visiocasque *Hololens* (édition pour le développement, première génération) de la compagnie Microsoft est utilisé pour cette recherche. Ces lunettes stéréoscopiques transparentes ajoutent

à la vision de son utilisateur des hologrammes en 3D. Les caractéristiques matérielles de ce visiocasque sont les suivantes :

- Autonomie de 2 à 3 heures sans fil,
- Résolution de 2500 points de lumière par radian,
- 1 centrale à inertie pour calculer les mouvements,
- 1 caméra de profondeur,
- 4 caméras d'analyse d'environnement (lumière visible),
- 1 caméra haute définition pour filmer ou prendre des photos,
- 1 capteur de lumière ambiante,
- 4 microphones,
- Haut-parleurs intégrés,
- Connexion WIFI et Bluetooth,
- Champ de vision de 70 degrés.

L'*Hololens* utilise le système d'exploitation Windows 10 et supporte la reconnaissance vocale et la reconnaissance de certains gestes de la main. Ce visiocasque est capable d'une multitude de fonctions, parmi lesquelles certaines seront exploitées dans le cadre de cette recherche, soit :

1. la cartographie spatiale,
2. les ancre-spatiales,
3. le partage d'ancre-spatiale.

Aussi, une grande communauté développe actuellement plusieurs programmes, applications et librairies libres d'accès en ligne pour la RA avec des lunettes *Hololens*, dont la librairie *HoloToolkit*.



Figure 3.1 – Visiocasque *Hololens* de Microsoft. Crédit photo : microsoft.com/hololens

Cartographique spatiale

Les lunettes *Hololens* de Microsoft permettent, grâce à leur caméra de profondeur, d'analyser un environnement physique en fonction de la profondeur. Elles peuvent ainsi créer une cartographie spatiale (ou *spatial map*) de cet environnement, exactement comme la figure 2.4 présentée à la section 2.7.1 de la revue de littérature. Une carte spatiale est constituée d'un maillage, dont la finesse des triangles peut être ajustée selon les besoins de l'application (Microsoft, 2018d). Bien entendu, plus les triangles sont petits, plus la carte spatiale est fidèle à l'environnement (précision des coins, des joints et des formes des meubles plus grande, par exemple), mais plus la puissance de calcul nécessaire est grande. Cette analyse de la profondeur a aussi des limites : la profondeur peut être analysée dans un rayon variant entre 0.8 m et 3.1 m autour de l'utilisateur.

Cette carte spatiale est mise à jour en temps réel puisque l'analyse spatiale est toujours activée. Or, si par exemple un meuble est déplacé dans l'environnement, la carte spatiale est ajustée dès que l'utilisateur regarde le meuble en question (Microsoft, 2018d). La cartographie spatiale du *Hololens* est à la base de plusieurs fonctionnalités clés de la RA, comme :

- le placement d'hologrammes sur des surfaces planes (horizontales ou verticales),
- l'occlusion des hologrammes par les objets physiques,
- la physique des interactions entre les hologrammes et l'environnement, comme les collisions.

Ancre spatiale

L'*Hololens* peut encapsuler l'information correspondant à un endroit précis de son environnement physique sous forme d'ancre spatiale (ou *spatial anchor*). Comme expliqué à la section 2.7.1 de la revue de littérature, une ancre spatiale utilise des coordonnées spatiales, exprimées en mètres, qui tiennent compte de la disposition de l'environnement physique, contrairement au système de coordonnées cartésiennes standard utilisé pour les éléments virtuels (Microsoft, 2018c,a).

Une fois un hologramme placé à l'endroit choisi dans un environnement, cet endroit peut être enregistré dans le système de coordonnées spatiales. Puisque la cartographie spatiale s'ajuste constamment, car le balayage se fait en continu, un hologramme avec une ancre spatiale s'ajuste aussi en temps réel. Par exemple, un hologramme ancré au centre d'une table bougera avec la table si celle-ci est déplacée.

Pour une application statique dans un petit environnement, l'utilisation d'ancres spatiales

n'est pas nécessaire. Cependant, pour une application dans un grand environnement, l'utilisation d'ancres spatiales permet non seulement de sauvegarder un emplacement, mais aussi de stabiliser les hologrammes. Un hologramme qui se trouve à plusieurs mètres des lunettes peut en effet dériver dans l'environnement s'il n'est pas ancré. Finalement, une ancre spatiale peut être enregistrée dans la mémoire du *Hololens* pour être réutilisée lors d'une prochaine utilisation de l'application.

Partage d'ancres spatiales

Une ancre spatiale peut être partagée entre plusieurs utilisateurs d'une même application. Lors d'un partage, c'est l'ancre spatiale ainsi que tout le système de coordonnées spatiales qui sont partagées (Microsoft, 2017). Cette information peut être interprétée par d'autres utilisateurs qui se trouvent dans le même environnement, ce qui est utile pour positionner des objets exactement aux mêmes endroits pour plusieurs utilisateurs. Si la carte spatiale d'un utilisateur qui reçoit une ancre spatiale ne correspond pas aux coordonnées spatiales reçues, l'ancre spatiale sera ignorée. Cette fonctionnalité est appelée « partage d'ancres spatiales » (*anchor sharing*).

Avant d'envoyer une ancre spatiale sur le réseau, il est important de sérialiser ces données. Lors de la réception, les données reçues sont désérialisées et enregistrées à nouveau sous le format d'ancre spatiale.

3.1.2 Clicker

Le *clicker* de Microsoft illustré à la figure 3.2 est un accessoire des lunettes *Hololens*. Cet accessoire produit le même résultat que de cliquer avec le geste de la main, mais son utilisation est pertinente à cette recherche pour deux raisons majeures, soit sa facilité d'utilisation et son renforcement de l'aspect collaboratif de la simulation.

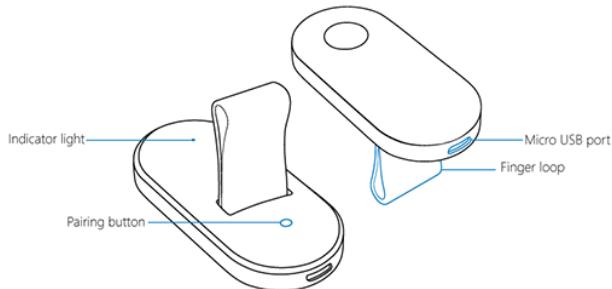


Figure 3.2 – *Clicker* (Microsoft, 2018e)

No	Ajout	Impact et explications
1	Utilisation du <i>clicker</i> au lieu des gestes de la main préenregistrés.	Bien que les gestes de la main soient faciles à maîtriser après quelques utilisations, plusieurs nouveaux utilisateurs des <i>Hololens</i> ont de la difficulté à bien les reproduire, ce qui pourrait affecter le sentiment de présence. $\Rightarrow H_1$
2	Utilisation d'un seul <i>clicker</i> par binôme.	Cela renforce l'esprit collaboratif. Les deux membres d'un binôme doivent donc obligatoirement se consulter et répondre d'un commun accord. $\Rightarrow H_2$

3.1.3 Mannequin

Un mannequin est également utilisé comme support physique à la simulation. Il est posé sur une table placée entre trois murs, comme illustré à la figure 3.3. Il est vêtu d'une jaquette et de shorts.

3.1.4 Logiciels utilisés

La simulation est construite à l'aide du logiciel Unity 2017.4.1f1. L'environnement de développement Visual Studio 2017 est utilisé pour déboguer et générer les solutions destinées aux lunettes *Hololens*.

Les sections suivantes détaillent certaines fonctionnalités offertes par les différents logiciels utilisés qui seront nécessaires à cette étude.

Outils de développement du logiciel Unity

Le logiciel Unity offre une interface de programmation pour le développement de réseaux de communications, souvent abrégée UNet pour *Unity Network*. UNet comprend une interface de bas et de haut niveau (*Low and High Level API*) ainsi que d'autres services comme des serveurs relais ou des chambres de connexion (Unity, 2018a).

L'interface haut niveau gère des transferts simples comme ceux des fonctions de communications UNet pour exécuter des fonctions chez le client ou chez le serveur en provenance de l'autre identité (fonctions *cmd* ou *rpc*), ou encore pour synchroniser des variables à travers le réseau (*SyncVar*). Ces fonctionnalités UNet proviennent de la librairie *NetworkBehaviour*. À titre informatif, les fonctions de réseau haut niveau de l'interface UNet demandent également que tous les objets de la scène qui ont à communiquer sur le réseau possèdent une composante *NetworkIdentity*.



Figure 3.3 – Mannequin

L’interface bas niveau de UNet appelée *Network Layer* ou « couche réseau » laisse plus de liberté au développeur quant aux informations transférées sur le réseau. Cette couche réseau fonctionne selon le principe de *sockets* et peut gérer des messages sous forme de tableaux d’octets (Unity, 2018b). L’outil couche réseau de Unity propose seulement deux types de connexions, soit UDP ou *WebSocket*. Une connexion *WebSocket* est plus fiable qu’une connexion UDP, mais l’outil couche réseau requiert que le serveur d’une telle connexion soit dédié (un ordinateur indépendant, par exemple). Cette condition empêche alors un Hololens de devenir hôte ou serveur d’une simulation.

Outils de développement de Windows

Windows fournit aussi une interface de programmation réseau pour les applications UWP (*Universal Windows Platform*). Plusieurs types de connexions sont offertes par les outils UWP, dont TCP. Les outils réseau UWP laissent beaucoup de liberté au développeur, plus que l’interface bas niveau de UNet.

3.2 Scénario

Le scénario brièvement expliqué plus tôt se fait en deux versions : la version standard et la version améliorée. Chaque différence entre les deux versions est expliquée brièvement ci-dessous, sans quoi les autres éléments du scénario sont les mêmes pour les deux versions. Les différences entre les deux scénarios, étroitement en lien avec les variables étudiées, sont analysées en détail plus tard à la section 3.6. La simulation se déroule en mode multi-utilisateur, soit en équipe de deux personnes (binôme), pour toutes les expériences.

La scène est constituée d'un mannequin vêtu d'une jaquette qui repose sur une table au centre de la pièce. Les deux participants enfilent les lunettes de RA *HoloLens* et voient un bouton virtuel au-dessus du mannequin, bouton qu'ils doivent sélectionner pour démarrer la simulation, tel qu'illustré à la figure 3.4. Les participants font face au mannequin, perpendiculairement à la table au début de l'expérience.

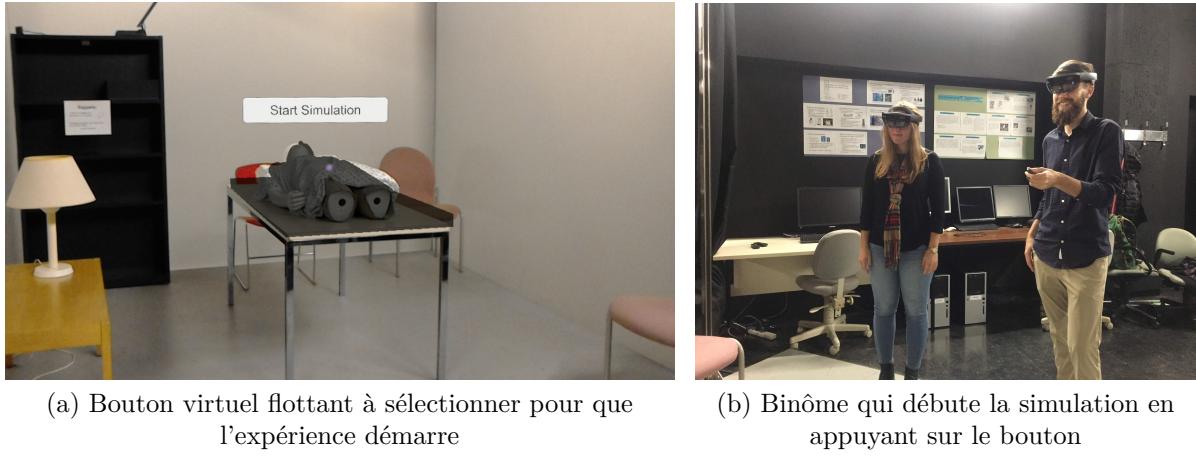


Figure 3.4 – Préparation au commencement de la simulation

Au début de la simulation, l'AV apparaît au-dessus du mannequin, soit à la position qu'il occupera pendant la majorité de l'expérience et un son accompagne son arrivée. Il explique que la simulation portera sur l'apprentissage des organes de l'abdomen et qu'il y aura un test à la fin de l'expérience. Il fait également part aux participants qu'ils sont libres de regarder et de se promener partout dans l'environnement pendant l'expérience, tout en se déplaçant lui-même dans l'environnement, autour du mannequin et sous la table.

- Version standard : Aucune occlusion n'est faite entre l'AV et les objets physiques (la table et le mannequin), ce qui donne l'impression que l'AV est *sur* le mannequin, tel qu'illustré à la figure 3.5a.
- Version améliorée : L'AV est occlus par les objets physiques (la table et le mannequin), tel qu'illustré à la figure 3.5b.



(a) Version standard sans occlusion

(b) Version améliorée avec occlusion

Figure 3.5 – Occlusion ou non de l’AV par les objets physiques pour chaque version

L’AV fait par la suite apparaître les organes superposés sur le mannequin physique afin de commencer le « cours ».

- Version standard : les organes apparaissent par-dessus la jaquette. L’AV spécifie plus tard aux participants que la jaquette doit être relevée afin de mieux observer les organes. Le résultat est illustré à la figure 3.6a.
- Version améliorée : l’AV demande aux participants de relever la jaquette. Il attend que cette action soit complétée avant de faire apparaître les organes. Le résultat est illustré à la figure 3.6b.



(a) Version standard sans occlusion des organes par la jaquette

(b) Version améliorée avec jaquette relevée

Figure 3.6 – Occlusion ou non des organes par la jaquette pour chaque version

L’AV valide par la suite avec les participants s’ils sont prêts à débuter, dans lequel cas ils doivent appuyer sur un bouton. Le cours sur les organes débute alors. Dans l’ordre, les

participants reçoivent des informations théoriques sur le fonctionnement et les maladies reliés aux poumons, au pancréas, au foie et aux reins. Les explications de l'AV durent environ huit minutes au total. Des éléments visuels qui aident les participants à mémoriser l'information, tel qu'illustré à la figure 3.7, sont souvent ajoutés aux explications de l'AV.

No	Ajout	Impact et explications
3	Ajout d'éléments virtuels en lien avec la théorie expliquée, tel que des trucs mnémotechniques ou des pictogrammes.	La théorie peut ainsi être absorbée à l'audio, parce que l'AV explique, ou visuellement, ce qui aide à l'apprentissage $\Rightarrow H_3$ et H_4

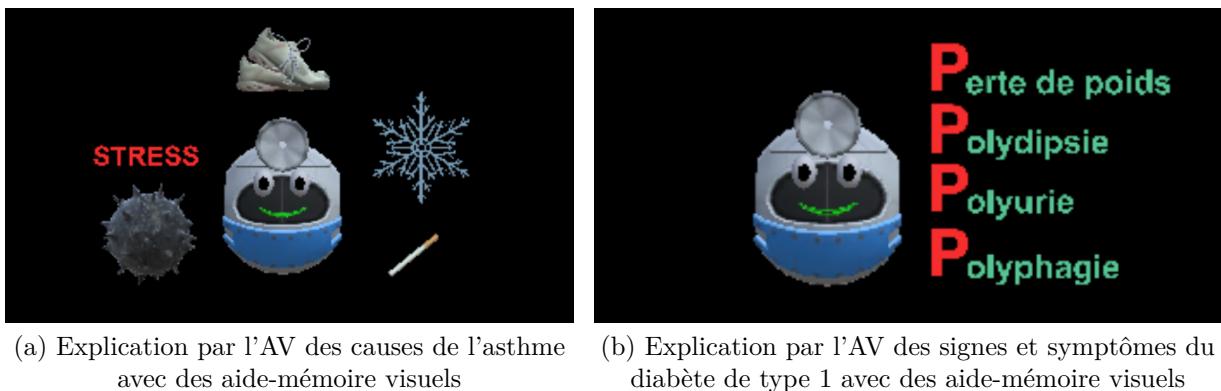


Figure 3.7 – Explications de l'AV accompagnées d'éléments visuels qui aident à la mémorisation de l'information

Une fois les explications terminées, afin de tester les connaissances des participants, l'AV pose les questions du test et les choix de réponses sont affichés autour de celui-ci, tel qu'illustré à la figure 3.8. Un exemple de question est « d'où à où les poumons s'étendent-ils ? » avec quatre choix de réponses affichés près de celui-ci sous forme de boutons à appuyer.



Figure 3.8 – Choix de réponse à une question du test

À deux questions plus difficiles présélectionnées, l'AV donnera la chance aux participants de relancer la discussion et de possiblement modifier leur réponse en demandant « êtes-vous certain de cette réponse ? Le pancréas est un organe important, il est primordial de bien comprendre son fonctionnement. », ou simplement « êtes-vous certain ? ». Cette intervention de l'AV a lieu, peu importe si la réponse donnée à la question était juste ou pas.

No	Ajout	Impact et explications
4	Remise en question de l'AV d'une réponse choisie par les participants.	Une remise en question donne la chance aux participants de réfléchir davantage à une question et cette réflexion supplémentaire peut possiblement les mener à changer leur réponse. $\Rightarrow H_4$
5	Remise en question de l'AV d'une réponse choisie par les participants.	Un tel comportement de l'AV s'approche du comportement qu'aurait un véritable instructeur, ce qui peut influencer le sentiment de présence sociale. $\Rightarrow H_1$

Après avoir répondu aux treize questions du test, la simulation se termine. Le scénario complet de la simulation avec toutes les paroles de l'AV se trouve en Annexe G.

3.3 Procédures

La salle utilisée pour l'expérience est illustrée à la figure 3.9. Deux bureaux se trouvaient aussi en dehors de l'installation de la scène, avec un ordinateur portable sur chaque bureau.

No	Ajout	Impact et explications
6	Le lieu où se déroule la simulation est aménagé pour ressembler à un bureau de médecin.	Cette disposition vise à augmenter la sensation d'immersion en créant un environnement visuellement réaliste. Tel que défini précédemment, la sensation d'immersion est en lien avec le sentiment de présence et le sentiment de présence sociale. $\Rightarrow H_1$

Les candidats sont d'abord initiés aux lunettes de RA *HoloLens* par la chercheuse afin de comprendre les commandes vocales et les gestes et afin de bien calibrer les lunettes. Pour ce faire, les candidats essaient l'application gratuite (disponible sur le site de Microsoft en ligne) *Holographic Art*. Ceux-ci doivent d'abord ouvrir et naviguer le menu à l'aide des gestes d'« accueil » et de « clic » afin d'ouvrir l'application *Holographic Art*. Cette application permet de dessiner en 3D avec les gestes de la main en RA, et offre plusieurs styles d'« encre » pour dessiner, sélectionnables à l'aide de commandes vocales. Les participants ont donc environ cinq minutes pour se familiariser avec la technologie, après quoi ils enlèvent les lunettes et



Figure 3.9 – Arrangement de la scène où se déroule l'expérience

se dirigent vers les bureaux pour lire et signer le formulaire de consentement présenté à l'Annexe A.

Les participants enfilent ensuite les lunettes et voient alors le bouton « Start simulation », tel qu'illustré plus tôt à la figure 3.4a. La chercheuse leur demande de valider s'ils peuvent observer une sphère blanche au-dessus du casque de leur partenaire, comme illustré à la figure 3.10. Cette dernière étape est pour valider que les deux lunettes sont toujours connectées ensemble, tel qu'expliqué plus tard à la section 3.4.



Figure 3.10 – Sphère blanche au-dessus des lunettes *Hololens* de chaque utilisateur

No	Ajout	Impact et explications
7	Présence d'une sphère blanche virtuelle, au-dessus de chaque lunette, qui suit les mouvements de son propriétaire.	La visualisation d'un objet 3D qui suit les mouvements de son coéquipier permet de faire comprendre aux deux participants qu'ils sont dans la « même » expérience. $\Rightarrow H_2$

La chercheuse demande aux participants de se placer à environ deux mètres du mannequin, à deux positions prédéterminées (marquées d'un « X »). La chercheuse donne alors aux candidats toutes les instructions à suivre pendant l'expérience. Une retranscription des paroles de la chercheuse, entre guillemets, est parfois ajoutée aux instructions détaillées ci-dessous.

1. Explications de la nature de l'expérience. « Vous vivrez aujourd'hui une simulation médicale portant sur les organes abdominaux en RA. Pendant l'expérience, un instructeur vous enseignera les fonctionnalités et maladies reliées à différents organes de l'abdomen, après quoi vous aurez à tester vos connaissances lors d'un test, toujours en RA. C'est l'AV qui posera les questions après le cours. »
2. Clarification des termes utilisés pendant l'expérience. La chercheuse explique que ce qui est posé sur la table se nomme un « mannequin », que le vêtement que le mannequin porte est une « jaquette » et que l'instructeur est appelé « avatar ». Cette étape est nécessaire, car les participants peuvent provenir de cultures francophones différentes et utiliser des termes différents pour désigner une même chose.
3. Explications de la commande vocale. « Pendant l'examen, vous pouvez utiliser la commande vocale « avatar repeat » pour que l'avatar répète la question. » La chercheuse demande également aux participants de pratiquer cette commande vocale et elle les corrige s'ils parlent trop vite ou pas assez fort.
4. Utilisation du *clicker*. La chercheuse explique aux participants qu'ils n'utiliseront pas le geste du « clic » lors de l'expérience, mais bien le *clicker*, qui fonctionne comme une souris d'ordinateur. « Puisque cette expérience est collaborative, vous aurez un *clicker* pour deux. » La chercheuse donne alors le *clicker* à l'utilisateur « serveur ».
5. Déplacements dans l'environnement. « Pendant la simulation, vous êtes libres de vous déplacer partout dans l'environnement. Si vous voulez observer un organe de plus près ou si l'avatar vous demande d'accomplir une tâche, sentez-vous libre de le faire. Cependant, vous devez toujours garder un bras de distance avec les hologrammes, car ceux-ci sont inconfortables à regarder de trop près. Pendant le cours, plusieurs hologrammes vont apparaître autour du mannequin et il est agréable pendant cette période d'avoir

une vue d'ensemble de la scène. Pour ce faire, il est plus confortable de se reculer un peu afin de voir tous les hologrammes à la fois dans son champ de vision. »

6. Déroulement de l'expérience. La chercheuse explique qu'elle restera dans la salle pendant l'expérience, mais qu'aucune communication n'aura lieu entre elle et les participants durant l'expérience.

Il est à noter que pour faciliter les commandes vocales, l'appellation « avatar » est utilisée pendant l'expérience par les participants (même mot en anglais et en français). C'est d'ailleurs un terme plus facile à mémoriser qu'« agent virtuel ».

La chercheuse démarre alors l'enregistreur audio puis quitte l'environnement de l'expérience pour se retirer à un des bureaux.

À la fin de l'expérience, la chercheuse recueille les lunettes, met fin à l'enregistrement audio et demande aux participants de retourner à leur bureau respectif afin de remplir les questionnaires suivants :

1. Présence sociale (Bailenson et al., 2001) - voir Annexe C ;
2. Co-présence (Harms et Biocca, 2004) - voir Annexe D ;
3. Motivation à l'apprentissage (Barange et al., 2017; Soliman et Guetl, 2014) - voir Annexe E.

