



HAL
open science

Rôle du retour haptique dans les interactions avec des avatars en réalité virtuelle

Grégoire Richard

► **To cite this version:**

Grégoire Richard. Rôle du retour haptique dans les interactions avec des avatars en réalité virtuelle. Interface homme-machine [cs.HC]. Université de Lille, 2023. Français. NNT : 2023ULILB015 . tel-04182814v2

HAL Id: tel-04182814

<https://hal.science/tel-04182814v2>

Submitted on 19 Dec 2023

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

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

Thèse de Doctorat en Informatique
Spécialité Interaction Humain - Machine

Rôle du retour haptique dans les interactions avec des avatars en réalité virtuelle

Soutenu le 19 juin 2023
par

Grégoire Richard

En vue de l'obtention du grade de docteur
délivré par l'Université de Lille

Composition du jury

<i>Présidente du jury</i>	Catherine PELACHAUD	Directrice de recherche, CNRS - Sorbonne Université
<i>Rapporteurs</i>	Indira THOUVENIN Ronan BOULIC	Professeure, Université de Technologie de Compiègne Maître d'enseignement et de recherche, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne
<i>Examinatrice</i>	Tabitha PECK	Associate Professor, Davidson College
<i>Directeur de thèse</i>	Géry CASIEZ	Professeur, Université de Lille
<i>Encadrants</i>	Thomas PIETRZAK Ferran ARGELAGUET Anatole LÉCUYER	Maître de conférences, Université de Lille Chargé de recherche, IRISA/Inria Rennes Directeur de recherche, IRISA/Inria Rennes

Résumé

La réalité virtuelle connaît depuis quelques années un essor technologique et médiatique sans précédent, à travers la démocratisation des casques et les premières propositions de *métavers*. Les technologies de réalité virtuelle proposent des expériences immersives qui permettent d'interagir avec des environnements virtuels toujours plus réalistes, voire qui dépassent parfois la réalité. Ces expériences intègrent déjà un retour visuel et auditif pour les utilisateurs et sont capables de reproduire fidèlement leurs mouvements : elles sont intrinsèquement multisensorielles. Dans la majorité des cas, plus l'intégration multisensorielle est aboutie, meilleure sera l'expérience globale de l'utilisateur. L'haptique, décrivant tout ce qui a trait au toucher et à la manipulation, est encore assez peu présent dans les expériences immersives. Un grand nombre de recherches récentes s'intéressent désormais à l'intégration de l'haptique en réalité virtuelle et aux liens qui existent entre retour haptique et expérience utilisateur. Nos travaux portent sur l'intégration du retour haptique en environnement virtuel immersif et les liens qui existent entre retour haptique et expérience utilisateur, et tout particulièrement le sentiment d'incarnation, qui décrit le rapport entre un utilisateur et sa représentation en environnement virtuel, l'avatar. Dans ce contexte, nous avons contribué à la connaissance des liens existant entre retour haptique et expérience utilisateur selon trois axes principaux. Le premier axe de nos travaux est méthodologique. Nous avons étudié les pratiques méthodologiques existantes pour mettre en place des protocoles expérimentaux étudiant l'incarnation virtuelle. Nous proposons une démarche permettant de comparer ces différents protocoles, basée sur la réplique d'une expérience de la littérature et sur des simulations à partir des données obtenues. Les résultats de ce premier axe de recherche nous ont ensuite servis pour les expériences mises en place dans la suite de nos travaux. Dans un deuxième axe de recherche, nous comparons plusieurs modalités haptiques relativement à leur contribution au sentiment d'incarnation, dans un contexte d'interaction fine avec l'environnement virtuel. Les résultats issus de ces travaux nous permettent de mettre en lumière l'importance de la cohérence et de la validité écologique du retour haptique quand il est étudié sous le prisme du sentiment d'incarnation. Enfin, notre troisième axe de recherche porte sur un plan technique et technologique. Nous proposons dans nos travaux la conception d'une manette de réalité virtuelle intégrant un retour haptique basé sur des vibrations spatialisées, permettant d'enrichir l'expérience utilisateur lors d'interactions avec l'environnement virtuel. Trois expériences de validation du prototype accompagnent la description de la conception du prototype, deux expériences portant sur la perception des vibrations spatialisées et une sur l'apport de la spatialisation sur l'expérience haptique.

Mots-clés : réalité virtuelle, haptique, retour d'effort, retour vibrotactile, expérience utilisateur, incarnation, avatar, environnement virtuel immersif

Abstract

Virtual reality has undergone an unprecedented technological and media boom in the last few years, through the democratization of headsets and the first proposals of *metaverses*. Virtual reality technologies offer immersive experiences that allow interaction with virtual environments that are increasingly realistic and sometimes even exceed reality. These experiences already incorporate visual and auditory feedback for users and are capable of faithfully reproducing their movements : they are intrinsically multisensory. In most cases, the better the multisensory integration, the better the overall user experience. Haptics, which describes everything related to touch and manipulation, is still not very present in immersive experiences. A lot of recent research is now focusing on the integration of haptic in virtual reality and the links between haptic feedback and user experience. Our work focuses on the integration of haptic feedback in immersive virtual environments and the links between haptic feedback and user experience, especially the sense of embodiment, which describes the relationship between a user and their avatar, their representation in the virtual environment. In this context, we have contributed to the knowledge of the links between haptic feedback and user experience along three main axes. The first axis of our work is methodological. We have studied existing methodological practices for setting up experimental protocols that study virtual embodiment. We propose an approach that allows us to compare these different protocols, based on the replication of an experiment from the literature and on simulations using the data obtained. The results of this first research axis were then used for the experiments set up in the rest of our work. In a second line of research, we compare several haptic modalities with respect to their contribution to the feeling of embodiment, in a context of fine interaction with the virtual environment. The results of this work allow us to highlight the importance of coherence and ecological validity of haptic feedback when studied under the prism of the sense of embodiment. Finally, our third line of research is technical and technological. In our work, we propose the design of a virtual reality controller that integrates haptic feedback based on spatialized vibrations, enriching user experience during interactions with the virtual environment. We describe the design of the prototype along with three experiments that evaluate both the prototype and the vibration model. The first two experiments deal with the perception of spatialized vibrations, and the last one addresses the added value of spatialization over haptic experience.

Key words : virtual reality, haptics, force feedback, vibrotactile feedback, user experience, embodiment, avatar, immersive virtual environment

REMERCIEMENTS

Je tiens premièrement à remercier mon directeur de thèse et mes encadrants Géry, Thomas, Anatole et Ferran. Merci pour la confiance accordée tout au long de cette thèse, pour vos conseils précieux, et surtout, toujours pertinents (« T'avais raison Géry! »). Merci au Défi Avatar, et tout particulièrement à Ludovic, d'avoir rendu possible mes travaux, et pour les retours toujours constructifs des différents membres du Défi.

Merci aux membres du jury pour les échanges et discussions extrêmement intéressantes, et tout particulièrement aux rapporteurs Indira Thouvenin et Ronan Boulic, pour avoir accepté de relire ce document et pour leurs précieux retours, à Catherine Pélachaud, pour avoir présidé lors de la soutenance et à Tabitha Peck pour avoir accepté malgré la rédaction en français.

Il me faut aussi remercier les incroyables équipes Loki et Hybrid! Un immense merci aux membres de l'équipe Loki de m'avoir supporté pendant ces quelques années, mes emotes Shrek et moi, merci à la TeamRU, au Start'R, à la team Karaoke & Grimpe, Axel, Sylvain, Bruno, Danny. Un grand merci à Suliac pour son aide précieuse ces derniers mois, et à tous les collègues d'Inria qui ont eu à subir mes expériences répétées! Mes années à Lille et au labo resteront d'heureux souvenirs, et c'est en grande partie grâce à vous! Merci aux membres d'Hybrid de m'avoir accueilli pendant ces trop courtes semaines, avec une mention spéciale pour Élodie pour m'avoir fait découvrir Rennes!

Je tiens à remercier l'équipe enseignante de l'IUT pour m'avoir accordé leur confiance et permis de trouver mes marques dans ce bel exercice qu'est l'enseignement. Merci tout particulièrement à Marie, Fabien, Jean-Marie, Yann et Philippe. Un grand merci à l'équipe pédagogique de Laval, notamment à Olivier et Geoffrey, qui m'ont formé, et pour tous les moments partagés avant, et après!

Je tiens évidemment à remercier ma famille, qui a toujours été là pour moi, et sans qui je n'aurais sans aucun doute pas tenu jusqu'au bout de ce chemin ardu. Un immense merci à mon père, ma mère et à ma sœur Fanny pour leur soutien indéfectible. Pensée et gratitude à mes grands-mères et à mon grand-père, pour m'avoir donné le goût de la recherche et de l'aventure.

Un énorme merci pour ceux qui me supportent depuis bien trop longtemps, ça c'est pour vous les gars, Armand, Jules, Justin, Vincent ; toujours là dans les moments durs, vous êtes justes géniaux ! Merci aux TB évidemment, merci à Olivier, Guilhem, Thomas, Thomas, Léo, Louis, Aurélien, Laurène, Ema, Anas ; merci pour ces moments créatifs lunaires, merci pour ces randos et ces moments de grande performance, toujours. Merci à toutes les personnes que j'ai pu rencontrer à Lille, et particulièrement la brochette de l'escalade ! Merci à Mag pour toutes ces soirées basse-grimpe, merci à Niels, Jean, Théo ; les moments à se poncer la peau sur les murs ont bien aidés durant l'année passée ! Je tiens à remercier toutes ces personnes avec lesquelles il m'a été donné de me lier d'amitié, Swane, Antoine, Maxence, Charlotte ; chacun a contribué même sans s'en apercevoir à ce travail. Pensée particulière à mon chat-dinde préféré (miaou !) ; ai-je besoin d'en dire plus ?

C'est en contemplant le chemin parcouru en arrivant au bout d'une telle entreprise que l'on se rend compte que nous n'effectuons jamais rien seul. Tous les contacts que j'ai pu avoir ces dernières années ont leur part de contribution dans ce manuscrit, et j'en suis profondément reconnaissant.

Du fond du cœur, merci,

Grégoire

TABLE DES MATIÈRES

1	Introduction	1
1.1	Problématiques	6
1.2	Méthodologie	8
1.3	Structure du manuscrit	8
2	État de l'art	11
2.1	Structure générale de la revue	11
2.2	Expérience utilisateur	12
2.2.1	Immersion et présence	13
2.2.2	Composantes de la présence	13
2.3	Incarnation	14
2.3.1	Appropriation corporelle	16
2.3.2	Agentivité	18
2.3.3	Schèmes corporels et autolocalisation	19
2.3.4	Représentations corporelles et incarnation d'outil	19
2.3.5	Méthodes d'évaluation	22
2.3.6	Différences individuelles en RV	24
2.4	Haptique et sens du toucher	25
2.4.1	Sens du toucher chez l'humain	26
2.4.2	Formes du retour haptique	28
2.4.3	Dispositifs haptiques	30
2.4.4	Interaction haptique	33
2.5	Haptique et expérience utilisateur	36
2.5.1	Modèle de l'expérience haptique	37

2.5.2	Haptique et incarnation virtuelle	38
2.6	Méthodologie expérimentale	40
2.6.1	Protocoles expérimentaux pour l'étude de l'incarnation	41
2.7	Synthèse	44
3	Méthodologie expérimentale pour l'incarnation virtuelle	47
3.1	Contexte	49
3.2	Objectifs	51
3.3	Expérience	52
3.3.1	Protocole expérimental	52
3.3.2	Conditions expérimentales	53
3.3.3	Méthodologie	54
3.3.4	Dispositif technologique	55
3.3.5	Participants	55
3.3.6	Métriques et questionnaires	55
3.4	Résultats	57
3.4.1	Résultats du protocole intra-sujets	57
3.4.2	Résultats pour le protocole inter-sujets	58
3.4.3	Influence du nombre de participants sur les analyses intra-sujets	59
3.4.4	Influence du nombre de participants sur les analyses inter-sujets	61
3.5	Discussion	61
3.5.1	Protocoles intra-sujets	62
3.5.2	Protocoles inter-sujets	63
3.6	Limitations	65
3.7	Travaux futurs	66
3.8	Conclusion	68
4	Modalités du retour haptique et incarnation	71
4.1	Contexte	72
4.2	Protocole expérimental	73
4.2.1	Hypothèses	73
4.2.2	Participants	75
4.2.3	Tâche	75
4.2.4	Dispositif technologique	76
4.2.5	Plan expérimental	78
4.2.6	Procédure	78
4.2.7	Variables dépendantes	79
4.2.8	Mesures objectives	80
4.3	Résultats	81
4.3.1	Incarnation	81

4.3.2	Charge de travail	82
4.3.3	Mesures objectives	83
4.4	Discussion	83
4.5	Conclusion	85
5	Manette de RV à retour vibrotactile spatialisé	87
5.1	Contexte	88
5.2	Conception du prototype et mise en place	90
5.2.1	Objectifs	90
5.2.2	Carte électronique	91
5.2.3	Châssis et vibreurs	91
5.2.4	Modèle vibratoire	92
5.2.5	Evaluation du prototype	94
5.3	Première expérience	95
5.3.1	Objectifs	95
5.3.2	Protocole	96
5.3.3	Résultats	99
5.3.4	Discussion	100
5.3.5	Conclusion	103
5.4	Deuxième expérience	103
5.4.1	Objectifs	104
5.4.2	Protocole	104
5.4.3	Résultats	108
5.4.4	Discussion	110
5.4.5	Limitations	116
5.4.6	Conclusion	117
5.5	Troisième expérience	117
5.5.1	Objectifs	118
5.5.2	Protocole expérimental	118
5.5.3	Résultats	121
5.5.4	Discussion	123
5.5.5	Conclusion	125
5.6	Avancement et poursuite	126
5.7	Conclusion	129
6	Conclusion	131
6.1	Synthèse des contributions	131
6.2	Travaux futurs	133
6.2.1	Perspectives à court et moyen termes	133
6.2.2	Perspectives à long terme	135

A Questionnaires post-expérience - différences individuelles	163
Extended summary	177

TABLE DES FIGURES

2.1	Schéma du dispositif expérimental de l'illusion de la main en caoutchouc. . . .	15
2.2	Représentation du modèle comparatif de l'agentivité.	17
2.3	L'Homonculus de Penfield.	27
2.4	Environnement utilisé dans le cadre de l'étude de Krogmeier <i>et al.</i> [134]	39
2.5	Dispositif expérimental utilisé dans l'étude de Fröhner <i>et al.</i> [79].	40
3.1	Dispositif expérimental lors de l'expérience comparant les protocoles [195]. . .	54
3.2	Scores d'incarnation pour les conditions expérimentales en intra-sujets.	58
3.3	Taille d'effet moyenne et cohérence sur le nombre total de participants.	60
4.1	Illustration du fonctionnement d'un proxy haptique.	74
4.2	L'environnement virtuel et vue générale de l'environnement et les avatars [194].	76
4.3	Signal de contrôle du vibreur et le circuit électrique simplifié [188].	78
4.4	Dispositif expérimental avec le bras à retour d'effort et le vibreur.	79
4.5	Diagramme des scores d'incarnation composante par composante [194].	81
5.1	Vues du prototype.	90
5.2	Matrice des vibreurs projetées en deux dimensions sur une main (la position réelle des vibreurs peut varier selon la morphologie de la main).	92
5.3	Modèle de <i>funneling</i> de vibration basé sur 3 vibreurs.	93
5.4	Dispositif expérimental pour la première expérience	97
5.5	Analyse bi-dimensionnelle de l'écart-type des réponses des participants.	99
5.6	Boîtes à moustache représentant l'intensité perçue pour chaque essai.	100
5.7	Pourcentage d'essais perçus comme étant une vibration unique.	100
5.8	Prototype tenu en main.	102

5.9	Dispositif expérimental pour la deuxième expérience.	104
5.10	Matrice des motifs vibratoires présentés.	106
5.11	Diagrammes récapitulatif des temps de réponses et taux de réussite.	109
5.12	Dispositif expérimental pour la troisième expérience.	121
5.13	Scores agrégés de l'appréciation globale des conditions.	122
5.14	Scores agrégés de l'expérience haptique.	122

LISTE DES TABLEAUX

2.1	Résumé des articles revus sur l'incarnation virtuelle	42
3.1	Questionnaire d'incarnation adapté de Peck & Gonzalez-Franco [185].	56
3.2	Résumé des résultats intra-sujets pour 92 participants.	58
3.3	Résumé des résultats inter-sujets avec 92 participants.	59
4.1	Questionnaire d'incarnation post-condition	80
5.1	Matrice de confusion. Les lignes correspondent aux motifs des essais, et les colonnes aux réponses des participants. Les valeurs sont des pourcentages du nombre d'essai total par motif. La couleur est basée sur un gradient allant de 0 à 100%. La colonne <i>Miss</i> représente les pourcentages d'essais où les participants n'ont pas répondu avant que le temps soit écoulé.	108
5.2	Questionnaire d'expérience haptique post-condition.	120
5.3	Résumé des analyses PCA.	123
A.1	Questionnaire VRSQ (Mal des simulateurs)	163
A.2	Questionnaire PANAS-X	166
A.3	Questionnaire QCAE	167
A.4	Questionnaire IPC	168

Ce manuscrit rend compte des travaux de recherche qui ont été réalisés durant notre thèse, intitulée « Le rôle du retour haptique dans les interactions avec des avatars en réalité virtuelle ». L'introduction qui suit sert deux objectifs : nous voulons présenter les grands thèmes dont il sera question dans nos travaux ainsi que les motivations personnelles qui nous ont poussés à nous y intéresser d'une part, et poser les questions de recherche et la méthodologie mise en place pour y répondre de l'autre. Notre sujet s'inscrit plus largement dans les travaux réalisés au sein du Défi Avatar, porté par 6 équipes-projet Inria, avec pour objectif de concevoir les prochaines générations d'avatars, mieux incarnés, et plus interactifs. Durant le Défi Avatar, un certain nombre de travaux portant sur les notions d'avatars, d'expérience utilisateur et d'interaction ont été réalisés [66, 67, 77, 78], et les travaux que nous présentons ici viennent s'insérer à leur suite, en y ajoutant tout particulièrement la notion de multisensorialité.

Réalité matérielle ou virtuelle ?

La première notion dont il nous importe de parler, et à la lumière de laquelle nous orientons toutes nos réflexions, est la réalité virtuelle. Qu'est-ce que la réalité virtuelle ? Au premier abord, l'association de ces deux termes est un oxymore à la limite de l'antinomie. Dans le langage courant, nous faisons habituellement une dichotomie entre le réel et le virtuel, et considérons que ce qui est virtuel est par là même marqué d'une certaine *irréalité*. Pourtant, la virtualité et la réalité ne sont pas incompatibles ou exclusives, et aujourd'hui, l'on considère plutôt la question sous le prisme du spectre réalité-virtualité : un élément virtuel peut s'intégrer à la réalité, et inversement, des éléments réels peuvent être présents dans des environnements virtuels

de synthèse [163]. Notre monde et le niveau technologique actuel nous amènent sans cesse à franchir la barrière qui sépare monde matériel et monde virtuel : écrans, smartphones, cinéma 3D, espaces virtuels sur Internet et, de plus en plus, casques de réalité virtuelle. . . Il est possible de considérer la réalité virtuelle comme évolution et comme suite de l'intégration des mondes virtuels parallèlement à notre réalité matérielle. Il est possible de comprendre la *réalité virtuelle* (RV) comme représentant l'ensemble des technologies et techniques qui permettent de modéliser et simuler les environnements virtuels en trois dimensions avec lesquels les utilisateurs peuvent interagir, et dans lesquels ils pourront s'immerger.

La RV, avec l'essor qu'elle prend en termes d'engouement populaire et d'investissements, concrétise et réalise une vision issue initialement de la science-fiction. On pourra penser, par exemple, au *Neuromancien* de William Gibson, *Snow Crash* ou *Le Samourai virtuel* en français, de Stephenson, ou plus récemment, à *Ready Player One*. Certains imaginaires y voyaient là l'opportunité d'améliorer l'humain au travers de la machine, comme c'est le cas dans *Ghost in the shell*, par Masamune Shirow. Ces œuvres, particularités de leurs univers respectifs mises à part, voyaient dans la réalité virtuelle le potentiel de transcender l'humain, très souvent en abolissant les limites du corps biologique, et en élargissant les frontières de l'environnement immédiat de l'humain. Mais, s'il a fallu attendre la révolution industrielle pour voir émerger ces œuvres de fiction basées sur des technologies machinistes, les narratifs qu'ils mettent en jeu parsemaient déjà les récits mythologiques des différentes civilisations au travers de l'histoire. L'histoire d'Icare, grandement répandue dans nos cultures qui héritent de la mythologie gréco-latine, les *Avatâra* hindous, qui donneront la notion d'avatar sur laquelle nous reviendrons plus loin dans notre introduction, ou même les différents mythes évoquant les métamorphoses de Loki, dans la mythologie nordique, montrent que l'homme a toujours conceptualisé une certaine transformation, un passage au-delà de la forme qui lui est attribuée à sa naissance.

D'un point de vue personnel, nous avons toujours été fasciné par la mythologie et la fiction littéraire, par tout ce que ces œuvres renfermaient de véritablement fantastique, mais une fascination teintée d'une déception d'enfance : le monde qui nous entoure semblait exclure le monde imaginaire et ses possibles sans limites. C'est au travers des œuvres que nous avons mentionnées précédemment (et d'autres !) que nous avons découvert le concept de réalité virtuelle. Cette découverte deviendra pour nous une passion, et par suite, notre sujet d'étude. À nos yeux, et bien qu'elle ne se limite pas à cela, la RV est un outil, un medium extrêmement puissant d'étude de l'humain, de ses capacités cognitives, perceptuelles et comportementales. Comme nous le mentionnions plus haut, la réalité virtuelle permet de s'affranchir du réel, et ce, sur plusieurs niveaux : elle permet de **créer de nouvelles façons d'interagir avec l'environnement virtuel** (il est possible de contrôler des objets par télékinésie en RV par exemple), et elle permet aussi **d'évoluer dans un environnement virtuel au travers d'un corps qui n'est pas notre corps biologique**, corps que nous appelons *avatar*. Ces deux potentialités de la RV font intervenir deux notions fondamentales dans nos travaux, à savoir les notions d'avatar et d'interaction.

Avatar

Nous pouvons comprendre la notion d'*avatar* comme la représentation virtuelle d'un utilisateur au sein d'un environnement virtuel. Dans le cadre de technologies peu immersives comme les réseaux sociaux ou les jeux en ligne, les avatars peuvent prendre la forme de simples photos ou de personnage que l'on contrôle au moyen d'une souris et d'un clavier. Dans un contexte en RV, toute représentation virtuelle qui permet à l'utilisateur d'évoluer, naviguer, interagir dans l'environnement peut être considérée comme un avatar. Des manettes, une représentation humanoïde ou animale, un mannequin, une simple sphère sont autant d'exemples de représentations qui peuvent servir d'avatars en RV. Il convient d'insister sur une distinction importante : une représentation virtuelle en RV ne sera un avatar que si elle est contrôlée par un utilisateur humain. Si une représentation est contrôlée par une intelligence artificielle (ce que l'on pourrait appeler un Personnage Non-Joueur - PNJ - dans les jeux en ligne), celle-ci n'est pas un avatar mais un agent. La notion d'agent est particulièrement étudiée et utilisée dans les études portant sur la simulation de foules, ou de comportements sociaux [68, 260]. Nous nous limitons à la notion d'avatar dans nos travaux.

Interaction Humain-Machine et expérience utilisateur

Arnaldi *et al.*, dans leur ouvrage sur la RV, la définissent comme suit : « la réalité virtuelle est un domaine technique et scientifique qui fait appel à l'informatique et aux interfaces comportementales pour simuler le comportement d'entités 3D dans un monde virtuel qui interagissent en temps réel entre elles et avec l'utilisateur dans une immersion pseudo-naturelle par le biais de canaux sensorimoteurs. » [12]. Cette définition fait intervenir la seconde notion qui sous-tend nos travaux, à savoir la notion d'interaction. Il est difficile de donner une définition concise de la notion d'interaction. Nous remarquons tout d'abord qu'il existe deux entités distinctes pour et lors d'une interaction, et que ces deux entités *envoient et reçoivent des informations sensorimotrices*. Dans un contexte portant sur les technologies informatiques, et particulièrement en RV, les deux entités correspondent d'un côté à l'utilisateur et de l'autre au système. Ces deux entités vont s'influencer et se déterminer mutuellement, et ce, dans la durée, en échangeant des informations [110]. Le système pourra par exemple changer l'affichage d'un contenu visuel en trois dimensions, suite au mouvement de tête de l'utilisateur. Un utilisateur immergé en RV va donc recevoir des informations sortant du système, informations sensorielles, principalement visuelles (*e.g.* au travers d'écrans), et va en retour générer des actions (mouvements de tête, appuis de boutons). Une interaction en RV est donc un échange bidirectionnel en temps réel entre l'utilisateur immergé, et l'environnement virtuel. Dans un système de RV, l'utilisateur va générer des actions et recevoir des informations au travers de son avatar, qui sera ainsi le médium de l'expérience de l'utilisateur. Au cours d'une interaction, un utilisateur va passer par un certain

nombre d'états psycho-physiologiques, incluant ses émotions, sa perception et ses comportements. L'ensemble de ces états, et leur évolution au cours du temps sont souvent désignés sous le nom d'*expérience utilisateur* (UX) [240]. L'expérience utilisateur est souvent influencée par différents facteurs, comme l'utilisabilité, la pertinence de l'information présentée, la rapidité de réponse du système, etc. Elle se trouve au cœur des réflexions lors de la conception d'interactions.

Réalité virtuelle et multisensorialité

Si notre ambition personnelle, et plus généralement, celle qui anime la recherche en RV aujourd'hui, est de proposer des systèmes aux capacités interactives qui dépassent celles de la réalité même, il faut reconnaître que le développement des technologies immersives s'est tout d'abord effectué par imitation et simulation du réel. Historiquement, la recherche en RV s'est d'abord concentrée sur l'aspect technologique et les performances en termes de simulation, pour pouvoir recréer des mondes virtuels convaincants. Notre construction du réel s'effectue au travers de notre perception, et des informations que nos sens nous transmettent. D'un point de vue interactif, nous apprenons à connaître notre environnement au travers de nos interactions avec celui-ci, au moyen de la boucle sensorimotrice, qui englobe toutes les informations sensorielles et actions du côté humain dans le cadre d'une interaction humain-machine [85, 188]. Ainsi, les technologies de RV s'attachent à produire ou reproduire des stimuli sensoriels propres à immerger l'utilisateur. L'amélioration des capacités de calcul graphique récentes, et les progrès dans la spatialisation du son permettent aujourd'hui de simuler des environnements hautement réalistes, capables de restituer les mouvements des utilisateurs en temps réel. Nous appelons de tels environnements Environnements Virtuels Immersifs (EVI).

Les technologies actuelles grand public, comme les casques de RV ou les *CAVEs* (*Cave Automatic Virtual Environment*), reposent principalement sur la simulation de deux sens, la vue et l'ouïe. Pourtant, la vue et l'ouïe ne sont qu'une partie des informations sensorielles qui nous permettent de forger notre conception de la réalité. Les informations de toucher, de mouvements, les odeurs, le goût sont autant de canaux qui nous ouvrent à la richesse de notre environnement, et nous font éprouver nos propres capacités d'interaction : l'odeur d'un plat suscite l'appétit et l'envie de manger, la musique et les sons que l'on perçoit suscitent l'envie de danser, etc. Notre expérience, en tant que sujets recevant des informations d'objets qui nous sont extérieurs, ne peut être que multisensorielle, et toute expérience en EVI qui se limitera à un ou deux sens ne sera pas en mesure de fournir une expérience immersive à la hauteur de la réalité. Des premiers travaux intégrant le retour olfactif et gustatif ont déjà été réalisés [42, 73, 101, 171]. Les progrès et la maturité de la RV s'accompagneront donc d'une intégration multisensorielle toujours plus grande, qui s'étendra aux différents sens. Comme nous l'avons mentionné dans le paragraphe dédié à l'interaction, en RV, l'avatar est le médium entre l'utilisateur et l'environnement virtuel.

Le fait de pouvoir voir et contrôler son avatar est très engageant pour l'utilisateur, mais pouvoir ressentir ce que l'avatar fait, touche, et perçoit l'est encore plus.

Retour haptique

Comme nous l'avons dit, les technologies immersives reposent aujourd'hui principalement sur la simulation de la vue et l'ouïe. S'il est encore compliqué de concevoir des solutions pour simuler le goût ou l'odorat, de nombreuses recherches en RV s'intéressent aujourd'hui à intégrer le sens du toucher. Le toucher est un sens primordial dans les interactions : un grand nombre d'entre elles sont basées sur le contact entre nos doigts ou nos mains et l'environnement, le terme manipulation étant d'ailleurs étymologiquement dérivé de *main*. Le toucher est alors considéré sous ses différentes modalités, englobant à la fois les informations tactiles et cutanées - au niveau du contact entre la peau et l'objet - et les informations kinesthésiques - au niveau des articulations pour percevoir la pression, les efforts, et les mouvements. Ce sens du toucher élargi est appelé haptique, et nous appelons retour haptique tout retour sensoriel qui simulera des informations tactiles, de mouvement, de chaleur, ou encore relatives à l'équilibre.

Actuellement, les systèmes de RV disponibles au grand public ont la capacité de suivre et reproduire les mouvements réels des utilisateurs dans l'EVI, et donc de générer une forte immersion sur le plan kinesthésique. Mais ils n'ont pas la capacité de rendre tangible les objets virtuels présents dans l'environnement : lorsque l'on vient saisir un objet virtuel, nous pouvons avoir l'illusion de saisir l'objet en voyant l'objet dans notre main virtuelle, mais nous ne pourrons pas sentir son poids, sa texture, ses formes, etc. Ces informations sont pourtant fondamentales lorsque l'on explore activement un environnement. L'intégration du retour haptique est donc un enjeu crucial pour rendre les EVIs plus immersifs, et améliorer l'expérience des utilisateurs.

Cognition et incarnation

La relation entre corps biologique et avatar est un aspect important des expériences en EVI avec un casque de RV. Porter un casque occulte la vision du corps biologique, et conduit à attribuer les sensations ressenties durant l'expérience comme provenant de l'avatar, et non du corps biologique. C'est le phénomène d'incarnation virtuelle. Le processus d'incarnation, au cours duquel une personne va s'approprier et considérer un corps étranger comme étant le sien, est initialement étudié dans les sciences cognitives, particulièrement dans le cadre de la cognition incarnée, qui met l'accent sur le rôle des boucles sensorimotrices dans le développement de la cognition [74]. Selon cette théorie, notre corps et ses mouvements sont intégrés dans notre façon de penser et de comprendre le monde qui nous entoure. Par exemple, nous pouvons utiliser notre connaissance de la façon dont nous pouvons saisir et manipuler des objets pour comprendre

comment ils fonctionnent et comment nous pouvons les utiliser. L'incarnation virtuelle est une extension du phénomène d'incarnation biologique, au cours duquel les perceptions sensorielles sont jugées comme provenant du corps virtuel, l'avatar donc, qui nous est donné. La notion d'incarnation est très utile pour décrire tout ce qui a trait au corps virtuel dans l'expérience utilisateur dans les EVIs. Les grands paradigmes portant sur l'étude de l'incarnation [30, 126, 203] ont montré l'aspect crucial de l'intégration multisensorielle, et donc, par extension, de l'intégration haptique, vis-à-vis de l'émergence de l'incarnation.

Nous avons ainsi pu faire le tour des notions clés qui s'articuleront dans nos travaux. Il apparait assez clairement que l'ensemble des notions que nous manipulons couvrent un champ pluridisciplinaire extrêmement large. Pour l'exprimer succinctement, la réalité virtuelle (RV), comprise comme l'ensemble des technologies pour simuler des environnements virtuels immersifs (EVI), a pour but de simuler une réalité non contrainte par les limitations matérielles. En passant outre ces limitations, les expériences en RV pourront proposer des interactions qui dépasseront les limites physiques et biologiques du corps humain. Cela suppose une intégration poussée de tous les sens humains, et particulièrement le sens du toucher, que l'on nomme haptique. Si désormais toutes les notions principales nécessaires à la présentation de nos travaux ont été définies, il reste à mettre en lumière les liens qui existent entre elles. Notre intérêt principal se situe dans l'étude du retour haptique, et de l'influence que son intégration peut avoir sur l'expérience des utilisateurs au sein des environnements de RV. Nous nous attacherons particulièrement à la relation qui existe entre retour haptique et corps virtuel. Ces considérations nous permettront de présenter nos réflexions sur ce sujet, et d'introduire les problématiques identifiées.

1.1 Problématiques

Nous avons pu introduire, au cours de la section précédente, les notions principales qui nous serviront à construire notre réflexion. Dans le cadre de ces travaux, nous nous intéressons au retour haptique et son intégration en EVIs. Nous voulons étudier, en particulier, l'influence du retour haptique sur l'expérience de l'utilisateur, et encore plus précisément, sur l'aspect de l'UX qui décrit la relation d'un utilisateur par rapport à son avatar, à savoir le sentiment d'incarnation.

Bien que nous reviendrons en détail sur cette notion dans l'état de l'art, il convient de préciser certaines caractéristiques de l'incarnation. Nous avons pu l'évoquer dans notre contextualisation, mais l'incarnation est un phénomène qui résulte de la congruence des sensations ressenties par un utilisateur : lorsque ce que l'on voit correspond à ce que l'on ressent, alors le sentiment d'incarnation envers l'avatar peut émerger [60, 126]. Bien que l'on puisse observer des signes objectifs témoignant du sentiment d'incarnation, à un moment donné, chez un utilisateur,

celui-ci reste entièrement subjectif, et est très souvent évalué au moyen de questionnaires. Tout comme le ressenti de l'ensemble des informations sensorielles, il existe une grande variabilité interindividuelle dans la perception subjective de l'incarnation.

Toute hypothèse de recherche doit être validée expérimentalement, au travers d'expériences contrôlées. Lorsque l'on s'intéresse à l'expérience utilisateur, ou plus largement, à des facteurs humains, un certain nombre de choix se posent aux chercheurs au cours du processus de conception d'une expérience contrôlée. Parmi ces choix, le type du protocole expérimental est crucial : une étude peut être réalisée suivant un protocole intra-sujets (*within-subjects*) ou inter-sujets (*between-subjects*). Chaque protocole possède ses propres avantages et inconvénients. Dans un protocole intra-sujets, chaque condition expérimentale est répétée pour tous les participants, pouvant entraîner des effets d'apprentissage par exemple, tandis que pour un protocole inter-sujets, chaque participant est affecté à un groupe, et ne sera exposé qu'à une condition expérimentale associée à ce groupe, ce qui peut introduire des biais liés aux différences interindividuelles. Ainsi, pour mettre en place un protocole inter-sujets, il faut s'assurer que l'on peut créer des groupes homogènes par rapport à la variable que l'on veut étudier. Nous avons voulu, dans un premier temps, nous pencher sur les pratiques méthodologiques pour étudier l'incarnation. L'étude de l'incarnation en EVI se situe à la rencontre de plusieurs domaines de recherche, et ces différentes disciplines ont leurs propres paradigmes et méthodologies. Ainsi, notre première question de recherche porte sur les pratiques méthodologiques pour étudier l'incarnation virtuelle.

Q1 : Comment mettre en place correctement des protocoles expérimentaux pour étudier l'incarnation virtuelle ?

Une fois ces considérations méthodologiques faites, nous pouvons nous intéresser plus directement au sentiment d'incarnation et à ses liens avec l'intégration multisensorielle. Si un large éventail d'études et de données prouvent la nécessité de l'intégration multisensorielle pour l'émergence de l'incarnation, en ce qui concerne le retour haptique, son intégration en RV peut prendre plusieurs formes, et il n'existe pas encore de comparaison, parmi les différentes modalités haptiques, sur les modalités qui amélioreront le plus l'incarnation. Notre seconde question de recherche porte donc sur les différentes modalités haptiques.

Q2 : Quelles formes de retour haptique permettent de susciter le sentiment d'incarnation le plus élevé en EVI ?

Enfin, lorsque l'on considère aujourd'hui les interactions en RV, on s'aperçoit que, pour les expériences de RV disponibles au grand public, elles s'effectuent principalement au travers de manettes. Ces manettes intègrent un retour haptique peu riche, sous la forme de vibrations.

Les manettes ont l'avantage d'être peu chères et non spécialisées pour une interaction particulière, comme cela peut être le cas dans les solutions d'interaction proposées dans les projets de recherche ou les produits commerciaux à la pointe. Notre dernière problématique de recherche s'intéresse ainsi à la proposition de solutions haptiques qui puissent enrichir l'expérience des utilisateurs tout en étant aussi polyvalentes dans leur contexte d'utilisation que les manettes de RV actuelles, et de cette problématique découle notre dernière question de recherche.

Q3 : Comment proposer des interactions haptiques plus riches dans les interactions basées sur des manettes en RV ?

1.2 Méthodologie

L'intégration du retour haptique en EVI a un impact sur l'expérience des utilisateurs en EVI. Nous nous intéressons particulièrement aux apports du retour haptique sur l'expérience utilisateur et la relation entre l'utilisateur et son avatar. Comme nous l'avons expliqué au début de notre introduction, l'expérience utilisateur décrit l'ensemble des états psycho-physiologiques des utilisateurs lorsqu'il interagit avec un EVI. Ainsi, en considérant le retour haptique sous le prisme de l'apport sur l'expérience utilisateur, nous mettons l'utilisateur au cœur de nos réflexions. Nous adoptons ainsi, dans nos travaux, une démarche de conception centrée sur l'utilisateur.

Pour les trois axes identifiés comme problématiques de notre sujet, nous avons mis en place une méthodologie similaire, basée sur l'implémentation de prototypes fonctionnels, ultérieurement validés au travers d'études empiriques avec des participants humains.

1.3 Structure du manuscrit

Le prochain chapitre de ce manuscrit, le *Chapitre 2*, présente une synthèse de notre revue de la littérature et des travaux antérieurs portant sur les notions qui sont au cœur des travaux réalisés durant ce doctorat. Nous revenons dans ce chapitre sur les notions introduites succinctement dans notre introduction. Nous nous attardons particulièrement sur l'expérience utilisateur et sur l'incarnation en EVI, ainsi que ses facteurs d'influence. Ces facteurs d'influence de l'incarnation nous amèneront aussi à nous intéresser aux différences individuelles et à leur impact sur l'incarnation. Ensuite, nous détaillerons les multiples réalités que couvrent le concept d'haptique, que ce soit les formes du retour, les solutions technologiques, ou les interactions basées sur l'haptique, et nous discuterons des liens qui existent entre retour haptique et expérience utilisateur. Nous terminerons cette revue en nous intéressant aux méthodologies expérimentales existantes pour étudier l'incarnation en contexte immersif, suivie d'une synthèse de l'ensemble de la revue.

Les Chapitres 3, 4 et 5 traitent de l'ensemble des projets et des études menées au cours de notre doctorat.

Le *Chapitre 3* présente une première étude qui propose une démarche répondant à un questionnement de pure méthodologie : comment bien mettre en place des protocoles expérimentaux pour étudier l'incarnation virtuelle ? Dans ce manuscrit, nous nous intéressons aux liens qui existent entre perception du corps virtuel, au travers de l'incarnation, et retour haptique. Nous avons donc fait une revue de la littérature pour comprendre comment étaient mis en place les protocoles dans les études portant sur l'incarnation, et mis en place une démarche pour comparer les différents protocoles expérimentaux. Les conclusions de ce premier chapitre, d'ordre méthodologique, serviront pour la construction des expériences mises en place dans la suite de nos travaux.

Le *Chapitre 4* présente une étude qui compare différentes formes de retour haptique par rapport au sentiment d'incarnation virtuelle, dans un contexte de manipulation fine. Nous avons mis en place une expérience utilisateur dans laquelle les participants devaient interagir avec précision dans une tâche de dessin en RV. Cette étude a permis de comparer les deux modalités principales du retour haptique (le retour vibrotactile et le retour de force) en contexte immersif.

Dans le *Chapitre 5*, nous présentons un prototype de manette de RV proposant un retour vibrotactile spatialisé. Dans un premier temps, nous présentons le prototype et sa conception, puis nous décrivons trois expériences qui ont été conduites pour évaluer le prototype. Deux de ces expériences ont porté sur les capacités des utilisateurs en termes de perception des vibrations, tandis que la troisième s'est intéressée à l'apport du prototype et du modèle des vibrations en termes d'expérience utilisateur.

Enfin, le *Chapitre 6* synthétise l'ensemble des travaux réalisés dans cette thèse et présentés dans notre manuscrit, ainsi que les contributions qui en sont issues. Nous proposons des pistes d'ouverture de ces travaux, selon différentes perspectives.

Résumé

Dans ce chapitre, nous présentons une revue des travaux qui ont structuré nos réflexions tout au long de ce doctorat. Nous proposons trois grands axes pour cette revue. En premier lieu, nous définirons la notion d'expérience utilisateur, et les principaux modèles pour la qualifier, notamment le sentiment d'incarnation. Nous entrerons dans le détail de la structure du modèle de l'incarnation. S'ensuit une section présentant le retour haptique et les différents niveaux de compréhension qui lui sont associés, particulièrement lorsque l'on s'y intéresse sous le prisme de l'expérience haptique. Enfin, nous présentons une synthèse des pratiques méthodologiques pour étudier le sentiment d'incarnation en environnement virtuel immersif (EVI).

2.1 Structure générale de la revue

Comme nous avons pu le voir dans l'introduction qui a précédé, il existe un grand nombre de questions propres à la réalité virtuelle, particulièrement en ce qui concerne les aspects interactifs et humains. Nos travaux portent principalement sur les liens existant entre l'intégration du retour haptique, et l'expérience de l'utilisateur dans les EVIs.

Le chapitre qui suit se consacre ainsi à la revue de la littérature portant sur de multiples aspects de la réalité virtuelle permettant de contextualiser nos travaux. Les notions propres au

retour haptique d’une part, et de l’expérience utilisateur de l’autre, sont, par nature, des objets de recherches pluridisciplinaires, car impliquant des problématiques à la fois technologiques (la proposition de nouveaux dispositifs d’interaction haptique par exemple), perceptuelles et cognitives, mais aussi méthodologiques. Nous voulons, dans cette revue de la littérature, articuler les trois grandes dimensions qui ont structuré nos réflexions lors de nos recherches bibliographiques. Dans un premier temps, nous aborderons la notion d’expérience utilisateur, particulièrement au travers du prisme du sentiment d’incarnation. Ces notions seront fondamentales dans nos travaux, car elles nous serviront, dans nos études, à qualifier l’expérience des participants, et donc, à évaluer nos systèmes technologiques sous l’angle de leur apport à l’utilisateur. Nous nous pencherons ensuite, dans un second temps, à l’axe principal de cette thèse, le retour haptique. Nous le verrons par la suite, mais le retour haptique, pris dans son acception large, couvre un nombre de réalités variées : l’aspect purement perceptif, du côté du système sensoriel humain, très étudié en sciences cognitives, ou encore l’aspect computationnel, avec la simulation du toucher au travers d’algorithmes et de systèmes technologiques, pour ne citer que ces deux exemples. Ainsi, il conviendra de définir précisément les différentes composantes du retour haptique, et, particulièrement, lorsqu’il est question de l’haptique en EVI. Enfin, dans un troisième temps, il sera question de méthodologie expérimentale. Comme nous venons de l’évoquer, les études portant sur l’expérience utilisateur en EVI sont pluridisciplinaires. Chacun des domaines de recherche possède ses propres paradigmes, et ses propres pratiques méthodologiques, en termes de recrutement, de conception expérimentale notamment. Nous essaierons de faire ressortir les grandes lignes communes aux études de ce domaine relativement jeune.

Nous concluons ce chapitre avec une synthèse des notions vues, synthèse qui nous permettra d’introduire nos propositions et hypothèses théoriques découlant de l’ensemble de nos recherches bibliographiques.

2.2 Expérience utilisateur

Nous allons tout d’abord nous intéresser à l’expérience utilisateur et ses modèles propres aux EVIs. Si les débuts de la réalité virtuelle ont d’abord vu un intérêt croissant pour l’innovation en termes de technologie et de performance, et les problématiques de recherche ont d’abord fortement penché sur les aspects techniques des technologies immersives, la démocratisation des casques et du matériel de RV, la disponibilité d’outils de développement accessibles à tous ont permis d’élargir les problématiques et les champs d’étude de la RV. Aujourd’hui, un des objectifs clés des technologies immersives est de proposer aux utilisateurs des expériences faisant sens (*meaningful experience*) [87, 154, 170]. Leur ressenti au sein de l’environnement virtuel, leur expérience, devient alors un enjeu principal pour les chercheurs. Ce ressenti est caractérisé par la notion d’expérience utilisateur. Nous accepterons, dans la suite de nos travaux, la définition de

l'expérience utilisateur proposée par Schrepp *et al.* [206] comme « un ensemble de critères de qualité distincts qui incluent les critères classiques d'utilisabilité classiques, comme l'efficacité, la possibilité de contrôle ou la facilité d'apprentissage, et des critères de qualité non orientés vers un objectif ou hédoniques, tels que la stimulation, le plaisir d'utilisation, la nouveauté, les émotions ou l'esthétique » [Traduction]. Il existe un grand nombre de modèles de l'expérience utilisateur [240], qui ont été proposés au cours des trois dernières décennies principalement, mais nous n'entrerons dans le détail que des principaux modèles. Nous pouvons notamment donner l'*immersion*, la *présence*, l'*incarnation* ou l'engagement en exemple. Comme nous le verrons au cours de ce manuscrit, nous nous sommes principalement intéressés à la notion d'incarnation, qui, pour faire simple, lie expérience utilisateur et avatar, mais il convient tout de même de développer les notions d'immersion et de présence, celles-ci étant liées au modèle de l'incarnation [96].

2.2.1 Immersion et présence

Nous allons tout d'abord aborder les notions d'immersion et de présence, qui sont deux notions liées. La notion d'*immersion* peut se définir telle que l'ont fait Slater *et al.* en 2009 [223] : cette dernière est une description objective de la technologie et des moyens techniques mis en place pour développer un environnement ou un EVI. Ainsi, il est possible d'évaluer, suivant cette définition, le niveau d'immersion au travers des spécificités logicielles ou matérielles tangibles, comme la latence, la résolution d'affichage, etc. Cette définition de l'immersion a été contestée par Witmer & Singer, proposant une immersion psychologique plus centrée sur l'utilisateur [255]. Il existe ainsi deux compréhensions de la notion d'immersion, l'immersion perceptuelle et l'immersion psychologique.