La durée complète de l'expérience (remplissage des formulaires, familiarisation avec les lunettes et expérience) est d'environ 40 minutes.

3.4 Réseau de communication

Le développement d'un réseau de communication entre les lunettes de l'application est un noyau important de cette recherche. C'est avec un réseau wifi dédié que le développement, les tests et l'expérience sont réalisés. La communication entre les lunettes doit supporter les échanges de messages et de paquets standards ainsi que le transfert d'une ancre spatiale. Une ancre spatiale a une taille d'environ 160Mo, dépendamment de la vastité de l'environnement et de la précision du balayage.

Deux versions ont été testées pour mettre sur pied le réseau utilisé pour cette recherche et sont décrites ci-dessous. Tous les logiciels, outils et librairies utilisés pour le développement des deux versions ont préalablement été détaillés à la section 3.1.4. Pour les deux versions, c'est un environnement de communication de type serveur-client qui est utilisé, tel qu'illustré à la figure 3.11. Dans tous les cas, le serveur est un hôte, c'est-à-dire que cette lunette agit à la fois comme un client et un serveur, alors que tous les autres participants sont des clients.

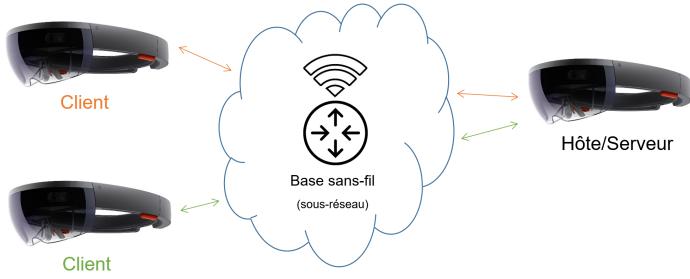


Figure 3.11 – Exemple d'un environnement de communication pour une simulation à trois utilisateurs

D'ailleurs, bien que l'expérience se déroule en binômes, le réseau est conçu pour pouvoir supporter plus d'utilisateurs. Quatre utilisateurs ont déjà joint cette simulation simultanément avec succès. Cependant, puisque les lunettes *Hololens* émettent des rayons infrarouges, trop d'utilisateurs dans un même environnement physique peuvent potentiellement causer des interactions non souhaitées, comme l'indique le fabricant dans ses recommandations d'utilisation (Microsoft, 2017). Cette limite reste à être testée.

Pour cette expérience, une connexion wifi dédiée est utilisée. Il est important de noter que l'utilisation du *multicast* peut causer des soucis sur certains types de réseau. En effet, les pare-feu des grands réseaux publics empêchent souvent la réception et l'envoi de certains paquets en lien avec le *multicast*.

3.4.1 Version A

La version A du réseau développé utilise la composante de l'interface de programmation bas niveau de UNet appelée *Network Layer* ou « couche réseau » afin de gérer l'envoi de données d'une lunette à une autre. L'option d'utiliser la couche réseau propre à Unity s'explique par la simplicité de l'intégration dans une simulation utilisant déjà Unity.

Sachant cela, les étapes d'implémentation, d'envoi et de réception de messages dans les réseaux pour la version A sont les suivantes :

1. Initialisation et ouverture d'un *socket UDP* pour le serveur et envoi *multicast* d'une invitation à se connecter aux clients, avec une qualité de service de type *ReliableSequenced*, qui garantit la livraison de chaque message dans l'ordre ;
2. Sectionnement par le serveur de l'ancre spatiale à partager en tableaux de 1024 octets en vue de l'envoi ;
3. Envoi de l'ancre spatiale ;

4. Assemblage des messages de données d'ancre spatiale chez le client. Si la réception est interrompue, de mauvaise taille ou invalide, comme cela peut arriver avec une connexion UDP, l'ancre spatiale est réenvoyée en totalité ;
5. Incorporation de l'ancre spatiale à l'environnement du client.

Cette version du réseau de communication comporte cependant plusieurs désavantages non négligeables qui ont mené à un rejet de cette version :

- La couche réseau de Unity ne permet pas d'envoyer des tableaux de plus de 1024 octets à la fois, alors qu'une ancre spatiale a une taille d'environ 160Mo, ce qui rend le sectionnement des données assez lourd ;
- Suite à une utilisation prolongée des lunettes *Hololens*, la cartographie spatiale de l'environnement se précise et s'agrandit, selon le balayage visuel effectué par l'utilisateur, mais s'alourdit également. Une ancre spatiale en lien avec une cartographie spatiale détaillée augmente en taille et requiert plus de temps de transfert ;
- Une solution au problème précédent est de détruire la carte spatiale enregistrée et de demander à l'utilisateur de balayer brièvement son environnement avant chaque envoi d'une ancre spatiale afin de limiter la taille de l'information à envoyer. Cependant, la seule façon de détruire cette carte spatiale de la mémoire du *Hololens* est de se rendre dans les réglages, ce qui est long et peu justifiable à exiger à un étudiant qui désire utiliser la simulation pour étudier ;
- Dû au sectionnement de l'information à envoyer en un nombre important de tableaux d'octets plus petits, le transfert d'une ancre spatiale se mesure en minutes plutôt qu'en secondes ;
- Vu le temps de transfert très long d'une ancre spatiale (plusieurs minutes), il arrive souvent que la connexion s'interrompe au milieu d'un transfert.

3.4.2 Version B

La version B du réseau de communication, et celle qui est retenue pour cette recherche, est fortement inspirée d'un exemple portant spécifiquement sur le transfert d'ancre spatiale mis en ligne à l'hiver 2018 par la communauté qui développe la librairie libre d'accès *Holo Toolkit* (*MixedRealityToolkit*, 2018). Cet exemple d'application se nomme *Sharing With UNET* et fonctionne selon une configuration serveur-client dans un réseau wifi. Plus précisément, le premier utilisateur qui se connecte à l'application demande à être serveur, ouvre une session et place une ancre spatiale dans son environnement. Les utilisateurs suivants qui se

connectent à l'application ont alors le choix de joindre la session du premier utilisateur ou d'en démarrer une nouvelle. En joignant une session déjà active, l'ancre spatiale du serveur est automatiquement importée chez le client, et ce en moins d'une minute.

Cette version B utilise l'interface de programmation réseau fournie par Windows pour les applications UWP et UNet, contrairement à la version A du réseau expliquée plus tôt qui utilise seulement UNet. Le fonctionnement est le suivant :

1. Initialisation et ouverture d'un *socket* TCP chez le serveur à l'aide des outils UWP et des espaces-nom Windows.Networking et Windows.Networking.Socket et envoie *multicast* d'une invitation à se connecter aux clients (Microsoft, 2018b) ;
2. Envoi d'une ancre spatiale (pas de sectionnement préalable à l'envoi nécessaire) ;
3. Réception de l'ancre spatiale chez le client et incorporation de celle-ci à son environnement.

L'utilisation de UNet dans cette version survient lors de transferts simples de haut niveau en lien avec la scène Unity décrite à la section suivante.

3.5 Simulation

Comme indiqué plus tôt, le logiciel Unity a été utilisé pour construire cette simulation. La scène Unity est utilisée pour développer les éléments virtuels de la simulation. Les différentes composantes de la scène et leurs sous-composantes sont illustrées à la figure 3.12 et énumérées ci-dessous, avec les fichiers de code et les informations utiles associés à chaque élément.

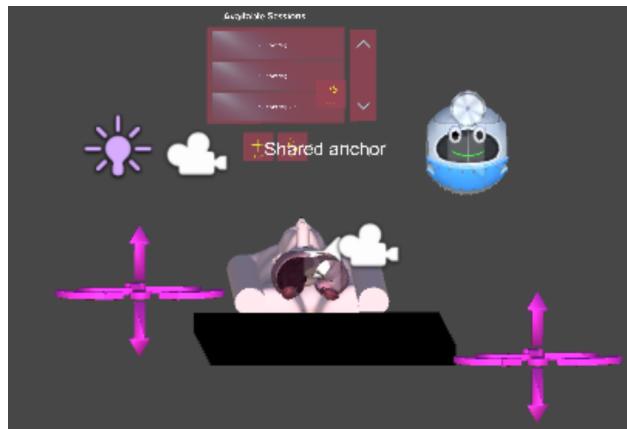


Figure 3.12 – Composantes virtuelles de la scène Unity

3.5.1 Sous-composantes de la scène Unity

1. Lumière directionnelle de la scène. C'est cette composante qui se charge de simuler l'illumination des objets virtuels ;
2. Caméra *Hololens*. La caméra *Hololens* calcule quels éléments virtuels doivent être affichés en fonction du point de vue de l'utilisateur ;
3. Gestionnaires. Cette composante gère les différents aspects de la scène comme le regard, les entrées (*inputs*), le curseur, les événements, le réseau et les ancre spatiales. C'est donc cette composante qui contient les fichiers de code de la librairie *Holo Toolkit* en lien avec le partage d'ancre spatiale tels que UNetAnchorManager.cs, WorldAnchorManager.cs et GenericNetworktransmitter.cs ;
4. Curseur. Déplacé par le regard de l'utilisateur, le curseur est un petit objet 3D en forme d'anneau qui entre en collision avec les différents éléments virtuels et réels afin d'être en mesure de les sélectionner ;
5. Interface utilisateur en lien avec la sélection d'une session et le déverminage. Cette interface est bien illustrée plus bas à la section 3.7. Elle provient de la librairie *Holo Toolkit* ;
6. Interface utilisateur en lien avec les interactions avec l'AV (boutons) ;
7. Agent virtuel (AV). L'objet de l'AV contient le fichier de code AvatarBehaviour.cs qui gère tout ce qui est en lien avec les comportements de l'AV, dont ceux détaillés plus tard à la section 3.6.2 ;
8. Mannequin :
 - (a) Organes. Un nuanceur particulier est utilisé pour le rendu des organes, afin qu'ils soient affichés par-dessus la « peau » du mannequin,
 - (b) Peau. Un nuanceur particulier est utilisé pour le rendu de la « peau » du mannequin, afin que n'importe quels hologrammes soient affichés par-dessus la peau,
 - (c) Flèches de calibration. Les flèches sont utilisées afin de placer avec précision le mannequin lors de la calibration en translation et rotation ;
9. Table :
 - (a) Flèches de calibration. Les flèches sont utilisées afin de placer avec précision le mannequin lors de la calibration en translation et rotation ;
10. Éléments d'apprentissages. Éléments visuels affichés comme aide-mémoire lors du « cours » sur les organes abdominaux ;

11. Gestionnaire des lignes du temps. Gère la chronologie, le démarrage et l'arrêt des différentes lignes du temps.

D'autres éléments ou concepts ont également contribué au bon fonctionnement de la scène. Ces éléments sont décrits ci-dessous.

3.5.2 Animations

Plusieurs animations ont lieu pendant la simulation, que ce soit au niveau de l'AV, des organes ou des objets 3D affichés en tant qu'aide-mémoire. Certaines animations ne se produisent que quelques fois, comme l'apparition, la disparition et le déplacement sous la table de l'AV. Elles ont pour but de rendre la simulation plus active. D'autres animations se font en continu, comme l'oscillation de l'AV ou les mouvements de sa bouche ou de ses pupilles qui ont pour but de rendre l'AV plus réaliste et plus crédible. Toutes ces animations ont été réalisées avec l'outil d'animation intégré à Unity. Conséquemment, une composante *Animator* est ajoutée à chaque objet dans la scène qui possède une ou des animations.

No	Ajout	Impact et explications
8	L'AV est continuellement animé ; il oscille pour donner l'impression qu'il flotte et ses pupilles bougent légèrement. Sa bouche est également animée au moment où il parle.	Ces animations de l'AV visent à le rendre plus réaliste et plus crédible afin de favoriser un plus grand sentiment de présence. $\Rightarrow H_1$

3.5.3 Chronologie de la simulation

La simulation suit un ordre de déroulement bien précis. D'abord, l'AV se présente, puis enchaîne avec les cours sur les poumons, le pancréas, le foie et les reins, pour terminer avec l'examen. C'est l'outil intégré à Unity « ligne du temps », ou *Timeline*, qui est utilisé pour réaliser les différentes séquences de la simulation.

L'outil ligne du temps permet de synchroniser dans l'ordre désiré du contenu audio, des animations et des activations d'objets. C'est à cette étape que la voix de l'AV, préenregistrée, est ajoutée à la simulation, en simultané avec l'animation de bouche qui parle. Un exemple de ligne du temps est présenté à la figure 3.13.

La composante « gestionnaire des lignes du temps » introduite plus tôt dans la scène Unity gère le démarrage et l'arrêt des lignes du temps afin de présenter un contenu fluide. Le

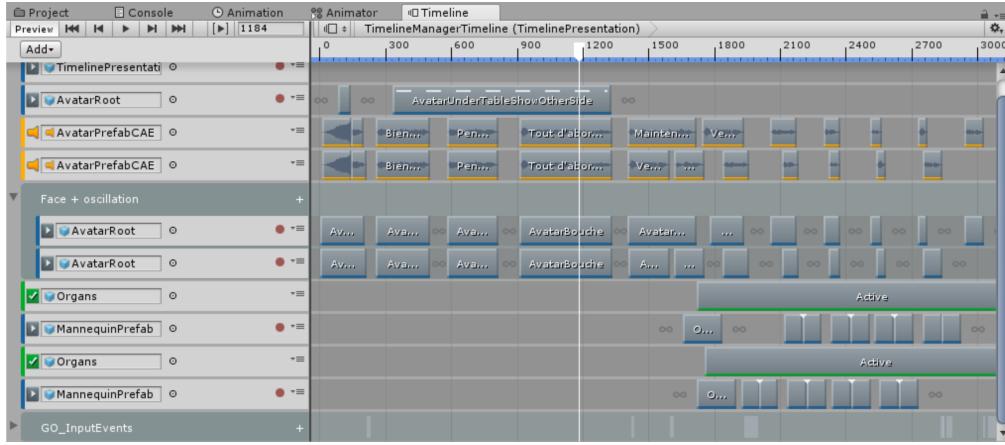


Figure 3.13 – Ligne du temps de la présentation de l’AV

gestionnaire des lignes du temps s’occupe, par exemple, de reprendre au bon endroit la ligne du temps de l’examen après un arrêt temporaire de cette ligne du temps causé par un participant qui désire réentendre une question.

3.5.4 Positionnement des hologrammes pour tous les utilisateurs

Dans la revue de littérature à la section 2.7.2, plusieurs auteurs avaient relevé deux méthodes pour assurer la propagation des transformations des objets virtuels entre les utilisateurs. C’est la deuxième méthode, soit celle qui envoie aux clients, en provenance du serveur, la position et l’orientation d’un objet 3D en temps réel en fonction d’une ancre spatiale, qui est utilisée pour cette simulation. Un pseudo-code de cet algorithme implémenté dans la fonction *Update* est présenté ci-dessous (voir l’Annexe H pour lire le fichier de code complet).

Résultat: Partage de la position d’un hologramme relativement à une ancre spatiale sur le réseau

```

if je suis le serveur then
    enregistrement de la position de l’hologramme relativement à une ancre spatiale
        placée dans l’environnement du serveur;
    partage aux clients de cette information;
else
    réception de la position de l’hologramme;
    calcul de la transformée inverse de la position de l’hologramme;
    placement de cet hologramme dans l’environnement du client;
end
```

Ce fichier de code peut être ajouté à n’importe quel objet que l’on souhaite positionner au

même endroit pour tous les utilisateurs (client ou serveur) de l'application en fonction d'une ancre spatiale partagée. L'ajustement de la position et de l'orientation de tous les objets se fait donc en temps réel pour tous les utilisateurs.

3.5.5 Instance joueur

L'instance joueur est une composante assez standard dans le développement de jeux vidéos, et cette simulation a pu en tirer profit. La scène possède une composante de joueur, qui est initialisée et enregistrée sur le réseau lors du démarrage de l'application. Dans le cas de cette simulation multi-utilisateur, la composante joueur de l'utilisateur courant et des autres utilisateurs n'est presque pas représentée physiquement, contrairement à un jeu vidéo où l'on voit les avatars des autres joueurs. Ici, une simple sphère blanche apparaît sur le côté de la lunette de chaque utilisateur (et visible par les autres participants) pour reconnaître qu'un utilisateur est connecté, tel qu'illustré précédemment à la figure 3.10.

Le placement de cette sphère qui suit les déplacements et l'orientation de son propriétaire et de tous les autres joueurs s'inspire du fonctionnement du placement des différents hologrammes de la scène en fonction d'une ancre spatiale, expliqué à la section précédente. Cependant, non seulement le serveur envoie à tous la position d'un objet relativement à une ancre spatiale, mais les clients informent aussi le serveur de leur position et de leur orientation par rapport à l'ancre spatiale. La position et l'orientation d'un utilisateur sont données par la position de la caméra, soit celle des lunettes *Hololens*, ce qui donne une excellente approximation de l'emplacement de la tête de l'utilisateur.

Cette connaissance de l'emplacement exact des autres utilisateurs par tous les utilisateurs est utile pour l'implémentation des comportements améliorés de l'AV décrits plus tard à la section 3.6.2.

3.6 Implémentation des différents comportements de l'AV

Tel qu'expliqué plus tôt dans les sections abordant le contexte de recherche et le scénario aux sections 2.10 et 3.2, l'AV agit différemment selon la version de la simulation. En effet, pour la version améliorée, les comportements de l'AV sont améliorés et tiennent compte de l'environnement physique.

Les « comportements améliorés de l'AV » réfèrent en fait aux deux variables étudiées dans cette étude :

- $\theta_{occlusion}$: l'occlusion de l'AV par les objets de l'environnement physique,

- $\theta_{conscience}$: la conscience de tous les participants, de leurs positions, de leurs orientations et de leurs paroles par l'AV.

Les manifestations des variables étudiées sont synthétisées au tableau 3.2, puis le tout est détaillé et expliqué ci-dessous.

Tableau 3.2 – Synthèse des manifestations des différences entre les deux versions de la simulation

Déference	Variable θ	Version standard	Version améliorée
δ_1	$\theta_{occlusion}$	L'AV n'est pas occlus par l'environnement physique	L'AV est occlus par les objets physiques de la pièce
δ_2	$\theta_{occlusion}$	Les organes du mannequin ne sont pas occlus par sa jaquette	Les organes du mannequin apparaissent seulement après que la jaquette soit relevée
δ_3	$\theta_{conscience}$	L'AV regarde « son » utilisateur et n'a aucune conscience des autres	L'AV connaît la position et l'orientation des autres utilisateurs et peut regarder tous les participants individuellement. Il sait également si un des participants parle.

3.6.1 $\theta_{occlusion}$: Occlusion (version améliorée seulement)

L'AV demeure normalement au-dessus du mannequin, mais à deux reprises pendant la simulation, celui-ci se déplace dans l'environnement, notamment sous la table. Dans la version standard, celui-ci n'est pas occlus par son environnement physique, alors que c'est le cas pour la version améliorée (δ_1). Le résultat pour chaque version de la simulation est illustré à la figure 3.5, présentée plus tôt. Deux techniques ont été testées pour arriver à cet effet.

D'abord, c'est la cartographie spatiale qui a été utilisée pour produire l'effet d'occlusion. La carte spatiale produite par le *Hololens*, tel qu'expliqué à la section 3.1.1, peut être utilisée afin d'occuler les hologrammes d'une scène en fonction de la disposition physique d'un environnement. C'est d'ailleurs une des fonctionnalités clés des lunettes *Hololens* de Microsoft. Lorsque l'utilisateur balaie l'environnement du regard, la carte spatiale s'ajuste en temps réel. Même les déplacements du coéquipier d'un participant sont visibles dans cette carte spatiale. Cependant, la carte est souvent grossièrement tracée et l'ajustement en temps réel des changements dans l'environnement se fait lentement. Par exemple, entre deux affichages, les triangles de la carte spatiale peuvent changer, comme illustré ci-dessous à la figure 3.14, pour un exemple fictif d'occlusion entre une chaise et un hologramme.

Après quelques minutes d'utilisation, une occlusion changeante à chaque affichage est dé-



(a) Occlusion d'une chaise avec un hologramme à un instant donné (b) Occlusion de la même chaise avec le même hologramme l'instant suivant

Figure 3.14 – Exemple d'occlusion d'une chaise réelle avec un hologramme pour deux affichages subséquents avec l'utilisation de la cartographie spatiale

rangeante pour l'oeil et imprécise, c'est pourquoi une alternative pour occulure l'AV a été mise au point par la chercheuse. Cette deuxième technique est basée sur le principe que les hologrammes de couleur noire opaque ne sont pas visibles dans les lunettes *Hololens*, car l'affichage des couleurs des hologrammes se fait selon le principe d'addition des lumières. Ceci étant dit, il suffit alors de changer la couleur du mannequin et de la table, après la calibration, pour un noir opaque, tel qu'illustré à la figure 3.15, afin qu'ils ne soient plus visibles aux yeux des utilisateurs. Puisque les hologrammes s'occluent entre eux dû au test de profondeur (test Z), l'AV est occulue par les hologrammes positionnés exactement sur le mannequin et sur la table, ce qui donne l'impression qu'il est occlus par les objets physiques. La figure 3.15 illustre également l'occlusion de l'AV, s'il était possible de voir les hologrammes noirs, ce qui n'est pas le cas. L'utilisateur voit ce qui a été présenté plus tôt à la figure 3.5b, qui est en réalité un montage, car les images prises avec un *Hololens* affichent les hologrammes noirs.

Toujours dans l'optique d'intégrer le concept d'occlusion dans la version améliorée, l'occlusion des organes avec la jaquette est également exploitée, tel qu'illustré plus tôt à la figure 3.6. Ce sont en fait les participants de la version standard qui voient les hologrammes par-dessus la jaquette, alors que cette situation est évitée dans la version améliorée (δ_2), car l'AV demande aux participants de relever la jaquette avant d'afficher les hologrammes. La visualisation d'hologrammes d'organes par-dessus un vêtement n'est pas en accord avec la physique que nous connaissons et est désagréable. Normalement, les organes seraient occlus par la jaquette, ce qui n'est pas le cas pour une partie de la version standard.



Figure 3.15 – Hologrammes noirs qui rendent possible l’occlusion

Pour ce faire, la simulation est capable de détecter si les participants ont relevé la jaquette ou pas. Cette détection se base sur la proximité d'un participant avec l'AV et le mannequin et sur la direction du regard de celui-ci à ce moment de proximité. Le participant doit regarder le thorax du mannequin où se trouve la jaquette. Ces deux conditions fonctionnent bien et la détection de si un participant a relevé la jaquette ou non est efficace.

3.6.2 $\theta_{conscience}$: Conscience des tous les participants et de leurs positions, de leurs orientations et de leurs paroles par l'AV (version améliorée seulement)

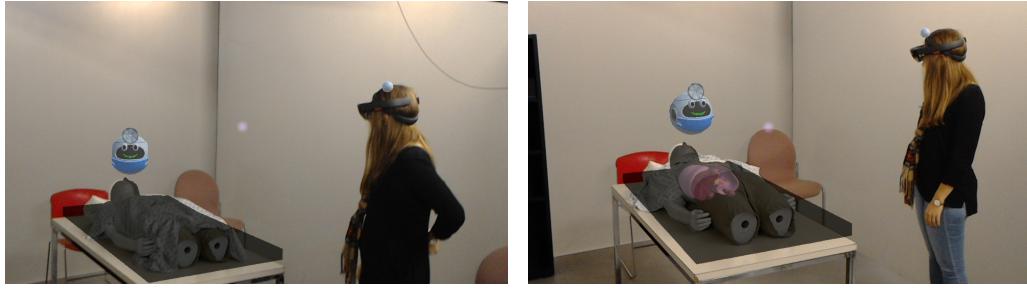
Après que la jaquette soit relevée pour les deux versions de l'expérience, l'AV dit les mêmes paroles et les hologrammes apparaissent au même moment pour les deux participants, et ce pour chaque version. Cependant, l'orientation du regard de l'AV est différente dans les deux versions.