La notion de *présence* peut se définir littéralement par opposition à l'absence, à savoir le fait de se trouver physiquement en un lieu. Il est généralement accepté que la présence puisse se définir comme l'a caractérisée Heeter en 1992 [106], « *Being there* », le sentiment d'« être là ». Ainsi, il semble que l'immersion psychologique proposée par Witmer & Singer et la présence soient des notions liées, ainsi que l'a fait remarquer Slater *et al.* [220]. Slater *et al.* avanceront de plus que « la présence est une réaction humaine à l'immersion » [Traduction]. Nous garderons dans la suite du rapport le terme d'immersion pour définir les moyens techniques et technologiques mis en place dans un environnement pour une simulation virtuelle.

2.2.2 Composantes de la présence

Nous avons défini les concepts d'immersion et présence, il convient désormais d'explicitier les différentes dimensions qui viennent composer le sentiment de présence. Encore une fois, il a

existé une grande divergence quant aux sous-composantes de la présence ; nous avons décidé de prendre le modèle proposé par Lee en 2004 [141], celui-ci étant le plus repris dans la littérature que nous avons parcourue. La présence y est décomposée ainsi : la présence physique (*physical presence*), la présence sociale (*social presence*), et la présence de soi (*self-presence*).

La présence sociale, impliquant la présence de plusieurs acteurs sociaux virtuels (artificiels ou humains), ne nous intéresse pas dans cette étude. En revanche, la présence physique, définie comme « l'état psychologique dans lequel des objets physiques virtuels sont vécus comme de véritables objets physiques, de manière sensorielle ou non » [Traduction], et la présence de soi, définie comme « l'état psychologique dans lequel le soi virtuel est vécu comme le soi véritable, de manière sensorielle ou non » [Traduction] [141], sont deux notions qui sont chacune liées fortement à plusieurs dimensions de notre problématique. En effet, puisque la présence physique concerne la relation de l'utilisateur avec l'environnement, il semble que le sens du toucher et la présence physique puissent être en lien si l'on admet que la tangibilité de l'environnement et des objets qui le composent peut rendre des objets plus « physiques ». De plus, la présence de soi concerne la transposition du soi depuis le réel vers le virtuel, et peut donc se lier à la notion d'avatar.

Slater [221] a proposé que la présence soit considérée au travers de deux composantes orthogonales, l'illusion de la localisation (*Place Illusion*) et l'illusion de plausibilité (*Plausibility Illusion*). Cette catégorisation permet de prendre en compte des évolutions temporelles de l'illusion de présence, si celle-ci venait à être rompue au cours de l'expérience par exemple. Avec ce modèle, la notion initiale de présence est contenue dans *l'illusion de la localisation*, tandis que *l'illusion de plausibilité* permet de décrire la *cohérence* [218] de l'EVI, la fidélité du scénario de l'EVI, sa capacité à corréler les actions de l'utilisateur avec des retours sensoriels, etc.

Nous allons désormais nous intéresser au modèle de l'incarnation. Avant cela, il peut être utile de relever que l'incarnation et la présence ne sont pas deux notions fermées l'une à l'autre : Gorisse *et al.* ont montré que l'incarnation, dans sa globalité, participait à la présence au travers de la présence de soi [96]. Ces modèles, qui cherchent à caractériser l'expérience utilisateur ou un de ses aspects, ne sont pas encore strictement définis quant au périmètre de phénomènes qu'ils décrivent, et il est possible qu'ils se recourent.

2.3 Incarnation

La notion d'incarnation fait référence à la prise de possession d'un corps, et signifie littéralement « dans la chair ». Historiquement, le phénomène d'incarnation a été mis en évidence dans une expérience restée célèbre, l'expérience de l'illusion de la main en caoutchouc (*Rubber-Hand Illusion*, RHI dans la suite du rapport) [30]. Dans cette expérience a été mise en évidence

la possibilité d’induire une erreur dans la perception d’un membre (d’une main dans l’expérience initiale) des participants, et d’induire un sentiment de possession envers un substitut. Botvinick & Cohen sont parvenus à ce résultat grâce à une stimulation tactile sur le membre factice, corrélée à des stimulations synchrones de même nature sur la main réelle des participants dont on leur occultait la vue. Cette expérience a permis de poser un premier paradigme dans la compréhension des schémas corporels, de l’incarnation et la conscience du corps.

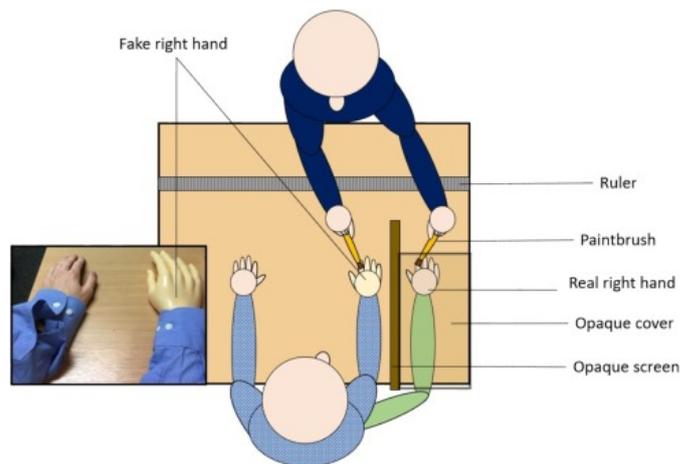


FIGURE 2.1 – Schéma du dispositif expérimental de l’illusion de la main en caoutchouc, tel que mis en place par O’Dowd & Newell [176].

Le sentiment d’incarnation virtuelle comprend généralement les dimensions de contrôle moteur et d’attachement affectif envers un corps virtuel [126]. Ces dimensions ont été théorisées par les approches pluridisciplinaires de la *théorie de la cognition incarnée (embodied cognition theory)* [74], et propose une appropriation du corps par le sujet dans une complémentarité des processus montants et descendants [60].

Nous adoptons la définition de l’incarnation proposée par Kilteni *et al.* : « Le sentiment d’incarnation (*Sense of Embodiment - SoE*) envers un corps B est le sentiment qui émerge lorsque les propriétés de B sont traitées comme si elles étaient les propriétés de son propre corps biologique » [Traduction] ([126]). Pour des lectures supplémentaires concernant l’incarnation, nous nous référons aux études approfondies de Kilteni *et al.* [126] et de Vignemont [60]. Cette définition de l’incarnation met au premier plan l’importance de l’interrelation entre les corps réel et virtuel pour l’émergence de l’incarnation, la subjectivité de cette notion, et l’aspect progressif de son émergence : c’est un processus. Dans la même étude proposant la définition virtuelle de l’incarnation que nous adoptons, Kilteni *et al.* proposent aussi une structure de l’incarnation en trois dimensions : l’appropriation corporelle, propre à l’attachement affectif, l’agentivité, relative au contrôle moteur du corps, et la localisation de soi, ou autolocalisation, en lien avec la dimension spatiale et localisée de l’expérience corporelle. Une description des composantes de cette struc-

ture de l’incarnation et des facteurs qui améliorent ou permettent ces sous-composantes dans les EVIs sont discutés ci-après.

2.3.1 Appropriation corporelle

L’appropriation corporelle, que l’on peut aussi rencontrer sous le nom de *possession (body ownership)*, se conceptualise comme pouvant prendre la forme d’un jugement ou d’un sentiment. La différence entre le jugement d’appropriation et le sentiment d’appropriation est que le premier se réfère à un processus cognitif ou intellectuel de reconnaissance ou de connaissance qu’une partie du corps ou un objet appartient à soi-même, tandis que le second se réfère à une sensation ou un sentiment subjectif et plus immédiat de propriété corporelle qui est basé sur des expériences sensorielles ou perceptuelles [60]. Les réflexions sur l’attribution de notre corps physique tendent à montrer que nous ne sommes que rarement conscients de celui-ci [100]. Nous sommes de plus capables de ressentir des sensations, comme la douleur, simplement en observant d’autres personnes souffrir [217]. Pourtant, cette empathie n’entraîne aucune confusion entre le soi et les autres : les expressions des sensations corporelles ne nous sont pas propres, elles sont communes à soi et aux autres [64]. Ainsi, du besoin de différencier les sensations de son corps et d’un corps tiers résulte le sentiment d’appropriation. Ce sentiment peut se considérer de deux façons : positivement et négativement [60]. Dans l’approche positive de l’appropriation, nous allons juger qu’un membre différent de notre corps biologique nous appartient *en plus* de notre corps biologique. C’est le cas pour le paradigme de la main en caoutchouc, dans lequel les participants viennent s’approprier la main factice, ou dans les travaux de Khateb *et al.* [124] et Hoyet *et al.* [112], dans lequel les participants pouvaient s’approprier un sixième doigt virtuel ajouté à la représentation de leur main dans l’EVI. Dans ce paradigme, la main en caoutchouc ne vient pas remplacer la main biologique des participants, et ceux-ci ne cessent pas de considérer leur main comme leur main. Le processus d’appropriation est donc dans ce cas positif, il vient étendre la perception corporelle des participants. À l’inverse, il existe des phénomènes dans lesquels l’inverse se produit : non pas une extension de la perception corporelle, mais une réduction [59, 60]. Nous pourrions notamment citer le trouble identitaire de l’intégrité corporelle, dans lequel une personne voudra s’amputer ou se faire amputer d’un membre sain. Bien qu’une personne souffrant de ce trouble perçoive sensoriellement ses membres correctement, elle jugera le membre comme ne lui appartenant pas. Ces phénomènes de désappropriation sont souvent liés à des lésions cérébrales, et relèvent d’un domaine qui dépasse largement le champ de nos considérations. Dans la suite de nos travaux, nous nous intéresserons à la conception positive de l’appropriation.

Le sentiment d’appropriation est défini par Gallagher *et al.* [81] comme l’auto-attribution d’un corps qui est la source de sensations ressenties, par exemple, la perception que le corps bouge indépendamment de la volonté de bouger. La redécouverte du paradigme de la RHI par

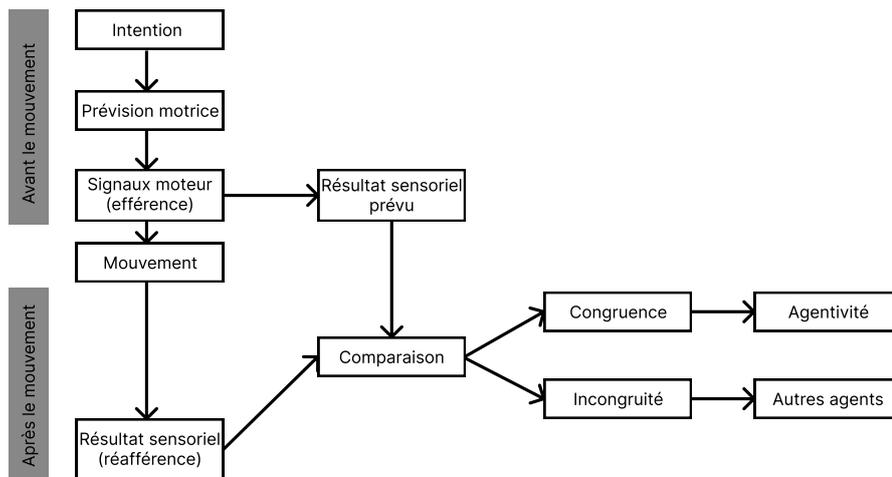


FIGURE 2.2 – Représentation du modèle comparatif de l’agentivité, traduit de Zaadnoordijk *et al.* [265].

Botvinick & Cohen [30] a permis d’ouvrir de nouvelles perspectives de recherche et de compréhension du sentiment d’appropriation. L’émergence du sentiment d’appropriation est admise comme provenant de la combinaison entre des facteurs montants (*bottom-up*) et des facteurs descendants (*top-down*) [241]. Les facteurs ascendants font référence aux informations provenant de nos organes sensoriels, comme les entrées tactiles et proprioceptives. Par exemple, les stimuli visuotactiles suscitent le sentiment d’appartenance lorsqu’ils sont congruents en termes de lieu et de temporalité [30, 242], tandis que la synchronisation visuomotrice dans les mouvements passifs suffit à faire émerger le sentiment d’appartenance et suscite une plus grande illusion que l’intégration visuotactile [131, 244]. Les facteurs descendants font référence aux processus cognitifs qui permettent au mécanisme d’incarnation de prendre place. La nécessité d’une similarité morphologique de base entre la partie du corps de substitution à incarner et le membre du participant dans la RHI est un exemple de processus descendant [241, 242]. L’absence de ressemblance, ou des incohérences entre la main factice et la main biologique de l’utilisateur peuvent dégrader, voire empêcher l’apparition du sentiment d’appropriation [11, 54, 121]. Le paradigme de la RHI a été confirmé par Sanchez-Vives *et al.* [203] pour des mains virtuelles, ainsi que pour des avatars complets [175]. Il est utile de souligner que le paradigme de la RHI en RV, contrairement au paradigme originel, permet de co-localiser la main des participants et la main virtuelle qu’ils s’approprient au cours de l’expérience, et offre un contrôle moteur complet sur la main virtuelle. Nous comprendrons par la suite le sentiment de possession comme « l’auto-attribution d’un corps, ce corps étant la source des informations sensorielles » [Traduction] [241].

2.3.2 Agentivité

Le sentiment d'agentivité (*sense of agency*) a été défini par Gallagher [80] comme « je suis la cause ou l'origine d'une action » [Traduction], et plus récemment par Blanke et Metzinger [28], comme le « contrôle moteur global, incluant l'expérience subjective de l'action, le contrôle, l'intention, la sélection motrice et l'expérience consciente de la volonté » [Traduction]. L'émergence du sentiment d'agentivité résulte d'une comparaison entre les informations sensorielles anticipées avant l'action de l'utilisateur et les conséquences sensorielles qui s'ensuivent. Lorsqu'il y a correspondance entre les conséquences sensorielles prédites et les conséquences sensorielles réelles, par exemple au travers d'une synchronisation visuomotrice entre le corps physique et l'avatar, l'utilisateur va considérer être à l'origine de ces actions [118]. Cette compréhension de l'agentivité découle du modèle comparatif de l'agentivité [235, 265]. Ce modèle est synthétisé dans la figure 2.2. Dans ce modèle, le sentiment d'agentivité émerge suite à des mouvements intentionnels, dont les résultats sensoriels sont cohérents avec la prévision, ou les résultats attendus par l'individu. De ce fait, l'incohérence entre les attentes d'une personne et les résultats effectifs peuvent conduire à une diminution du sentiment d'agentivité, ou empêcher son émergence.

Il a été montré à plusieurs reprises qu'une mauvaise synchronisation visuomotrice (avec de la latence, par exemple) pouvait impacter négativement le sentiment d'agentivité [75]. Les travaux de Bayne & Pacherie [24] ont posé une ébauche de la distinction entre deux formes d'agentivité : l'agentivité comme schéma *narratif* (*narrator's approach*) et l'agentivité comme schéma comparatif (*comparator's approach*). D'après eux, l'agentivité ne peut se limiter au modèle narratif de l'agentivité : ce dernier est basé sur un ensemble de procédés descendants qui ne suffit pas à décrire le phénomène. Le modèle comparatif proposé par Bayne & Pacherie désigne les procédés montants suscitant l'agentivité de nos propres mouvements. Cette dichotomie de l'agentivité se retrouve dans les travaux de Synofzik *et al.* [235] et de Moore [166], qui décomposent l'agentivité en jugement d'agentivité et en sentiment d'agentivité. Les travaux de Jeunet *et al.* [118] ont permis d'approfondir la compréhension de ces deux notions. Le sentiment d'agentivité précède le retour sensoriel issu de l'action, tandis que le jugement d'agentivité découle de la comparaison entre les résultats réel et attendu de l'action. Ces deux composants reposent sur trois principes. Ces trois principes correspondent aux conditions d'attribution de la causalité [118] : [Traduction]

1. Principe de priorité : l'intention consciente d'accomplir un acte doit précéder immédiatement l'action, qui à son tour doit précéder immédiatement le résultat.
2. Principe de cohérence : le résultat sensoriel doit correspondre au résultat prédit.
3. Principe d'exclusivité : la pensée doit être la seule cause apparente du résultat (absence supposée de la part de l'utilisateur d'influence extérieure).

Ce modèle est en accord avec le modèle comparatif de l'agentivité. Le principe de cohérence, en particulier, nous semble d'une importance toute particulière. Il est aussi intéressant de noter que les principes de priorité et de cohérence trouvent leur équivalent dans la théorie de l'action proposée par Norman [174], où la phase de formation de l'intention de l'action correspondrait au principe de priorité, et où les dernières phases de l'action (perception et interprétation de l'environnement puis évaluation du résultat de l'action) correspondraient au principe de cohérence. L'absence de cohérence, ou les divergences entre le retour visuel et les actions de l'utilisateur, conduisent à ce qu'on appelle habituellement le phénomène de la vallée de l'étrange (*uncanny valley*) [167, 168]. L'intégration visuomotrice induit un sentiment élevé d'agentivité du corps virtuel contrôlé, car elle corrèle le mouvement du corps réel de l'utilisateur, et donc l'intention du mouvement, au mouvement du corps virtuel.

2.3.3 Schèmes corporels et autolocalisation

La localisation de soi « correspond au volume déterminé dans l'espace où l'utilisateur se sent localisé » [Traduction] [126]. La localisation de soi est à différencier de la présence. Comme nous l'avons vu plus haut, le sentiment de présence rend compte de la relation entre l'utilisateur et l'environnement (« être là », dans l'espace), tandis que la localisation de soi décrit la relation entre l'utilisateur et son corps. La RHI [30] montre qu'une stimulation visuotactile synchrone permet d'induire un décalage proprioceptif : l'utilisateur juge sa main comme étant plus proche de la main en caoutchouc, après l'émergence d'un sentiment d'appropriation. Ainsi, la stimulation synchrone permet d'induire une erreur de localisation de soi. D'autres études [144] ont montré que les *Out of Body Experience*, les expériences « hors de son corps » pouvaient aussi induire des erreurs de localisation sur l'ensemble du corps. En EVI, il est courant d'utiliser un point de vue égocentré, rendu depuis la position du corps virtuel et ce, afin de maximiser le sentiment de localisation de soi. En effet, il a été montré que le point de vue utilisé a un impact sur la localisation de soi et sur le sentiment d'appropriation corporelle [94].

2.3.4 Représentations corporelles et incarnation d'outil

Il est très fréquent que l'interaction entre un utilisateur et un environnement virtuel soit médiée, au travers de manettes le plus couramment, mais encore avec un stylet dans le cas de l'utilisation de certaines interfaces [159], ou d'autres dispositifs prototypiques [108, 266]. Ces dispositifs de médiation de l'interaction peuvent être considérés comme des outils. L'incarnation d'outil est fortement liée aux différentes représentations corporelles. L'idée que le cerveau va traiter un outil comme une extension du corps date de plus d'un siècle, émise par Butler en 1872 [38]. Cette idée est maintenant largement acceptée et est confirmée par de nouvelles ex-

périences neuropsychologiques [155]. Nous passons en revue différentes notions et conceptions propres aux représentations corporelles et l'intégration d'outils dans ces schémas corporels.

Espace péripersonnel La première représentation corporelle dont le corps dispose et qui sert d'interface avec l'environnement est l'espace péripersonnel. L'espace péripersonnel est fortement lié à la vision et à l'audition [40]. Cet espace permet d'acquérir des informations somato-sensorielles, visuelles et auditives. De Vignemont & Iannetti [58] ont proposé une dichotomie fonctionnelle de l'espace péripersonnel, qui serait dédié d'une part à la détection de menaces et à la protection du corps, et d'autre part servirait à l'interaction avec l'environnement proche et les objets à portée. L'espace péripersonnel servant à l'interaction peut être relié à l'espace proxémique théorisé par Hall [102], espace propre aux interactions humaines et sociales dépendant du contexte culturel des individus. Nous n'avons pas trouvé de travaux s'intéressant aux potentiels conflits entre la vision et les informations somato-sensorielles en cas de menaces en EVI. Cette première interprétation de l'espace péripersonnel dépasse néanmoins le cadre de nos travaux, qui se concentrent plus sur l'interaction et le sens du toucher. De ce fait, la deuxième acceptation de l'espace péripersonnel, comme intégration sensorielle de possibilités d'interaction dans l'environnement proche, est plus pertinente dans notre contexte.

Certaines études ont montré que l'utilisation prolongée d'outils chez les primates permet de montrer un agrandissement de l'espace péripersonnel selon l'axe de l'outil [114]. Des études plus récentes ont permis de trouver des résultats similaires aux primates chez des patients atteints de négligence spatiale (« incapacité à détecter, s'orienter, ou répondre à des stimuli porteurs d'information lorsqu'ils sont présentés dans l'espace opposé à la lésion » [Traduction] [107]) [26] mais aussi chez des sujets sains [256]. Ainsi, en interagissant au travers d'un objet autre que notre corps, il est possible d'intégrer cet objet, même non biologique, dans l'espace péripersonnel. Ces résultats ont aussi été transposés en réalité virtuelle, par Alzayat *et al.* [7]. Dans leur étude, Alzayat *et al.* comparent les capacités d'interaction et d'attention de participants suivant plusieurs conditions : avec des manettes, avec les mains, et avec bras mécanique à pince basé sur un outil réel (le bras virtuel est modélisé suivant la forme globale du bras mécanique réel que les participants tenaient). L'outil utilisé dans leur expérience augmentait donc aussi physiquement leur capacité d'interaction avec l'environnement. Il n'y a pas, à notre connaissance, d'étude qui s'intéresse à l'augmentation de l'espace péripersonnel suite à une expérience interactive en EVI dans laquelle l'outil permettant de transformer la capacité d'interaction est principalement virtuel.

L'utilisation d'outil ne fait pas que modifier notre espace péripersonnel ; elle modifie aussi les représentations corporelles plus profondes, comme le schéma corporel, l'image corporelle ou la description structurelle du corps.

Schéma corporel Le schéma corporel correspond à la représentation spatiale de la dimension, de la position et de la posture des membres et des parties du corps. Cette représentation est utile pour exécuter ou imaginer l’exécution de mouvements correctement [160]. Cardinali *et al.* [40] ont montré que le schéma corporel pouvait être modifié par l’utilisation d’un outil, ici d’une pince mécanique, après une période de dix minutes. En effet, le comportement des utilisateurs après utilisation d’outil est modifié « comme s’ils avaient un bras plus long » [Traduction]. Les profils cinématiques des mouvements mains libres des sujets ont été enregistrés avant et après l’utilisation de l’outil. Cardinali *et al.* ont remarqué que les profils après utilisation présentent des vitesses et des amplitudes plus faibles, semblables à des profils propres aux personnes possédant des bras longs, et ce quelle que soit la longueur réelle de leur bras. La notion de schéma corporel est liée à la proprioception, perception profonde du corps, que nous détaillerons dans la partie de notre revue consacrée au retour haptique [41]. Le schéma corporel est ainsi à distinguer de l’espace péripersonnel, au moins au niveau des sens impliqués dans leur construction physiologique (proprioception pour le schéma corporel, et vision et audition pour l’espace péripersonnel).

Image corporelle L’image corporelle se définit souvent par opposition au schéma corporel, et correspond à la représentation consciente et sémantique des membres et parties du corps et leurs fonctions [59]. Miller *et al.* [164] ont proposé une expérience dans laquelle les utilisateurs devaient juger de la taille de leur main par rapport à une image de main servant de contrôle, avant et après avoir utilisé un outil en forme de main beaucoup plus grand. Les résultats obtenus sont dépendants des conditions de passation : lorsque les sujets ont un retour visuel en utilisant l’outil, alors ils jugent la taille de leur main différemment selon si cela est demandé avant ou après l’utilisation de l’outil ; mais sans retour visuel, il n’y a aucune différence induite par l’outil. Le retour visuel est ainsi impliqué dans les modifications de l’image corporelle. Comme la vision est prédominante sensoriellement dans notre construction de la réalité [71], la RV s’intéresse particulièrement aux changements de l’image corporelle. Un certain nombre d’études se sont penchées sur la modification du corps en EVI [18, 126, 173, 189].

Ainsi, nous avons vu dans cette sous-section qu’il est possible d’intégrer des objets étrangers dans notre compréhension profonde de notre corps et ses représentations. Ces changements proviennent de modifications observables des capacités d’interaction, ou résultent simplement d’un changement visuel. Plus largement, les sous-sections précédentes ont présenté les notions principales pour décrire le phénomène d’incarnation dans un corps virtuel, ses conditions d’émergence, et des considérations plus larges sur l’incarnation d’outils. Dans la sous-section suivante, nous nous intéresserons aux modalités d’évaluation de l’incarnation.

2.3.5 Méthodes d’évaluation

L’évaluation du sentiment d’incarnation est un point crucial lorsque l’on considère cet aspect de l’expérience utilisateur en EVI. En effet, pour étudier l’incarnation, il est nécessaire de pouvoir la quantifier chez un individu. L’incarnation étant proprement subjective (elle exprime le rapport d’un sujet par rapport à un objet), sa mesure soulève encore aujourd’hui plusieurs problématiques. Actuellement, il existe deux grandes approches pour mesurer l’incarnation : les mesures subjectives, les plus répandues, comme l’utilisation de questionnaires, et les mesures objectives, plus contextuelles.

Mesures subjectives de l’incarnation L’incarnation est une notion subjective, ressentie par un utilisateur à un moment donné, suite à une expérience précise. De ce fait, elle peut être évaluée au travers de questionnaires dans lesquels les participants autorapportent leur niveau d’incarnation. Il existe un certain nombre de questionnaires qui cherchent à évaluer l’incarnation. Le premier d’entre eux a été proposé par Botvinick & Cohen, lors de l’expérience de la RHI [30].

Ces dernières années, un nombre non négligeable d’études ont proposé et utilisé (ou réutilisé) des questionnaires cherchant à évaluer l’incarnation. Nous pouvons notamment mentionner les premières démarches proposées par Gonzalez-Franco & Peck [92] et par Roth *et al.* [199], qui ont commencé à regrouper les différents questionnaires et items proposés dans les protocoles antérieurs. Ces deux travaux ont proposé des approches statistiques similaires de construction d’échelle : Roth *et al.* ont validé avec une analyse CFA (*Confirmatory Factor Analysis*), analyse cherchant à vérifier que les mesures issues du questionnaire sont cohérentes avec la construction théorique du phénomène observé, tandis que Gonzalez & Peck ont proposé une démarche basée sur une analyse PCA (*Principal Component Analysis*), analyse cherchant à réduire la dimensionnalité des données en entrée sans préjuger d’une construction théorique intrinsèque structurant les données. De ce fait, les analyses des travaux de Roth *et al.* [199] proposent un questionnaire d’incarnation basé sur trois dimensions, l’appropriation corporelle, l’agentivité, et une troisième dimension qu’ils nomment changement (*Change*), tandis que le questionnaire proposé par Gonzalez-Franco & Peck avance une structure en six composantes, qu’ils nomment appropriation corporelle, agentivité et contrôle moteur, sensations tactiles, localisation du corps, apparence extérieure, et réponse aux menaces. Plus récemment, Peck & Gonzalez [185] ont proposé une version actualisée de leur premier questionnaire, adoptant une démarche similaire, avec une analyse PCA, qui aboutit finalement à une décomposition de ce nouveau questionnaire d’incarnation en quatre sous-composantes, Apparence, Réponse, Appropriation et Multi-sensorialité. Le questionnaire proposé a ensuite été validé sur trois expériences. Avec une validation sur un échantillon de près de 450 participants, répartis selon 9 protocoles expérimentaux différents, ce questionnaire est actuellement le plus robuste à disposition de la communauté s’intéressant à l’incarnation en EVI.

Dans l’ensemble, les questions utilisées pour les questionnaires d’incarnation sont assez explicites quant à l’objet de leur étude (la relation d’un participant par rapport au corps virtuel qui lui était attribué lors d’une expérience en EVI). Si le participant peut inférer le but et l’objet d’investigation de l’expérimentateur, cela peut conduire à biaiser les résultats du questionnaire [46]. Les questionnaires sont administrés à d’éventuels participants après leur passage en EVI. Ainsi, la mesure de l’incarnation par un questionnaire sera ponctuelle - post-expérimentale - et ne pourra pas prendre en compte la temporalité du phénomène et ses éventuelles variations au cours de l’expérience. Ces raisons motivent l’utilisation de mesures objectives de l’incarnation.

Mesures objectives de l’incarnation De même que les premiers questionnaires d’incarnation sont issus de l’étude originelle de la RHI, les premières mesures objectives se sont aussi inspirées de ce paradigme. Dans leur étude initiale, Botvinick & Cohen [30] ont montré que les scores élevés au questionnaire étaient corrélés positivement à une *dérive proprioceptive* (*proprioceptive drift*) plus importante. Pour rappel, on nomme dérive proprioceptive le décalage dans la position perçue de la main réelle résultant de l’illusion. La perception qu’a le participant de l’emplacement de sa propre main se déplace progressivement vers l’emplacement de la fausse main, ce qui démontre l’effet de l’illusion sur la proprioception. L’ampleur du déplacement de l’emplacement perçu de la main du participant est utilisée pour quantifier la force de la RHI. Cette mesure nécessite et implique un décalage entre la position de la main réelle du participant, et la position de la main en caoutchouc. Cette métrique a été réutilisée dans les répliques en EVI de la RHI [203].

Le sentiment d’incarnation est un processus psychophysique, qui a fait l’objet d’études dans les neurosciences [243]. Des études se sont intéressées aux techniques d’électroencéphalographie (EEG) pour mesurer l’incarnation [118]. L’étude de Jeunet *et al.* montre l’existence de marqueurs physiologiques observables par EEG corrélés au niveau d’agentivité durant l’immersion. Cette mesure, bien que technologiquement lourde, a l’avantage d’avoir lieu tout au long de l’expérience immersive, et donc de garder des informations temporelles par rapport à l’évolution de l’incarnation. Certaines études se sont aussi intéressées à la mesure de la conductance de la peau (*Skin Conductance Response*, SCR), et de la sudation pour évaluer le niveau d’incarnation des participants [151, 187]. Cette mesure a particulièrement été utilisée dans des contextes intégrant des menaces visant l’avatar des participants, dans le but de générer une réaction. Les mesures SCR permettent de mesurer des pics de réponse émotionnelle avec quelques secondes de décalage, mais il n’est pas possible de déterminer la valence ou la qualité de cette réponse émotionnelle [4], et la mesure de SCR doit être accompagnée par d’autres mesures.

Enfin, de par l’effet *Proteus* [262, 263], l’émergence du sentiment d’incarnation peut conduire à des changements plus ou moins durables dans le comportement des participants. L’effet *Proteus* qualifie le phénomène dans lequel le comportement d’utilisateurs au sein d’en-

vironnements virtuels (immersifs ou non) va être changé par les caractéristiques de leur avatar. Ce changement provient de la connaissance qu’a l’individu des comportements que les autres utilisateurs qui font partie de cet environnement virtuel associent généralement aux caractéristiques de l’avatar de l’individu. Ces changements peuvent par suite servir à quantifier le degré d’incarnation. Dans une étude, Kilteni *et al.* [125] ont montré que les mouvements des participants et leur amplitude étaient significativement différents dans certaines conditions expérimentales, proposant une représentation virtuelle contextuellement plus parlante pour les participants. Ils ont trouvé que l’amplitude des mouvements était corrélée au niveau d’incarnation pour ces conditions expérimentales. La réaction à des menaces extérieures a été corrélée au sentiment de possession : plus le sentiment est fort, plus la réaction à une menace sera vive [187]. Les comportements en réaction à des menaces peuvent ainsi servir de mesure observable de l’incarnation.

Si la mesure de l’incarnation est un élément crucial pour la conception et l’amélioration des EVIs, il est empiriquement observable que les individus réagissent différemment aux illusions propres à la réalité virtuelle, et particulièrement au phénomène d’incarnation. Ces différences de réactions peuvent s’expliquer, au moins en partie, par des différences interindividuelles, comme les traits de personnalité ou l’état physiologique des individus.

2.3.6 Différences individuelles en RV

Tout comme il existe des différences entre les individus en ce qui concerne leur vitesse de frappe ou leur capacité à cliquer sur des cibles en utilisant une souris d’ordinateur (pour citer des exemples courants dans la littérature en Interaction Humain-Machine – IHM), la communauté scientifique de RV a maintenant des preuves qu’il existe des différences individuelles en ce qui concerne l’incarnation et, plus largement, l’expérience utilisateur [67, 121, 255]. Des différences individuelles telles que l’empathie, les traits de personnalité ou la conscience corporelle ont été étudiées par rapport à la présence et à l’incarnation.

Rôle des différences individuelles dans la présence Il existe plusieurs études qui se sont penchées sur la relation entre la présence et les traits de personnalité. Wallach *et al.* [251] a conçu une expérience avec un panel suffisamment grand (84 participants) et a constaté que la présence était significativement corrélée à l’empathie, au locus de contrôle interne et à l’imagination. Le locus de contrôle mesure la propension d’un individu à attribuer à des causes internes ou externes les événements qui se produisent dans sa vie. Les résultats de Wallach *et al.* sont conformes à plusieurs autres études, qu’il s’agisse de l’empathie [214] ou du locus de contrôle [169].

Rôle des différences individuelles dans l’incarnation et l’appropriation corporelle Il existe peu d’études qui ont directement cherché à corréliser le sens de l’incarnation avec des caractéristiques individuelles telles que les traits de personnalité. La plupart de ces études ont essayé de valider les corrélations précédemment trouvées entre ces traits de personnalité et le sens de la présence. De plus, ces études se sont principalement concentrées sur la relation entre les traits individuels et l’aspect de la possession corporelle de l’effet de réalité augmentée dans le monde réel. Tout comme la présence, une corrélation entre l’incarnation et l’empathie a été trouvée [211]. C’est également le cas pour la corrélation entre le locus de contrôle et l’incarnation [67]. Le travail de Dewez *et al.* est intéressant car il a été mené dans un environnement immersif virtuel et a essayé d’explorer autant de facteurs prédictifs que possible. Par exemple, ils n’ont pas trouvé de corrélation entre les traits de personnalité et l’incarnation, même si les traits de personnalité et la présence étaient corrélés. Il est également pertinent de dire que le locus de contrôle, dans le travail de Dewez *et al.*, était corrélé avec la composante de l’agentivité, et non du sentiment d’appropriation.

Marotta *et al.* [156] ont étudié la relation entre la suggestibilité sensorielle et l’appropriation à travers le paradigme de la RHI. La suggestibilité sensorielle est une mesure qui quantifie la façon dont une personne réagit aux informations sensorielles. Cette suggestibilité sensorielle est mesurée au travers d’un questionnaire nommé *Sensory Suggestibility Scale (SSS)*. Marotta *et al.* ont trouvé que la suggestibilité sensorielle était en effet corrélée au sentiment d’appropriation. Il est intéressant de noter qu’ils ont conçu leur étude en suivant un protocole inter-sujets et ont catégorisé les participants en deux groupes en utilisant leur score de suggestibilité sensorielle.

2.4 Haptique et sens du toucher

Nous avons vu dans les sections précédentes de cette revue de la littérature les notions fondamentales pour décrire les expériences de réalité virtuelle : la notion d’avatar, la notion d’expérience utilisateur. Nous avons aussi vu que la multisensorialité, et particulièrement l’intégration visuo-haptique, est une des composantes essentielles sur lesquelles la recherche doit se porter dans le but d’améliorer l’expérience des utilisateurs en EVI. Dans cette revue, et plus largement, dans notre manuscrit, nous nous limiterons à l’étude du sens du toucher, nommé haptique. Nous essaierons de définir en premier lieu ce qu’est l’haptique, au sens physiologique du terme, que l’on nommera haptique physiologique (*human haptics*). Il sera ensuite question des formes de retour haptique et les dispositifs qui peuvent être utilisés pour simuler un retour haptique. Cela nous permettra de considérer le retour haptique au travers du prisme de l’interaction entre l’utilisateur et son environnement. Nous verrons enfin comment le retour haptique est mis en œuvre en EVI sur des problématiques d’expérience utilisateur.

2.4.1 Sens du toucher chez l'humain

L'haptique réfère, au sens le plus large, à tout ce qui concerne le sens du toucher. Le sens du toucher, chez l'humain, est constitué de l'ensemble des sous-systèmes cognitif, moteur, sensoriel et mécanique. Les mains jouent un rôle prédominant dans le sens haptique : elles comportent environ 40% des mécanorécepteurs cutanés [253]. Une main humaine est composée d'un ensemble de dix-neuf os (sans compter les huit os du poignet), connectés par autant d'articulations sans frottements, le tout étant recouvert de tissus mous et de peau. Les os sont reliés à une quarantaine de muscles au travers de tendons. Cet ensemble compose la structure mécanique de la main, proposant vingt-deux degrés de liberté, et est équipé d'un système sensoriel complexe, dont les terminaisons nerveuses se trouvent au niveau de la peau, des articulations, des tendons ou des muscles. L'utilisation de nos mains pour des tâches de manipulation ou d'exploration demande l'utilisation simultanée des différentes propriétés de la peau et des tissus sous-cutanés, notamment au niveau des doigts, et des capacités motrices et sensorielles de la main [230].

Il est possible de classer en deux catégories les informations sensorielles perçues par le cerveau lors du contact entre la main et un objet.

La première catégorie va contenir les *informations tactiles*, qui vont découler des réponses des mécanorécepteurs de la peau (des informations cutanées) et décrire la perception du contact avec l'objet. Il existe quatre types de mécanorécepteurs différents, qui vont permettre la perception de sensations différentes :

- la pression mécanique légère, comme les vibrations ou les mouvements, au travers des *corpuscules de Meissner*
- la pression, les vibrations haute fréquence et la douleur, au travers des *corpuscules de Pacini*
- les informations tactiles fines de pression, de forme et de position grâce aux *disques de Merkel*
- la pression et les informations liées à l'étirement de la peau, avec les *corpuscules de Ruffini*

Nous avons mentionné le fait que la main, chez l'homme, était plus développée que d'autres parties du corps en termes de perception haptique. Les différents récepteurs propres au toucher sont effectivement inégalement répartis sur le corps humain, qui privilégie certaines zones pour les interactions liées au toucher. Nous avons cité les mains, mais les lèvres jouent aussi un rôle important, pour le contact avec les aliments. Le neurologue Penfield a représenté visuellement le corps humain, en proportionnant chaque partie en fonction de sa surface respective dans le cortex moteur. Cela a abouti à la représentation désormais célèbre de l'*Homonculus de Penfield*, présentant une hypertrophie des mains, des lèvres et de la langue, et une atrophie du reste du corps (Figure 2.3).



FIGURE 2.3 – L'Homunculus de Penfield.

La seconde catégorie va contenir les informations *kinesthésiques*. Ces dernières correspondent à la sensibilité du mouvement des membres et à la sensibilité des forces qui y sont associées [105]. Ces informations kinesthésiques sont transmises au travers d'un mécanorécepteur, le fuseau neuromusculaire, constitué de fibres musculaires modifiées, disposées parallèlement aux fibres musculaires, et sensibles à leur élongation. Il convient aussi de présenter la notion de *proprioception*, qui est parfois entendue comme quasi-synonyme de la kinesthésie [233]. La proprioception désigne les informations sensorielles relatives à l'état global du corps humain, y compris les informations cutanées et kinesthésiques [177]. Elle peut être comprise aussi comme la perception profonde de la position de notre corps et de nos membres. Nous ferons donc la distinction par la suite entre kinesthésie, comme perception des mouvements et des efforts, et proprioception, comme perception de la position.

Il convient de préciser un point important : si en théorie, il est possible d'isoler les informations tactiles des informations kinesthésiques en pratique, les deux formes d'informations sont présentes simultanément dans des tâches actives (d'exploration, de manipulation, etc) [139].

Notre classification dichotomique des sensations haptiques, entre tactile et kinesthésie, n'est pas tout à fait exacte. Le système vestibulaire, situé dans l'oreille interne, est l'organe responsable de l'équilibre, et de la perception du mouvement et des accélérations de la tête. Il est parfois considéré comme une source d'informations haptiques différente des sources tactiles et kinesthésiques [144]. Nous considérons cependant que ces informations vestibulaires peuvent être rapportées à la perception profonde de la position du corps et ses mouvements, et donc à la proprioception.

Ces canaux informatifs sensoriels, qu'ils soient tactiles ou kinesthésiques, vont ainsi servir à transmettre les informations haptiques lors d'expériences interactives intégrant le sens du

toucher. La compréhension profonde des mécanismes participant à la perception de ces informations haptiques, du côté humain, dépasse largement le cadre de nos recherches. Néanmoins, nous nous intéresserons aux démarches permettant de reproduire et de simuler de telles informations haptiques chez des utilisateurs. La sous-section suivante cherche à catégoriser les techniques simulants le retour haptique. Nous verrons notamment qu’il existe plusieurs niveaux de complexité technologique pour intégrer le toucher aux expériences immersives.

2.4.2 Formes du retour haptique

Le retour haptique est naturellement présent à tout instant de la vie d’un être humain, et par là même, à tout moment d’une expérience immersive, que ce soit par les informations perçues au travers de la position ou des mouvements de son corps, ou avec les contacts qu’il aura avec les objets tangibles de son environnement.

Haptique actif L’haptique actif désigne les dispositifs haptiques contrôlés par un programme et nécessitant un ordinateur pour générer des stimuli qui seront transmis aux utilisateurs par le biais du dispositif, que ce soit par des moyens électroniques, mécaniques ou autres. Les dispositifs haptiques actifs font l’objet d’une sous-section de notre revue plus bas.

Haptique passif L’haptique passif désigne l’ensemble des techniques cherchant à fournir un retour haptique en utilisant les propriétés physiques inhérentes d’objets (non virtuels), comme leur forme, la texture de leur surface, etc [145]. Ce type de solution a l’avantage de ne pas être invasif technologiquement : il n’y a pas besoin de dispositif commandé par ordinateur.

Dans un contexte en EVI, si l’utilisateur peut marcher librement, l’absence de retour haptique pour l’environnement peut causer des décalages entre la position réelle de l’utilisateur et celle de son avatar : si l’interpénétration des objets virtuels n’est pas possible, si l’utilisateur décide de se déplacer de cinq mètres dans une direction, mais qu’un mur arrête son avatar au second, alors quand l’utilisateur reviendra à sa position initiale, il se sera décalé par rapport à son avatar. Ainsi, le principe de l’haptique passif serait ici d’arrêter l’avatar et l’utilisateur, pour éviter toute interpénétration, qu’elle soit virtuelle ou réelle. Pour ce faire, il faut utiliser des objets physiques que l’on vient positionner pour correspondre aux obstacles virtuels que l’avatar de l’utilisateur peut rencontrer. L’haptique passif peut être utilisé pour créer de nouvelles interactions, comme l’ont fait Azmandian *et al.* [16], en proposant la redirection haptique, (*haptic retargeting*). Leur technique permet de réutiliser le même objet physique, offrant le retour haptique passif, pour plusieurs objets virtuels distincts en position, en jouant sur la prédominance de la vision durant un conflit sensoriel. De récents travaux cherchent désormais à

concilier cette approche de l’haptique passif avec celle de l’haptique actif, avec des objets réels robotisés qui peuvent s’adapter à l’environnement et aux interactions de l’utilisateur [32]. Ces dispositifs haptiques sont basés sur la *rencontre* de l’utilisateur et de l’environnement physique (*encounter-type haptic feedback*). Ces travaux ouvrent de nouvelles perspectives, permettant potentiellement d’adapter les environnements quotidiens des utilisateurs à des EVIs intégrant un retour haptique adaptable et varié. Nous nous référons à la revue de Mercado *et al.* [162] pour plus de détails sur ces dispositifs haptiques.

Pseudo-haptique Le pseudo-haptique désigne l’ensemble des techniques qui permettent de créer l’illusion de sensations haptiques en EVI, sans avoir recours à des dispositifs haptiques physiques [136]. Souvent, les retours pseudo-haptiques reposent sur la malléabilité de la perception humaine. Cela peut être fait en utilisant des stimuli visuels, sonores ou vibrotactiles qui sont synchronisés avec l’interaction de l’utilisateur dans l’environnement virtuel. Ujitoko & Ban [245] dressent une très bonne taxonomie des différentes instances existantes de pseudo-haptiques, et des propriétés haptiques ainsi simulées : le pseudo-haptique a trouvé des applications pour répliquer la sensation de poids [69], de texture (fine ou large) [246], et de friction [137]. Il nous paraît pertinent de souligner que dans cette taxonomie, Ujitoko & Ban qualifie aussi la redirection de pseudo-haptique, sous le terme de *compliance*, d’acceptation. En effet, la redirection, comme nous avons pu la voir dans la sous-section précédente [16], repose sur l’acceptation d’informations sensorielles conflictuelles, en jouant sur la prédominance de la vision. Cela est aussi utilisé pour des applications comme la marche redirigée [82, 267], qui va jouer sur les conflits entre l’oreille interne, la proprioception et la vue. Le dispositif proposé par Achibet *et al.* [1] repose lui aussi sur l’utilisation d’un retour proprioceptif réel, basé sur la raideur d’un élastique, couplé à la manipulation du retour visuel pour faire accepter une déformation de l’avatar des utilisateurs, qui équivaut donc à un changement du schéma corporel. La mise en place d’un retour pseudo-haptique nécessite un retour sensoriel déjà présent, que l’on vient ultérieurement manipuler en exagérant ou en surajoutant d’autres informations sensorielles conflictuelles. Ce type de retour peut donc tout à fait s’intégrer en parallèle d’une implémentation d’un retour haptique passif ou actif quelconque, comme nous l’avons décrit précédemment avec l’exemple de la redirection proposée par Azmandian *et al.* [16] - ici, un retour passif couplé à du pseudo-haptique.

Ces différentes formes de retour haptique, actif, passif ou pseudo-haptique, peuvent ainsi se décliner en implémentations particulières dans le cadre de travaux de recherche, voire de dispositifs commercialisés. Nous passons en revue différents dispositifs haptiques, en catégorisant ces solutions en fonction de leurs caractéristiques principales.

2.4.3 Dispositifs haptiques

Les différents circuits sensoriels participant à l’haptique au sens large peuvent être catégorisés en deux sens principaux, que nous regroupons sous le sens kinesthésique, et le sens tactile [177, 196]. Bien qu’il existe de nombreux dispositifs haptiques permettant de générer du retour haptique, nous nous concentrerons dans cette revue de la littérature sur deux grandes familles de dispositifs, les dispositifs à retour de force, qui génèrent principalement des sensations kinesthésiques, et les dispositifs vibrotactiles, qui génèrent principalement des sensations tactiles [55, 231].