Dans la version standard, l'AV n'a pas conscience de l'autre participant : il ne regarde que « son » participant (δ_3). Or, peu importe si le coéquipier d'un participant parle, bouge ou interagit avec l'AV, celui-ci n'en est jamais conscient, ou du moins ne le laisse jamais paraître.

Dans la version améliorée, l'AV a conscience de tous les participants, de leurs positions, de leurs orientations et de leurs paroles. Cette connaissance permet à l'AV de regarder « son » participant et tous les autres participants. Dans le contexte de cette étude, avec deux participants à la fois, l'AV peut regarder en alternance chaque participant. Un aperçu de ce comportement est présenté à la figure 3.16.

Aussi, dans la version améliorée, quand l'AV se présente, pose une question, marque une pause ou conclue l'expérience, il regarde successivement chaque participant.

Puisque le serveur connaît la position et l'orientation de chaque utilisateur en temps réel relativement à l'ancre spatiale commune, le comportement de l'AV est plus humain et plus



(a) Version standard où l'AV regarde toujours « son » participant (b) Version améliorée où l'AV peut également regarder l'autre participant

Figure 3.16 – Regard et orientation de l'AV pour chaque version

crédible. Celui-ci regarde des participants au hasard lorsqu'il parle et regarde un participant en particulier si celui-ci ou celle-ci est parle. Plus précisément, les comportements de l'AV implémentés sont :

- Dans le cas où l'AV parle...
 - et que plusieurs participants regardent l'AV :
 - l'AV alternera son regard sur les participants les uns après les autres de façon aléatoire.
 - et qu'un participant regarde l'AV :
 - l'AV regarde ce participant jusqu'à ce qu'un autre participant recommence à le regarder, dans lequel cas le participant observé redeviendra aléatoire ;
 - et qu'aucun participant ne regarde l'AV :
 - l'AV alternera son regard sur les participants les uns après les autres de façon aléatoire.
- Dans le cas où l'AV est silencieux...
 - et que les participants sont également silencieux :
 - l'AV alterne son regard entre les participants ou le vide (entre les participants, le plancher, etc.) de façon aléatoire.
 - et qu'un participant parle :
 - l'AV regarde le participant qui parle et le suit du regard jusqu'à ce qu'il ait terminé de parler ;
 - et que plusieurs participants parlent :
 - l'AV observe le premier participant qui a commencé à parler.

La détection d'un utilisateur qui parle se fait à l'aide du microphone intégré aux lunettes *Hololens*. Il est possible de vérifier l'amplitude du son capté par le microphone (en décibels) puis de déterminer à l'aide de seuils si le participant parle ou non. Les microphones du *Hololens* sont conçus de façon à bien capter la voix de son utilisateur seulement et à couper les bruits environnants ou les voix des autres utilisateurs. Il faut qu'un autre utilisateur soit excessivement proche des lunettes d'un autre utilisateur pour que le micro capte un niveau de décibels aussi élevé que lorsque l'utilisateur qui porte les lunettes parle à un niveau standard.

3.7 Calibration

La calibration doit être effectuée à chaque démarrage de l'application. D'abord, l'écran d'accueil de l'application invite l'utilisateur à ouvrir une session ou à joindre une session déjà en cours (si une session est disponible), tel qu'illustré à la figure 3.17.

Si un utilisateur désire démarrer une nouvelle session (dans laquelle il sera serveur), il doit alors positionner les hologrammes du mannequin rose et de la table rouge exactement en superposition avec ces mêmes objets réels dans son environnement à l'aide des flèches de calibration. Au démarrage de la session, ces hologrammes sont placés à environ trois mètres de l'utilisateur sur une surface plane, si surface plane il y a. Un exemple de calibration avant et après est présenté à la figure 3.18.

Dans le cas où un utilisateur joint une session en cours, celui-ci n'aura pas besoin de placer ses hologrammes en superposition avec les objets physiques dans l'environnement. Il verra les hologrammes du mannequin rose et de la table rouge avec un message affichant le stade d'importation de l'ancre spatiale (connexion au réseau, importation ou désrialisation). Une fois l'ancre spatiale complètement reçue, les hologrammes de cet utilisateur se placeront automatiquement au même endroit que ceux de son coéquipier dans son environnement. Cette attente d'importation d'une ancre spatiale peut durer au plus quelques dizaines de secondes.

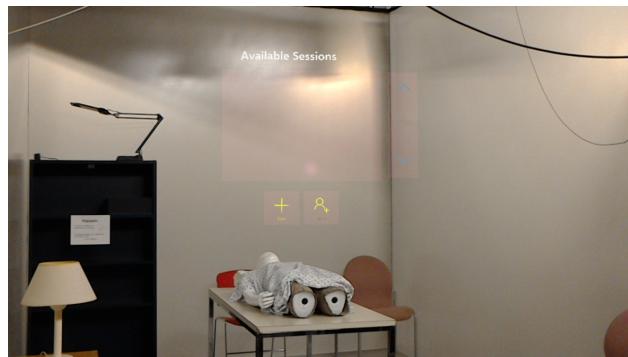


Figure 3.17 – Sélection d'une session

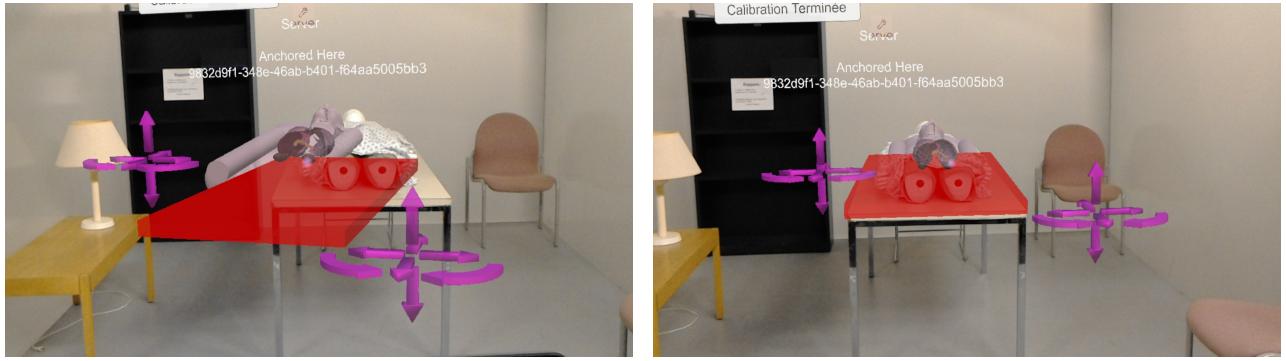


Figure 3.18 – Calibration du mannequin et de la table

Bien entendu, pour que les hologrammes se placent au bon endroit suite à l’importation de l’ancre spatiale, il faut que le serveur ait préalablement placé les hologrammes.

Les hologrammes sont placés aux mêmes endroits dans l’environnement pour le serveur et le ou les client(s) à quelques centimètres près ($\approx 10\text{ cm}$). Puisque le placement des hologrammes dépend de la position de l’ancre spatiale, qui elle dépend des coordonnées spatiales obtenues à l’aide d’une cartographie spatiale parfois grossière et imparfaite, les hologrammes ne sont jamais exactement au même endroit. Un léger décalage est toujours présent. Ce décalage peut faire en sorte que, par exemple, chez le client, les organes sont dix centimètres trop à gauche.

Une amélioration future à la calibration serait de placer des ancre spatiales persistantes dans le temps, pour que les hologrammes soient au même endroit à chaque démarrage de l’application.

CHAPITRE 4 MÉTHODOLOGIE DE LA PRISE DE DONNÉES

Maintenant que la méthodologie en lien avec la construction et le développement de la simulation a été expliquée au chapitre précédent, il est pertinent de connaître la méthodologie derrière la prise des données, avant, pendant et après l'expérience. Ce chapitre aborde à la première section la signification statistique et le calcul de la taille minimale de l'échantillon. La deuxième section détaille le processus de sélection des participants, puis les sections 3 et 4 justifient les questionnaires choisis et les mesures objectives évaluées. Finalement, une synthèse des différentes mesures prises et des hypothèses associées est faite.

4.1 Signification statistique

La population étudiée est majoritairement constituée d'étudiants en ingénierie, puisque l'étude a eu lieu à l'École Polytechnique de Montréal, ce qui rend la population homogène. Une population homogène possède des avantages et des inconvénients. Cette ressemblance des participants au niveau de leur champ d'études apporte une validité interne à l'expérience, car les sujets se ressemblent tous entre eux, mais au détriment d'une validité externe.

Le plus grand nombre de participants possible et l'analyse la plus approfondie possible de chaque participant sont souhaités. Cependant, il est difficile pour une recherche d'atteindre ces deux aspects et ainsi d'obtenir une validité interne et externe de l'expérience. Dans le cadre de cette étude, une validité interne est désirée avant une validité externe. En effet, puisque le but de cette étude est la mise en évidence de relations théoriques et expérimentales, il est plus profitable d'analyser en profondeur un plus petit nombre de participants que d'analyser en surface un plus grand nombre de participants (Thietart, 2014).

Les calculs nécessaires à l'estimation de la taille d'un échantillon avec un degré de confiance satisfaisant sont décrits ci-dessous (Thietart, 2014). Ces calculs sont faits en fonction des trois questionnaires remplis à la fin de l'expérience, où la réponse à chaque question est évaluée à l'aide d'une échelle de 7 points (échelle de Likert). Notez que ces calculs sont des estimations destinées à donner une idée de la taille de l'échantillon.

L'équation pour calculer la taille minimale de l'échantillon pour atteindre une précision donnée est :

$$n = \left(\frac{z}{\lambda} s \right)^2 \quad (4.1)$$

où :

n : taille de l'échantillon

z : valeur de la loi normale pour le seuil de signification α

λ : précision

s : écart type de la variable étudiée = $\sqrt{\text{variance}}$

La variance des données recueillies avec des échelles peut être estimée selon le nombre de points de l'échelle (Churchill et Iacobucci, 2009). Pour une échelle de 7 points, toujours selon Churchill et Iacobucci (2009), l'ordre de la grandeur de la variance varie entre 2,5 et 4,0. Par précaution, la borne supérieure de l'intervalle sera utilisée. Or, si la variance est de 4,0, l'écart-type est $s = \sqrt{4,0} = 2,0$.

Le seuil de signification α utilisé est de 5%. Ce seuil est assez standard : des seuils plus bas sont utilisés pour des études en laboratoire et des seuils plus hauts sont utilisés pour des études sociales (Thietart, 2014). La valeur de la loi normale associée à un seuil de signification $\alpha = 0,05$ est $z = 1,96$.

La précision λ correspond à la précision de part et d'autre de la moyenne des résultats. L'estimation de la précision souhaitée pour cette étude est $\lambda = 1$. Par exemple, pour une question d'un des trois questionnaires, si la moyenne est de 2 (en accord), la moyenne sera en fait entre 1 (un peu en accord) et 3 (très en accord), avec 5% de chances de se tromper (Thietart, 2014).

Sachant cela :

$$n = \left(\frac{z}{\lambda} s \right)^2 = \left(\frac{1,96}{1} 2 \right)^2 = 15,37 \quad (4.2)$$

Ainsi, selon cette méthode, 15 échantillons sont nécessaires. Puisque deux groupes sont testés (un groupe témoin et l'autre groupe avec les comportements améliorés de l'AV), 60 participants, donc 30 binômes, devront être recrutés.

4.2 Participants

C'est la méthode du « choix raisonné » qui a été utilisée pour sélectionner l'échantillon de participants. Autrement dit, les participants ont été choisis parmi un bassin de personnes répondant à des critères précis, et non pas au hasard dans la population en général.

Nous avons souhaité que les participants satisfassent les critères suivants :

- être âgés de 18 ans ou plus, sans quoi un consentement parental aurait été requis,
- être étudiants, car les étudiants sont habitués à un contexte d'apprentissage et sont le public cible des simulations médicales,
- poursuivre des études universitaires dans un domaine qui n'est pas la santé ou la biologie, car le cours théorique serait trop complexe à réaliser, ou l'informatique, car le sentiment de présence pourrait être affecté du à de trop grandes connaissances en infographie,
- parler, lire et comprendre le français à un niveau avancé, car l'expérience et les questionnaires sont en français,
- ne pas avoir développé une trop grande complicité avec son coéquipier préalablement à l'expérience.

Ce dernier critère s'explique par la différence entre la façon que communiquent des inconnus et de bons amis entre eux. Un couple ou deux meilleurs amis pourraient, par exemple, penser à un même ami qui est atteint d'asthme pendant l'explication de cette complication des poumons par l'AV et commenceront à en discuter pendant la simulation. Ils pourraient également se couper la parole entre eux lors d'un argumentaire sur une question de l'examen, car ils sont moins polis et respectueux envers leur coéquipier que des personnes qui ne se connaissent pas, ou qui se connaissent peu.

Le recrutement de participants s'est fait par les réseaux sociaux (promotion d'un événement *Facebook* qui incite les gens à participer à l'expérience) et par la parution d'une annonce dans un courriel hebdomadaire destiné aux élèves des cycles supérieurs en génie de l'École Polytechnique de Montréal. La chercheuse a également fait la promotion des lunettes *HoloLens* de Microsoft à des étudiants au hasard présents à la cafétéria de l'École Polytechnique de Montréal, en se rendant à toutes les tables occupées, après quoi les étudiants intéressés étaient invités à participer à l'expérience. Tous les participants se sont inscrits sur une base volontaire et n'ont reçu aucune compensation pour leur participation.

L'inscription anonyme des participants se faisait à travers un calendrier *Doodle*. Finalement, 32 binômes ont réalisé l'expérience : 16 équipes ont vécu l'expérience standard et les 16 autres l'expérience améliorée, pour un total de 64 candidats. Les expériences se sont échelonnées sur quatre semaines.

- 36 des candidats sont des hommes et 28 des femmes ;
- moyenne d'âge de 23,09 ans (écart-type = 2,38) ;
- 1 d'entre eux est étudiant au niveau collégial, 38 au premier cycle universitaire, 22 au deuxième cycle et 3 au troisième cycle ;

- 15 candidats avaient déjà vécu une expérience de RA avant de participer à la recherche, et de ceux-ci, 10 avaient déjà essayé les lunettes *Hololens* de Microsoft ;
- 32 candidats ont affirmé connaître leur coéquipier (16 pour l'expérience standard et 16 pour l'expérience améliorée) : 5 d'entre eux ont qualifié leur relation avec leur partenaire de « connaissance » et les 27 autres de « connaissance et ami » ;
- 2 candidats ont rapporté avoir un problème de vision 3D, un désalignement des yeux ou un oeil croisé ou errant, mais que cela ne les empêchait pas de réaliser l'expérience et de voir les hologrammes 3D.

4.3 Choix des différentes mesures d'évaluation

Les méthodes subjectives d'évaluation de la présence ont été abordées plus tôt à la section 2.8.1 et plusieurs questionnaires ont été analysés. Plus d'un questionnaire peut évaluer un même sentiment.

Comme abordé plus tôt à la section 3.3, trois questionnaires sont remplis par les participants à la fin de cette expérience, soit un questionnaire de présence sociale, un questionnaire de co-présence et un questionnaire de motivation à l'apprentissage. Les trois questionnaires sont remplis avec une échelle de type Likert à sept points. Les questionnaires se trouvent aux Annexes C, D et E. Ils ont été librement traduits de l'anglais au français, ce qui peut possiblement être un biais dans cette recherche (voir la section 6.2 pour tous les biais).

Des mesures objectives peuvent également traduire le sentiment de présence sociale, le sentiment de co-présence et la motivation à l'apprentissage, tel qu'expliqué à la section 2.8.2. Cinq mesures objectives ont été relevées pendant cette expérience : elles sont détaillées ci-dessous, après la justification des questionnaires choisis.

4.3.1 Questionnaire d'évaluation du sentiment de présence sociale

Pour son utilisation répandue dans de nombreuses études, c'est le questionnaire d'évaluation de la présence sociale de Bailenson et al. (2001) qui est utilisé pour cette étude. En effet, d'autres études liées avec celle-ci, soit celles de Mccall et al. (2011); Pütten et al. (2012); Kim et al. (2017), utilisent ce questionnaire pour évaluer le sentiment de présence sociale.

4.3.2 Questionnaire d'évaluation du sentiment de co-présence

Le questionnaire d'évaluation du sentiment de co-présence provient de Harms et Biocca (2004). Ce questionnaire de 36 questions évalue le sentiment de présence social en fonction

des six dimensions de ce sentiment, dont le sentiment de co-présence, évalué en six questions. Les questions en lien avec le sentiment de co-présence du questionnaire de Harms et Biocca (2004) ont été choisies, au détriment du questionnaire du « sentiment d'être ensemble » de Basdogan et al. (2000) (voir la section 2.8.1), notamment pour sa facilité d'ajustement.

En effet, un des buts de cette recherche est de mesurer l'impact du fait qu'un AV a conscience d'un coéquipier physiquement présent dans la même simulation que l'utilisateur. Or, le questionnaire d'évaluation du sentiment de co-présence mis au point par Harms et Biocca (2004) évalue ce sentiment entre un utilisateur et un AV seulement. Le questionnaire a donc été adapté de façon à évaluer également le sentiment de co-présence entre un utilisateur et son coéquipier. Par exemple, la première question du questionnaire de Harms et Biocca (2004) est : « j'ai conscience de l'avatar ». La version de cette question destinée à évaluer le sentiment de co-présence entre un utilisateur et son partenaire serait donc : « mon/ma partenaire a conscience de l'avatar ». Le questionnaire adapté est donc passé de six à douze questions.

4.3.3 Questionnaire d'évaluation de la motivation à l'apprentissage

Le questionnaire d'évaluation de la motivation à l'apprentissage est le même que celui utilisé pour l'expérience de Barange et al. (2017), tel qu'expliqué plus tôt à la section 2.8.1. Six questions de ce questionnaire portent sur l'évaluation de la motivation à l'apprentissage en lien avec la présence d'un AV (Q1, Q2, Q5, Q7, Q9 et Q10). Les quatre autres questions portent sur la perception de l'AV par les participants.

4.3.4 Échanges verbaux entre coéquipiers

Les paroles des participants sont enregistrées pendant l'expérience, ce qui permet d'analyser leurs dialogues pendant le test, moment où ils doivent communiquer pour s'entendre sur une réponse à chaque question. Le temps de dialogue pour répondre à chaque question est mesuré, en secondes.

4.3.5 Résultat au test

La simulation produit un fichier de texte avec les réponses au test. Il est ainsi possible de connaître le résultat au test de chaque équipe, ce qui constitue une donnée qui reflète objectivement les apprentissages réalisés.

4.3.6 Effet de l'occlusion

À deux reprises pendant la simulation, nous avons fait en sorte que l'AV se déplace dans l'environnement et va même sous la table. La chercheuse présente dans la salle pendant l'expérience a donc noté si les participants se penchaient pour regarder l'AV sous la table ou non. Cette situation a été illustrée plus tôt à la figure 3.5.

Cette mesure vise à tester et valider la corrélation positive entre le sentiment de présence sociale et la qualité des indices de profondeur précédemment trouvée par l'étude Kim et al. (2017) décrite à la section 2.5.2.

4.3.7 Travail d'équipe pour relever la jaquette

Dans les deux versions de la simulation (standard et améliorée), l'AV demande à un moment aux participants de relever la jaquette du mannequin. La chercheuse présente dans la salle pendant l'expérience note si les deux participants s'approchent pour relever la jaquette ou si ceux-ci s'entendaient sur lequel d'entre eux doit effectuer cette tâche.

La mesure du sentiment de co-présence est le degré avec lequel un participant est conscient des autres. Cette mesure évalue si les deux participants se sont avancés pour relever la jaquette (faible sentiment de co-présence, car les participants se croient tous les deux seuls et accomplissent la tâche peut importe ce que l'autre fait en simultané) ou si un seul des participants a accompli cette tâche (fort sentiment de co-présence, car les participants ont conscience de la présence de leur coéquipier dans la même simulation qu'eux et s'entendent sur qui accomplit cette tâche). Dans un contexte hors simulation, relever un morceau de tissu est une tâche destinée à une seule personne.

4.3.8 Considération des remises en question de l'AV

Pendant le test, l'AV demande à deux reprises si les participants sont certains de leur réponse, tel qu'expliqué plus en détail précédemment à la section 3.2. La simulation enregistre également dans le fichier de texte avec les résultats au test si le binôme répond positivement ou négativement à cette remise en question. Un binôme a considéré une remise en question de l'AV si à au moins une des deux questions difficiles il est revenu sur sa réponse initiale.

Enfin, cette mesure témoigne du sentiment de présence sociale. En effet, si les participants considèrent les remises en question lancées par l'AV, c'est qu'ils considèrent celui-ci comme étant présent avec eux dans la simulation.

4.4 Synthèse

Les différentes mesures expliquées ci-dessus visent toutes à valider ou invalider une des hypothèses posées à la section 2.11. Ci-dessous se trouvent les différentes mesures ainsi que l'association de celles-ci aux différentes hypothèses, également illustré au tableau 4.1.

Mesures :

- M_1 Questionnaire d'évaluation du sentiment de présence sociale ;
- M_2 Questionnaire d'évaluation du sentiment de co-présence ;
- M_3 Questionnaire d'évaluation de la motivation à l'apprentissage ;
- M_4 Échanges verbaux entre coéquipiers ;
- M_5 Résultat au test ;
- M_6 Effet de l'occlusion (participants se penchent pour voir sous la table ?) ;
- M_7 Travail d'équipe pour relever la jaquette ;
- M_8 Considération des remises en question de l'AV.

Hypothèses et mesures associées :

- H_{a1} L'amélioration des comportements de l'AV augmente le sentiment de présence sociale ressenti par le participant. M_1 , M_6 et M_8 ;
- H_{a2} L'amélioration des comportements de l'AV augmente le sentiment de co-présence ressenti par le participant. M_2 et M_7 ;
- H_{a3} L'amélioration des comportements de l'AV augmente la motivation à l'apprentissage ressentie par le participant M_3 ;
- H_{a4} L'amélioration des comportements de l'AV impacte positivement l'apprentissage du participant M_5 ;
- H_{a5} L'amélioration des comportements de l'AV incite les participants à communiquer davantage entre eux pendant la simulation M_4 .

Tableau 4.1 – Hypothèses et mesures associées

	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6	M_7	M_8
H_{a1}	X					X		X
H_{a2}		X					X	
H_{a3}			X					
H_{a4}					X			
H_{a5}				X				

CHAPITRE 5 ANALYSE DES RÉSULTATS

L'analyse des résultats effectuée dans ce chapitre permettra par la suite de confirmer ou d'informer les hypothèses. Ce chapitre comporte trois sections : la première détaille les variables étudiées, la deuxième fait état des différents tests statistiques à utiliser pour une situation donnée et la dernière section présente les résultats des analyses statistiques.