Il y a eu de nombreux travaux ces dernières années pour explorer et proposer de nouveaux dispositifs haptiques et de nouvelles méthodes d’interaction haptique pour la VR. Il existe deux grandes catégories de dispositifs haptiques, les dispositifs *ancrés* ou *portatifs*. Les dispositifs ancrés sont fixés à une table ou au sol et les dispositifs portatifs peuvent être tenus à la main ou portés sur les utilisateurs sur leur corps ou leurs vêtements [109]. Les deux sous-sections suivantes passeront en revue différents travaux proposant des dispositifs d’abord ancrés, puis portatifs. Nous nous intéresserons tout particulièrement aux interactions rendues possibles par les différents dispositifs.

Dispositifs ancrés

Les dispositifs haptiques ancrés ne peuvent pas être portés sur le corps de l’utilisateur, mais sont fixés sur une surface, comme une table ou le sol. Ils peuvent être saisissables ou tactiles, et leur espace de travail est limité en raison de leur taille ou de leurs caractéristiques fonctionnelles, tel que la présence de réservoirs d’air ou de compresseurs. En raison de leur taille et de leur poids plus importants par rapport aux dispositifs portatifs, ces dispositifs peuvent utiliser des actionneurs pneumatiques ou magnétiques pour fournir une rétroaction haptique. Il existe deux sous-catégories de dispositifs ancrés : les dispositifs saisissables, dont l’interface est attrapable par l’utilisateur (comme un bras à retour d’effort [159]), et les dispositifs tactiles, que l’on vient toucher directement pour interagir (comme une table ou un écran).

Dispositifs ancrés saisissables Les systèmes haptiques qui peuvent être saisis sont généralement des dispositifs kinesthésiques, mais certains peuvent offrir une rétroaction cutanée par vibration via un outil tenu en main. Des exemples commerciaux connus de dispositifs haptiques ancrés (à poser sur un bureau ou une table par exemple) à saisir sont le système *TouchX* (3D Systems, États-Unis, anciennement Phantom de Sensable Technologies [236]) et *Omega* (*Force Dimension*, Suisse). Ces types de dispositifs haptiques sont très précis et peuvent fournir des efforts très réalistes, avec un nombre de degrés de liberté élevé. On peut notamment citer les

travaux de Quek *et al.* [190], dans lesquels ils ont présenté un dispositif haptique basé autour d’un stylet *Skin Stretch*, qui venait augmenter le degré de liberté du retour haptique d’un bras à retour d’effort *TouchX*.

Dispositifs ancrés tactiles Les dispositifs ancrés tactiles sont des affichages interactifs qui permettent à l’utilisateur d’interagir avec des objets affichés sur un écran et qui fournissent généralement un retour tactile au travers de vibreurs, d’électrodes, ou avec des ultrasons [111]. Ces dispositifs visent à être intégrés dans des contextes interactifs qui ne nécessitent pas un degré de précision élevé, comme pour certaines interfaces utilisateurs, des expériences artistiques fixes, ou la rééducation [259]. Nous nous référons à la revue de littérature par Basdogan *et al.* [23] sur les dispositifs haptiques surfaciques, qui couvrent aussi les différents domaines d’application de ces dispositifs.

Dispositifs portatifs

Parmi les dispositifs portatifs, il existe plusieurs types de dispositifs haptiques, tels que des gants haptiques ou les manettes. Il convient alors de faire la différence entre les dispositifs haptiques tenus (comme des manettes), et les dispositifs portés (comme les gants ou les vestes). Cette sous-section explore certains types de dispositifs portatifs, et plusieurs exemples d’interactions rendues possibles. Pour des revues sur d’autres dispositifs haptiques, nous renvoyons aux revues plus complètes concernant les gants haptiques [186] et les systèmes haptiques portés [178]. Les dispositifs portatifs, qu’ils soient portés ou tenus, sont de plus en plus populaires dans les cas d’utilisation de la VR, car ils permettent une plus grande liberté de mouvement et d’interactions.

La plupart des équipements de VR grand public incluent déjà un ou deux contrôleurs, c’est-à-dire des dispositifs tenus, en tant que moyens d’interactions avec les EVIs. Ces contrôleurs incluent généralement une forme de retour haptique vibrato-tactile, mais il est toujours limité à un vibreur situé à l’intérieur du cadre pour le faire résonner [248]. En fin de compte, les contrôleurs grand public offrent actuellement un retour haptique limité. Des travaux de recherche plus récents ont tenté d’enrichir le retour haptique pour les dispositifs tenus. Certaines études ont essayé de rendre la forme à travers des dispositifs haptiques portables [90, 264]. X-Rings, conçu et développé par Gonzalez [90], est particulièrement intéressant en raison de la forme de l’appareil : il imite la forme des contrôleurs existants et simule la forme grâce à la couche déformable de la poignée, qui peut s’étendre ou se comprimer. Les auteurs de cette étude ont montré que les participants étaient en mesure d’associer la perception visuelle des objets virtuels à la forme simulée par l’appareil.

Les dispositifs pour l’interaction de saisie représentent également une grande partie des dispositifs haptiques proposés par les études de recherche, en particulier pour les dispositifs portables [33, 152], mais aussi pour les dispositifs tenus en main [2, 51]. Le prototype CLAW [51] est particulièrement pertinent dans cette revue car avec ce prototyp, les auteurs ont tenté de mettre en œuvre plusieurs interactions haptiques via un seul dispositif, en combinant le retour haptique vibrato-tactile et le retour de force. Certains dispositifs portables conçus par des chercheurs ont proposé des dispositifs cylindriques, intégrant soit un retour haptique vibrato-tactile [39], un retour électrotactile [120] ou un retour cutané [47]. Kajimoto [120] a proposé un dispositif portable cylindrique qui a intégré à la fois la détection capacitive et le retour tactile, grâce à des électrodes couvrant toute la surface du cylindre. C’est, à notre connaissance, le premier contrôleur qui a combiné le retour tactile et la détection capacitive, avant de commencer à être utilisé sur des équipements grand public [248]. Dans l’expérience, ils ont montré que les motifs circonférentiels sur le dispositif permettaient aux participants de reconnaître la direction des stimuli. Bien que ce prototype ait inclus une forte densité d’électrodes, il était limité aux stimulations électrotactiles, qui peuvent être moins acceptées que le retour haptique vibrato-tactile [232], et n’a pas été utilisé dans un contexte écologique pour montrer son utilisation.

Nous avons pu voir dans cette sous-section, il existe un grand nombre de catégories distinctes de prototypes haptiques, issues de travaux de recherche s’intéressant à l’intégration d’un retour haptique en EVI. Ces prototypes facilitent, voire rendent possible des formes d’interactions - haptiques - entre l’utilisateur et l’EVI. Dans notre revue des sous-sections précédentes, nous avons souvent évoqué, au même titre que le prototype, la forme du retour, et l’interaction que le prototype cherchait à améliorer, ou à simuler. Il nous paraît judicieux d’introduire ici la notion de solution haptique.

Une solution haptique est une implémentation particulière d’une (ou plusieurs) forme de retour haptique (kinesthésique, tactile, voire les deux), dans le but d’enrichir une interaction haptique. Le ternaire retour-interaction-solution, pour l’haptique, a été proposé par Bouzbib [32], et permet de mieux mettre en évidence les différentes problématiques liées à l’intégration de l’haptique en EVI. Le retour haptique en EVI, en termes de capacité sensorielle, constitue l’ensemble des sensations perçues par un utilisateur, produites par une solution haptique (ou un dispositif), à la suite d’une interaction. Le retour haptique, l’interaction haptique, et la solution haptique sont ainsi trois facettes distinctes mais liées de la même problématique, celle de l’intégration du sens du toucher pour l’enrichissement des expériences immersives. Cette compréhension du retour et de l’interaction haptique est très proche, à nos yeux, de la définition de la *technique d’interaction* proposée par Nigay & Coutaz [172], dans laquelle une technique d’interaction est composée d’un langage (ici le retour haptique) et d’un système (ici la solution). Si nous avons pu parler du sens du toucher au travers de sa dimension physiologique, chez l’humain, des solutions haptiques, au travers des propositions nombreuses de dispositifs, et des interactions qu’elles rendent possibles, nous avons peu parlé de l’interaction, et de l’interaction haptique, en tant que telles.

Le fait d'interagir avec un environnement, comme nous avons pu brièvement le voir dans notre introduction, est une composante essentielle du rapport que l'homme entretient avec le monde, et permet en grande partie la construction et l'intellection de la réalité, que celle-ci soit tangible, ou virtuelle. En considérant une interaction comme la détermination réciproque du comportement de deux entités au cours du temps [110], une interaction haptique correspondra donc à la rencontre d'un utilisateur et d'une solution haptique, capable d'informer l'utilisateur au travers d'un retour haptique, au cours du temps, de façon à ce que l'utilisateur modifie en retour l'état du système - de la solution haptique donc.

La description de toutes les technologies haptiques existantes dépasse le cadre de notre travail et, pour plus d'informations, nous renvoyons à l'examen approfondi des technologies haptiques par Culbertson *et al.* [55], des gants haptiques par Perret *et al.* [186], et des dispositifs portatifs par Pacchierotti *et al.* [178], et plus largement, à la base de données Haptipedia [210].

2.4.4 Interaction haptique

Lors de notre introduction, nous avons pu esquisser les différentes problématiques liées à l'interaction en général. Une interaction se rapporte à deux entités qui vont s'influencer, et déterminer leur comportement respectif au cours du temps [110]. Nigay & Coutaz [172] ont conceptualisé les techniques d'interaction comme la rencontre entre une solution, solution haptique dans notre contexte, et un langage d'interaction, qui va définir un ensemble de symboles pour transmettre du sens. La construction de langages interactifs et la transmission de sens sont réalisés selon trois niveaux : les niveaux lexical, syntaxique, et sémantique. Le niveau lexical correspond au vocabulaire du langage, soit ses mots ou ses briques constitutives. Le niveau syntaxique correspond à l'agencement des briques lexicales pour former des phrases. Enfin, le niveau sémantique représente le sens à transmettre à l'utilisateur porté dans l'interaction.

Dans le monde réel, les utilisateurs interagissent quotidiennement, avec la seule contrainte de leur corps biologique, avec les objets qui les entourent. Il est intéressant de noter que la majorité des interactions qui impliquent le toucher se fait grâce aux mains. La rencontre entre un objet du quotidien et un utilisateur débouchant sur une interaction suit la théorie de l'*affordance*, proposée par Gibson [86], selon laquelle les objets *signifient* par leur forme et leur représentation les possibilités d'interaction qu'ils proposent, ce que Gibson a nommé des *signifiers*. Une *affordance* représente les possibilités d'interaction entre deux entités, et les *signifiers* les propriétés, perçues ou non, qui permettent de découvrir les possibilités d'interaction.

Interactions haptiques en EVI

En passant d’interactions situées dans la réalité à des interactions haptiques en EVI, se rajoute une couche technologique qui va médier l’interaction. En effet, la majorité des casques de réalité virtuelle est vendue avec des manettes. Ces manettes ont pour but de faciliter l’interaction en EVI, mais vont aussi, d’une certaine façon, la contraindre. Les manettes deviennent alors un proxy pour les mains de l’utilisateur, et, par suite, le médium unique (ou principal) d’interaction haptique ; elles deviennent ce qu’on appelle en anglais et en programmation un *god object*, un objet qui possède trop de fonctionnalités. Nous considérons ces *god-objects* en réalité virtuelle comme des outils, dans lesquels les utilisateurs peuvent alors se projeter, et élargir leur schéma corporel (voir la section 2.3.4). Les solutions haptiques qui sont basées sur ce mode d’interaction sont nombreuses. Nous avons pu en évoquer certaines dans les sous-sections précédentes. Ces solutions haptiques proposent ainsi des interfaces tenues en main par les utilisateurs, remplaçant ou enrichissant le rôle des manettes en EVI [90, 108, 120].

Il est aussi possible de reproduire des interactions plus proches de la réalité, dans lesquelles l’utilisateur garde les mains libres, et peut interagir avec des objets présents dans la réalité et l’EVI. Nous avons déjà évoqué dans les sous-sections précédentes différentes solutions haptiques qui permettent ce type d’interactions, pour percevoir des informations tactiles [65] ou kinesthésiques [16]. Ces interactions, qui se font donc à partir du toucher réel, peuvent être assimilées à des interactions en manipulation directe. La manipulation directe en réalité virtuelle est définie par Bryson [35] comme la capacité d’un utilisateur immergé en EVI à contrôler des objets faisant partie de l’EVI de façon directe et naturelle, de la même façon que l’on manipule des objets dans la réalité. Cette compréhension de la manipulation directe en RV est donc différente de la manipulation directe proposée par Schneiderman [216].

Ainsi, la majorité des interactions en haptique passif sont des formes de manipulation directe. À l’inverse, dès que le dispositif haptique est tenu en main, à l’instar d’une manette, l’interaction est médiée au travers d’un *god-object*. Les interactions haptiques médiées au travers d’un *god-object* sont, à nos yeux, les interactions les plus répandues aujourd’hui en RV, pour la raison évoquée plus haut : les casques vendus au grand public sont toujours assortis de manettes. Cela les rend, à nos yeux, dignes d’un intérêt tout particulier. La majorité des manettes de RV grand public intègre déjà une forme de retour haptique, sous la forme d’un vibreur unique, permettant donc un retour vibrotactile. Le retour vibrotactile, s’il est moins riche que le retour de force, a néanmoins des propriétés intéressantes.

Illusion vibrotactile et spatialisation

Parmi les trois catégories principales du retour haptique que nous avons vues dans la section 2.4.2, le retour pseudo-haptique est particulier : il repose sur la prédominance d'informations visuelles aux dépens d'autres informations, comme la proprioception, comme cela a été mis en lumière par Boban *et al.* [29]. La perception haptique est, *in fine*, une synthèse et une interprétation de notre cerveau de tous les signaux qu'il reçoit et de toutes les actions que nous effectuons (ou voulons effectuer) [86]. Il y a donc un certain jeu, ou décalage, entre les signaux produits par le dispositif haptique et la résultante perçue par l'utilisateur. Les illusions qui en résultent existent pour les informations proprioceptives comme pour les informations vibrotactiles. Nous nous intéressons ici à l'utilisation d'un retour vibrotactile pour transmettre ou générer l'illusion de spatialisation, par le mouvement ou la position. Il existe trois illusions principales pour susciter un tel effet : l'effet de *saltation* [237], les motifs tactiles dynamiques apparents [116], et l'effet de *funneling* [6, 22].

Saltation et motifs tactiles dynamiques apparents L'effet de saltation, également connu sous le nom d'illusion cutanée du lapin, est une illusion tactile évoquée en tapotant deux ou plusieurs régions distinctes de la peau en succession rapide [84, 237]. Dans cette illusion, les différents tapotements sont ressentis comme un train de tapotements discontinus et discrets qui se déplacent d'un point de tapotement à l'autre. Il a été démontré que l'effet de saltation fonctionne également en 2 dimensions [130].

Les motifs tactiles dynamiques apparents sont un autre type d'illusions tactiles qui s'appuient sur le chevauchement des temps d'actionnement d'actionneurs proches pour évoquer la sensation de mouvement [115]. Cette illusion dépend de ce que l'on appelle l'asynchronie de déclenchement du stimulus (*Stimulus Onset Asynchrony – SOA*), c'est-à-dire le temps qui s'écoule entre deux actions consécutives.

La saltation et les motifs tactiles dynamiques apparents peuvent recréer l'illusion du mouvement pour un retour vibrotactile avec des motifs préenregistrés. Cependant, ces effets ne peuvent pas être utilisés pour l'exploration active de la RV en temps réel, car les mouvements des utilisateurs sont libres et sans contrainte.

Funneling Parmi ces illusions haptiques connues, il en existe une qui nous intéresse tout particulièrement, l'illusion des *vibrations fantômes*, aussi connue sous le nom de *funneling*. Cette illusion repose sur la spatialisation des vibrations : une vibration est dite spatialisée lorsqu'elle implique plusieurs actionneurs, activés successivement, pour transmettre des informations spatiales ou de mouvement aux utilisateurs. L'effet de *funneling* repose sur la spatialisation des vi-

brations. Cet effet est une illusion au cours de laquelle plusieurs vibrations, provenant de vibreurs différents, sont perçues comme une unique vibration dont la position se situe entre les vibreurs. En pratique, l’effet de *funneling* a montré son efficacité sur différentes parties du corps, comme les avant-bras [6], le poignet [99], le torse [129], ou encore la tête [123]. Une étude particulière a fait référence aux vibrations mises en œuvre dans leur prototype *SemFeel* [261] comme *retour vibrotactile avec information sémantique*. Nous appelons ainsi vibrations sémantiques, en nous basant sur la définition citée précédemment, des vibrations qui transmettent des informations significatives pour un système selon un langage interactif donné. Pour une revue exhaustive sur l’illusion du *funneling*, nous nous référons à la revue de Park *et al.* [181].

Cohérence de l’interaction La conception d’interactions, et particulièrement d’interactions haptiques doit mettre l’expérience de l’utilisateur au cœur de la réflexion [110]. La deuxième section principale de cette revue s’est penchée sur la notion d’expérience utilisateur en EVI, et particulièrement certains travaux qui portent sur l’importance de la dimension *écologique* de l’expérience : l’amélioration des propriétés techniques/technologiques d’un EVI améliore l’immersion [222], et devrait ainsi augmenter l’expérience de l’utilisateur. Mais dans les faits, pousser le réalisme d’une ou certaines caractéristiques de l’EVI sans améliorer les autres peut être néfaste pour l’expérience de l’utilisateur. Cela s’illustre notamment, pour l’aspect visuel, avec le phénomène de la vallée de l’étrange [167]. Cette notion a été étudiée dans le cadre d’interaction haptique, par Berger *et al.* [25], qui propose une extension avec la *vallée de l’étrange du toucher*. Ces derniers avancent que le retour ressenti lors de l’interaction haptique doit être en accord avec les autres retours sensoriels (visuel, auditif) pour que cela améliore l’expérience de l’utilisateur.

Nous voyons donc qu’il existe des relations particulières entre l’implémentation du retour haptique en EVI et l’expérience de l’utilisateur. Nous nous intéressons dans la sous-section suivante aux liens mis en évidence entre retour haptique et incarnation virtuelle.

2.5 Haptique et expérience utilisateur

Dans la section consacrée à l’incarnation, nous avons pu évoquer le paradigme de la RHI, qui, historiquement, met en évidence le rôle crucial des stimulations visuotactiles, donc haptiques, sur l’émergence du sentiment d’appropriation corporelle [30]. L’expérience utilisateur, telle que nous l’avons définie dans la section 2.2, est largement acceptée comme étant une notion contextuelle et subjective, dépendant à la fois de l’environnement dans lequel se déroulent les interactions, et de l’état psychophysique dans son ensemble - émotionnel, physique, etc - de l’utilisateur. Les facteurs influençant l’expérience utilisateur sont donc multimodaux, et in-

cluent par là même tous les aspects techniques et technologiques de l’environnement, y compris le sens du toucher. Pourtant, nous avons pu voir avec la section précédente, portant sur les différentes modalités du retour haptique, que celui-ci n’était, en lui-même, pas unifié, et qu’il existe de nombreuses façons de le concevoir et de l’intégrer. L’intégration haptique en EVI demande une meilleure compréhension des liens théoriques et pratiques qui existent entre retour haptique et expérience utilisateur, que l’on nommera, à l’instar de Kim & Schneider [127], expérience haptique (*haptic experience*). Kim & Schneider définissent l’expérience haptique comme « un ensemble distinct de critères qualitatifs combinant des critères d’utilisabilité et des facteurs expérientiels qui sont les considérations les plus importantes pour les personnes interagissant avec une technologie qui fait appel à un ou plusieurs sens du sens du toucher, éventuellement dans le cadre d’une expérience multisensorielle » [Traduction] [127]. Nous nous intéressons, dans cette section, à la définition des dimensions qui composent l’expérience haptique, puis aux liens qui existent entre haptique et expérience, et particulièrement l’incarnation.

2.5.1 Modèle de l’expérience haptique

La définition de l’expérience haptique avancée par Kim & Schneider [127] implique une décomposition en deux dimensions principales distinctes : les critères d’utilisabilité, et les facteurs expérientiels. Les critères d’utilisabilité correspondent aux facteurs pratiques et concrets nécessaires pour une expérience haptique :

- Utilité - le retour haptique est-il utile ?
- Causalité - puis-je identifier la cause du retour haptique ?
- Cohérence - le retour est-il fiable ?
- Saillance - le retour est-il suffisamment perceptible ?

Ces critères d’utilisabilité sont liés à la performance et aux capacités de l’utilisateur dans le but de réaliser des tâches. Ils évaluent le sentiment de l’utilisateur sur le retour haptique ou sur la solution haptique en elle-même. On peut notamment retrouver ces critères d’utilisabilité, en partie, dans d’autres métriques cherchant à évaluer l’expérience utilisateur, comme le Questionnaire de l’Expérience Utilisateur (UEQ) [135], avec les dimensions d’Efficacité, de Perspicacité, et de Fiabilité.

Les facteurs expérientiels, quant à eux, couvrent les différents aspects liés, non plus à la solution haptique, mais à la qualité et au plaisir ressenti par l’utilisateur suite à son interaction avec la solution haptique. Ces facteurs expérientiels, qui vont influencer l’expérience de l’utilisateur, peuvent se décomposer en 5 composantes :

- Harmonie - le retour haptique est-il cohérent avec mes autres sens ?
- Autotélisme - le retour est-il agréable par lui-même ?

- Expressivité - y a-t-il des distinctions entre les effets ?
- Immersion - est-ce que je me sens immergé ?
- Réalisme - le retour paraît-il réaliste ?

De même que pour les critères d'utilisabilité, d'autres modèles de l'expérience utilisateur évaluent certaines composantes des facteurs expérientiels. C'est à nouveau le cas pour le Questionnaire de l'Expérience Utilisateur [135], avec la Stimulation et l'Excitation, mais aussi le questionnaire de la présence, de Witmer & Singer (IPQ) [255], qui a une sous-partie consacrée à l'immersion.

2.5.2 Haptique et incarnation virtuelle

Un certain nombre d'études ont montré les avantages et les usages du retour haptique en RV, comme les études sur la présence [83, 133], la performance [133] et l'apprentissage [142]. Cependant, seules quelques études, détaillées ci-après, s'intéressent au rôle de l'haptique sur l'émergence du sentiment d'incarnation virtuelle [52, 79, 134, 192].

Les liens entre l'intégration multisensorielle, et particulièrement le retour haptique, et l'émergence du sentiment d'incarnation ont été mis en évidence dès les premières études sur le sentiment d'incarnation. En effet, dans le paradigme de la RHI, la condition nécessaire pour susciter un sentiment d'appropriation envers la main en caoutchouc est une stimulation visuo-tactile synchrone en simultané sur la main factice et la main biologique. Ces travaux ont été, comme nous l'avons déjà évoqué dans la partie consacrée à l'incarnation, répliqué en EVI [203]. De même, il existe symétriquement une influence de l'avatar et la suite, de l'incarnation, sur la perception du retour haptique [91].

Le travail effectué par Krogmeier *et al.* [134] est une étude multidimensionnelle qui a montré une corrélation positive entre l'incarnation et le retour vibrotactile. Les auteurs n'ont pas tenu compte du retour de force et la mesure de l'incarnation autodéclarée était limitée à l'appropriation corporelle. Ils ont utilisé un gilet vibrotactile pour simuler une collision entre des participants qui restaient immobiles tandis que des agents virtuels passaient devant eux et se heurtaient à leur représentation virtuelle (voir Figure 2.4). Ce type de retour haptique, qui remplace une force – un petit choc ici – par une vibration, peut être considéré comme un retour symbolique. Les participants n'ont pas pu interagir activement avec l'environnement pendant la tâche principale pour faire l'expérience du retour haptique. Par contre, dans cette étude, les auteurs ont fait varier la pertinence du retour vibrotactile, en termes d'intensité et de synchronicité. Ils ont ainsi pu montrer que le retour vibrotactile, quelle que soit sa mise en place (cohérent, incohérent temporellement, etc), permettait d'augmenter le sentiment d'incarnation.

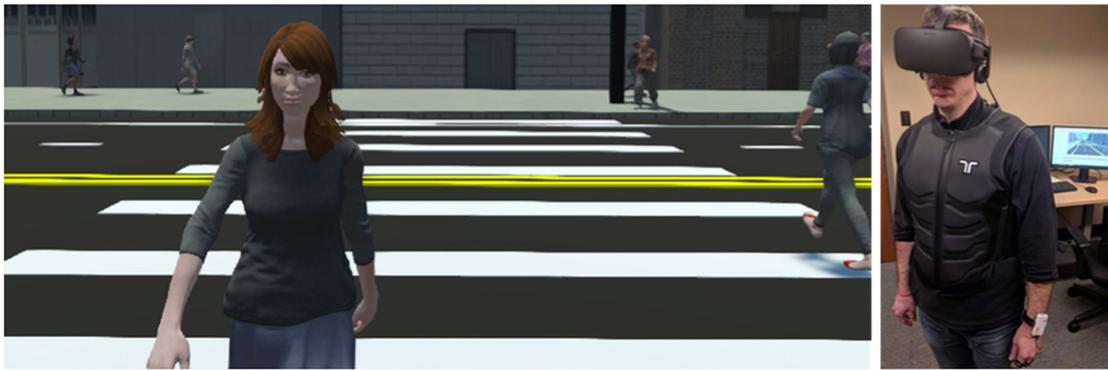


FIGURE 2.4 – L’environnement virtuel utilisé dans le cadre de l’étude de Krogmeier *et al.* (à gauche) et un participant équipé du casque de RV, la veste haptique et un capteur de réponse cutanée galvanique (à droite) [134].

Deux autres études se sont intéressées aux problématiques de l’incarnation et du toucher, mais n’ont pas essayé de comparer différentes formes de retour haptique, mais ont utilisé un bras à retour de force (dispositif ancré) qui permettait une interaction active avec l’environnement [52, 192]. Raz *et al.* [192] ont recréé le paradigme de la RHI/VHI avec un retour haptique dans des mouvements passifs et actifs, en ajoutant également une condition d’autostimulation. Cette étude n’a pas exploré les composantes de l’incarnation autres que l’appropriation. En ajoutant l’audio, Choi *et al.* [52] ont montré que l’intégration multisensorielle pouvait conduire à un sentiment plus fort d’appropriation corporelle, et que ce sentiment d’appropriation était le plus fort durant des mouvements actifs. Dans leur étude, ils ont demandé aux participants de jouer activement du xylophone avec un retour audio, visuel et tactile, tout en étant immergés à travers des lunettes stéréoscopiques. La notion de mouvement actif peut se rapporter au concept d’exploration active (*active exploration*) [138], proposé par Lederman & Klatzky. Pour Lederman & Klatzky, les procédures exploratoires permettent de ressentir différentes propriétés tactiles des objets avec lesquels l’on interagit. Ainsi, il est possible que l’exploration active permette de renforcer l’effet positif du retour haptique sur le sentiment d’incarnation. Ces deux études, en intégrant un retour de force à 3 degrés de liberté (DoF) pour simuler des objets tangibles, ont proposé un retour haptique écologique.

Enfin, les travaux de Fröhner *et al.* [79] donnent un bon aperçu de la manière dont le retour haptique simulé grâce à un dispositif portable peut augmenter l’incarnation. Dans leur article, les auteurs ont fourni un retour de force et vibrotactile par le biais de *timbles*, avec une force normale sur deux doigts pour simuler le retour de force, créant ainsi un gant haptique portable. Bien que le retour de force dans leur étude soit plus écologique que le retour vibrotactile, il reste limité dans la mesure où il n’offre que 1-DoF. Ils ont évalué les trois principales sous-composantes de l’incarnation et ont constaté une supériorité significative du retour de force et du retour vibrotactile par rapport à l’absence de retour haptique. Cette supériorité s’explique

principalement par les différences de localisation de soi. Ils ont créé un environnement non totalement immersif, où les sujets n'étaient pas colocalisés avec la représentation virtuelle de leur main, permettant ainsi une dérive proprioceptive.

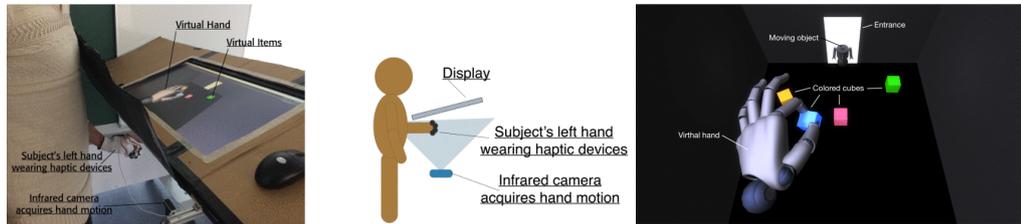


FIGURE 2.5 – Le dispositif expérimental utilisé dans l'étude de Fröhner *et al.* avec un participant interagissant avec le système (à gauche), une représentation schématique du dispositif (au centre), et l'environnement virtuel mis en place (à droite) [79].

En résumé, peu d'études ont porté sur le retour haptique et sa relation avec l'incarnation [52, 79, 134, 192]. Aucune d'entre elles n'a mis en œuvre à la fois le retour de force et le retour tactile pour étudier l'incarnation dans un EVI complet. Il n'est toujours pas clair si, dans un contexte donné, il existe une supériorité d'un type particulier de retour haptique concernant l'incarnation. L'étude de Fröhner *et al.* [79], tout en proposant à la fois un retour de force et un retour vibrotactile, n'a pas trouvé de différence significative entre les deux types de retour haptique, et n'a pas fait de distinction claire entre un retour plus écologique et l'autre plus symbolique. Ainsi, il reste à savoir si, dans un contexte particulier, il existe un type de retour haptique qui est supérieur aux autres en termes d'incarnation, particulièrement sous le prisme de la cohérence du retour. Nous traiterons de cette question de recherche précise dans notre quatrième chapitre.

Ces considérations sur les liens entre retour haptique et incarnation clôturent la section de notre revue consacrée à l'haptique. Comme nous avons pu le voir, la notion de retour haptique comporte plusieurs dimensions (en termes de perception humaine et physiologique, de conception d'interactions et de solution techniques et technologiques, et d'impact sur l'expérience utilisateur). Lorsque l'on considère le retour haptique sous le prisme de l'expérience haptique des participants, toutes ces dimensions s'interconnectent [127].

Dans la dernière partie de notre revue, nous nous intéresserons aux méthodologies expérimentales étudiant le sentiment d'incarnation en EVI.

2.6 Méthodologie expérimentale

Lors de la conception d'un nouveau dispositif ou d'une nouvelle interaction, il est nécessaire de valider le dispositif (ou l'interaction), et de le comparer avec les solutions préalablement

existantes pour pouvoir évaluer et valider la conception. Au-delà des validations techniques, il est nécessaire d'effectuer des études empiriques en laboratoire pour récolter des données sur des participants. La conception d'une expérience contrôlée nécessite de déterminer le nombre de variables indépendantes à prendre en compte, et le nombre de niveaux pris par chacune d'elles. Pour toute variable indépendante impliquée, l'expérimentateur doit choisir entre un plan inter-sujets, où chaque participant n'est exposé qu'à un seul niveau, et un plan intra-sujets, où chaque participant teste chaque niveau. Un plan inter-sujets est nécessaire pour étudier les différences individuelles. Par exemple, l'effet du sexe ou de l'âge sur une variable dépendante, et un plan intra-sujets est nécessaire pour étudier les effets de l'apprentissage ou de la fatigue sur une variable indépendante. Cependant, la plupart du temps, le choix d'un plan expérimental n'est pas fixe et il est décidé par le chercheur.

Chaque modèle présente ses propres avantages et inconvénients. Les plans d'expérience inter-sujets évitent les facteurs de confusion tels que l'apprentissage, la fatigue et la frustration, puisque chaque participant est exposé à un seul niveau. Le temps nécessaire pour réaliser l'expérience est également plus court que dans le cas d'un plan intra-sujets. Cependant, les plans inter-sujets sont basés sur des comparaisons entre différents groupes de participants pour étudier l'effet d'une variable indépendante. Les résultats peuvent être affectés par les différences individuelles, ce qui rend plus difficile la détection de différences significatives et réduit la puissance de l'analyse statistique. Cela augmente également les chances de détecter des différences qui peuvent être attribuées à des différences entre les groupes plutôt qu'à des différences entre les conditions, lorsque les groupes sont trop petits et non homogènes (*e.g.* vitesse de frappe lors de la comparaison de différentes techniques de frappe [140]). Pour réduire l'impact des différences individuelles, les plans d'expériences inter-sujets nécessitent comparativement des groupes plus grands que les plans d'expériences intra-sujets (m fois plus grands si m est le nombre de niveaux d'une variable indépendante). Les plans d'expérience mixtes peuvent être utilisés lorsqu'on considère deux variables indépendantes ou plus, où une ou plusieurs variables indépendantes sont administrées à l'intérieur des sujets et les autres entre les sujets, mais cela dépasse le cadre de ce travail.

2.6.1 Protocoles expérimentaux pour l'étude de l'incarnation

Nous avons examiné 40 études de la littérature concernant l'incarnation virtuelle, pour mieux comprendre quand et comment chaque protocole expérimental est utilisé (voir Table 2.1). Il est important de souligner qu'il ne s'agit pas d'une revue systématique de la littérature, mais plutôt d'une vue d'ensemble des modèles expérimentaux en matière d'incarnation dans la RV.

À part quelques-uns qui n'ont pas eu le choix de leur conception, il est intéressant de noter que les autres n'ont pas fourni les motivations pour le choix de leur protocole expérimental. En

TABLE 2.1 – Résumé des articles revus parus sur l'incarnation virtuelle.

*L'effet est exprimé par la différence entre les réponses moyennes au questionnaire des différentes conditions. Il est exprimé en points, sur une échelle de Likert à 7 points.

**Les études qui ont rapporté des tailles d'effet pour les réponses au questionnaire sur l'incarnation. La valeur rapportée ici correspond au *d* de Cohen.

Référence	Année	Protocole	Nb niveaux	Nb participants	Mesure objective	Mesure subjective		Effet (pt)*
						Nombre d'items	Questionnaire utilisé	
[203]	2010	Intra-sujets	2	14	Dérive proprioceptive	11	[30]	1.29
[226]	2010	Inter-sujets	2x2x2	24	Rythme cardiaque	8	-	1.1
[175]	2011	Intra-sujets	2	22	Comportement	11	[30]	1.25
[187]	2011	Intra-sujets	2	20	GSR	9	-	0.75
[18]	2013	Intra-sujets	2	30	Performance	4	-	1.25
[158]	2013	Inter-sujets	2x2	18	Rythme cardiaque	7	[144, 226]	1
[131]	2014	Inter-sujets	2x2	60	GSR	8	[255]	1.25
[179]	2014	Intra-sujets	2x2	15	Dérive proprioceptive	12	[30, 203]	0.38
[258]	2015	Inter-sujets	3	53	Performance	10	-	0.21
[151]	2015	Intra-sujets	2x2x2	43	Dérive proprioceptive/GSR	13	[30, 121, 225]	2
[113]	2015	Intra-sujets	6	13	Dérive proprioceptive	2	-	1.4
[10]	2016	Intra-sujets	3	33	Comportement/mouvement	8	-	0.5
[19]	2016	Inter-sujets	2x3	60	Comportement	5	-	0.75
[112]	2016	Inter-sujets	2	24	Performance	12	[143, 226]	0.3
[252]	2016	Intra-sujets	5	10	Performance	2	[113]	-
[63]	2017	Mixte	2x2	48	GSR	10	-	0.75
[31]	2017	Inter-sujets	2	32	Performance/Comportement	7	[143, 226]	1
[191]	2017	Intra-sujets	2x2x2	39	Comportement	14	[148]	0.9
[57]	2017	Intra-sujets	3x3x2x1	23	-	6	[10, 149, 226]	1.4
[94]	2017	Intra-sujets	2	28	Performance	10	[10, 61]	0.75
[207]	2017	Intra-sujets	2x4	24	-	32	[255]	-
[15]	2017	Intra-sujets	2x2	22	Comportement	12	[148]	2.5
[77]	2018	Intra-sujets	3	20	Performance	9	[121]	1.5
[8]	2018	Intra-sujets	4	25	-	18	[10]	3.75
[79]	2018	Intra-sujets	3	32	Dérive proprioceptive	10	[148]	0.8**
[119]	2018	Intra-sujets	2	10	Comportement	16	[17]	1
[150]	2018	Inter-sujets	3	75	Performance	13	[200]	0.35
[209]	2018	Intra-sujets	5x2	41	Performance	14	[30, 151]	1.15
[34]	2018	Intra-sujets	3x2	21	-	2	-	-
[134]	2019	Inter-sujets	5	60	GSR	4	[225]	2
[95]	2019	Intra-sujets	3x2	34	Performance	12	[10, 61, 94]	0.25
[208]	2019	Intra-sujets	3x3	37	Performance	5	[209]	0.55
[227]	2019	Intra-sujets	2	16	-	16	[121]	0.45
[36]	2019	Intra-sujets	2	30	Performance	12	-	1.3
[14]	2019	Inter-sujets	2x2	64	Comportement	4	[20]	1.1
[78]	2020	Mixte	2x3	30	Comportement	14	[92]	1.5
[184]	2020	Inter-sujets	2x2	60	Performance	11	[92]	1.5
[183]	2021	Intra-sujets	2x2x2	99	Performance	24	[92]	-
[194]	2021	Intra-sujets	3	24	Performance	14	[92]	0.35
[215]	2021	Mixte	2x2	74	Performance	4	[45]	0.6

ce qui concerne les mesures d'incarnation, certaines de ces études ont mis en œuvre des mesures objectives et subjectives, tandis que d'autres n'ont utilisé que des moyens subjectifs. Pour les études mettant en œuvre des menaces [10, 77, 78], la mesure objective consistait principalement en des analyses du comportement et des mouvements des participants. Les répliques virtuelles de la RHI avaient tendance à utiliser la dérive proprioceptive [30, 113, 131, 203], tandis que d'autres utilisaient d'autres moyens, comme la réponse cutanée galvanique (GSR) [131, 134]. Les études publiées avant les récentes propositions de questionnaires d'incarnation standardisés [92, 185, 199] ont souvent proposé leurs propres questionnaires, adaptés du questionnaire de présence [255] pour le contexte de leur expérience, ne comportant parfois que quelques

items [252]. Des études plus récentes [8, 14, 34, 194] ne mettent en œuvre qu'une mesure subjective de l'incarnation.

Les questionnaires sur l'incarnation sont soit administrés en dehors de l'EVI après les conditions, après avoir retiré l'équipement de RV [56, 63, 67, 131, 194], soit directement à l'intérieur de l'EVI [78, 132, 207, 252]. Certaines études mentionnent qu'elles donnent des directives aux participants pour répondre aux questionnaires, principalement pour répondre sur la base de ce qu'ils ont ressenti et perçu [252], tandis que d'autres ont donné un questionnaire abrégé avant l'expérience pour que les participants évaluent l'incarnation dans une condition de base [31, 131, 132, 191]. D'autres études ont également mis en place une phase de familiarisation [134, 184, 194]. En particulier, Bovet [34] a demandé aux participants de se familiariser avec deux conditions extrêmes avant l'expérience. Nous avons remarqué qu'il n'existe pas de rapport systématique de la taille de l'effet pour les études d'incarnation. Certaines études rapportent des tailles d'effet pour la mesure objective [34, 77, 113, 131], mais une seule étude rapporte des tailles d'effet pour les réponses au questionnaire d'incarnation [79].

Parmi les 40 articles examinés, 25 de ces études ont été menées selon un plan intra-sujets. La taille des échantillons déclarés varie de 10 participants pour l'étude de Waltemate *et al.* [252], à 99 participants dans l'étude de Peck *et al.* [183]. Il y avait en moyenne 30 participants dans les études intra-sujets examinées. Les protocoles intra-sujets peuvent amener les participants à adopter certains comportements, par exemple à agir d'une manière particulière qu'ils pensent que les expérimentateurs attendent d'eux. Cet effet est connu sous le nom d'« effet de demande » [198, 254]. L'effet de demande est particulièrement préoccupant pour la recherche psychologique expérimentale et peut induire un biais lors de l'administration des questionnaires [46].

Parmi ces études, 12 ont été conçues selon un plan inter-sujets [14, 18, 19, 21, 31, 131, 134, 150, 158, 258]. Pour ces études en inter-sujets, le nombre de participants allait de 20 pour la deuxième expérience de Won *et al.* [258], à 69 participants dans l'étude de Lugin *et al.* [150]. La taille des groupes variait de 10 à 23 participants, pour une moyenne de 15 participants par groupe. La taille de l'échantillon pour les études inter-sujets est importante, en raison des biais possibles causés par d'éventuelles différences individuelles. Lors des études inter-sujets, si l'homogénéité des groupes n'a pas été prise en compte, il est possible que les résultats s'expliquent par des différences entre les groupes de participants. Ceci est particulièrement pertinent pour les études concernant la possession du corps et l'incarnation. Par exemple, Kalckert *et al.* [121] ont réalisé une réplication systématique de la RHI afin de comparer les stimulations visuomotrices et visuotactiles. Dans leur revue de la littérature, ils ont remarqué deux études [70, 244] qui suivaient des conceptions différentes et donnaient des résultats différents. Tsakiris *et al.* [244], dans une expérience intra-sujets, n'ont trouvé aucune différence d'appropriation entre l'intégration visuomotrice et visuotactile, tandis que Dummer [70], dans une expérience inter-sujets, a trouvé que l'appropriation était plus élevée sous des stimuli visuotactiles que visuomoteurs.

En résumé, même si la majorité des études sur l'incarnation virtuelle sont menées dans le cadre d'études intra-sujets, un nombre non négligeable d'entre elles mettent en œuvre une conception inter-sujets. En dehors de contextes spécifiques, il n'y a pas de motivation claire pour choisir l'un ou l'autre. Les tailles d'effet pour les études d'incarnation virtuelle ne sont pas massivement rapportées. Il n'existe pas de taille d'effet standard dans la littérature et, par conséquent, le nombre de participants varie selon les études. La façon dont le plan expérimental peut influencer les résultats de l'incarnation virtuelle n'est pas claire.

2.7 Synthèse

Dans cette courte section, qui marque la fin de notre revue de la littérature, nous récapitulons synthétiquement les notions introduites dans ce premier chapitre, et la façon dont elles s'articulent entre elles.

Cette revue était découpée en cinq sections, qui se regroupent en trois grandes parties : les deux premières ont servi à définir et caractériser les deux grands axes qui structurent tous nos travaux, à savoir l'expérience utilisateur et l'incarnation, plus l'haptique. Nous avons pu définir ces deux notions, et expliqué les différents aspects qui les composent, ainsi que leurs facteurs d'influence. Dans une troisième partie, et de façon plus transversale, nous nous sommes penchés sur les pratiques méthodologiques liées à l'étude de l'incarnation.

Pour caractériser le ressenti d'un utilisateur suite à une expérience quelconque avec un système, la notion d'expérience utilisateur est la clé. Mais, en contexte interactif et immersif, il existe plusieurs dimensions de l'expérience utilisateur : nous avons présenté succinctement les notions d'immersion et de présence, qui ont trait à la perception de l'EVI et à ses propriétés techniques, puis nous avons plus amplement traité le concept d'incarnation. Le sentiment d'incarnation, « le sentiment qui émerge lorsque les propriétés d'un corps B sont traitées comme si elles étaient celles du corps biologique », est la facette de l'expérience utilisateur qui caractérise le mieux la relation entre un utilisateur et son avatar. La notion d'avatar a été introduite dans notre introduction, et correspond à la représentation d'un utilisateur au sein d'un environnement virtuel. Cette notion est nécessaire pour comprendre le phénomène d'incarnation, mais elle n'est pas au cœur de nos travaux, ainsi elle n'a pas de section consacrée dans cette revue. Nous avons présenté la structure tridimensionnelle de l'incarnation, composée de l'appropriation corporelle, de l'agentivité, et de localisation du corps, et mis en évidence les liens qu'il existe entre la multisensorialité et l'émergence du sentiment d'incarnation. Nous voulons insister ici sur la notion de cohérence dans le retour multisensoriel. En effet, dans le paradigme de la RHI, le sentiment d'incarnation peut ne pas émerger si les stimulations tactiles sont asynchrones. Cette nécessité de cohérence et de non-conflit entre les informations sensorielles est résumée dans le principe

de cohérence avancé par Jeunet *et al.* [118] dans le modèle de l’agentivité. La réalité multisensorielle de phénomène d’incarnation permet de faire le lien avec l’intégration du retour haptique en EVI.

Le retour haptique, se référant au sens du toucher élargi, est une réalité plurielle. Le retour haptique peut ainsi être étudié sous le prisme de la physiologie humaine, et expliciter par quels organes sensoriels le corps humain va percevoir les sensations haptiques. La réalité du retour haptique ne s’arrête pas au retour tactile, cutané, mais intègre aussi toutes les informations relatives à la proprioception. Selon qu’il visera le système proprioceptif ou tactile, le retour haptique ne va pas simuler les mêmes effets. Les dispositifs haptiques sont ainsi régulièrement catégorisés en fonction de la forme du retour qu’ils génèrent. Le retour haptique se considère donc aussi du point de vue technologique et interactif : il existe un grand nombre de dispositifs haptiques, qui cherchent à rendre fidèlement les sensations haptiques que pourraient comporter des interactions précises en EVI. Ces interactions enrichies haptiquement vont augmenter la capacité immersive globale du système immersif, en améliorant ses propriétés technologiques, mais aussi l’expérience utilisateur, et particulièrement l’incarnation. Nous avons passé en revue les études qui ont montré un lien entre incarnation virtuelle et retour haptique. Ces études sont beaucoup plus nombreuses en environnement non virtuel. Le paradigme de la RHI en est un exemple parmi d’autres. Les quelques études qui s’y sont intéressées en EVI n’ont pas non plus tenu compte de la notion de cohérence dans les mises en place du retour haptique. Ainsi, s’il apparaît clairement que le retour haptique, et plus spécifiquement l’intégration visuo-haptique, est une composante essentielle de l’expérience utilisateur et de l’incarnation, les modalités de mise en place de ce retour restent assez floues.

Enfin, la dernière partie de notre état de l’art, est spécifique aux méthodologies expérimentales existantes pour étudier l’incarnation. Nous avons proposé une synthèse non exhaustive passant en revue les pratiques et spécificités méthodologiques de 40 articles portant sur l’étude de l’incarnation en EVI. Ces considérations transversales nous ont permis de réaliser qu’il existe de grandes disparités entre ces études en termes de taille d’échantillon, de report des tailles d’effet, et de choix dans le protocole expérimental.

Ces considérations nous ont conduits à traiter le sujet initial, portant les interactions haptiques et le sentiment d’incarnation en réalité virtuelle, selon trois axes principaux. Un premier axe, assez transversal, nous conduira à nous pencher sur des questions relatives aux méthodologies et aux bonnes pratiques pour étudier le sentiment d’incarnation en EVI. Le second axe de nos recherches s’articulera autour de la comparaison de différents retours haptiques par rapport au sentiment d’incarnation, en faisant le lien entre les différents retours et la cohérence de chacun par rapport au contexte de la tâche en EVI. Enfin, le dernier axe de ce manuscrit servira à présenter les travaux réalisés sur la conception d’une solution haptique pour l’interaction avec des manettes en RV, et les différentes étapes pour évaluer le prototype proposé.