Trois ouvrages ont été souvent consultés pour s'assurer de la validité des analyses, soit Thietart (2014), STHDA (2018) et UdeS (2018)

5.1 Variables et causalité

Les deux variables observées, soit celles qui varient d'une version à l'autre, dans cette étude sont :

- $\theta_{occlusion}$: l'occlusion de l'AV par les objets de l'environnement physique,
- $\theta_{conscience}$: la conscience de tous les participants, de leurs positions, de leurs orientations et de leurs paroles par l'AV.

L'observation de ces variables se fait à l'aide de méthodes statistiques basées sur des hypothèses inspirées de la littérature scientifique parue à ce jour (Thietart, 2014). Ces deux variables $\theta_{occlusion}$ et $\theta_{conscience}$ peuvent être observées car elles sont isolées lors d'une expérience contrôlée comportant deux versions (standard et améliorée). Toutes les variables restent inchangées entre les deux versions, sauf pour les variables observées $\theta_{occlusion}$ et $\theta_{conscience}$, qui, elles, varient.

Il existe des variables latentes, soit des variables qui ne peuvent pas être contrôlées d'une version à l'autre. Dans le cas de cette étude, ces variables latentes peuvent être, par exemple, l'intelligence, l'intérêt envers le domaine de la santé ou encore l'humeur des participants.

Cette étude vise à mettre en lumière un possible lien de causalité simple entre les variables observées $\theta_{occlusion}$ et $\theta_{conscience}$ et les hypothèses posées (voir la section 2.11). Un lien de causalité simple serait, par exemple, que l'occlusion ($\theta_{occlusion}$) influence le sentiment de présence social (tel que déjà prouvé par Kim et al. (2017)). Cependant, un lien de causalité simple ne confirme pas qu'à l'inverse, le sentiment de présence sociale influence la perception de l'occlusion. D'autres liens peuvent exister entre les variables observées et les hypothèses, tels que l'influence réciproque ou la double causalité, mais de telles relations ne seront pas étudiées dans le cadre de cette recherche.

5.2 Choix des tests statistiques

Les hypothèses nulles H_0 et alternatives H_a ont été présentées plus tôt à la section 2.11. Les tests statistiques acceptent généralement une hypothèse alternative seulement dans la situation où l'hypothèse nulle est rejetée. En effet, il est plus difficile de prouver une hypothèse alternative H_a que de rejeter l'hypothèse nulle H_0 (Thietart, 2014).

À titre de rappel, le seuil de signification α , aussi appelé erreur de première espèce, est de 5% pour cette étude. Tous les échantillons sont indépendants, c'est-à-dire qu'une seule donnée est associée à un même candidat pour un test donné, car les candidats ont fait l'expérience une seule fois. Certaines données de cette étude ont été relevées individuellement (64 données), comme les résultats aux questionnaires, alors que d'autres ont été prises pour chaque paire de participants (32 données), comme le résultat au test dirigé par l'AV.

Les tests statistiques sont divisés en deux familles, soit les tests paramétriques et les tests non paramétriques. Les tests paramétriques considèrent que les populations suivent une forme paramétrique particulière, comme la loi normale. Les tests non paramétriques eux ne tiennent pas compte de formes paramétriques particulières. Les deux familles de tests peuvent mener à un rejet de l'hypothèse nulle H_0 , mais les tests paramétriques sont plus puissants et mènent plus rapidement au rejet de l'hypothèse nulle H_0 dans le cas où celle-ci doit être rejetée (XLStats, 2016). Une étude doit cependant répondre à plus de critères pour se qualifier à un test paramétrique. Entre autres, l'échantillon doit être assez grand et doit suivre une loi normale et les variances des échantillons doivent être semblables.

Les tests statistiques utilisés pour comparer deux moyennes comparent en fait ces deux moyennes à une valeur donnée D_0 . Dans le cas présent, cette valeur sera de zéro, ce qui fait en sorte que les hypothèses nulles H_0 et alternatives H_a énoncées précédemment sont respectées. Les hypothèses alternatives H_a ont été rédigées de façon à ce que la grande majorité des relations à valider ou à invalider soient de forme unilatérale à droite (sauf indication contraire). L'équation liée aux hypothèses de forme unilatérale de droite est présentée ci-dessous et la distribution normale avec la représentation de la zone d'acceptation et la zone de rejet est présentée à la figure 5.1. Veuillez noter que les différentes variables en lien avec une des deux versions, soit la version standard la version améliorée, seront référencées avec les lettres S pour standard et A pour améliorée.

$$H_0 : x_S - x_A = D_0 \implies H_0 : x_S = x_A$$

$$H_a : x_S - x_A < D_0 \implies H_a : x_A > x_S$$

où :

H_0 : Hypothèse nulle

H_a : Hypothèse alternative en question

x_S et x_A : Variables de l'échantillon (version standard ou améliorée)

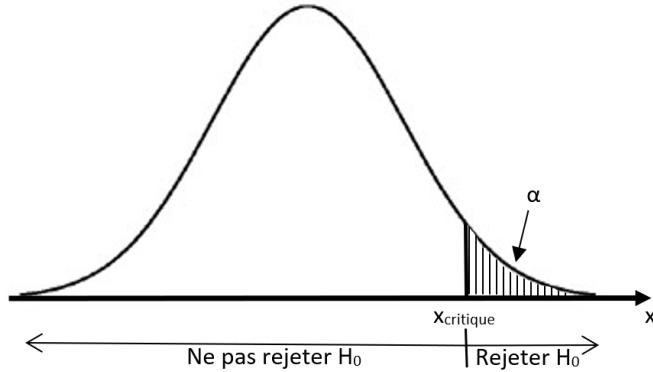


Figure 5.1 – Distribution normale et représentation des zones d'acceptations et de rejet (inspiré de Thietart (2014))

Les données qui nécessitent une analyse statistique sont présentées ci-dessous. La taille de chaque échantillon (toutes versions confondues $N = n_S + n_A$) associée à ces données ainsi que l'équation à analyser en lien avec la bonne hypothèse sont également données.

- D_1 Moyenne des réponses à chaque question du questionnaire d'évaluation du sentiment de présence sociale (M_1). $H_{a1} = \mu_A > \mu_S$ ($N = 64$) ;
- D_2 Moyenne des réponses à chaque question du questionnaire d'évaluation du sentiment de co-présence (M_2). $H_{a2} = \mu_A > \mu_S$ ($N = 64$) ;
- D_3 Moyenne des réponses à chaque question du questionnaire d'évaluation de la motivation à l'apprentissage (M_3). $H_{a3} = \mu_A > \mu_S$ ($N = 64$) ;
- D_4 Moyenne des échanges verbaux des participants entre eux pendant le test en secondes (M_4). $H_{a5} = \mu_A > \mu_S$ ($N = 32$) ;
- D_5 Moyenne des résultats au test (M_5). $H_{a4} = \mu_A > \mu_S$ ($N = 32$) ;
- D_6 Distribution de la variable catégorielle « effet d'occlusion » (M_6). $H_{a1} = D_A > D_S$ ($N = 32$) ;
- D_7 Distribution de la variable catégorielle « travail d'équipe pour relever la jaquette » (M_7). $H_{a2} = D_A > D_S$ ($N = 32$) ;
- D_8 Distribution de la variable catégorielle « considération des remises en question de l'AV » (M_8). $H_{a1} = D_A > D_S$ ($N = 32$) .

5.2.1 Comparaison de deux moyennes pour des échantillons indépendants

Les données qui seront analysées selon leur moyenne sont les données D_1 à D_5 . Les différents tests d'analyse statistique possibles pour comparer deux moyennes expérimentales sont présentés sous forme d'arbre décisionnel à la figure 5.2.

Le test de Student, ou test t, est le test le plus puissant et le plus efficace parmi ceux considérés (voir l'Annexe K pour plus de détails). Ce test paramétrique demande cependant la validation de plusieurs conditions d'utilisation préalablement :

- C_1 Les échantillons sont aléatoires et de type indépendant ;
- C_2 La taille de chaque échantillon est supérieure à 30 OU chaque population suit une loi normale,
- C_3 Les variances des deux populations sont égales.

Le critère C_1 est déjà validé, tel qu'expliqué à la section 5.2. La condition C_2 qui veut que la taille l'échantillon soit supérieure à 30 diffère d'une source à l'autre. Thietart (2014) et STHDA (2018) recommandent une taille d'au moins 30 alors que XLStats (2017) recommande une taille d'au moins 20. En fait, un échantillon de taille supérieure à 30 signifie que cet échantillon suit presque automatiquement une loi normale (par la force du nombre). Bien que les données D_1 , D_2 et D_3 sont pour chaque échantillon de taille supérieure à 30 ($n_S = n_A = 32$), leurs tailles sont très près de la limite imposée. Afin d'être constant, conservateur et rigoureux dans l'analyse statistique, toutes les données recueillies seront testées afin de s'assurer qu'elles suivent une distribution normale avant de sélectionner une méthode d'analyse. Le critère C_2 sera testé avec la méthode Shapiro-Wilk, décrite plus en détail à l'Annexe I.

Dans le cas où les données ne suivent pas la loi normale, le test non paramétrique équivalent au test de Student pour comparer deux moyennes expérimentales, soit le test de Wilcoxon, sera utilisé pour analyser statistiquement ces données. Le test de Wilcoxon est expliqué plus en détail à l'Annexe L.

La dernière condition C_3 veut que les variances des deux populations soient égales. Un test existe pour valider cette condition, soit le « test de comparaison deux variances » qui suit une distribution de Fisher-Snedecor. Ce test est présenté plus en détail à l'Annexe J. Dans le cas où les variances sont significativement différentes, le test alternatif d'Aspin-Welch sera utilisé.

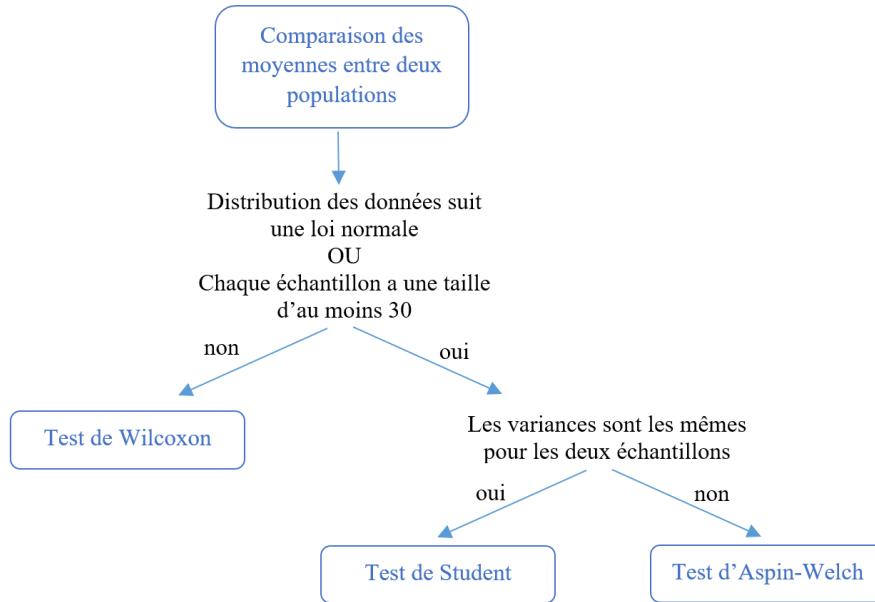


Figure 5.2 – Arbre décisionnel de la méthode d’analyse statistique à choisir pour une comparaison entre deux moyennes expérimentales
(inspiré de STHDA (2018))

5.2.2 Comparaison de deux variables catégorielles

Des variables catégorielles, comme celles obtenues aux mesures D_6 à D_8 , ne peuvent pas être analysées en fonction de leur moyenne comme pour les autres données. En effet, ces données appartiennent à une catégorie en particulier : 0 si le comportement n'est pas observé ou 1 si le comportement est observé. Un test existe pour analyser statistiquement ce genre de données : le test Khi-2, présenté plus en détail à l'Annexe M.

5.3 Analyse des résultats

Les questionnaires d'évaluation du sentiment de présence sociale, du sentiment de co-présence et de la motivation à l'apprentissage sont remplis avec une échelle Likert à 7 points allant de -3 à 3. Pour faciliter l'analyse de ces données, les échelles ont été ramenées à un pointage entre 1 et 7. Une analyse supplémentaire de ces trois questionnaires est l'analyse du « résultat global ». Similairement à la façon dont un examen est évalué, le pointage de toutes les questions d'un questionnaire est additionné pour chaque candidat. Le score maximal est de $7 \text{ points} \times nb_{questions}$.

Les données analysées sont présentées sous forme de tableaux puis, dans le cas échéant, les données sont aussi illustrées sous forme de graphiques. Notez l'utilisation des variables n

pour la taille de l'échantillon, μ pour la moyenne et p pour la probabilité de rejeter à tort l'hypothèse nulle.

5.3.1 Questionnaire d'évaluation du sentiment de présence sociale

Notez que pour ce questionnaire, présenté à l'Annexe C, les questions 3 et 5 sont formulées différemment, ce qui entraîne une analyse unilatérale à gauche (formulation négative) contrairement à toutes les autres questions. De la même façon, l'échelle des questions 3 et 5 a été inversée pour calculer le résultat global.

Tableau 5.1 – Analyse statistique des résultats du test d'évaluation du sentiment de présence sociale. * : $p < 0.05$

	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5
n_S	32	32	32	32	32
n_A	32	32	32	32	32
μ_S	5,813	5,125	4,375	3,656	4,781
μ_A	6,063	4,813	4,094	3,531	3,906
W_S - test Shapiro-Wilk	0,796	0,898	0,908	0,930	0,916
W_A - test Shapiro-Wilk	0,792	0,848	0,911	0,908	0,923
Suit une loi normale ?	non	non	non	non	non
Test utilisé	Wilcoxon	Wilcoxon	Wilcoxon	Wilcoxon	Wilcoxon
T - test Wilcoxon	0,940	0,584	0,604	0,282	1,863
p	0,163	0,724	0,273	0,614	0,027*

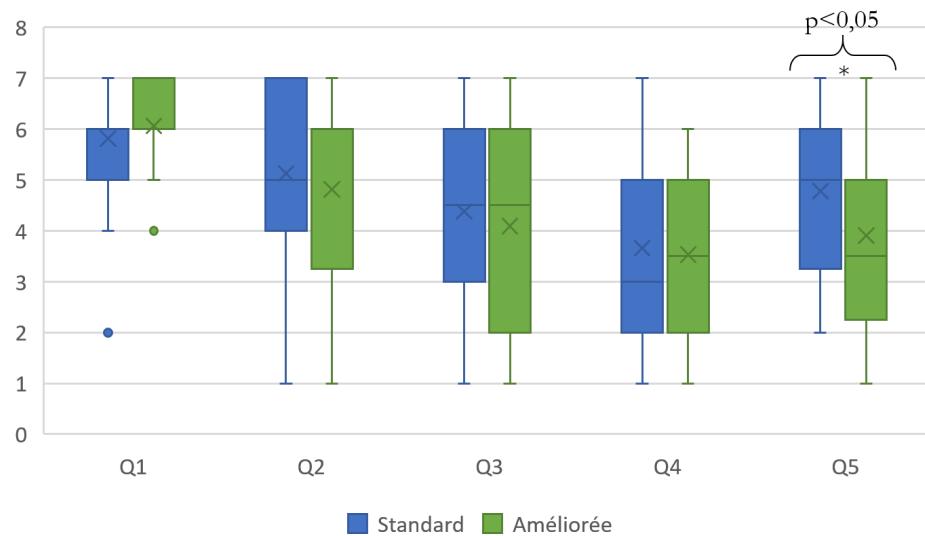


Figure 5.3 – Réponses au questionnaire d'évaluation de la présence sociale

Tableau 5.2 – Analyse statistique du résultat global du test d'évaluation du sentiment de présence sociale

	Résultat global
n_S	32
n_A	32
μ_S	21,44
μ_A	22,41
W_S - test Shapiro-Wilk	0,983
W_A - test Shapiro-Wilk	0,974
Suit une loi normale ?	oui
F - test de comparaison de variances	0,870
Variances égales ?	oui
Test utilisé	Student
T - test Student	0,820
p	0,208

5.3.2 Questionnaire d'évaluation du sentiment de co-présence

Pour ce questionnaire, certaines questions ont enregistré moins de réponses que d'autres. Ceci s'explique par le fait que des participants ont parfois oublié de répondre à une question en particulier ou aux dernières questions du questionnaire, qui était sur deux pages.

Tableau 5.3 – Analyse statistique des résultats du test d'évaluation du sentiment de co-présence. * : $p < 0.05$; ** : $p < 0.01$; *** : $p < 0.001$

	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	...
n_S	32	32	32	31	32	
n_A	32	32	32	32	32	
μ_S	6,219	4,188	6,343	4,677	6,094	
μ_A	6,438	4,906	6,594	5,031	6,313	
W_S - test Shapiro-Wilk	0,759	0,855	0,763	0,893	0,809	
W_A - test Shapiro-Wilk	0,735	0,862	0,672	0,785	0,744	
Suit une loi normale ?	non	non	non	non	non	
Test utilisé	Wilcoxon	Wilcoxon	Wilcoxon	Wilcoxon	Wilcoxon	
T - test Wilcoxon	1,316	1,558	1,282	0,687	1,020	
p	0,082	0,055	0,090	0,239	0,141	

...	Q6	Q7	Q8	Q9	Q10	Q11	Q12
	32	31	31	31	31	31	31
	32	31	31	31	31	31	31
	3,719	5,805	3,677	5,387	4,098	5,613	3,710
	4,156	6,129	5,129	6,258	5,193	6,258	4,903
	0,918	0,830	0,914	0,873	0,891	0,869	0,948
	0,825	0,791	0,872	0,791	0,866	0,680	0,864
	non	non	non	non	non	non	oui
	Wilcoxon	Wilcoxon	Wilcoxon	Wilcoxon	Wilcoxon	Wilcoxon	Wilcoxon
	1,202	0,901	3,301	2,971	2,717	2,224	2,823
	0,112	0,167	0,0003***	0,0006***	0,0025**	0,0062**	0,0019**

L'analyse du résultat global est divisée en deux, vu la nature différente des questions : un premier résultat global est calculé pour les questions 1 à 6 et un deuxième résultat global est calculé pour les questions 7 à 12. En effet, les questions 1 à 6 portent sur le sentiment de co-présence entre le candidat et l'AV alors que les questions 7 à 12 portent sur le sentiment de co-présence entre le candidat et son coéquipier.

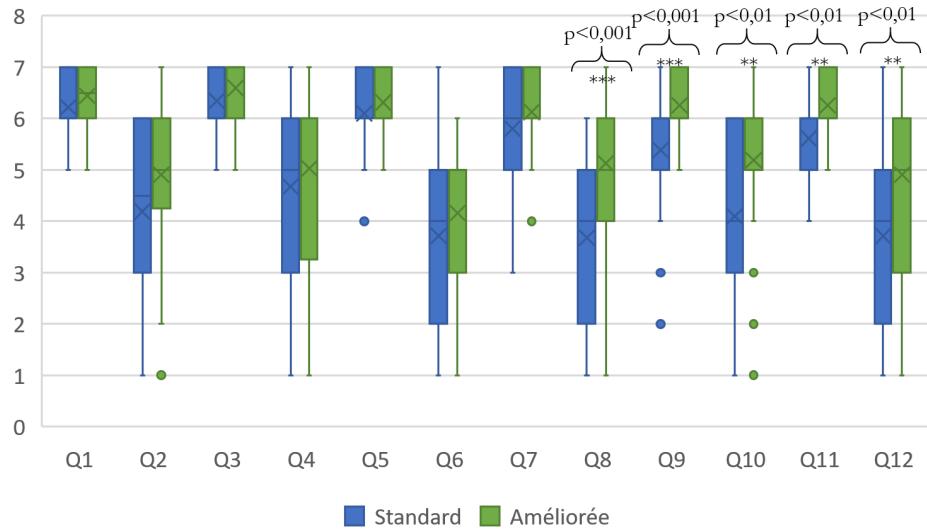


Figure 5.4 – Réponses au questionnaire d'évaluation du sentiment de co-présence

Tableau 5.4 – Analyse statistique du résultat global du test d'évaluation du sentiment de présence sociale. * : $p < 0.05$; ** : $p < 0.01$; *** : $p < 0.001$

	Résultat global Q1-Q6	Résultat global Q7-Q12
n_S	30	31
n_A	32	31
m_S	31,37	28,29
m_A	33,44	33,87
W_S - test Shapiro-Wilk	0,940	0,962
W_A - test Shapiro-Wilk	0,945	0,949
Suit une loi normale ?	oui	oui
F - test de comparaison de variances	1,632	1,034
Variances égales ?	oui	oui
Test utilisé	Student	Student
T - test Student	1,661	4,397
p	0,0509	0,00002***

5.3.3 Questionnaire d'évaluation de la motivation à l'apprentissage

Pour ce questionnaire, certaines questions ont enregistré moins de réponses que d'autres. Ceci s'explique par le fait que des participants ont parfois oublié de répondre à une question en particulier ou aux dernières questions du questionnaire, qui était sur deux pages.

Tableau 5.5 – Analyse statistique des résultats du test d'évaluation de la motivation à l'apprentissage. * : p < 0.05

	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	...
n_S	32	32	32	32	32	
n_A	32	32	32	32	32	
μ_S	4,844	4,875	4,375	6,189	5,594	
μ_A	5,469	5,750	4,688	6,531	5,936	
W_S - test Shapiro-Wilk	0,824	0,861	0,837	0,751	0,841	
W_A - test Shapiro-Wilk	0,808	0,872	0,895	0,698	0795	
Suit une loi normale ?	non	non	non	non	non	
Test utilisé	Wilcoxon	Wilcoxon	Wilcoxon	Wilcoxon	Wilcoxon	
T - test Wilcoxon	1,410	1,994	0,826	1,020	1,551	
p	0,070	0,019*	0,197	0,124	0,054	

...	Q6	Q7	Q8	Q9	Q10
	32	32	32	32	32
	32	31	31	31	31
	4,688	5,468	5,688	5,625	4,844
	4,750	5,742	5,968	5,677	5,161
	0,884	0,791	0,749	0,822	0,897
	0,920	0,773	0,822	0,851	0,832
	non	non	non	non	non
	Wilcoxon	Wilcoxon	Wilcoxon	Wilcoxon	Wilcoxon
	0,027	0,990	0,962	0,048	1,237
	0,513	0,150	0,153	0,481	0,103

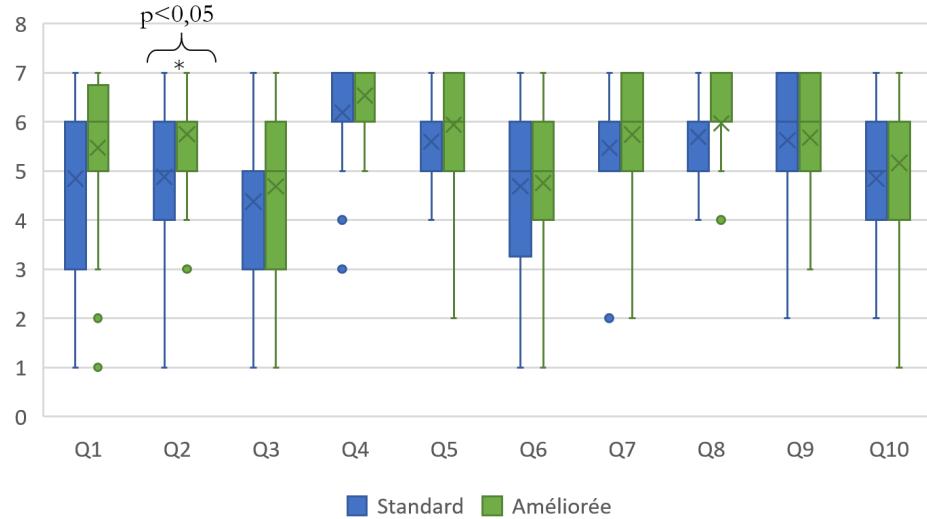


Figure 5.5 – Réponses au questionnaire d'évaluation de la motivation à l'apprentissage

L'analyse du résultat global prend en compte uniquement les six questions en lien avec la motivation à l'apprentissage, soit les questions Q1, Q2, Q5, Q7, Q9 et Q10. Les quatre questions restantes visaient à évaluer l'opinion du participant face à l'AV.