CHAPITRE 3

MÉTHODOLOGIE EXPÉRIMENTALE POUR L'INCARNATION VIRTUELLE

Résumé

Nous présentons des travaux portant sur le sentiment d'incarnation virtuelle au travers du prisme méthodologique. Ce chapitre est décomposé en deux parties : une mise en contexte de notre problématique et l'élaboration d'une démarche théorique pour y répondre, puis la description du protocole expérimental mis en place et la discussion des résultats obtenus.

Les travaux présentés dans ce chapitre ont fait l'objet d'une publication à la conférence *IEEE VR 2022* [195].

Dans ce premier chapitre, nous allons nous intéresser aux aspects méthodologiques de l'étude du sentiment d'incarnation, et notamment l'impact du choix du protocole expérimental.

Comme nous avons pu le voir dans l'état de l'art, et plus particulièrement dans la section 2.6, les pratiques méthodologiques dans le domaine de la RV sont un enjeu important, afin de concevoir des protocoles permettant de qualifier et quantifier au mieux l'expérience des utilisateurs. Il est important de souligner que l'étude de l'expérience des participants au sein des EVIs est un champ pluri-disciplinaire, qui fait entrer en relation différents domaines (*Computer graphics*, Interaction Humain-Machine, psychologie comportementale et cognitive, etc.), chacun de ces domaines ayant ses propres paradigmes, et ses démarches d'investigation. Il devient

parfois complexe de s'assurer de la répliquabilité des travaux menés sur des populations très diverses, dans des environnements parfois radicalement différents. Nous pouvons mettre en avant l'exemple récent d'un premier *Workshop* organisé à la conférence *IEEE ISMAR 2021*, intitulé « Premier *Workshop* sur la Réplication dans le domaine Réalité Étendue » [Traduction], dont deux des objectifs annoncés portaient sur la mise en lumière des problèmes liés à la réplication et la reproductibilité, et de proposer des pistes pour répondre à ce qui est nommé comme une *crise* de la réplication¹.

La démarche qui sous-tend ce chapitre s'inscrit dans une logique analogue. Elle part d'un constat simple : les utilisateurs de systèmes immersifs perçoivent les EVIs de façon variable d'un individu à l'autre [34, 62], et vont possiblement s'immerger à des intensités différentes, et donc s'incarner à des degrés divers. On peut en effet remarquer, empiriquement, que lorsque l'on fait passer des expériences immersives sur l'incarnation, certains participants vont facilement croire à l'illusion, tandis que d'autres restent très sceptiques. Cela semble évident, mais implique une réflexion méthodologique conséquente. Lorsque l'on réalise une étude portant sur l'incarnation virtuelle, avec pour métrique un questionnaire d'incarnation, les participants vont donc s'incarner à des niveaux différents, indépendamment des conditions expérimentales propres à l'expérience. Si l'étude est réalisée en suivant un protocole intra-sujets, les participants sont soumis à plusieurs conditions expérimentales, et pour chacune des conditions, vont répéter le questionnaire d'incarnation. Ces questionnaires sont assez explicites quant au sujet d'investigation de l'expérience, et peuvent conduire à un biais expérimental, le biais d'expérimentateur [198]. Ce biais survient lorsque les participants peuvent déduire les questions de recherche investiguées dans l'expérience à laquelle ils prennent part, et modifient leur comportement en fonction de ce qu'ils pensent être attendus d'eux. On pourrait alors se dire qu'il vaudrait mieux concevoir les expériences portant sur l'incarnation en suivant un protocole inter-sujets. Pourtant, dans ce genre d'expérience, les participants sont séparés en groupes arbitraires, groupes dont les expérimentateurs ne peuvent aucunement s'assurer de leur homogénéité en termes d'incarnation. Ainsi, tout résultat observable provenant d'une telle expérience sera mêlé au bruit des différences inter-individuelles - les conditions expérimentales étaient-elles différentes, ou était-ce les groupes formés ? En théorie, si les groupes sont suffisamment grands et créés en utilisant un tirage aléatoire de la population cible, alors il y a statistiquement peu de chances d'observer des différences entre ces groupes.

Ce sont ces réflexions qui nous ont amenés à proposer de nouvelles démarches et méthodologies, décrites dans ce chapitre. Dans un premier temps, nous replaçons notre démarche dans le contexte de la conception d'expériences impliquant des facteurs humains. Notre revue de la littérature nous a conduits à traiter des travaux portant sur l'incarnation virtuelle au travers du prisme méthodologique. Au travers de cette revue, nous avons pu voir que la conception d'ex-

1. 1st Workshop on Replication in Extended Reality (WoR XR), *IEEE ISMAR 2021*, <https://sites.google.com/view/replicationinxr/home>, consulté le 17/11/2022

périence impliquant des facteurs humains comporte des étapes cruciales, comme le choix du protocole expérimental, dont le choix est souvent le résultat d'une décision libre de la part des expérimentateurs. Cette revue va nous servir pour définir plusieurs sous-objectifs qui jalonnent la démarche présentée dans le chapitre. Nous décrirons l'expérience mise en place, les résultats issus de celle-ci, et les discussions subséquentes. Enfin, en recontextualisant par rapport aux objectifs initiaux de ce projet, nous dessinerons des axes de recherche futurs pour approfondir les connaissances relatives aux pratiques méthodologiques des études en incarnation virtuelle.

3.1 Contexte

La conception d'une expérience contrôlée nécessite de déterminer le nombre de variables indépendantes à prendre en compte et le nombre de niveaux pris par chacune d'elles. Pour toute variable indépendante impliquée, l'expérimentateur doit choisir entre un plan inter-sujets, où chaque participant n'est exposé qu'à un seul niveau, et un plan intra-sujets, où chaque participant teste chaque niveau. Les plans ou protocoles inter-sujets sont nécessaires pour étudier les différences individuelles, par exemple, dans le but d'étudier l'effet du sexe ou de l'âge sur une variable dépendante, ou pour éviter tout effet d'ordre qui pourrait survenir et influencer les résultats des conditions expérimentales. Les protocoles intra-sujets sont nécessaires pour étudier les effets d'apprentissage ou de fatigue sur une variable indépendante. Cependant, la plupart du temps, le protocole expérimental d'une expérience n'est pas déterminé par les caractéristiques propres à l'expérience, mais résulte d'un choix des expérimentateurs. Chaque type présente ses propres avantages et inconvénients. Les plans d'expérience inter-sujets évitent les facteurs de confusion tels que l'apprentissage, la fatigue et la frustration, puisque chaque participant est exposé à une seule condition expérimentale. Le temps nécessaire pour réaliser l'expérience est également plus court que dans le cas d'un plan intra-sujets. Cependant, les plans inter-sujets sont basés sur les comparaisons entre différents groupes de participants pour étudier l'effet d'une variable indépendante. Les résultats peuvent être affectés par les différences individuelles, ce qui rend plus difficile la détection de différences significatives et réduit la puissance de l'analyse statistique. Cela augmente également les chances de détecter des différences qui peuvent être attribuées à des différences entre les groupes plutôt qu'à des différences entre les conditions, lorsque les groupes sont trop petits et non homogènes (*e.g.* vitesse de frappe au clavier lors de la comparaison de différentes techniques de frappe [140]). Pour réduire l'impact des différences individuelles, les plans d'expériences inter-sujets nécessitent comparativement des groupes plus grands que les plans d'expériences intra-sujets (m fois plus grands si m est le nombre de niveaux d'une variable indépendante). Les plans d'expérience mixtes peuvent être utilisés lorsqu'on considère deux variables indépendantes ou plus, où une ou plusieurs variables indépendantes sont administrées à chaque participant et les autres à des sous groupes de participants, mais cela dépasse le cadre de notre chapitre.

Les expériences contrôlées en RV pour étudier l'expérience de l'utilisateur ne souffrent pas d'exception. Certains contextes exigent de suivre un plan intra-sujets, par exemple lorsqu'on étudie l'effet thérapeutique de la RV et des expériences immersives sur des phobies, au cours de plusieurs sessions [201]. D'autres contextes, tels que les scénarios impliquant des surprises/menaces [67, 78], suivent généralement un plan inter-sujets car après l'avoir expérimenté une fois, être conscient de l'effet de surprise peut modifier les réactions des participants. D'autres contextes plus génériques, s'intéressant à l'expérience utilisateur, offrent plus de liberté dans le choix d'un plan expérimental.

Un facteur clé de l'expérience utilisateur dans la RV est l'incarnation virtuelle, le « sens qui émerge lorsque les propriétés [d'un corps] sont traitées comme si elles étaient les propriétés de son propre corps biologique » [126].

Alors que la majorité des études sur l'incarnation virtuelle sont conçues selon un protocole intra-sujets, un nombre non négligeable d'entre elles suivent un modèle inter-sujets (voir Table 2.1). Pour chaque protocole, on ne sait pas toujours combien de participants doivent être impliqués dans une étude pour détecter un effet, s'il existe, même si la taille de l'échantillon nécessaire peut être déterminée par une analyse basée sur la puissance statistique. De plus, pour obtenir la même puissance statistique entre les deux types de protocoles, il n'est pas certain que le nombre de participants requis dans un plan inter-sujets soit simplement facteur du nombre de conditions expérimentales. Un plan inter-sujets à deux niveaux pourra nécessiter plus de deux fois l'échantillon requis pour un plan intra-sujets avec le même nombre de niveaux. Le comportement des participants lorsqu'ils répondent à des questionnaires successifs peut également influencer les résultats, car ils peuvent répondre aux questions en fonction de leurs réponses précédentes, par exemple.

Pour répondre à ces questions, nous évaluons dans ce chapitre l'influence du plan expérimental et de la taille de l'échantillon dans une expérience d'incarnation virtuelle avec une seule variable indépendante à deux niveaux. Nous rapportons d'abord une expérience ($n = 92$), dans laquelle les participants devaient réaliser une tâche visuomotrice adaptée d'études antérieures [31, 131, 158]. Le plan expérimental comportait une variable intra-sujets avec deux niveaux, l'intégration visuomotrice synchrone et asynchrone. La tâche et le plan ont été choisis de manière à ce qu'une différence significative puisse être observée entre les deux niveaux, avec des scores d'incarnation plus faibles pour la condition asynchrone, comme cela a été démontré précédemment [31, 131, 158]. Nous avons ensuite évalué l'influence du nombre de participants et du type de plan expérimental sur la taille de l'effet et la capacité à trouver la différence significative attendue entre les conditions. Nous avons utilisé une méthode de Monte-Carlo sur différents sous-ensembles des données collectées pour simuler un nombre de participants allant de 10 à 92 dans le plan intra-sujets et de 12 à 46 par groupe dans le plan inter-sujets.

Les résultats issus des données d’incarnation des participants ont permis de réaliser des analyses portant sur la taille des échantillons nécessaires pour réaliser des expériences en suivant des protocoles intra-sujets. Pris dans leur globalité, nos analyses et résultats nous permettent de tirer des conclusions sur les tailles d’échantillons de participants nécessaires pour réaliser des expériences sur l’incarnation en suivant un protocole intra-sujets, mais ne nous permettent pas de conclure quant aux protocoles inter-sujets. Nous discutons des implications de ces résultats et fournissons des lignes directrices sur la conception des études d’incarnation virtuelle et des questionnaires d’incarnation à la fin du chapitre. Enfin, nous discutons des perspectives futures ouvertes par les travaux que nous avons menés.

3.2 Objectifs

L’objectif de ce projet est d’étudier méthodologiquement les différents protocoles mis en place pour étudier le sentiment d’incarnation en EVI. Plus précisément, nous voulons comparer les protocoles intra-sujets et inter-sujets, en terme de capacité à détecter des effets entre conditions expérimentales, ainsi que l’influence de la taille des échantillons sur cette capacité.

La première chose qui s’est imposée à nous, dans notre réflexion, était la nécessité de récolter un large éventail de données d’incarnation issues d’un paradigme des questions d’incarnation virtuelle, ou tout du moins des données provenant d’un protocole déjà familier de la littérature. En effet, il n’existe pas à notre connaissance de base de données d’incarnation en accès libre, il nous fallait donc récolter ces données par nous-mêmes. Les expériences d’incarnation virtuelle sont nombreuses, mais explorent souvent avec des protocoles variés et peu répliqués, des aspects différents des processus psycho-physiologiques conduisant à l’émergence du sentiment d’incarnation virtuelle. Dans une démarche visant à aboutir à des outils méthodologiques, il nous était nécessaire d’identifier un protocole paradigmatique, ou le plus répliqué possible, afin de pouvoir contrôler et anticiper au mieux les résultats d’incarnation qui en résulteraient. Il était important que ce protocole permette de mettre en place deux conditions expérimentales significativement différentes, afin de pouvoir comparer des valeurs d’incarnation *absolue* (avec une seule condition optimale par exemple), ou *relative* (dans une différence entre une condition optimale et une condition dégradée), et ainsi avoir à disposition des informations en termes de *taille d’effet*. Nous décrivons le protocole expérimental retenu dans la section suivante, qui lui est dédiée.

Nous partions donc avec l’hypothèse que le protocole mis en place nous permettrait de récolter des données propres à l’incarnation des participants, sur deux niveaux significativement différents. Ce protocole serait mis en place en suivant un protocole intra-sujets. Il est possible de passer de données obtenues avec un protocole intra-sujets vers des données inter-sujets, en ne gardant que la première condition de chaque participant, si les ordres de passation sont contreba-

lancés. Cela implique la perte de la moitié des données initialement obtenues, quoi qu'il arrive. Avec un échantillon suffisamment grand, nous pouvions formuler l'hypothèse que nos données d'incarnation mettraient en évidence une différence significative entre les deux conditions expérimentales, que ce soit avec l'analyse partant du protocole intra-sujets - les données brutes - ou en partant des données ne gardant que la première condition, l'analyse en protocole inter-sujets. La démarche mise en place pour étudier l'influence du nombre de participants sur les résultats, basée sur une méthode de Monte-Carlo, et des simulations d'*expériences virtuelles*, sera décrite plus précisément dans les sections 3.4.3 et 3.4.4.

Nous récapitulons les différentes étapes de la méthodologie adoptée avec les trois qui suivent :

- Mise en place et réplication d'un protocole sur l'incarnation virtuelle, avec 2 conditions expérimentales significativement différentes.
- Comparaison des résultats en analyse intra-sujets et inter-sujets.
- Analyse de l'influence du nombre de participants sur la capacité des protocoles à détecter des effets.

Nous allons maintenant préciser le protocole expérimental mis en place, et décrivons plus précisément les questionnaires utilisés.

3.3 Expérience

L'objectif principal de cette expérience est de récolter une quantité importante de données relatives à l'incarnation en vue de comparer les protocoles expérimentaux pour étudier l'incarnation virtuelle en EVI.

3.3.1 Protocole expérimental

Comme nous l'avons rappelé dans la mise en contexte de ce chapitre, notre expérience nécessite l'utilisation d'une vérité de contrôle établie à partir de résultats validés et répliqués dans la littérature. Il y a peu d'expériences dans la RV qui ont été reproduites en plus de la synchronie visuotactile avec la RHI [30, 121, 242] et la synchronie visuotactile/visuomotrice avec l'étude de la latence sur l'incarnation [131, 203]. Ces études précédentes ont montré qu'il n'y a pas de différence significative dans l'incarnation entre la synchronie visuotactile et visuomotrice [121]. Nous avons choisi de reproduire les expériences basées sur la synchronie visuomotrice plutôt que sur la synchronie visuotactile, car leur configuration expérimentale et leur procédure sont plus simples à reproduire, ne nécessitant pas d'expérimentateur pour administrer le retour tactile,

comme c’est le cas dans la RHI [30, 176] ou l’étude de Kokkinara *et al.* [131]. Nous avons également choisi de ne tester que deux conditions expérimentales, l’une avec une latence minimale et l’autre avec un niveau de latence connu pour avoir un impact significatif sur l’incarnation. C’est l’expérience la plus simple que nous puissions concevoir et elle simplifie l’analyse statistique. Ainsi, elle peut être facilement répliquée dans d’autres études pour renforcer les résultats et les recommandations méthodologiques. Notre expérience suit un plan intra-sujets où chaque participant a expérimenté deux conditions différentes : une intégration visuomotrice synchrone (SYNCHRO) et une intégration visuomotrice asynchrone (ASYNCHRO). Les deux conditions sont contrebalancées entre les participants afin de compenser les effets possibles de l’ordre de présentation et de pouvoir utiliser la première condition testée par les participants comme si nous menions un plan inter-sujets avec les deux conditions.

3.3.2 Conditions expérimentales

La condition synchrone (SYNCHRO) intègre les mouvements des participants sans délai supplémentaire entre leurs actions dans les environnements physique et virtuel. La condition asynchrone (ASYNCHRO) a été conçue pour ajouter un retard de 300 ms par rapport à SYNCHRO.

Les systèmes interactifs ont un retard inhérent associé au matériel, au système et au traitement. Cette latence de bout en bout était la même dans les deux conditions, nous l’avons mesurée avec le dispositif LagMeter [44] dans l’application de l’expérience, déployée sur *Unity3D*. Concrètement, le LagMeter mesure le délai entre une entrée utilisateur et un changement facilement perceptible sur l’image à l’écran. Dans notre cas, l’entrée de l’utilisateur correspond à un tapotement sur le pad tactile de l’ordinateur, et suite à cette entrée, l’écran change du blanc au noir.

Pour l’entrée utilisateur, le LagMeter détecte et mesure d’abord le moment où une vibration résultant d’un tapotement sur le pad tactile se produit, à l’aide d’un capteur de vibration piézoélectrique fixé à l’index. Ensuite, il mesure le moment où la réponse de l’écran associée se produit à l’aide d’une photodiode installée sur l’écran gauche du casque VR. L’application fait passer l’écran du casque de noir à blanc à la réception de l’événement provenant du pad. Nous avons recueilli 50 mesures de latence et trouvé une latence moyenne de bout en bout de 63 ms (SD=12 ms).

La latence pour la ASYNCHRO a été implémentée artificiellement en mettant en mémoire tampon tous les événements d’entrée pendant un temps donné. De cette façon, ASYNCHRO avait une latence totale d’environ 360 ms. Selon la littérature, la condition synchrone a une latence qui est peu susceptible d’avoir un impact sur l’incarnation (moins de 100 ms) tandis que la latence

dans la condition asynchrone est dans la gamme supérieure de 100-500 ms où la latence est connue pour dégrader l'incarnation.

3.3.3 Méthodologie

Les participants ont d'abord reçu des informations concernant la procédure et l'expérience : la tâche visuomotrice qu'ils allaient devoir réaliser, comment effectuer cette tâche, et sur quoi se concentrer pendant l'immersion. Les participants recevaient aussi pour consigne de regarder les jambes virtuelles de l'avatar lorsqu'ils effectuaient la tâche. Ensuite, ils ont été invités à signer un formulaire de consentement éclairé et à répondre à des questions démographiques génériques (âge et expression de genre). Parmi ces questions, ils pouvaient exprimer leur expression de genre, qui a été utilisée pour choisir l'avatar correspondant.

Pour la partie physique du dispositif, les participants devaient s'asseoir sur une chaise et placer leurs jambes sur une table (120cm × 120cm × 50cm) située devant eux et garder leurs bras immobiles de chaque côté de la chaise (Figure 3.1). La chaise et la table étaient co-localisées avec une table virtuelle et une chaise virtuelle de forme similaire dans l'EVI, afin d'obtenir un retour haptique passif cohérent.



FIGURE 3.1 – Dispositif expérimental avec le casque de RV, les manettes, et les capteurs de suivi disposés sur un participant (gauche), l'environnement virtuel (centre), et les deux avatars proposés (droite). © 2022 IEEE

La tâche consistait à reproduire des motifs avec les deux talons, par des mouvements de jambes. Les instructions pour les mouvements de jambes étaient affichées sur un écran virtuel dans l'EVI, situé en face des participants. Chaque instruction demandait aux participants de répéter le motif 10 fois, et il y avait 12 motifs différents, soit un total de 120 mouvements par condition. La tâche durait environ 5 minutes.

Les participants ont passé les deux conditions en une seule session. L'ordre des conditions était contrebalancé. Chaque condition expérimentale était suivie d'un questionnaire d'incarnation pour évaluer l'incarnation subjective (voir section 3.6). Les participants ont été invités à retirer le casque de RV et à poser les manettes puis à remplir le questionnaire sur un ordinateur

portable. Les participants ne pouvaient pas voir leurs réponses à la première condition lorsqu’ils remplissaient le questionnaire pour la seconde.

3.3.4 Dispositif technologique

Afin de s’immerger dans l’EVI, les participants étaient équipés d’un *Valve Index* qui fournissait un retour visuel et un suivi de tête à 6 DoF. Les pieds des participants étaient captés à l’aide d’un *Vive Tracker* attaché à chacun d’eux, et les mouvements de l’avatar étaient calculés par cinématique inverse [197] en se basant en entrée sur les mouvements réels de tête et de pieds des participants. L’environnement virtuel a été développé avec *Unity3D* (2019.2.12f1), et tout l’aspect RV a été intégré à l’aide du plugin *Steam VR*. Les spécifications de l’ordinateur utilisé pour l’expérience étaient les suivantes : une carte graphique Nvidia GeForce 2070 RTX de 8 Go, un processeur central Intel(R) Core(TM) i7-9750H à 2,60 GHz et 32 Go de mémoire RAM. Les représentations virtuelles des participants étaient deux avatars -expression de genre masculin et féminine- issus de la bibliothèque *RocketBox* [93].

3.3.5 Participants

92 participants se sont portés volontaires pour participer à l’expérience (64 hommes et 28 femmes), âgés de 22 à 53 ans ($M = 30,2; SD = 7,7$). Ils ont été recrutés par bouche-à-oreille. Les participants avaient une vision normale ou corrigée à la normale. L’expérience a été approuvée par le comité d’éthique d’Inria.

3.3.6 Métriques et questionnaires

Deux dimensions étaient importantes dans le cadre de l’expérience : l’incarnation, évaluée avec un questionnaire unique, et l’état global du participant, que ce soit son état psychophysio-logique au moment de l’expérience ou ses capacités empathiques, évalués avec 5 questionnaires regroupés à la fin du protocole expérimental. En vue de comparer les protocoles expérimentaux par rapport à l’incarnation virtuelle, seul le questionnaire d’incarnation est nécessaire. Les autres métriques ont été incluses dans le protocole pour de futures analyses, que nous décrivons dans les travaux futurs, en Section 3.7.

Questionnaire d’incarnation

Le sentiment d’incarnation était subjectivement rapporté par les participants au moyen d’un questionnaire en ligne, utilisant des échelles de Likert à sept points. Le questionnaire relatif à l’incarnation a été repris du questionnaire proposé par Peck & Gonzalez-Franco [185]. Ce questionnaire a été validé par un grand nombre d’observations et est le plus récent. Parmi les 16 items proposés dans ce questionnaire, un item original a été retiré (R8 dans l’article original), car il ne pouvait pas être adapté à notre scénario (Table 3.1).

TABLE 3.1 – Questionnaire d’incarnation adapté de Peck & Gonzalez-Franco [185].