Tableau 5.6 – Analyse statistique du résultat global du test d'évaluation de la motivation à l'apprentissage

	Résultat global
n_S	32
n_A	31
μ_S	31,25
μ_A	33,87
W_S - test Shapiro-Wilk	0,926
W_A - test Shapiro-Wilk	0,899
Suit une loi normale ?	non
Test utilisé	Wilcoxon
T - test Wilcoxon	1,471
p	0,071

5.3.4 Échanges verbaux entre coéquipiers

Tableau 5.7 – Analyse statistique de la durée des échanges verbaux entre les coéquipiers pendant le test donné par l'AV

n_S	16
n_A	16
μ_S (sec)	292,75
μ_A (sec)	274,56
W_S - test Shapiro-Wilk	0,933
W_A - test Shapiro-Wilk	0,859
Suit une loi normale ?	en partie
Test utilisé	Wilcoxon
T - test Wilcoxon	0,810
p	0,791

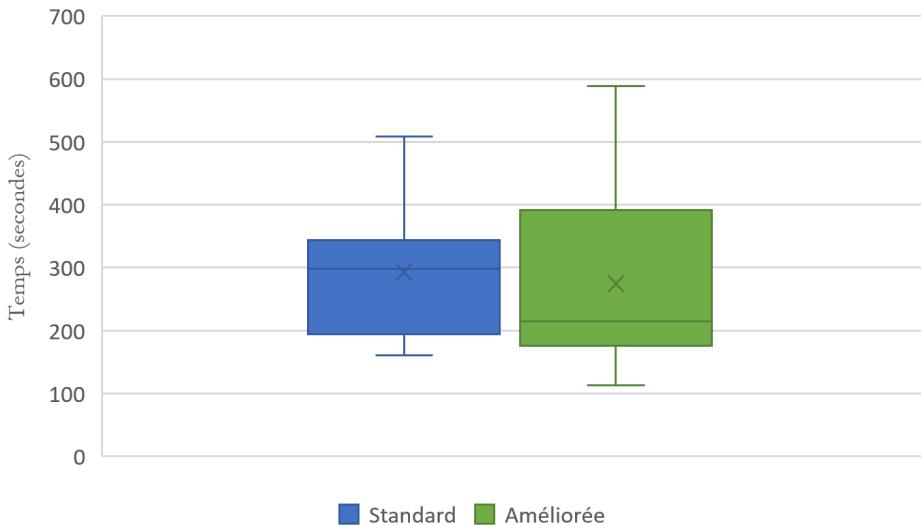


Figure 5.6 – Somme de la durée des échanges verbaux entre coéquipiers entre les questions du test donné par l'AV

Sachant, parmi les binômes qui ont participé à l'étude, lesquels d'entre eux ne se connaissent pas et lesquels sont des amis, une hypothèse plausible est que ceux qui sont amis ont plus discuté et argumenté entre chaque question du test, vu l'absence de gêne. Cependant, plusieurs analyses statistiques ont été effectuées pour tenter de trouver une telle relation, mais sans succès :

- Test de Wilcoxon entre les binômes « amis » et ceux qui ne se connaissaient pas, toutes versions confondues $\Rightarrow p = 0,623$

- Test de Wilcoxon entre les binômes « amis » et ceux qui ne se connaissaient pas pour la version standard $\Rightarrow p = 0,156$
- Test de Wilcoxon entre les binômes « amis » et ceux qui ne se connaissaient pas pour la version améliorée $\Rightarrow p = 0,861$

5.3.5 Résultat au test

Tableau 5.8 – Analyse statistique des résultats au test

n_S	16
n_A	16
μ_S (sec)	10,19
μ_A (sec)	10,50
W_S - test Shapiro-Wilk	0,952
W_A - test Shapiro-Wilk	0,864
Suit une loi normale ?	en partie
Test utilisé	Wilcoxon
T - test Wilcoxon	0,716
p	0,237

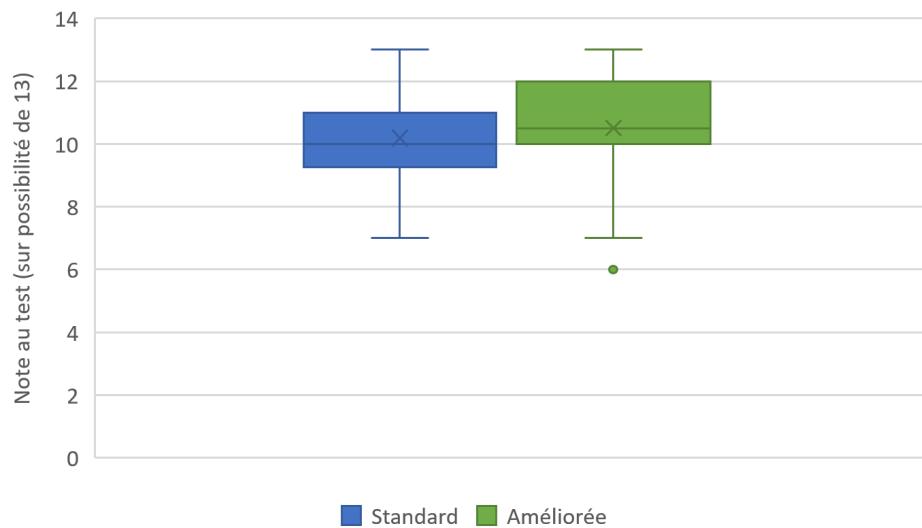


Figure 5.7 – Résultats au test

5.3.6 Effet de l'occlusion

Tableau 5.9 – Analyse statistique de l'effet d'occlusion. * : p< 0.05

		Candidats penchés	Candidats debout	Total
Version standard	Effectif	3	13	16
	Proportion	18,75%	81,25%	100%
Version améliorée	Effectif	9	7	16
	Proportion	56,25%	43,75%	100%
Total	Effectif	12	20	32
	Proportion	37,50%	62,50%	100%
X		4,8		
p		0,0285*		

5.3.7 Travail d'équipe pour relever la jaquette

Tableau 5.10 – Analyse statistique du travail en équipe

		Un candidat s'avance	Deux candidats s'avancent	Total
Version standard	Effectif	3	13	16
	Proportion	18,75%	81,25%	100%
Version améliorée	Effectif	4	12	16
	Proportion	25,00%	75,00%	100%
Total	Effectif	7	25	32
	Proportion	21,90%	78,10%	100%
X		0,183		
p		0,669		

5.3.8 Considération des remises en question de l'AV

Tableau 5.11 – Analyse statistique des remises en question de l'AV

		Remise en question	Pas de remise en question	Total
Version standard	Effectif	9	7	16
	Proportion	56,25%	43,75%	100%
Version améliorée	Effectif	5	11	16
	Proportion	31,25%	68,75%	100%
Total	Effectif	14	18	32
	Proportion	43,75%	56,25%	100%
X		2,032		
p		0,154		

CHAPITRE 6 DISCUSSION

Les mesures prises ont été décrites et associées aux hypothèses correspondantes précédemment à la section 4.4, après quoi les données ont été analysées au chapitre 5. Le présent chapitre confirme ou infirme les hypothèses alternatives posées selon les résultats de l'analyse. Pour chaque hypothèse, les arguments statistiques qui permettent de confirmer ou d'infirmer celle-ci sont présentés, puis des commentaires de la chercheuse sont donnés afin d'expliquer le résultat. Finalement, la dernière section aborde les limitations et les biais de l'étude.

Les deux variables étudiées, soit celles qui varient d'une version de la simulation à l'autre, sont :

- $\theta_{occlusion}$: l'occlusion de l'AV par les objets de l'environnement physique,
- $\theta_{conscience}$: la conscience de tous les participants, de leurs positions, de leurs orientations et de leurs paroles par l'AV.

Il est important de noter que puisque deux variables sont étudiées, soit $\theta_{occlusion}$ et $\theta_{conscience}$, il est difficile de connaître avec précision si une variable plus qu'une autre a davantage influencé une hypothèse.

La variable $\theta_{occlusion}$ influence le sentiment de présence sociale, tel que conclu précédemment par l'étude de Kim et al. (2017). Puisque le sentiment de présence et l'apprentissage sont liés, tel qu'expliqué à la section 2.4.2 et démontré par les études de Lester et al. (2013); Georgiou et Kyza (2018); Chen et Wang (2018), il sera intéressant d'observer si ces mêmes résultats peuvent être produits dans le contexte différent de cette expérience en mode multi-utilisateur.

La variable $\theta_{conscience}$, davantage en lien avec l'aspect multi-utilisateur de cette simulation, peut possiblement avoir une influence sur toutes les hypothèses, tel qu'illustré à la figure 6.1. La conscience par l'AV du coéquipier d'un participant est un lien peu étudié par les auteurs de la communauté scientifique. Les études présentées à la section 2.6.1 de la revue de littérature portent sur les simulations multi-utilisateurs et leur lien avec le sentiment de présence ou l'apprentissage. Autrement dit, elles abordent un des deux liens bleus sur la figure 6.1, mais aucune étude n'analyse l'effet du lien orange, représenté sur la même figure, sur le sentiment de présence sociale, le sentiment de co-présence, la motivation à l'apprentissage, l'apprentissage ou les communications entre les coéquipiers. Il sera intéressant de comprendre, suite à l'analyse des résultats, l'impact de ce lien sur les hypothèses de cette étude.

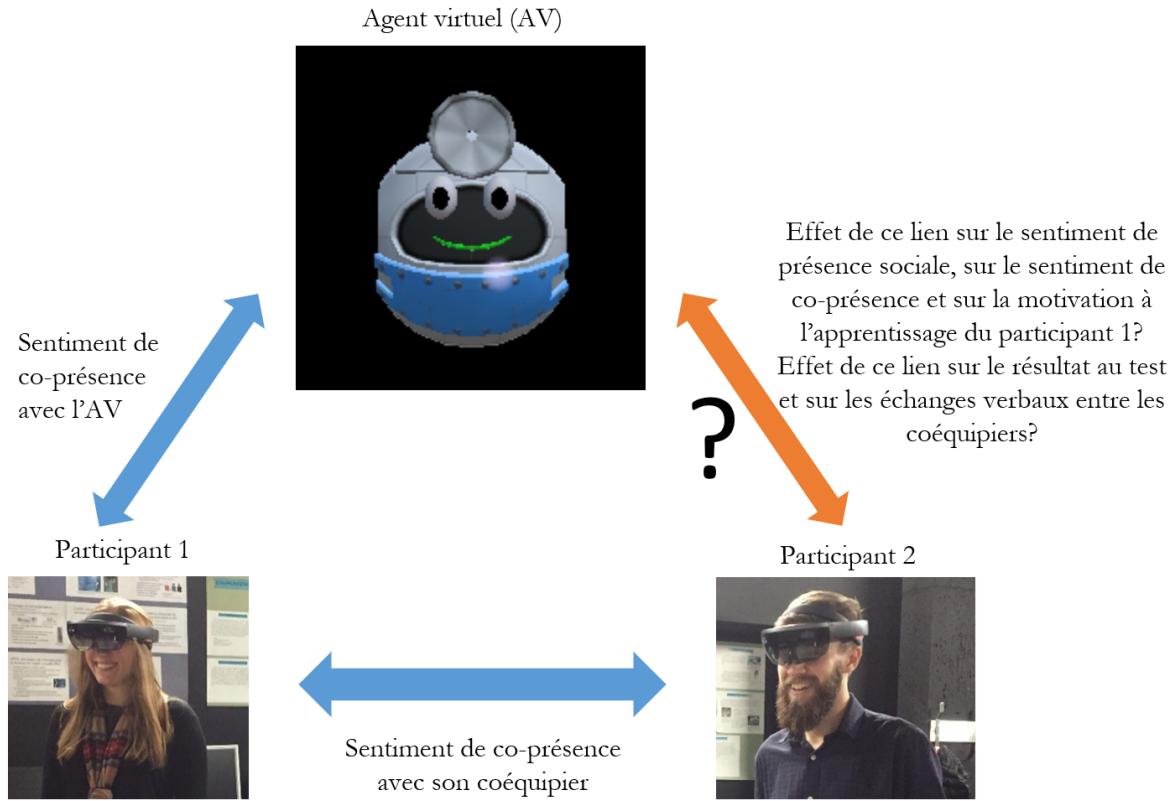


Figure 6.1 – Influence de chaque personne, physique ou virtuelle, sur les différentes hypothèses

Des commentaires ou des paroles des participants émis après l’expérience sont parfois mentionnés dans cette discussion pour appuyer certaines idées ou certains concepts. Il est important de noter que ces commentaires n’ont pas été enregistrés rigoureusement comme les autres mesures, ils proviennent de la vue d’ensemble de la chercheuse acquise pendant la prise de données des 32 équipes.

La simulation construite pour évaluer les différentes hypothèses est le premier résultat qui découle de cette étude, car c’est cet environnement qui a permis de faire vivre une expérience aux 64 participants. Le développement des comportements de l’AV en lien avec son regard et son orientation présentés à la section 3.6.2, qui donnent à l’AV une attitude plus humaine et réaliste, constitue une avancée dans le domaine, tout comme le développement du réseau de communication capable de supporter le mode multi-utilisateur et le développement des algorithmes de partage d’objets 3D. Aucune étude (trouvée à ce jour par la chercheuse) n’a précédemment fait état d’un AV en RA conscient des tous les participants d’une simulation multi-utilisateur. Plusieurs commentaires émis par les participants qui ont vécu la version

améliorée témoignent de la valeur ajoutée de $\theta_{conscience}$, par exemple :

- « L'avatar te regarde, on dirait que c'est toi qui dois répondre à cette question » (parole d'un participant à son coéquipier pendant l'examen) ;
- « On dirait que l'avatar me rappelle à l'ordre en me regardant » (parole d'un participant à son coéquipier pendant le cours).

Certaines équipes qui ont vécu la version standard de l'expérience ont parfois remarqué dès les premiers instants que l'AV n'était pas conscient de leur coéquipier. Il est arrivé à quelques reprises qu'un participant demande directement à son coéquipier de lui décrire comment celui-ci voyait l'AV. Dans la version standard, il est évident que des participants qui réalisent que l'AV n'est pas orienté de la même façon pour les deux coéquipiers influence à la baisse le sentiment de présence. En comparaison, des coéquipiers de la version améliorée qui réalisent qu'ils sont réellement « ensemble », dans une même simulation avec le même AV orienté de la même façon en fonction des tous les utilisateurs, influence à la hausse le sentiment de présence.

6.1 Vérification des hypothèses

H1 : L'amélioration des comportements de l'AV augmente le sentiment de présence sociale ressenti par le participant.

Mesures en lien avec H1 : M_1 , M_6 et M_8 .

Vérification : Invalidité

D'abord, pour ce qui est du questionnaire d'évaluation de présence sociale (M_1), l'analyse des résultats de chaque question démontre que la dernière question, « J'ai l'impression que l'avatar est contrôlé par ordinateur et non autonome », a obtenu un résultat significativement plus bas pour la version améliorée ($p = 0,027*$). Les participants qui ont vécu la version améliorée n'ont donc pas eu l'impression que l'AV était contrôlé par un ordinateur et non autonome, contrairement à ceux qui ont vécu la version standard. Une telle impression a un impact négatif sur le sentiment de présence sociale : il est plus difficile de considérer l'AV comme étant présent socialement dans la simulation avec soi sous l'impression que celui-ci est contrôlé par un ordinateur. L'analyse du résultat global du questionnaire d'évaluation de présence n'est cependant pas significative ($p = 0,208$).

Ensuite, l'analyse des résultats confirme que l'effet d'occlusion (M_6) a eu un impact sur le comportement de gens, car une majorité des participants qui ont vécu la version améliorée se sont penchés pour observer l'AV lorsque celui-ci était occlus par la table ($p = 0,0258*$). Le

lien entre l’occlusion des hologrammes et le sentiment de présence a déjà été prouvé par Kim et al. (2017). Or, puisque l’occlusion a été remarquée par les participants, il est logique de stipuler que la variable étudiée $\theta_{occlusion}$ a eu un impact positif sur le sentiment de présence sociale, toujours selon les conclusions de Kim et al. (2017). La pertinence de l’ajout à une simulation de la variable $\theta_{occlusion}$ pour la version améliorée serait ainsi confirmée.

Enfin, la remise en question par l’AV (M_8) a davantage eu d’effet sur les binômes de la version standard, alors que la majorité des équipes sont revenues sur au moins une de leurs réponses. La différence entre les deux versions n’est toutefois pas significative ($p = 0,154$).

L’analyse des mesures M_1 et M_8 empêchent de conclure que l’amélioration des comportements de l’AV ont augmenté le sentiment de présence sociale de façon significative, ce qui infirme H1.

Cette conclusion implique aussi, selon les résultats, que la variable $\theta_{conscience}$ n’a pas d’impact significatif sur le sentiment de présence sociale.

Commentaires

Les conclusions de l’étude de Kim et al. (2017) n’ont malheureusement pas eu l’effet escompté dans ce contexte d’étude. Sachant que l’occlusion ($\theta_{occlusion}$) a un impact positif sur le sentiment de présence sociale, cette infirmation de $H1$ peut cependant s’expliquer par le fait que des situations où l’occlusion était observable se sont produites à seulement deux reprises, et ce pendant de courtes périodes de temps (une dizaine de secondes). L’occlusion d’hologrammes par des objets physiques tout au long de la simulation, comme c’est le cas dans l’étude de Kim et al. (2017), aurait eu un impact d’une autre envergure sur le sentiment de présence sociale. La courte exposition des participants au phénomène d’occlusion ne permettait peut-être pas d’influencer assez les participants pour avoir un impact notable sur le sentiment de présence sociale.

Sur un autre sujet, une piste de réflexion intéressante porte sur le fait que les équipes de la version standard ont à la fois plus considéré les remises en question de l’AV et ont aussi cru significativement que l’AV était contrôlé par un ordinateur et était non autonome. Un lien est à faire entre ces deux résultats : est-ce que l’apparence robotique de l’AV a eu pour effet de faire considérer davantage aux équipes les remises en question de celui-ci ? Une première réflexion nous aurait portés à croire qu’un agent virtuel plus « humain » gagnerait la confiance des utilisateurs et aurait ainsi la capacité de les faire douter au sujet de leurs réponses aux questions. Or, les résultats ne vont pas dans ce sens. Est-ce alors cette pensée que l’AV est contrôlé par un ordinateur qui fait croire aux participants qu’une remise en question de la part de celui-ci est probablement préprogrammée, car la réponse qu’ils ont donnée est

fausse ? La perception de l'AV a influence sur la confiance accordée aux idées et interventions de celui-ci, mais les causes et effets de cette perception restent inconnues. Les résultats non significatifs de la mesure M_8 nous empêchent de conclure quoi que ce soit à ce niveau, mais il serait intéressant de pousser la question dans une recherche future.

H2 : L'amélioration des comportements de l'AV augmente le sentiment de co-présence ressenti par le participant.

Mesures en lien avec H2 : M_2 et M_7

Vérification : Invalidé

Le questionnaire d'évaluation de la co-présence (M_2) peut se diviser en deux parties. La première moitié évalue le sentiment de co-présence entre le participant et l'AV (Q1 à Q6), puis l'autre moitié évalue le sentiment de co-présence entre le participant et son coéquipier (Q7 à Q12). L'analyse des questions en lien avec le sentiment de co-présence avec l'AV, bien qu'aucune question ne soit significative individuellement, prouve que les participants de la version améliorée ont toujours ressenti un sentiment de co-présence avec l'AV plus fort que ceux de la version standard ($p \leq 0,239$ pour les six questions). L'analyse du résultat global des questions Q1 à Q6 appuie ces observations. En effet, ce résultat global confirme que les participants de la version standard ont eu un sentiment de co-présence avec l'AV plus fort que les participants de la version standard. Ce résultat est très près d'être significatif ($p = 0,0509$), mais sans l'être.

La deuxième portion du questionnaire d'évaluation du sentiment de co-présence, soit celle qui évalue le sentiment de co-présence entre le participant et son coéquipier, présente un résultat global significativement plus élevé pour la version améliorée ($p = 0,00002 **$). Les questions Q9 à Q12 présentent également des résultats significatifs ($p < 0,001 **$). Cette évidence que les participants de la version améliorée ont davantage senti que leur coéquipier était présent avec eux dans la même simulation confirme que la variable $\theta_{conscience}$ a eu un impact pour la version améliorée.

Un travail en équipe des participants pour relever la jaquette (M_7) aurait traduit qu'une distinction entre les participants se serait fait sentir pendant la simulation. Or, les résultats démontrent que les participants ne se sont pas divisé cette tâche plus dans la version standard que dans la version améliorée ($p = 0,669$). Ceci démontre que ni la variable $\theta_{occlusion}$ ou $\theta_{conscience}$ n'a eu l'effet de pousser les participants à se consulter pour convenir ou planifier un travail d'équipe.

Puisque la valeur p du résultat global des questions Q1 à Q6 est légèrement supérieure au seuil de signification α de 5%, nous sommes dans l'impossibilité de conclure que l'amélioration

des comportements de l'AV augmente le sentiment de co-présence.

Commentaires

Un si petit écart entre la valeur p calculée et le seuil de signification porte à croire qu'un plus grand échantillon aurait pu permettre de confirmer $H2$.

Des comportements plus évidents ou plus raffinés de l'AV en lien avec la variable étudiée $\theta_{conscience}$ pourraient également faire une différence au niveau du sentiment de co-présence (il est effet plus intuitif de croire que $\theta_{conscience}$ influence plus le sentiment de co-présence que $\theta_{occlusion}$ vu son lien direct entre les deux participants). Les comportements améliorés de l'AV sont pour le moment simples, mais pourraient, avec du développement supplémentaire, davantage imiter les comportements d'un instructeur humain. Les comportements ci-dessous sont des pistes de comportements à améliorer et à implémenter dans le futur.

- Les yeux et les pupilles de l'AV pourraient changer de direction. En effet, lorsque nous parlons à plusieurs personnes à la fois, nous déplaçons seulement nos yeux ou notre tête et très rarement notre corps en entier, comme le fait présentement l'AV.
- L'ajout de bras et de mains à l'AV pourrait lui permettre de pointer un objet ou un participant en particulier : l'AV en est pour le moment dépourvu.
- Un AV avec un prénom aurait pu ajouter du réalisme au personnage de l'AV et un sentiment de cohésion dans le groupe. Il est plus usuel de converser dans un groupe en utilisant le prénom des gens pour les interroger, au lieu de simplement nommer l'AV « avatar ».
- Un AV plus proactif pourrait interroger un participant dans le cas où celui-ci semble se désintéresser de la simulation ou encore valider avec les participants s'ils ont des questions et s'ils comprennent bien l'information reçue entre chaque étape.
- Dans le cas où un utilisateur parle en même temps que l'AV, celui-ci devrait interrompre ce qu'il disait et attendre que le participant ait terminé de parler.
- L'ajout d'expressions faciales à l'AV ajouterait une touche de réalisme supplémentaire. Pour ce faire, l'AV devrait aussi être en mesure de comprendre ce que disent les participants entre eux afin d'adapter ses expressions.

Bien entendu, plusieurs de ces changements nécessitent à court terme l'ajout d'une intelligence artificielle à l'AV. Heureusement, l'utilisation de l'intelligence artificielle est aujourd'hui beaucoup plus répandue et accessible. L'objectif ultime serait de créer un AV capable de reproduire le sentiment de se trouver en compagnie d'un véritable instructeur, autant au niveau de la parole et de la compréhension qu'au niveau de ses comportements physiques. Pour le

moment, l'ajout des comportements listés ci-dessus est un bon point de départ et ferait l'objet de recherches très intéressantes.

Un peu comme pour l'effet d'occlusion, plus d'occasions demandant aux participants d'effectuer une tâche conjointement auraient été bénéfiques pour la mesure M_7 . En effet, cette mesure prise une seule fois au début de l'expérience était subtile. L'AV aurait pu donner des tâches à effectuer par un ou deux participants à plus d'une reprise, comme de retourner le patient ou de déplacer des chaises ou d'autres objets dans l'environnement.

H3 : L'amélioration des comportements de l'AV augmente la motivation à l'apprentissage ressentie par le participant.

Mesures en lien avec H3 : M_3

Vérification : Invalidité

Le questionnaire d'évaluation de la motivation à l'apprentissage (M_3) comporte dix questions : six d'entre elles, soit les questions Q1, Q2, Q5, Q7, Q9 et Q10, portent sur la motivation à l'apprentissage en lien avec la présence de l'AV, alors que les quatre autres portent sur l'opinion des participants face à l'AV. L'analyse révèle que cinq des six questions portant sur la motivation à l'apprentissage laissent croire que la motivation est plus grande chez les participants de la version améliorée ($p \leq 0,150$), alors que Q2 confirme que ceux-ci ont trouvé que la présence de l'AV a davantage aidé à leur apprentissage ($p = 0,019*$). L'analyse des quatre questions portant sur l'opinion qu'ont les participants de l'AV ne permet cependant de rien conclure.

L'analyse du résultat global obtenu au questionnaire de motivation à l'apprentissage indique que les étudiants qui ont vécu la version améliorée étaient plus motivés à apprendre que ceux qui ont vécu la version standard, mais pas de façon significative ($p = 0,071$). Encore une fois, puisque la valeur p est légèrement supérieure au seuil de signification α de 5%, l'hypothèse H3 doit être infirmée.

Commentaires

Les participants ont souvent informé la chercheuse, après l'expérience, que le cours théorique donné par l'AV était long et qu'ils ont souvent arrêté de porter attention à ce que disait l'AV, et ce à plusieurs moments pendant le cours. En effet, le cours théorique qui durait environ huit minutes demandait principalement aux participants de regarder et d'écouter et ne leur demandait pas d'interagir ou d'effectuer quelconque action. En comparaison, le début de l'expérience et l'examen à la fin demandaient aux participants de participer (relever la jaquette, mouvements de l'AV, appui de boutons virtuels, réponses aux questions et autres).

Plusieurs participants ont reporté avoir « décroché » de la simulation pendant le cours. Bien entendu, la perte d'attention des participants a une incidence sur le sentiment de présence et sur leur motivation, et peut conséquemment affecter les mesures M_1 à M_5 . Il est donc possible que les participants aient été généralement peu motivés à apprendre ou voire même ennuyés par le cours qui n'était pas assez interactif et qui était trop magistral.

À cet égard, l'ajout de questions à répondre de temps à autre pendant le cours ou d'actions à compléter aurait pu rendre le cours plus engageant et interactif. Le grand espace de la pièce aurait aussi pu être exploité pour faire bouger les participants, par exemple en accrochant un tableau plus loin dans l'environnement où l'AV aurait pu inviter l'équipe à aller regarder un schéma.

Une simulation plus interactive porte à croire que la motivation d'apprendre des étudiants aurait pu être plus grande. Aussi, l'augmentation des interactions entre l'AV et les participants mettrait plus en évidence les comportements de l'AV, ce qui pourrait possiblement améliorer l'opinion que les participants ont de lui. De plus grands échantillons auraient également possiblement pu aider à rendre les résultats significatifs.

H4 : L'amélioration des comportements de l'AV impacte positivement l'apprentissage du participant.

Mesures en lien avec H4 : M_5

Vérification : Invalidé

Les résultats au test portant sur les organes de l'abdomen sont légèrement plus élevés pour les équipes de la version améliorée, mais pas significativement ($p = 0,237$), ce qui mène eu rejet de l'hypothèse H4. Bien que les analyses démontrent que les résultats au test et que la motivation à l'apprentissage sont généralement plus élevés chez les étudiants de la version améliorée, ces résultats ne sont pas significatifs et rien ne peut être conclu.

Il est donc impossible de savoir si $\theta_{occlusion}$ ou $\theta_{conscience}$ ont eu un impact sur l'apprentissage.

Commentaires

Les connaissances en matière d'anatomie humaine des participants acquises préalablement à l'expérience peuvent avoir eu une influence sur ces résultats. Il est en effet possible que le résultat au test soit plus corrélé avec les connaissances déjà acquises par le participant avant l'expérience qu'avec les comportements améliorés de l'AV. Une façon de contrer cette variable inconnue serait de faire passer deux tests aux participants : un avant et l'autre après l'expérience, pour vraiment cibler l'analyse des connaissances acquises suite à la simulation. Une autre solution à cette limitation aurait été de créer une simulation de formation sur un

sujet peu connu des participants. Pour rester dans le domaine médical, un cours portant sur, par exemple, l'intubation ou l'anesthésie aurait demandé aux étudiants d'être plus attentifs, car le sujet étudié leur serait inconnu.

Plusieurs autres variables latentes interviennent aussi dans l'analyse de la performance au test, comme la concentration ou le niveau de stress des participants la journée de l'expérience.

H5 : L'amélioration des comportements de l'AV incite les participants à communiquer davantage entre eux pendant la simulation.

Mesures en lien avec H5 : M_4

Vérification : Invalidé

Les analyses révèlent que les participants de la version standard ou de la version améliorée ont discuté entre eux au sujet des questions du test de façon semblable ($p = 0,791$). L'hypothèse H5 est donc infirmée.

L'analyse de ces résultats révèle aussi que le fait que les membres d'un binôme se connaissent ou pas n'influence pas la durée des échanges verbaux entre eux. Bien que d'autres variables latentes entrent en compte dans l'étude des échanges verbaux entre coéquipiers, comme la personnalité et les aptitudes en communication de chaque membre, nous concluons que les comportements améliorés de l'AV n'ont pas incité les équipes de la version améliorée à discuter davantage entre eux pour donner la meilleure réponse possible à un AV qui leur aurait semblé plus réel et présent avec eux dans la simulation.

Commentaires

Un test plus difficile, plus interactif et qui incite davantage les participants à pousser et à développer leur raisonnement pour choisir la bonne réponse aurait aussi potentiellement pu inciter davantage à la discussion entre les membres d'un binôme. Encore une fois, la solution de tester les connaissances des participants sur un sujet qui leur est inconnu aurait pu les inciter à échanger davantage entre eux. La mesure M_4 gagnerait à être réétudiée dans un contexte où les questions et le sujet à l'étude seraient choisis plus soigneusement.

6.2 Limitations de l'étude et biais

Une première limitation à cette recherche porte sur la validité des questionnaires. Les trois questionnaires utilisés ont été acceptés par différents auteurs dans leur langue d'origine : l'anglais. Or, puisque les participants de cette étude parlent français et proviennent d'une université francophone, ils ont subi une traduction libre effectuée par la chercheuse. Les

questionnaires traduits n'ont pas été validés et testés avant l'expérience et la traduction a possiblement pu modifier l'effet mesuré, l'impact ou la validité des questions. Aussi, le questionnaire d'évaluation du sentiment de co-présence a été modifié pour les besoins de cette recherche par rapport à sa version originale, en plus d'avoir été traduit. Les questions Q7 à Q12 sont les mêmes que les questions Q1 à Q6, mais formulées pour évaluer le sentiment de co-présence par rapport au coéquipier au lien d'avec l'AV. De la même façon, ces six « nouvelles » questions n'ont pas été testées et approuvées précédemment dans des publications scientifiques.

Aussi, la population étudiée pour cette expérience est homogène, c'est-à-dire que tous les participants se ressemblent. Dans le cas de la présente étude, la majorité des sujets sont des étudiants en génie. Cette population homogène a permis de mettre en lumière les comportements expliqués plus haut pour des participants aux caractéristiques typiques et de donner à cette recherche une forte validité interne. Ces éléments ont permis la validation/invalidation des hypothèses, mais il serait souhaitable d'étendre les résultats afin de valider les conclusions sur une population non homogène où les différents participants présentent des comportements atypiques. Une seconde étude sur une population hétérogène de plus grande taille donnerait une validité externe à l'étude et confirmerait davantage les conclusions de l'expérimentation.

Finalement, cette étude comporte un biais lié aux résultats au test donné par l'AV, soit la mesure M_5 . Les connaissances des participants sur l'anatomie de l'abdomen et les maladies reliées à ceux-ci avant de faire l'expérience peuvent faire varier les résultats au test, ce qui constitue un biais.

CHAPITRE 7 CONCLUSION

7.1 Synthèse des travaux

Cette étude mesure les impacts du comportement d'un agent virtuel sur le sentiment de présence sociale, le sentiment de co-présence et l'apprentissage lors d'une formation médicale multi-utilisateur utilisant en réalité augmentée. Tous les objectifs de cette étude ont été atteints et deux versions d'une simulation ont été développées (une version améliorée avec les comportements améliorés de l'AV et une version standard) et ont été testées sur 32 équipes de deux personnes. Les résultats ont été analysés pour répondre aux cinq hypothèses de cette étude.

Le développement de cette simulation et des comportements améliorés de l'AV est le premier résultat de cette recherche. La conscience d'un AV des autres utilisateurs d'une même simulation multi-utilisateur en RA et les comportements qui y sont liés, comme la direction du regard de l'AV, ainsi que le développement du réseau de communication et des algorithmes de partage d'objets 3D contribuent au développement de la recherche dans ce domaine.

L'hypothèse H1 portant sur le sentiment de présence sociale a été infirmée, mais a tout de même permis de conclure que les participants de la version améliorée ont moins considéré l'AV comme étant contrôlé par un ordinateur que ceux de la version standard ($p = 0,027*$). L'effet d'occlusion de l'AV a également significativement affecté les participants de la version standard ($p = 0,0258*$), mais sans toutefois avoir un assez grand impact sur le sentiment de présence sociale telles que le laissaient présager les conclusions de l'étude de Kim et al. (2017) dans une précédente étude. Ce résultat pourrait s'expliquer par une exposition trop brève à l'effet d'occlusion pendant la simulation.

Le sentiment de co-présence est celui qui a été le plus affecté par les comportements améliorés de l'AV. La conscience de tous les participants par l'AV a non seulement affectée positivement le sentiment de co-présence entre un participant et son coéquipier de façon significative ($p \leq 0,001***$), mais a aussi influencée le sentiment de co-présence de ce même participant envers l'AV. Ce résultat n'est cependant pas significatif ($p = 0,0509$) et infirme l'hypothèse H2, mais permet tout de même à une tendance de se dessiner.

Les participants de la version améliorée ont davantage senti que l'AV les avait aidés dans leur apprentissage ($p = 0,019*$). Les questions du questionnaire d'évaluation de la motivation à l'apprentissage présentent de meilleurs résultats pour les participants de la version améliorée. Nous croyons donc que la motivation à apprendre était plus grande pour la version améliorée,

mais le résultat global de ce questionnaire ne nous permet pas de l'affirmer de façon significative ($p = 0,071$). Tout comme l'hypothèse H2, l'hypothèse H3 doit être infirmée du à une faible différence avec le seuil de signification α de 5%.

Les hypothèses H4 et H5 sont également infirmées. Les résultats au test visant à évaluer les connaissances acquises sur les organes abdominaux pendant la simulation ne sont pas différents entre les deux versions, de même que pour la durée des dialogues enregistrés entre les coéquipiers d'un binôme.

Cette étude nous a permis de comprendre que les impacts des comportements d'un AV dans une simulation multi-utilisateur en RA sont majoritairement positifs et que les variables étudiées $\theta_{occlusion}$ et $\theta_{conscience}$ gagneraient à être accentuées. Un effet d'occlusion plus présent aiderait au sentiment de présence et le raffinement des comportements améliorés de l'AV pourrait ajouter plus de réalisme à celui-ci. Aussi, il est important de saisir qu'un cours théorique donné en RA par un AV reste aussi magistral qu'un cours traditionnel : ce n'est pas le fait de donner le cours en RA qui rend celui-ci interactif. Il faut y ajouter des tâches à compléter par les participants, des questions à répondre ou des éléments visuels intéressants pour garder les étudiants attentifs. Cette expérience aurait gagné à être plus interactive pour accentuer les variables à l'étude et pour possiblement augmenter les sentiments de présence et l'apprentissage des participants.

Avec la montée en popularité de l'utilisation de la RA dans un contexte académique, les résultats de cette recherche aideront certainement à perfectionner les prochaines simulations et, ultimement, à contribuer aux simulations médicales qui formeront les médecins de demain. Les formations avec des mannequins traditionnels passent rapidement à un autre niveau en termes de réalisme et de potentiel d'apprentissage, et cette étude donne des outils pour perfectionner davantage ces formations multi-utilisateurs au niveau des sentiments de présence sociale et de co-présence et au niveau de l'apprentissage.

7.2 Améliorations futures

Plusieurs améliorations futures en lien avec les comportements améliorés de l'AV, qui sont pour le moment simples, pourraient davantage imiter les comportements d'un instructeur humain et influencer le sentiment de présence. On pense, par exemple, à un AV qui peut s'exprimer de façon ponctuelle et qui peut comprendre les conversations des participants. Une simulation avec plus d'un AV serait également intéressante à analyser et à construire : les échanges et les interactions entre les AV et les participants atteindraient un autre niveau de complexité. Dans cette situation hypothétique, le même réseau de communication que

celui développé pour cette simulation pourrait être utilisé.

Il serait aussi pertinent de refaire une expérience semblable sur des étudiants en médecine avec un cours et un test développé par un médecin, afin de confirmer que les méthodes d'enseignements sont optimales pour des concepts médicaux plus poussés.

Finalement, cette expérience utilise les lunettes *Hololens* de Microsoft, mais d'autres dispositifs de RA sont aussi intéressants et utilisés par l'industrie, comme des tablettes ou des téléphones mobiles. Il serait intéressant de connaître l'évaluation du sentiment de présence et de l'apprentissage en fonction de la technologie utilisée.

RÉFÉRENCES

- Abele, S. (2013). Group problem solving by Patrick R. Laughlin. University of Illinois, Urbana champaign. Princeton and Oxford : Princeton University Press, 2011. isbn 978-0-691-14791-8, 158 pp. *Journal of Behavioral Decision Making*, 26(3) :316–317, doi :10.1002/bdm.1777.
- Bailenson, J. N., Blascovich, J., Beall, A. C., et Loomis, J. M. (2001). Equilibrium theory revisited : Mutual gaze and personal space in virtual environments. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 10(6) :583–598, MIT Press, doi :10.1162/105474601753272844.
- Barange, M., Saunier, J., et Pauchet, A. (2017). Pedagogical agents as team members : Impact of proactive and pedagogical behavior on the user. In *Proceedings of the 16th Conference on Autonomous Agents and MultiAgent Systems*, AAMAS ’17, pages 791–800, Richland, South Carolina. International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems.
- Barfield, W. et Hendrix, C. (1995). The effect of update rate on the sense of presence within virtual environments. *Virtual Reality*, 1(1) :3–15, doi :10.1007/BF02009709.
- Basdogan, C., Ho, C.-H., Srinivasan, M. A., et Slater, M. (2000). An experimental study on the role of touch in shared virtual environments. *ACM Trans. Comput.-Hum. Interact.*, 7(4) :443–460, ACM, doi :10.1145/365058.365082.
- Bichlmeier, C., Wimmer, F., Heining, S. M., et Navab, N. (2007). Contextual anatomic mimesis hybrid in-situ visualization method for improving multi-sensory depth perception in medical augmented reality. In *Proceedings of the 2007 6th IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, ISMAR ’07, pages 1–10, Washington, DC, USA. IEEE Computer Society.
- Biocca, F. (1997). Cyborg’s dilemma : Embodiment in virtual environments. In Marsh, J., Nehaniv, C., et Gorayska, B., editors, *Proceedings of the International Conference on Cognitive Technology*, pages 12–26, Japan. IEEE.
- Biocca, F., Harms, C., et Gregg, J. (2001). The networked minds measure of social presence : Pilot test of the factor structure and concurrent validity. In *Presence 2001, 4th Annual International Workshop*, Philadelphia, Pennsylvania.
- Blascovich, J. (2002). A theoretical model of social influence for increasing the utility of collaborative virtual environments. In *Proceedings of the 4th International Conference on Collaborative Virtual Environments*, CVE ’02, pages 25–30, New York, NY, USA. ACM.

- Buttussi, F. et Chittaro, L. (2017). Effects of different types of virtual reality display on presence and learning in a safety training scenario. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, PP(99) :1–1, doi :10.1109/TVCG.2017.2653117.
- Cafaro, A., Ravenet, B., Ochs, M., Vilhjálmsson, H. H., et Pelachaud, C. (2016). The effects of interpersonal attitude of a group of agents on user's presence and proxemics behavior. *ACM Trans. Interact. Intell. Syst.*, 6(2) :12 :1–12 :33, ACM, doi :10.1145/2914796.
- Chen, Y.-H. et Wang, C.-H. (2018). Learner presence, perception, and learning achievements in augmented–reality–mediated learning environments. *Interactive Learning Environments*, 26(5) :695–708, Routledge, doi :10.1080/10494820.2017.1399148.
- Chertoff, D. B., Goldiez, B., et LaViola, J. J. (2010). Virtual experience test : A virtual environment evaluation questionnaire. In *2010 IEEE Virtual Reality Conference (VR)*, pages 103–110, Waltham, Massachusetts.
- Choi, S. et Clark, R. E. (2006). Cognitive and affective benefits of an animated pedagogical agent for learning english as a second language. *Journal of Educational Computing Research*, 34(4) :441–466, SAGE Publications, doi :10.2190/a064-u776-4208-n145.
- Churchill, G. A. et Iacobucci, D. (2009). *Marketing Reseach : Methodological Foundations*. Cengage Learning, Masson, OH, 10 edition.
- Daher, S., Kim, K., Lee, M., Schubert, R., Bruder, G., Bailenson, J., et Welch, G. (2017). Effects of social priming on social presence with intelligent virtual agents. In *Intelligent Virtual Agents*, pages 87–100. Springer International Publishing.
- Dittami, S. (2009). Shapiro-wilk normality test. <http://sdittami.altervista.org/shapirottest/ShapiroTest.html>. Accédé le : 2018-11-04.
- Ganier, F., Hoareau, C., et Tisseau, J. (2014). Evaluation of procedural learning transfer from a virtual environment to a real situation : a case study on tank maintenance training. *Ergonomics*, 57(6) :828–843, doi :10.1080/00140139.2014.899628. PMID : 24678862.
- Georgiou, Y. et Kyza, E. A. (2018). Relations between student motivation, immersion and learning outcomes in location-based augmented reality settings. *Computers in Human Behavior*, 89 :173 – 181, doi :10.1016/j.chb.2018.08.011.
- Grandi, J. G., Debarba, H. G., Bemdt, I., Nedel, L., et Maciel, A. (2018). Design and assessment of a collaborative 3d interaction technique for handheld augmented reality. In *2018 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, pages 49–56, Reutlingen, Germany.
- Guadagno, R., Blascovich, J., N. Bailenson, J., et McCall, C. (2007). Virtual humans and persuasion : The effects of agency and behavioral realism. *Media Psychology*, 10 :1–22.

- Harms, C. et Biocca, F. (2004). Internal consistency and reliability of the networked minds measure of social presence. In *Seventh Annual International Workshop : Presence*, Universidad Politecnica de Valencia, Valencia.
- Heeter, C. (1992). Being there : The subjective experience of presence. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 1(2) :262–271, doi :10.1162/pres.1992.1.2.262.
- Ijaz, K., Bogdanovych, A., et Trescak, T. (2017). Virtual worlds vs books and videos in history education. *Interactive Learning Environments*, 25(7) :904–929, Routledge, doi :10.1080/10494820.2016.1225099.
- Kalawsky, R. S. (2000). The validity of presence as a reliable human performance metric in immersive environments. In *Presence 2000, 3rd International Workshop on Presence*, pages 27–28, Delft, The Netherlands.
- Kennedy, R. S., Stanney, K. M., et Dunlap, W. P. (2000). Duration and exposure to virtual environments : Sickness curves during and across sessions. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 9(5) :463–472, doi :10.1162/105474600566952.
- Kim, K. (2018). Improving social presence with a virtual human via multimodal physical – virtual interactivity in ar. In *Extended Abstracts of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '18, pages SRC09 :1–SRC09 :6, New York, NY, USA. ACM.
- Kim, K., Maloney, D., Bruder, G., Bailenson, J. N., et Welch, G. F. (2017). The effects of virtual human's spatial and behavioral coherence with physical objects on social presence in ar. *Computer Animation and Virtual Worlds*, 28(3-4), doi :10.1002/cav.1771.
- Kingdom, S. (2018). F test for variance calculator. <http://www.statskingdom.com/220VarF2.html>. Accédé le : 2018-11-04.
- Laughlin, P. R. (2011). *Group Problem Solving*. Princeton University Press.
- Lee, C., Rincon, G. A., Meyer, G., Hollerer, T., et Bowman, D. A. (2013). The effects of visual realism on search tasks in mixed reality simulation. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 19(4) :547–556.
- Leo, G. D., Diggs, L. A., Radici, E., et Mastaglio, T. W. (2014). Measuring sense of presence and user characteristics to predict effective training in an online simulated virtual environment. *Simulation in Healthcare : The Journal of the Society for Simulation in Healthcare*, 9(1) :1–6, Ovid Technologies (Wolters Kluwer Health), doi :10.1097/sih.0b013e3182a99dd9.
- Lester, J. C., Ha, E. Y., Lee, S. Y., Mott, B. W., Rowe, J. P., et Sabourin, J. L. (2013). Serious games get smart : Intelligent game-based learning environments. *AI Magazine*, 34(4) :31–45, AAAI.

- Lin, J. J. W., Duh, H. B. L., Parker, D. E., Abi-Rached, H., et Furness, T. A. (2002). Effects of field of view on presence, enjoyment, memory, and simulator sickness in a virtual environment. In *Proceedings IEEE Virtual Reality 2002*, pages 164–171, Orlando, Florida.
- Liu, C.-L. et Uang, S.-T. (2016). Effects of depth perception cues and display types on presence and cybersickness in the elderly within a 3d virtual store. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 7(6) :763–775, doi :10.1007/s12652-015-0317-4.
- Marx, A., Backes, C., Meese, E., Lenhof, H. P., et Keller, A. (2016). Edison-wmw : Exact dynamic programing solution of the wilcoxon-mann-whitney test. *Genomics, proteomics and bioinformatics*, 14(1) :55–61, PMC.
- Mccall, R., Wetzel, R., Löschner, J., et Braun, A.-K. (2011). Using presence to evaluate an augmented reality location aware game. *Personal Ubiquitous Comput.*, 15(1) :25–35, Springer-Verlag, doi :10.1007/s00779-010-0306-8.
- Microsoft (2017). Shared experiences in mixed reality. <https://docs.microsoft.com/en-us/windows/mixed-reality/shared-experiences-in-mixed-reality>. Accédé le : 2018-10-27.
- Microsoft (2018a). Coordinate systems. <https://docs.microsoft.com/en-us/windows/mixed-reality/coordinate-systems>. Accédé le : 2018-10-22.
- Microsoft (2018b). Sockets. <https://docs.microsoft.com/en-us/windows/uwp/networking/sockets>. Accédé le : 2018-10-28.
- Microsoft (2018c). Spatial anchors. <https://docs.microsoft.com/en-us/windows/mixed-reality/spatial-anchors>. Accédé le : 2018-10-27.
- Microsoft (2018d). Spatial mapping. <https://docs.microsoft.com/en-us/windows/mixed-reality/spatial-mapping>. Accédé le : 2018-10-26.
- Microsoft (2018e). Use the hololens clicker. <https://support.microsoft.com/en-us/help/12646/hololens-use-the-hololens-clicker>. Accédé le : 2018-10-27.
- Milgram, P. et Kishino, F. (1994). A taxonomy of mixed reality visual displays. *IEICE Transactions on Information Systems*, E77-D(12) :1321–1329.
- MixedRealityToolkit (2018). Sharing with unet. <https://github.com/Microsoft.MixedRealityToolkit-Unity/commits/master?before=96cc9ab8998280edcd6871f41e89584030ee4f26+35&path%5B%5D=Assets&path%5B%5D=HoloToolkit-Examples&path%5B%5D=SharingWithUNET>. Accédé le : 2018-10-28.
- Oh, S., So, H. J., et Gaydos, M. (2018). Hybrid augmented reality for participatory learning : The hidden efficacy of multi-user game-based simulation. *IEEE Transactions on Learning Technologies*, 11(1) :115–127, doi :10.1109/TLT.2017.2750673.

- Pacherie, E. (2006). Towards a dynamic theory of intentions. In S. Pockett, W. B. . S. G., editor, *Does Consciousness Cause Behavior? An Investigation of the Nature of Volition*, pages 145–167. MIT Press.
- Park, S. et Catrambone, R. (2008). Social facilitation effects of virtual humans. *Human factors*, 49 :1054–60.
- Prensky, M. (2003). Digital game-based learning. *Comput. Entertain.*, 1(1) :21–21, ACM, doi :10.1145/950566.950596.
- Pütten, A. M. V. D., Klatt, J., Broeke, S. T., McCall, R., Krämer, N. C., Wetzel, R., Blum, L., Oppermann, L., et Klatt, J. (2012). Subjective and behavioral presence measurement and interactivity in the collaborative augmented reality game timewarp. *Interacting with Computers*, 24(4) :317 – 325, doi :<https://doi.org/10.1016/j.intcom.2012.03.004>. Special Issue on Presence and Interaction.
- Rackliffe, D. (2005). An augmented virtuality display for improving uav usability. *MITRE*.
- Riva, G. (2009). Is presence a technology issue ? some insights from cognitive sciences. *Virtual Reality*, 13(3) :159–169, doi :10.1007/s10055-009-0121-6.
- Rosenthal, M., State, A., Lee, J., Hirota, G., Ackerman, J., Keller, K., Pisano, E. D., Jiroutek, M., Muller, K., et Fuchs, H. (2002). Augmented reality guidance for needle biopsies : An initial randomized, controlled trial in phantoms. *Medical Image Analysis*, 6(3) :313 – 320, doi :[https://doi.org/10.1016/S1361-8415\(02\)00088-9](https://doi.org/10.1016/S1361-8415(02)00088-9). Special Issue on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention - MICCAI 2001.
- Rovelo, G., Abad, F., Juan, M.-C., et Camahort, E. (2012). Stereoscopic vision in desktop augmented reality : User performance in the presence of conflicting depth cues. In *GRAPP/IVAPP*, pages 460–465.
- Sacau, A., Laarni, J., et Hartmann, T. (2008). Influence of individual factors on presence. *Computers in Human Behavior*, 24(5) :2255 – 2273, doi :<http://dx.doi.org/10.1016/j.chb.2007.11.001>.
- Samosky, J. T., Nelson, D. A., Wang, B., Bregman, R., Hosmer, A., Mikulis, B., et Weaver, R. (2012). Bodyexplorerar : Enhancing a mannequin medical simulator with sensing and projective augmented reality for exploring dynamic anatomy and physiology. In *Proceedings of the Sixth International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction*, TEI '12, pages 263–270, New York, NY, USA. ACM.
- Sanchez-Vives, M. V. et Slater, M. (2005). Opinion : From presence to consciousness through virtual reality. *Nature Reviews Neuroscience*, 6(4) :332–339, Springer Nature, doi :10.1038/nrn1651.

- Sauer, F., Khamene, A., Basclle, B., Vogt, S., et Rubino, G. (2002). Augmented-reality visualization in imri operating room : system description and preclinical testing. In *Proceedings of SPIE, Medical Imaging*, volume 4681, pages 446–454.
- Sheridan, T. B. (1992). Musings on telepresence and virtual presence. *Presence : Teleoper. Virtual Environ.*, 1(1) :120–126, MIT Press, doi :10.1162/pres.1992.1.1.120.
- Slater, M. (2004). How colorful was your day ? why questionnaires cannot assess presence in virtual environments. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 13(4) :484–493, doi :10.1162/1054746041944849.
- Slater, M., Khanna, P., Mortensen, J., et Yu, I. (2009a). Visual realism enhances realistic response in an immersive virtual environment. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 29(3) :76–84, doi :10.1109/MCG.2009.55.
- Slater, M., Lotto, B., Arnold, M. M., et Sanchez-Vives, M. V. (2009b). How we experience immersive virtual environments : the concept of presence and its measurement. *Anuario de Psicología*, Universitat de Barcelona.
- Slater, M., Usoh, M., et Chrysanthou, Y. (1995). The influence of dynamic shadows on presence in immersive virtual environments. In Göbel, M., editor, *Virtual Environments '95*, pages 8–21, Vienna. Springer Vienna.
- Sluganovic, I., Serbec, M., Derek, A., et Martinovic, I. (2017). Holopair : Securing shared augmented reality using microsoft hololens. In *Proceedings of the 33rd Annual Computer Security Applications Conference*, ACSAC 2017, pages 250–261, New York, NY, USA. ACM.
- Soliman, M. et Guetl, C. (2014). Evaluation study and results of intelligent pedagogical agent-led learning scenarios in a virtual world. In *2014 37th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO)*, pages 914–918, Opatija, Croatia.
- Stangroom, J. (2018a). Chi-square calculator - social science statistics. <https://www.socscistatistics.com/tests/chisquare2/Default2.aspx>. Accédé le : 2018-11-05.
- Stangroom, J. (2018b). T-test calculator for 2 independent means - social science statistics. <https://www.socscistatistics.com/tests/studentttest/Default2.aspx>. Accédé le : 2018-11-06.
- Stanney, K. M. (2002). *Handbook of Virtual Environments : Design, Implementation, and Applications*. CRC Press, Inc., Boca Raton, FL, USA, 1st edition.
- STHDA (2018). Test de student : Est-il toujours correct de comparer des moyennes ? <http://www.sthda.com/french/wiki/test-de-student-est-il-toujours-correct-de-comparer-des-moyennes>. Accédé le : 2018-11-03.

- Thietart, R.-A. (2014). *Méthodes de recherche en management*. Dunod, Dunod, Paris, 4 edition.
- Tobar-Muñoz, H., Baldiris, S., et Fabregat, R. (2017). Augmented reality game-based learning : Enriching students' experience during reading comprehension activities. *Journal of Educational Computing Research*, 55(7) :901–936, doi :10.1177/0735633116689789.
- UdeS (2018). Test de chi-2. <http://spss.espaceweb.usherbrooke.ca/pages/statistiques-inferentielles/test-de-chi-2.php>. Accédé le : 2018-11-03.
- Unity (2018a). Evolving multiplayer games beyond unet. <https://blogs.unity3d.com/2018/08/02/evolving-multiplayer-games-beyond-unet/>. Accédé le : 2018-10-28.
- Unity (2018b). Using the transport layer api. <https://docs.unity3d.com/Manual/UNetUsingTransport.html>. Accédé le : 2018-10-27.
- Vassileva, J. (2008). Toward social learning environments. *IEEE Transactions on Learning Technologies*, 1(4) :199–214, doi :10.1109/TLT.2009.4.
- Vorderer, P., Wirth, W., Gouveia, F. R., Biocca, F., Saari, T., Jäncke, L., Böcking, S., Schramm, H., Gysbers, A., Hartmann, T., Klimmt, C., Laarni, J., Ravaja, N., Sacau, A., Baumgartner, T., et Jäncke., P. (2004). Mec spatial presence questionnaire (mecspq) : Short documentation and instructions for application. *Report to the European Community, Project Presence : MEC (IST-2001-37661)*.
- Vuforia (2017a). How to use the trackable base class. <https://library.vuforia.com/content/vuforia-library/en/articles/Solution/How-To-Use-the-Trackable-Base-Class.html>. Accédé le : 2018-10-21.
- Vuforia (2017b). Optimizing target detection and tracking stability. <https://library.vuforia.com/content/vuforia-library/en/articles/Solution/Optimizing-Target-Detection-and-Tracking-Stability.html>. Accédé le : 2018-10-21.
- Wissmath, B., Weibel, D., et Mast, F. W. (2010). Measuring presence with verbal versus pictorial scales : a comparison between online- and ex post-ratings. *Virtual Reality*, 14(1) :43–53, doi :10.1007/s10055-009-0127-0.
- Witmer, B. G. et Singer, M. J. (1998). Measuring presence in virtual environments : A presence questionnaire. *Presence : Teleoper. Virtual Environ.*, 7(3) :225–240, MIT Press, doi :10.1162/105474698565686.
- XLStats (2016). Quelle est la différence entre un test paramétrique et un test non-paramétrique ? https://help.xlstat.com/customer/fr/portal/articles/2062456-quelle-est-la-diff%C3%A9rence-entre-un-test-param%C3%A9trique-et-un-test-non-param%C3%A9trique-?b_id=9202. Accédé le : 2018-11-02.

XLStats (2017). Guide de choix de test statistique. https://help.xlstat.com/customer/fr/portal/articles/2062457-what-statistical-test-should-i-use-?b_id=9283.
Accédé le : 2018-11-03.

ANNEXE A FORMULAIRE D'INFORMATION ET DE CONSENTEMENT

Titre du projet de recherche : Impact du comportement d'un avatar sur le sentiment de présence et sur l'apprentissage lors d'une simulation multi-utilisateur utilisant la réalité augmentée (projet de recherche financé par un programme Mitacs)

Équipe de recherche :

Maude Carrier 1	Benoît Ozell
Candidate à la maîtrise en génie informatique	Directeur de recherche
École Polytechnique de Montréal	École Polytechnique de Montréal
Adresse courriel : maude.carrier@polymtl.ca	Adresse courriel : benoit.ozell@polymtl.ca

Préambule :

Nous vous invitons à participer à un projet de recherche qui vise à évaluer une simulation médicale éducative en réalité augmentée en équipe de deux (binômes). Par simulation médicale éducative, il est entendu que vous aurez d'abord un cours portant sur l'anatomie humaine en réalité augmentée, puis vous aurez à passer un test sur les connaissances acquises lors de ce cours. Cependant, avant d'accepter de participer à ce projet et de signer ce formulaire d'information et de consentement, veuillez prendre le temps de lire, de comprendre et de considérer attentivement les renseignements qui suivent. Nous vous invitons à poser toutes les questions que vous jugerez utiles au directeur de recherche ou aux autres membres de l'équipe de recherche et à leur demander de vous expliquer tout mot ou renseignement qui ne serait pas clair.

Présentation du projet de recherche et de ses objectifs :

Les objectifs de l'étude que nous réalisons sont les suivants : i) évaluer la qualité d'une simulation médicale éducative en réalité augmentée ; ii) évaluer les différents facteurs qui influencent l'apprentissage et iii) évaluer le comportement de l'avatar présent dans la simulation.

Afin d'atteindre nos objectifs, nous vous demandons de d'abord suivre la simulation médicale éducative en réalité augmentée en équipe de deux, de répondre aux questions qui demandera l'avatar à la fin de l'expérience portant sur l'information transmise pendant la simulation puis de remplir trois questionnaires à choix de réponses avant de quitter.

Nature et durée de votre participation au projet de recherche :

Dans le cadre de ce projet, seuls les étudiants âgés de 18 et plus seront inclus dans l'étude.

Afin de participer à la présente étude, vous devez étudier dans des domaines qui ne sont pas la santé, la biologie ou l'informatique. Vous ne devez également pas avoir développé une grande complicité avec votre partenaire préalablement à cette expérience. Autrement dit, votre partenaire et vous pouvez être des connaissances, mais pas de « bons » amis. L'expérience a une durée d'environ 40 minutes (préparation et réponses aux questionnaires inclus) et se déroulera dans le local C-536 de Polytechnique Montréal si vous êtes étudiants à la Polytechnique Montréal ou dans une salle de conférence chez CAE si vous êtes présentement en stage. Vous serez également enregistré (audio) pendant l'expérience. L'enregistrement est obligatoire pour participer à cette étude.

Vous serez d'abord initié aux lunettes de réalité augmentée Hololens afin de comprendre les commandes vocales et les gestes et afin de bien calibrer les lunettes. Le personnel de laboratoire ajustera ensuite les lunettes pour la véritable expérience, puis la simulation médicale éducative pourra débuter. L'expérience se déroule en équipe de deux. Sachez que vous serez enregistré (audio seulement) pendant l'expérience. À la fin de l'expérience, vous devrez remplir trois questionnaires avant de quitter.

Si, après réflexion, vous acceptez de participer au présent projet, veuillez signer le présent formulaire et le rendre à l'un des membres de l'équipe de recherche. Vous devrez ensuite remplir un formulaire de renseignements (âge, sexe, études, etc.) et l'expérience commencera.

Ci-dessous se trouve un schéma des différentes étapes de l'expérience avec la durée de chaque étape :



Figure A.1 – Étapes de l'expérience et durées associées

Avantages pouvant découler de votre participation au projet de recherche :

Vous ne retirerez aucun bénéfice personnel de votre participation au présent projet de recherche. Toutefois, les connaissances acquises grâce à votre participation permettront de faire avancer la recherche en lien avec les simulations médicales et les comportements d'un avatar. Les conclusions de l'étude, lorsqu'elles seront publiées, pourront être consultées au <http://www.polymtl.ca/rv/Avatar2018/>.

Inconvénients pouvant découler de votre participation au projet de recherche :

Votre participation au projet de recherche nécessitera environ 40 minutes de votre temps afin de compléter toutes les étapes de l'expérience.

Risques pouvant découler de votre participation au projet de recherche :

Le présent projet de recherche comporte de faibles risques d'inconfort chez le participant (inconfort visuel, maux de cœur, nausées, maux de tête, étourdissements, etc.) Sachez que vous pouvez quitter l'expérience à tout moment en retirant simplement les lunettes et en quittant la salle si vous ressentez de tels symptômes. Dans une telle situation, vos données ainsi que celles de votre partenaire seront détruites.

Compensation financière :

Vous ne recevrez aucune compensation financière pour votre participation au projet de recherche.

Indemnisation en cas de préjudice et droits du participant :

Si vous deviez subir quelque préjudice que ce soit par suite de votre participation à ce projet de recherche, vous ne renoncez à aucun de vos droits ni ne libérez les chercheurs, l'organisme subventionnaire ou l'établissement de leurs responsabilités légales et professionnelles.

Participation volontaire et possibilité de retrait :

Votre participation à ce projet de recherche est volontaire. Vous êtes libre de refuser d'y participer et pouvez à tout moment décider de vous retirer du projet sans avoir à motiver votre décision et sans risquer d'en subir de préjudice. Dans une telle situation, vos données ainsi que celles de votre partenaire ne seront pas conservées pour l'étude et seront détruites.

Les chercheurs ou le comité de la recherche de l'École Polytechnique pourront retirer les participants sans leur consentement, s'ils ne respectent pas les consignes du projet de recherche ou s'il existe des raisons administratives d'abandonner le projet, notamment pour des raisons de sécurité et de faisabilité.

Confidentialité :

Suite à votre arrivée, le chercheur responsable du projet recueillera et consignera les réponses au formulaire de renseignement (âge, statut, études, expériences en réalité augmentée et problèmes de vision) auxquelles vous aurez répondu par écrit après avoir signé ce document.

Votre identité ne sera jamais associée à vos résultats. Vous serez identifié par un numéro pour le traitement des résultats. Votre enregistrement se fait de façon numérique ce qui empêche qu'aucun support physique n'ait à être détruite. Tous les résultats de cette expérience, y compris ce document, sont donc numériques et seront gardés de façon sécuritaire sur un disque crypté barré à clé, et ce pendant 10 ans, après quoi ils seront détruits intégralement.

Deux personnes seulement y auront accès, soit Mme Maude Carrier et M. Benoît Ozell.

Seuls les renseignements nécessaires à la bonne conduite du projet de recherche seront recueillis dans le cadre de la présente étude. Ces renseignements comprennent l'enregistrement audio de votre expérience ainsi que les renseignements généraux demandés dans le formulaire de renseignements (âge, statut, études, expériences en réalité augmentée et problèmes de vision). Tous les renseignements recueillis au cours du projet de recherche demeureront strictement confidentiels dans les limites prévues par la loi. Les données collectées par le chercheur principal, ce document et les différents formulaires seront conservées sur un disque protégé par un code et à accès limité dans un tiroir d'un bureau de l'École Polytechnique de Montréal. Le chercheur responsable utilisera les données du projet de recherche pour les simples fins du projet de recherche.

Dans le cas échéant, les données du projet de recherche pourront être publiées dans des revues scientifiques ou partagées avec d'autres personnes lors de discussions scientifiques. Toutefois, aucune publication ou communication scientifique ne renfermera quelque information que ce soit pouvant permettre de vous identifier. À des fins de surveillance et de contrôle, votre dossier de recherche pourra être consulté par une personne mandatée par le Comité d'éthique de la recherche de l'École Polytechnique de Montréal ou encore une personne mandatée par les organismes subventionnaires de recherche. Toutes ces personnes et ces organismes adhèrent à une politique de confidentialité.

Le cas échéant, le chercheur a aussi le droit de consulter votre dossier de recherche pour vérifier l'exactitude des renseignements recueillis aussi longtemps que le chercheur responsable du projet de recherche, ou l'établissement détient ces informations.

Personnes-ressources :

Si vous avez des questions concernant le projet de recherche, vous pouvez communiquer avec Maude Carrier au (514) 706-8808 ou encore par courriel à maude.carrier@polymtl.ca.

Si vous avez des questions concernant votre participation au projet de recherche, vous pouvez communiquer avec la présidente du Comité d'éthique de la recherche de l'École Polytechnique, Mme Delphine Périé-Curnier, au (514) 340-4711, poste 4437 ou encore par courriel à delphine.perie@polymtl.ca

Consentement :

J'ai pris connaissance du présent formulaire d'information et de consentement. Je reconnaiss qu'on m'a expliqué clairement la nature de ma participation au projet de recherche, qu'on a répondu à mes questions et qu'on m'a laissé le temps voulu pour prendre une décision. Je consens à participer à ce projet de recherche aux conditions qui sont énoncées dans le présent

formulaire dont on m'a remis une copie.

Nom et signature du participant de recherche : _____

Date : _____

Je certifie que j'ai expliqué au participant la nature de sa participation au présent projet de recherche, répondu aux questions qu'il avait à cet égard et lui ai clairement indiqué qu'il demeurait libre de mettre un terme à sa participation à tout moment, et ce, sans subir le moindre préjudice. Je m'engage, avec l'équipe de recherche, à respecter les modalités décrites dans le présent formulaire d'information et de consentement et déclare en avoir remis une copie signée au participant.

Nom et signature du chercheur : _____

Date : _____

ANNEXE B FORMULAIRE DE RENSEIGNEMENTS

Section réservée au chercheur

Code : _____

Date et heure : _____

Âge : _____

Sexe : _____

Êtes-vous étudiant ? _____

Parcours d'étude (après le secondaire) : _____

Avez-vous déjà utilisé des applications mobiles utilisant la réalité augmentée ? _____

Si vous avez répondu oui à la question précédente, à combien de reprises et quelle(s) application(s) ? _____

Avez-vous déjà utilisé des lunettes de réalité augmentée comme le Hololens ou l'équivalent ? _____

Si vous avez répondu oui à la question précédente, à combien de reprises ? _____

Avez-vous des problèmes de vision 3D, un désalignement des yeux ou un oeil croisé ou errant ? _____

Connaissez-vous le partenaire avec qui vous vivrez l'expérience aujourd'hui ? _____

Si oui, à quel niveau ? Encerclez.

Je ne le connais pas

Connaissance

Connaissance et ami

Ami de longue date

ANNEXE C QUESTIONNAIRE DE PRÉSENCE SOCIALE

Questionnaire de Bailenson et al. (2001) traduit de l'anglais (traduction libre). Chaque question est répondue à l'aide d'une échelle de Likert allant de -3 à 3 (-3- fortement en désaccord, -2 - en désaccord, -1 un peu en désaccord, 0 - neutre, 1 - un peu en accord, 2 - en accord, 3 - fortement en accord).

1. J'ai le sentiment que l'avatar est dans la pièce avec moi.
2. Je sens que l'avatar m'observe et est conscient de ma présence.
3. La pensée que l'avatar n'est qu'un personnage virtuel m'a souvent traversé l'esprit.
4. L'avatar me semble sensible, conscient et vivant.
5. J'ai l'impression que l'avatar est contrôlé par ordinateur et non autonome.

ANNEXE D QUESTIONNAIRE DE CO-PRÉSENCE

Section du questionnaire de Harms et Biocca (2004) traduit de l'anglais (traduction libre). Chaque question est répondue à l'aide d'une échelle de Likert allant de -3 à 3 (-3- fortement en désaccord, -2 - en désaccord, -1 un peu en désaccord, 0 - neutre, 1 - un peu en accord, 2 - en accord, 3 - fortement en accord).

1. J'ai conscience de l'avatar
2. L'avatar a conscience de moi.
3. La présence de l'avatar m'était évidente.
4. Ma présence était évidente pour l'avatar.
5. L'avatar a capté mon attention.
6. J'ai capté l'attention de l'avatar.
7. Mon/ma partenaire a conscience de l'avatar
8. L'avatar a conscience de mon/ma partenaire.
9. La présence de l'avatar était évidente pour mon/ma partenaire.
10. La présence de mon/ma partenaire était évidente pour l'avatar.
11. L'avatar a capté l'attention de mon/ma partenaire.
12. Mon/ma partenaire a capté l'attention de l'avatar.

ANNEXE E QUESTIONNAIRE DE MOTIVATION À L'APPRENTISSAGE

Questionnaire inspiré de Barange et al. (2017) et de Soliman et Guetl (2014) traduit de l'anglais (traduction libre). Chaque question est répondue à l'aide d'une échelle de Likert allant de 1 à 5 (1 - fortement en accord, 2 - en accord, 3 - neutre, 4 - en désaccord, 5 - fortement en désaccord).

1. J'étais plus attentif à la simulation grâce à l'avatar.
2. L'avatar m'a aidé dans mon apprentissage.
3. J'ai senti que l'avatar avait une intelligence.
4. Je trouve que l'avatar était facile à trouver dans l'environnement.
5. Lors du test de la fin, l'avatar aidait à garder mon attention sur les questions.
6. J'ai senti que l'avatar m'encourageait à interagir avec lui.
7. Je crois que l'avatar contribue positivement à l'apprentissage en général.
8. J'ai senti que l'avatar a contribué positivement à cette simulation.
9. Je crois que l'avatar aide à garder la motivation.
10. Je crois que l'avatar est un élément essentiel à l'apprentissage dans cette situation.

ANNEXE F RECRUTEMENT

Le recrutement des participants se fait par envoi de courriel. Un courriel type serait le suivant :

Bonjour,

Aimerais-tu essayer les nouvelles lunettes de réalité augmentée Hololens ? C'est ta chance ! Viens participer à une étude scientifique portant sur la réalité augmentée en mode multi-utilisateur dans le domaine médical, dans le cadre de ma maîtrise recherche. Ta participation serait grandement appréciée et ne prendrait que 40 minutes de ton temps. Plusieurs plages horaires sont ouvertes.

Critères d'éligibilité :

1. Être âgé de 18 ans ou plus.
2. Être étudiant dans un domaine AUTRE que la santé, la biologie ou l'informatique.
3. Maîtriser la langue française comprise et parlée - niveau avancé.

L'expérience se fait en équipe de deux, vous serez donc jumelé avec un partenaire. Ce partenaire ne peut pas être votre ami ; il doit s'agir d'une personne avec qui vous n'avez pas de complicité préalablement à l'expérience.

ANNEXE G SCÉNARIO COMPLET

Le texte ci-dessous est une transcription des paroles de l'AV, sauf pour ce qui est en italique qui explique des animations ou des actions de l'AV.

***** PRÉSENTATION *****

Version standard :	Version améliorée :
Bonjour à vous !	Bonjour à vous deux ! [Regarde à tour de rôle les participants.]

Bienvenue dans cette simulation médicale portant sur les organes abdominaux. Je serai votre instructeur pour cette simulation.

Pendant la simulation, sentez-vous libre de regarder tout autour de vous.

[AV se promène autour des participants, du mannequin et sous la table afin de créer un effet d'occlusion.]

Tout d'abord, je vous enseignerai ce qu'il y a à savoir sur les organes abdominaux et les différentes particularités et maladies reliées à ceux-ci. Ensuite, je vous poserai des questions afin de valider votre compréhension.

Version standard :	Version améliorée :
Maintenant, veuillez jeter un œil à notre mannequin pour observer les organes à l'étude.	Veuillez s'il vous plaît relever la jaquette du patient afin que je puisse vous montrer les organes à l'étude.
<i>[Organes apparaissent sur la jaquette et non sur le torse du mannequin.]</i>	<i>[L'AV fait cette demande à un utilisateur en particulier en le regardant. Attente que la jaquette soit relevée.]</i>
Veuillez s'il vous plaît relever la jaquette pour mieux voir.	Merci, nous allons maintenant débuter.

Les organes à l'étude sont les poumons ...

le pancréas ...

le foie ...

et les reins.

[Chaque organe est mis en évidence.]

Êtes-vous prêt à commencer ?

Version standard :	Version améliorée :
	<i>[AV regarde chaque participant]</i>

***** COURS *****

Poumons

Débutons par les poumons.

Les poumons sont les organes responsables de la respiration. Ces deux organes de formes pyramidales entourent le cœur et s'étendent du diaphragme aux clavicules.

[Mise en évidence du poumon.]

Ils sont protégés par les os de la cage thoracique et sont essentiellement formés d'alvéoles et de vaisseaux sanguins.

Leur fonction est de faire des échanges gazeux entre l'air des alvéoles et le sang des capillaires pulmonaires.

À l'inspiration, l'oxygène entre dans le sang.

[Montrer le nez avec des flèches vertes, augmentation du volume.]

À l'expiration, le dioxyde carbone est rejeté.

[Montrer le nez avec des flèches rouges, diminution du volume.]

Ces échanges se font dans les alvéoles, de petites poches à l'intérieur des poumons.

Les poumons peuvent parfois devenir inflammés, comme c'est le cas pour les patients atteints d'asthme.

L'asthme est une inflammation chronique qui cause une hypersensibilité et qui obstrue les voies respiratoires. L'asthme se manifeste par spasmes.

Cinq facteurs peuvent principalement causer l'asthme, soit la présence d'allergènes comme le pollen ou la poussière ...

le sentiment d'un stress émotionnel chez le patient ...

la pratique d'exercices physiques intenses ...

la respiration d'air froid ...

ou la respiration de fumée.

[Apparition de petits pictogrammes pour aider à la mémorisation.]

Les traitements de l'asthme sont la prise de bronchodilatateurs, plus communément appelés pompes, et la prise d'anti-inflammatoire. Une autre complication médicale reliée aux poumons est la bronchite chronique.

La bronchite chronique fait partie des maladies pulmonaires obstructives chroniques, plus souvent connues sous l'acronyme M.P.O.C.

Un patient atteint de bronchite chronique verra la résistance de l'air qui entre dans les voies ariennes augmentée due à des lésions bronchiques. Ces lésions sont dues à une irritation répétée des voies respiratoires causée par le tabagisme ou les polluants environnementaux. Cette affection est malheureusement irréversible.

On reconnaît un patient atteint d'une bronchite chronique par sa production excessive de mucus et par sa toux avec expectorations qui sont présentes plus de 3 mois par année pour au moins 2 ans de suite.

Pancréas

Nous allons maintenant passer au prochain organe, le pancréas !

Version standard :

Version améliorée :

[AV regarde chaque participant]

Le pancréas possède deux fonctions majeures pour la digestion.

[Mise en évidence du pancréas]

Premièrement, il est le régulateur de sucs. Par suc il est question de sucs gastriques, composés d'eau, d'enzymes et d'électrolytes, qui sont libérés dans l'intestin pour aider à la digestion des aliments.

Sa deuxième fonction est de produire des îlots pancréatiques.

Les îlots pancréatiques sont principalement composés de deux types de cellules, soit alpha et bêta.

L'alpha mesure une hormone nommée le glucagon et la libère également.

[Animation de cellules alpha]

Cette fonction permet d'augmenter la glycémie, soit le taux de sucre, lorsque le corps en a besoin.

Les cellules bêta mesurent le niveau d'insuline et la libèrent dans le sang. L'insuline permet au sucre ingéré d'être métabolisé et dispersé dans le corps.

[Animation de cellules bêta]

Une complication liée à l'excration d'insuline est le diabète.

Il existe deux types principaux de diabète, soit le diabète de type 1 et de type 2.

Le diabète de type 1 survient lorsque les cellules bêta du pancréas ont été détruites par des anticorps. Le pancréas n'est donc plus en mesure de produire des quantités suffisantes d'insuline pour normaliser la glycémie.

Les signes et symptômes du diabète de type 1 sont la perte de poids, la polydipsie, la polyurie et la polyphagie.

[Animation des 4P]

La perte de poids est due à l'organisme qui est incapable de se procurer le glucose par l'alimentation.

La polydipsie, soit le phénomène de la soif exagérée, et la polyurie, soit le phénomène des mictions très fréquentes, sont dues à une tentative d'élimination du glucose non métabolisé par les reins.

Enfin, la polyphagie, soit le phénomène de la faim exagérée, s'explique par les besoins en sucre du corps.

[Fluorescence du P en question]

Le diabète de type 2 est dû à des habitudes de vies telles que l'obésité, la sédentarité et le cholestérol ou à l'hérédité.

Le corps développe alors une résistance à l'insuline due à une diminution de la réponse des récepteurs d'insuline, soit les cellules bêta.

Cette résistance à l'insuline est causée par l'accumulation de gras sur les cellules bêta. Elle peut aussi être causée par une diminution de la capacité du pancréas à produire l'insuline, car la glycémie est toujours trop élevée pour ce que le corps peut produire.

Foie

Nous allons maintenant passer au prochain organe, le foie !

Version standard :

Version améliorée :

[AV regarde chaque participant]

Le foie est un organe situé dans l'abdomen sous le diaphragme, du côté droit.

[Mise en évidence du foie]

Ses fonctions principales sont de métaboliser les protéines et les lipides, de produire le glucagon quand le pancréas ne le fournit pas et de nettoyer le sang.

Comme les autres organes étudiés précédemment, le foie peut également s'inflammer et se détériorer.

L'hépatite est une inflammation du foie, causée par une bactérie. Différents types d'hépatites existent, allant de l'hépatite A à l'hépatite G, souvent propagées par le sang et affectant l'ADN ou l'ARN des cellules du foie.

Le foie joue aussi un rôle important pour désintoxiquer certaines substances nocives telles que l'alcool.

Cependant, l'abus d'alcool peut créer des dommages au foie, tel que la cirrhose.

La cirrhose est une maladie chronique qui cause une dégénérescence et une destruction des cellules responsables de la sécrétion. La cirrhose est une cause importante de décès au Canada chaque année.

La véritable cause de la cirrhose est la malnutrition et l'alcool consommé en excès.

Les signes et symptômes de la cirrhose sont l'anorexie, des brûlements d'estomac, des nausées et des vomissements, de la diarrhée ou de la constipation, des douleurs abdominales, de la fièvre, de la fatigue et dans les cas tardifs, la cirrhose peut même teinter la peau du patient en jaune et causer de l'enflure généralisée.

La cirrhose est irréversible, mais peut être ralentie en traitant les symptômes et en promouvant l'abstinence d'alcool, d'aspirine et de Tylenol.

Reins

Nous allons maintenant passer aux derniers organes, les reins !

Version standard :	Version améliorée :
	<i>[AV regarde chaque participant]</i>

Les reins sont des organes qui participent à l'élimination des déchets.

[Mise en évidence des reins]

Ils excrètent eau, déchets azotés, toxines, médicaments et autres sels.

Leurs principales fonctions sont la filtration, l'ajustement du volume du sang, la régulation de la pression artérielle et la contribution au métabolisme.

Abordons maintenant le processus de la formation de l'urine en trois étapes.

[Animation des trois étapes écrites près de l'AV]

D'abord, la filtration. De l'eau et certains solutés entrent dans la membrane du rein pour se faire filtrer. Le rein décide ensuite si le corps en a besoin ou pas. Sinon, on le met dans l'urine.

Ensuite la réabsorption. Une fois un liquide dans le rein, il est possible que le corps réalise qu'il en a finalement besoin. Il est alors en mesure de réinjecter la substance en question dans le sang.

Par exemple, si le corps nécessite du sel, les reins peuvent permettre la réabsorption du sel présent dans les reins vers le sang. Enfin, la sécrétion. Dans le cas où il y a une surdose d'un soluté, les reins s'occupent d'éliminer ce surplus en assurant un passage du sang à l'urine.

[Fluorescence de l'étape en question]

Les pierres aux reins sont une complication médicale qui se caractérise par la formation d'un ou de plusieurs cailloux au niveau du rein.

Ce caillou est formé de sels minéraux, tels que le struvite, le phosphate, le sodium, le calcium et l'oxalate.

Cela peut être causé par la déshydratation,
un régime alimentaire,
une infection urinaire chronique,
une stase urinaire causée par un obstacle physique, par exemple une tumeur,
et/ou un mode de vie sédentaire.

Certaines substances peuvent également influencer le travail des reins, comme l'alcool et le café.

[Animation avec des objets représentant l'alcool et le café]

L'alcool arrête la sécrétion d'ADH, une hormone anti diurétique qui provoque normalement la réabsorption de l'eau en trop. L'ADH est inhibée par l'alcool, donc le patient constate une diminution de la réabsorption d'eau, une augmentation des urines et une déshydratation.

La caféine, quant à elle, inhibe la réabsorption du sodium, ce qui provoque une rétention de sodium dans les reins et une diminution de la réabsorption d'eau. En d'autres termes, plus d'urines et plus de déshydratation !

Voilà ce qui conclut ce cours sur les organes de l'abdomen. Êtes-vous maintenant prêt pour valider vos connaissances ?

[Silence ...]

Je rigole, que vous soyez prêts ou pas la validation commence !

[AV fait un tour en dessous de la table pour « rigoler »]

***** EXAMEN *****

Cet examen oral comporte 13 questions à choix de réponses.

Pour réentendre une question, veuillez dire « avatar repeat ».

Pour sélectionner une réponse, pointer le clicker sur la case désirée et appuyer sur le bouton.

Commençons !

1. De où à où les poumons s'étendent-ils ? -> *Choix de réponse : du nez au foie, des clavicules au diaphragme, des clavicules à la 5e côte, de l'apex du cœur au diaphragme.* Réponse : *Des clavicules au diaphragme.*
2. Quelle est la cause principale des maladies MPOC ? -> *Choix de réponse : tabagisme, vieillissement, accumulation de mucus, allergènes.* Réponse : *Tabagisme.*
3. Vrai ou faux : l'hépatite est l'inflammation de la vésicule biliaire ? -> *Réponse : Faux.*
4. Vrai ou faux : est-il possible de faire de la réabsorption d'eau dans la vessie ? -> *Réponse : Faux.*
5. Un patient arrive à l'urgence avec les lèvres bleues et une respiration rapide et superficielle. Il dit avoir des crachats jaunâtres et de la toux depuis quelque temps. Quel diagnostic posez-vous ? -> *Choix de réponse : bronchite chronique, cirrhose, asthme, hépatite B.* Réponse : *Bronchite chronique.*

Êtes-vous certain de cette réponse ?

[Bouton pour demander si la réponse est validée.]

6. En cas de pierre aux reins de n'importe quel type, quel minéral est-il important de réduire de son régime alimentaire ? -> *Choix : sel, calcium, vitamine D et magnésium.* Réponse : *Sel.*
7. Quel organe ne participe pas à l'excration des déchets ? -> *Choix : poumons, reins, pancréas, peau.* Réponse : *Pancréas.*
8. Quelle fonction n'est pas liée au foie ? -> *Choix : métaboliser les glucides, métaboliser les lipides, produire le glucagon, produire l'insuline.* Réponse : *Produire l'insuline.*

Il ne reste plus que 5 questions, tenez bon !

9. Si le corps est en hyperglycémie, c'est-à-dire en excès de sucre, quelle hormone doit être sécrétée par le pancréas ? -> *Choix de réponse : insuline, ADH, glucagon, sodium.* Réponse : *insuline.*

10. Si un patient fait une lithiasis urinaire, soit des pierres au rein formées de sodium, est-il recommandé pour le patient d'augmenter sa consommation de café ou de la diminuer ? -> *Réponse : Diminuer.*

Voulez-vous vraiment valider cette réponse ? Les reins sont des organes essentiels, il est bien important de comprendre leur fonctionnement.

[Bouton pour demander si la réponse est validée.]

11. Lequel des symptômes suivants n'est pas associé au diabète de type 1 ? -> *Choix : faim excessive, prise de poids, soif extrême, urines fréquentes.* Réponse : *Prise de poids.*

12. Vrai ou faux : les maladies du foie peuvent faire changer la couleur de la peau ? -> *Réponse : Vrai*

Et maintenant la dernière question.

13. Quelle fonction ont en commun le rein et le foie ? -> *Choix : formation de glucides, formation d'insuline, élimination des déchets et régulation du pH.* Réponse : *Élimination des déchets.*

Cette simulation arrive maintenant à sa fin, merci beaucoup !

***** **FIN** *****

ANNEXE H FICHIER DE CODE - AnchorNetworkTransform

```

using System . Collections ;
using System . Collections . Generic ;
using UnityEngine ;
using UnityEngine . Networking ;
using System ;

public class AnchorNetworkTransform : NetworkBehaviour {

    private Transform _sharedAnchor;

    [ NonSerialized ]
    [ SyncVar ]
    public Vector3 hologramRelativePosition;
    [ NonSerialized ]
    [ SyncVar ]
    public Vector3 hologramRelativeForward;
    [ SyncVar ]
    [ NonSerialized ]
    public Vector3 hologramRelativeUp;

    void Start () {
        _sharedAnchor = CommonAnchor . Instance . SharedAnchorTransform ;
    }

    void Update () {
        if ( isServer )
        {
            // Calcul de la position d'un hologramme dans l'environnement du serveur
            par rapport a une ancre spatiale
            hologramRelativePosition = _sharedAnchor . InverseTransformPoint ( transform .
                position );
            hologramRelativeForward = _sharedAnchor . InverseTransformDirection (
                transform . forward );
            hologramRelativeUp = _sharedAnchor . InverseTransformDirection ( transform . up
            );
        }
        else //Les clients
        {
            // Pour positionner dans le monde du client
            transform . position = CommonAnchor . Instance . SharedAnchorTransform .
                TransformPoint ( hologramRelativePosition );
            transform . rotation = Quaternion . LookRotation ( _sharedAnchor .
                TransformDirection ( hologramRelativeForward ), _sharedAnchor .
                TransformDirection ( hologramRelativeUp ) );
        }
    }
}

```

ANNEXE I TEST DE SHAPIRO-WILK

Le test Shapiro-Wilk vise à valider qu'un échantillon suit une loi normale. L'hypothèse nulle H_0 de ce test veut que la distribution suive une loi normale, donc si le test est significatif, l'échantillon ne suit pas une loi normale. La statistique W calculée est :

$$W = \frac{\left[\sum_{i=1}^{[n/2]} a_i (x_{n-i+1} - \bar{x}) \right]^2}{\sum_i (x_i - \bar{x})^2} \quad (\text{I.1})$$

où :

x_i : données de l'échantillon

$[n/2]$: partie entière de $[n/2]$

a_i : constantes générées en fonction d'un échantillon qui suit la loi normale

Si la statistique W calculée est plus petite qu'un seuil critique $W_{critique}$ (trouvé dans les Tables de Shapiro-Wilk), il y a rejet de la normalité.

La calculateur en ligne de Dittami (2009) est utilisé dans le cadre des analyses de cette étude.

ANNEXE J TEST DE COMPARAISON DE DEUX VARIANCES

Le test de comparaison de deux variances détermine si les variances de deux populations différentes sont significativement différentes. L'hypothèse nulle H_0 de ce test veut que les variances soient semblables, donc si le test est non significatif, les variances sont considérées comme égales. La statistique F calculée est :

$$F = \frac{s_S^2}{s_A^2} \quad \text{si } s_A^2 \geq 0 \quad (\text{J.1})$$

où :

s_S^2 et s_A^2 : variances de chaque échantillon

Si la statistique F calculée est plus petite qu'un seuil critique $F_{critique}$ (trouvé dans les Tables de la loi de Fisher-Snedecor en fonction de α et du des tailles de chaque échantillon), il y a rejet de l'égalité des variances.

La calculateur en ligne de Kingdom (2018) est utilisé dans le cadre des analyses de cette étude.

ANNEXE K TEST DE STUDENT

Avec deux échantillons qui suivent la loi normale, la statistique T permet de comparer deux moyennes expérimentales à une valeur donnée D_0 quand les variances sont inconnues mais égales. Dans le cas présent, D_0 est nul. La statistique T est :

$$T = \frac{\mu_S - \mu_A}{s_d} \quad \text{si } s_d \geq 0 \quad (\text{K.1})$$

où :

μ_S et μ_A : moyennes des données des échantillons des versions standard et améliorée

s_d : variance de la population

$$s_d = \sqrt{\frac{(n_S - 1)s_S^2 + (n_A - 1)s_A^2}{n_S + n_A - 2}} * \sqrt{\frac{1}{n_S} + \frac{1}{n_A}} \quad (\text{K.2})$$

où :

$$s_S^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n_S} (x_{Si} - m_S)^2}{n_S - 1} \quad s_A^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n_A} (x_{Ai} - m_A)^2}{n_A - 1} \quad (\text{K.3})$$

où :

x_S et x_A : valeurs de la variable étudiée pour les données de chaque échantillon

Puisque l'utilisation du test de Student valide que les données suivent une loi normale centrée réduite, la statistique T peut être comparée aux valeurs de la loi normale centrée réduite (test Z). Or, pour un test unilatéral à droite, H_0 est rejeté si $T > Z_\alpha$.

La calculateur en ligne de Stangroom (2018b) est utilisé dans le cadre des analyses de cette étude.

ANNEXE L TEST DE WILCOXON

Le test de Wilcoxon ne compare pas spécifiquement deux moyennes, mais évalue plutôt si les variables sont distribuées identiquement pour deux populations. L'hypothèse nulle H_0 de ce test est que les variables sont distribuées identiquement, alors que l'hypothèse alternative unilatérale à droite correspondante est $H_a = x_S - x_A < 0$. Autrement dit, l'hypothèse alternative veut que la distribution de la version améliorée soit décalée à droite par rapport à la distribution standard. La statistique T calculée est :

$$T = \frac{R - n_S(n_A + n_S + 1)/2}{\sqrt{n_A n_S(n_A + n_S + 1)/2}} \quad (\text{L.1})$$

La variable R correspond au classement associé aux données. Toutes les données des deux populations sont classées ensemble selon leurs valeurs et se voient attribuées un rang. La variable R se calcule comme étant la somme des rangs associés aux données de la version standard :

$$R = \sum_{i=1}^{n_S} R(S_i) \quad (\text{L.2})$$

où :

$R(S_i)$: la somme des rangs associés aux données de la version standard.

Lorsque la taille des échantillons est assez grande ($n > 12$) la statistique T s'approche de la loi normale et les règles de décisions en lien avec une distribution normale sont appliquées. La statistique T peut être comparée aux valeurs de la loi normale centrée réduite (test Z). Or, pour un test unilatéral à droite, H_0 est rejeté si $T > Z_\alpha$.

La calculateur en ligne de Marx et al. (2016) est utilisé dans le cadre des analyses de cette étude.

ANNEXE M TEST DE KHI-2

Ce test est de type non paramétrique et nécessite que les données soient indépendantes, que l'échantillon soit de petite taille ($n_x < 30$) et que les données apparaissent pour la plupart au moins 5 fois dans les catégories choisies. Le test mesure si la variable catégorielle diffère significativement entre les populations, en termes de proportions. Autrement dit, est-ce que les variables pour chaque population sont en relation ? Dans le cas où l'hypothèse nulle ($H_0 : proportion_S = proportion_A$) est rejetée, cela signifie que la variable catégorielle est indépendante entre les deux populations. La statistique X calculée est :

$$X = \frac{(x_S - n_S p)^2}{n_S p (1 - p)} + \frac{(x_A - n_A p)^2}{n_A p (1 - p)} \quad (\text{M.1})$$

où :

x_S et x_A : les additions des comportements reportés pour chaque version

$$p = \frac{x_S + x_A}{n_S + n_A}$$

La statistique X calculée doit être comparée avec la valeur X de référence en fonction de α et du degré de liberté dans une table Khi-2 afin de conclure ce test.

La calculateur en ligne de (Stangroom, 2018a) est utilisé dans le cadre des analyses de cette étude.