ID	Questions
R1	Je me suis senti hors de mon corps.
R2	J’avais l’impression que mon corps (réel) dérivait vers le corps virtuel ou que le corps virtuel dérivait vers mon corps (réel).
R3	J’avais l’impression que les mouvements du corps virtuel influençaient mes propres mouvements.
R4	J’avais l’impression que mon corps (réel) se transformait en un corps "d’avatar".
R5	À un moment donné, j’ai eu l’impression que mon corps réel commençait à prendre la posture ou la forme du corps virtuel que je voyais.
R6	J’avais l’impression de porter des vêtements différents de ceux que je portais en arrivant au laboratoire.
R7	J’ai senti que mon corps avait changé.
R9	Je sentais que mon propre corps pouvait être affecté par le corps virtuel.
R10	J’avais l’impression que le corps virtuel était mon corps.
R11	À un moment donné, j’ai eu l’impression que le corps virtuel ressemblait à mon propre corps (réel), en termes de forme, de couleur de peau ou d’autres caractéristiques visuelles.
R12	J’avais l’impression que mon corps se trouvait là où je voyais le corps virtuel.
R13	Je sentais que je pouvais contrôler le corps virtuel comme s’il s’agissait de mon propre corps.
R14	Il m’a semblé que je ressentais le toucher de la table à l’endroit où je voyais les jambes virtuelles se toucher.
R15	Il semblait que le toucher que je ressentais était dû au fait que la table touchait le corps virtuel.
R16	C’était comme si mon corps touchait la table.

Questionnaires sur les traits individuels

Nous avons aussi choisi et utilisé 5 questionnaires permettant d’évaluer les différences entre les individus et leurs traits personnels, 3 d’entre eux ayant été présentés dans la section 2.3.6. Ces questionnaires ont été choisis pour avoir été positivement corrélés avec l’incarnation ou ses sous-composantes. Ces 3 questionnaires sont le QCAE, qui mesure l’empathie [211], le SSS, qui mesure la suggestibilité sensorielle [156], et l’IPC Scale, qui évalue le locus de contrôle [67].

Les deux autres questionnaires sont le *Virtual Reality Sickness Questionnaire* (VRSQ) [128] et le *Positive And Negative Affects Schedule Abbreviated* (PANAS-X) [97]. Les questionnaires QCAE, SSS et IPC se sont tous avérés être positivement corrélés avec l’incarnation. Witmer & Singer a trouvé que la présence était négativement corrélée à la *cybersickness*, souvent appelé

mal du simulateur en français [255]. Nous avons émis l’hypothèse que la *cybersickness* pourrait être négativement corrélée avec l’expérience de l’utilisateur et l’incarnation au sein de l’EVI, et avons supposé qu’il pourrait s’agir d’un critère prédictif intéressant pour les participants ayant un score élevé au VRSQ.

Nous avons remarqué, au cours d’études passées, que l’humeur du moment, en particulier l’enthousiasme (ou le manque d’enthousiasme) des participants à l’égard de l’expérience ou de la RV en général, était un facteur important pour l’expérience des participants et, en tant que tel, influençait les résultats de l’incarnation. Nous avons fait l’hypothèse que l’évaluation de l’humeur actuelle des participants, par le biais du questionnaire PANAS-X, révélera des corrélations positives et négatives entre certaines humeurs et l’incarnation.

L’ensemble de ces questionnaires concaténés est reproduit en Annexe A de la façon dont il était présenté aux participants durant l’expérience. Nous expliquons et justifions l’utilisation de ces questionnaires dans la Section 3.7 décrivant nos travaux futurs.

3.4 Résultats

Dans cette section, nous rapportons d’abord les principaux résultats pour le protocole intra-sujets ($n = 92$), puis nous présentons une analyse de ces résultats en les ramenant à un protocole inter-sujets, en ne considérant que la première condition pour chaque participant (deux groupes de $n = 46$). Nous présentons ensuite les simulations de plans intra et inter-sujets en manipulant le nombre de participants. Enfin, nous présentons les résultats de la simulation du score d’incarnabilité et les conclusions de notre démarche globale.

En suivant les recommandations de Peck & Gonzalez-Franco [185], les réponses au questionnaire ont été agrégées pour calculer les sous-scores Apparence, Réponse, Propriété et Multi-sensoriel, ainsi qu’un score général pour l’incarnation, puis rééchantonnées entre -3 et +3.

3.4.1 Résultats du protocole intra-sujets

Les hypothèses de normalité ayant été violées (test de normalité de Shapiro-Wilk : $p < 0,0001$, $W = 0,99$), dans ce qui suit, seuls les tests non paramétriques seront considérés, à l’exception de l’analyse suivante visant à étudier les effets d’interaction.

De plus, pour exclure les effets d’ordre, nous avons effectué une ANOVA à mesures répétées sur les données Transformées par Classement Aligné (*Aligned Ranked Transform*), car les données ne suivaient pas une distribution normale [257], dans laquelle l’*ordre de présentation* a été

traité comme une variable indépendante inter-sujets et la *condition visuomotrice* (VM) comme une variable intra-sujets. L’analyse n’a montré aucun effet significatif de l’ordre de présentation ($F(1,90) = 1,39, p = 0,24$) ni aucune interaction entre l’ordre de présentation et la condition VM ($F(1,90) = 0,51, p = 0,48$).

La Table 3.2 et la Figure 3.2 résument les résultats, dans lesquels la réponse, la propriété, l’aspect multisensoriel et l’aspect global ont montré des différences significatives (analyse Wilcoxon signed-rank). La taille de l’effet calculée était de 0,53. La taille de l’effet pour le test des rangs signés de Wilcoxon a été calculée en utilisant la méthode proposée par Pallant [180]. Plus précisément, nous avons utilisé la fonction `wilcox_effsize` du `rstatix` R-package [122]. L’analyse sur l’apparence n’a pas révélé de différence significative ($p = 0,07$). Ces résultats reproduisent les résultats précédents de la littérature, car nous observons des scores d’incarnation significativement plus élevés pour la condition synchrone.

TABLE 3.2 – Résumé des résultats de l’analyse intra-sujets pour 92 participants. © 2022 IEEE

Métrique	p-value	V	Sync.		Async.	
			Mdn	IQ	Mdn	IQ
Réponse	< 0.001*	743	0.0	[-0.8, 0.7]	-0.2	[-1.4, 0.6]
Appropriation	< 0.001*	623.5	0.83	[0.25, 1.42]	0.16	[-0.5, 0.92]
Apparence	= 0.07	1528.5	-0.38	[-1.13, 0.5]	-0.69	[-1.25, 0.38]
Multi-sensorialité	< 0.001*	922	1.33	[1.0, 1.75]	1.17	[0.34, 1.5]
Incarnation	< 0.001*	959.5	0.42	[0.01, 1.00]	0.08	[-0.56, 0.74]

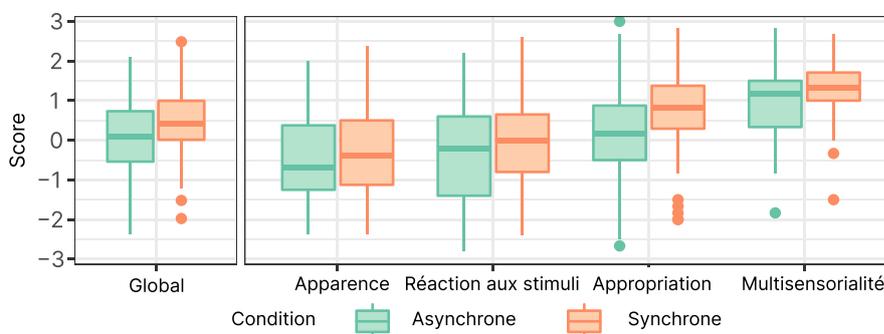


FIGURE 3.2 – Scores d’incarnation globaux et selon les sous-composantes pour les conditions SYNCHRO et ASYNCHRO dans le protocole intra-sujets. © 2022 IEEE

3.4.2 Résultats pour le protocole inter-sujets

Pour l’analyse inter-sujets, nous avons utilisé un test de la somme des rangs de Wilcoxon sur la première condition à laquelle les participants ont été exposés (Table 3.3). Aucun effet significatif n’a été constaté entre les conditions SYNCHRONE et ASYNCHRONE sur l’**incarnation**

globale ($p = 0,23$) ni sur aucune des sous-composantes. Ce résultat, dans notre démarche, n’est pas anodin, et implique plusieurs choses. La première, très directement, est que ces résultats sont différents des résultats de la littérature, dans lesquels l’effet de la latence sur le sentiment d’incarnation est largement reconnu [43, 121, 252]. Ce résultat vient infirmer nos hypothèses initiales, qui se basaient sur la présence d’une différence significative entre les conditions pour les analyses intra-sujets et inter-sujets. Le fait que cette hypothèse ne soit pas validée nous a obligés à revoir nos objectifs globaux.

TABLE 3.3 – Résumé des résultats pour l’analyse de l’échantillon à 92 participants avec le protocole inter-sujets. © 2022 IEEE

Metric	p-value	W	Sync.		Async.	
			Mdn	IQ	Mdn	IQ
Réponse	> 0.9	1048.5	0.0	[-0.95, 0.4]	0.0	[-1.34, 0.8]
Appropriation	> 0.2	920	0.58	[0.04, 1.46]	0.5	[-0.17, 1.17]
Apparence	> 0.2	909	-0.38	[-1.09, 0.34]	-0.63	[-1.25, 0.22]
Multi-sensorialité	> 0.1	886.5	1.5	[0.83, 1.96]	1.17	[0.67, 1.5]
Incarnation	> 0.2	905	0.38	[-0.02, 0.93]	0.21	[-0.43, 0.84]

3.4.3 Influence du nombre de participants sur les résultats des analyses intra-sujets

À partir de l’étude originale de 92 participants, nous avons créé des expériences virtuelles en sélectionnant aléatoirement différents sous-ensembles de participants en fonction d’une taille d’échantillon cible. Comme la simulation de toutes les combinaisons possibles est trop coûteuse en termes de calcul, nous avons utilisé une méthode de Monte-Carlo en créant plusieurs expériences virtuelles pour chaque taille d’échantillon, afin d’obtenir des estimations précises. Pour déterminer le bon nombre de simulations à réaliser, nous avons simulé entre 10 et 1000000 d’expériences virtuelles pour 12 participants en intra-sujets et en inter-sujets. Nous avons choisi de simuler des échantillons minimaux de 12 participants, car bien que nous ayons trouvé des échantillons plus réduits dans les articles de la liste présentée dans notre revue de la littérature en section 2.6, nous considérons le cas des échantillons à 12 participants comme le pire scénario, car la variance devrait être maximale. Les résultats ont montré que des simulations à 10000 expériences virtuelles étaient suffisantes pour obtenir des approximations précises de la cohérence et de la taille de l’effet. Pour garder une marge de sécurité tout en restant raisonnable en termes de coût de calcul, nous avons choisi d’exécuter 100000 simulations pour chaque taille d’échantillon.

Pour chaque expérience virtuelle, un test des rangs signés de Wilcoxon a été effectué entre les conditions SYNCHRO et ASYNCHRO. Comme un effet significatif a été trouvé dans l’étude originale intra-sujets avec les 92 participants, et conformément à la littérature, nous considérons

que toute expérience virtuelle présentant une différence significative ($p < 0,05$) entre les deux conditions, avec des scores moyens d'incarnation plus élevés dans la condition SYNCHRO que dans la condition ASYNCHRO, est **cohérente** avec les résultats originaux. Pour chaque taille d'échantillon, nous avons calculé le pourcentage d'expériences virtuelles qui étaient cohérentes avec les résultats originaux et la taille de l'effet (moyenne, 5^e percentile et 95^e percentile).

La ligne bleue dans la Figure 3.3 (en bas) montre l'évolution de la cohérence dans un échantillon d'expériences virtuelles lorsque l'on fait varier le nombre de participants pour les expériences virtuelles intra-sujets. Comme on peut le voir sur la figure, et comme prévu, la cohérence des résultats augmente avec la taille de l'échantillon. La cohérence atteint 95% à 33 participants et est pratiquement de 100% au-delà de 40 participants. De plus, la ligne bleue dans Figure 3.3 (en haut) montre l'évolution de la taille de l'effet lorsque la taille de l'échantillon augmente. Alors que la taille d'effet moyenne est presque constante (0,53) quelle que soit la taille de l'effet, l'écart entre le 5^e et le 95^e percentile se rétrécit au fur et à mesure que la taille de l'échantillon augmente.

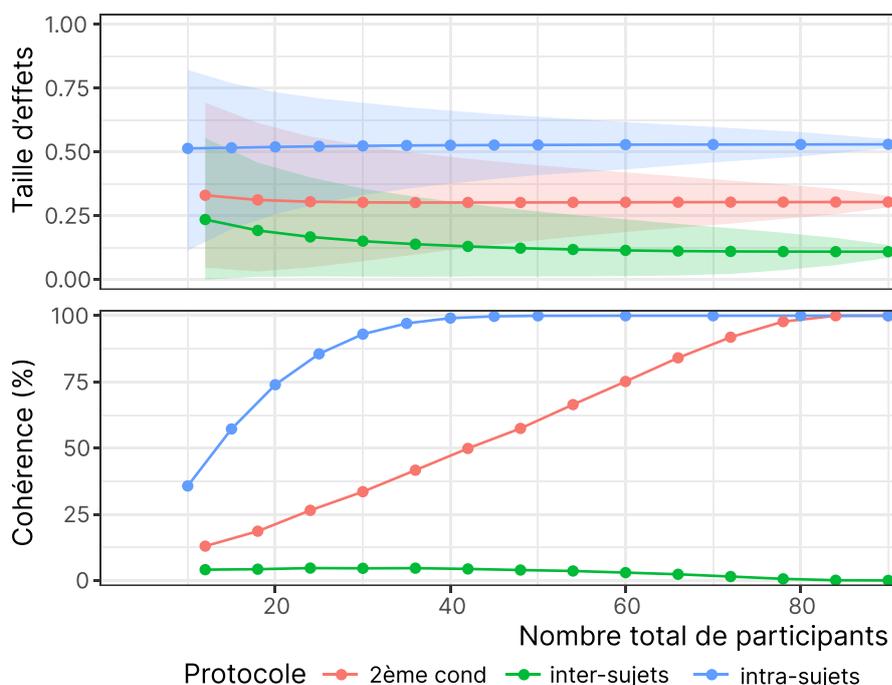


FIGURE 3.3 – Taille d'effet moyenne et cohérence sur le nombre total de participants aux expériences virtuelles intra et inter-sujets. Les régions semi-transparentes pour l'ampleur de l'effet correspondent au 5^e et au 95^e percentile des valeurs obtenues avec les simulations. 2^{ème} cond fait référence aux résultats obtenus en ne considérant que la seconde condition de chaque participant, de la même manière que nous avons créé le plan d'expériences inter-sujets avec la première condition. © 2022 IEEE.

3.4.4 Influence du nombre de participants sur les résultats des analyses inter-sujets

Pour étudier l’influence du nombre de participants pour l’étude inter-sujets, nous avons utilisé la même méthode que celle décrite dans la section ci-dessus. Nous avons sélectionné uniquement la première condition de chaque participant afin d’obtenir une étude inter-sujets de 92 participants dans laquelle les deux groupes comptaient 46 participants. Les résultats de l’étude complète entre sujets n’étaient pas significatifs (*cf.* subsection 3.4.2). Nous avons défini la notion de **cohérence** en nous basant sur les résultats de l’étude intra-sujets de 92 participants et sur la littérature, c’est-à-dire en postulant qu’il existe une différence significative dans l’incarnation entre les conditions SYNCHRONOUS et ASYNCHRONOUS. Ainsi, dans ce cas, les résultats de l’analyse inter-sujets globale, avec les 92 participants, sont considérés comme incohérents. Les lignes vertes dans Figure 3.3 montrent respectivement l’évolution de la taille de l’effet et de la cohérence. Comme on peut s’y attendre d’après les résultats de l’étude inter-sujets de 92 participants, les valeurs de cohérence restent proches de 0% pour toutes les simulations. De même, la taille de l’effet moyenne est plus faible (converge vers 0,11) avec un écart interquartile plus important pour les petites tailles d’échantillon.

Au cours de l’analyse des données, nous avons observé un comportement intéressant pour les résultats lorsque l’on considère uniquement la deuxième condition de chaque participant après l’étude originale avec 92 participants. Lorsqu’elle est considérée seule, la deuxième condition peut être considérée comme un protocole inter-sujets, bien que les résultats puissent être fortement biaisés par la première condition. Néanmoins, nous les rapportons car ils fournissent des indications intéressantes et correspondent à l’hypothèse initiale que nous avons pour les plans inter-sujets. Les lignes rouges dans Figure 3.3 montrent l’évolution de la taille de l’effet et de la cohérence respectivement en considérant les données de la deuxième condition. Il est intéressant de noter que la cohérence des résultats augmente presque linéairement en fonction du nombre de participants et atteint les 100% de cohérence à environ $n = 84$. L’évolution de la taille de l’effet suit également un schéma similaire à celui des simulations précédentes, convergeant vers 0,30.

3.5 Discussion

Nous avons comme objectif principal, pour ces travaux, de comparer les protocoles inter et intra-sujets en vue d’étudier le sentiment d’incarnation virtuelle. En vue de cet objectif, nous avons, dans la section précédente, présenté les résultats globaux de notre expérience, puis une analyse tenant compte du nombre de participants sur ces résultats. Nous discutons ici de ces

résultats, en commençant de même par les résultats pour les protocoles intra-sujets, puis inter-sujets.

3.5.1 Protocoles intra-sujets

Notre premier objectif était de reproduire les résultats concernant l'impact de la latence sur l'incarnation virtuelle, dans une tâche visuomotrice inspirée de la littérature [31, 131, 158]. Nous avons considéré l'intégration synchrone et asynchrone car plusieurs travaux ont montré que l'incarnation est altérée lorsque les participants perçoivent une divergence visuomotrice et/ou visuotactile [30, 113, 147, 252]. En considérant les résultats de l'étude intra-sujets de 92 participants, les participants ont été significativement affectés par les divergences visuomotrices pendant la condition asynchrone (latence autour de 360 ms), bien que la diminution des scores d'incarnation virtuelle par rapport à la condition synchrone ait été modérée par rapport à d'autres travaux [113, 252]. Cet effet a également été observé au niveau de trois des quatre sous-composantes proposées par Peck et Gonzalez-Franco [185]. Ces résultats tendent à valider à la fois le protocole pour susciter l'incarnation (la tâche visuomotrice basée sur les mouvements des jambes) et la valeur du délai pour entraver l'incarnation (360 ms).

La taille de l'effet rapportée pour l'étude intra-sujets de 92 participants était de 0,53. Selon la méthode de Cohen [53], la taille de l'effet pour le test de somme des rangs de Wilcoxon peut être interprétée de la même manière que le d de Cohen, de sorte qu'une taille de l'effet de 0,53 est considérée comme moyenne. Cela semble cohérent si l'on considère que la latence commence à affecter l'incarnation vers 100 ms et l'affecte sévèrement vers 500 ms. Par conséquent, nous pourrions nous attendre à mesurer une petite taille d'effet autour de 100 ms et une grande taille d'effet autour de 500 ms et une taille d'effet moyenne pour 360 ms. Cependant, les tailles d'effet sont rarement rapportées dans la littérature pour les études sur l'incarnation virtuelle. La taille de l'effet mesure l'ampleur d'un effet mais il faut généralement disposer des résultats de différentes études sur un phénomène donné pour pouvoir établir quelles valeurs peuvent être considérées comme faibles, moyennes ou élevées. Dans sa forme la plus simple, la taille de l'effet peut être considérée comme la différence des valeurs moyennes ou médianes entre deux conditions. Dans notre cas, la différence du score d'incarnation entre les deux conditions est égale à 0,34 point sur une échelle de Likert à 7 points, ce qui peut être considéré comme faible au regard des différences obtenues dans d'autres études (Table 2.1). Cependant, cette approximation ne tient pas compte de la variance des données comme le font les méthodes de calcul des tailles d'effet réelles. En outre, les résultats rapportés dans la littérature n'ont pas nécessairement utilisé les mêmes questionnaires. Les futures études d'incarnation rapportant également la taille de l'effet peuvent aider à caractériser l'ampleur de la nôtre.

Afin de tenir compte de l'impact de la taille de l'échantillon sur le résultat potentiel et la reproductibilité des résultats, nous avons simulé des expériences virtuelles avec des tailles d'échantillon variant de $n = 12$ à $n = 90$. Les résultats, comme prévus, ont montré une augmentation de la cohérence au fur et à mesure que la taille de l'échantillon augmentait, atteignant les 100% de cohérence lorsque $n = 40$. Le seuil de cohérence de 75% a été atteint pour les expériences virtuelles avec 20 participants et jusqu'à 33 participants étaient nécessaires pour atteindre 95%. Ces résultats montrent, compte tenu du plan expérimental intra-sujets, que 40 participants auraient assuré un nombre optimal de participants pour observer l'effet de la latence sur l'incarnation.

3.5.2 Protocoles inter-sujets

Contrairement à notre hypothèse initiale, les résultats des plans inter-sujets de 92 participants n'ont pas permis de reproduire les résultats obtenus pour le plan intra-sujets. En supposant que l'effet existe, comme les expériences virtuelles intra-sujets ont pu le détecter, atteignant même un 100% de cohérence autour de 40 participants, et en considérant que l'ensemble de données était le même, nous supposons que le protocole inter-sujets n'a pas réussi à détecter un effet pourtant existant. Une analyse de puissance a été effectuée après l'expérience, afin de déterminer la taille de l'échantillon qui aurait été nécessaire pour détecter un effet en protocole inter-sujets. Cette analyse a été réalisée à l'aide du logiciel G*Power [72], et la taille de l'échantillon a été calculée à l'aide de la taille de l'effet trouvée dans l'étude initiale de 92 participants au sein d'un même groupe. L'analyse donne une taille d'échantillon de 170 personnes comme nécessaire pour un protocole inter-sujets, alors que pour l'étude intra-sujets, la taille d'échantillon requise était de 44 personnes. Cela met nos résultats en perspective : la taille de l'échantillon pour un protocole inter-sujets, même avec une variable indépendante à deux niveaux, pourrait nécessiter quatre fois plus de participants pour détecter un effet que dans un protocole intra-sujets. Il est important de noter que ces résultats dépendent fortement de la taille de l'effet. Des études antérieures sur l'incarnation, menées à l'aide de plans inter-sujets, ont également montré qu'il était possible de trouver des différences significatives pour des tailles d'effet équivalentes ou inférieures aux nôtres, avec moins de participants [150, 258]. Bien que la tâche et le contexte soient différents, il pourrait y avoir des facteurs qui sont négligés lors de la réalisation d'études inter-sujets concernant l'incarnation dans la RV, comme les différences individuelles, comme le sexe ou l'âge. Compte tenu des résultats obtenus pour le plan d'expériences inter-sujets de 92 participants, il n'est pas surprenant que les expériences virtuelles avec un plus petit nombre de participants n'aient pas non plus réussi à détecter d'effet entre les conditions de façon répétée. Ces résultats sont conformes aux travaux de Kalckert *et al.* [121] qui a noté que les résultats de l'expérience de la main en caoutchouc pouvaient être différents en fonction du plan expérimental.

En considérant qu'aucune différence n'a été trouvée pour la première condition entre le groupe qui a commencé par la condition synchrone et celui qui a commencé par la condition asynchrone, les différences observées ne peuvent s'expliquer que par la deuxième condition de chaque participant et la façon dont ils ont répondu au questionnaire d'incarnation lors de leur second passage. L'analyse des expériences virtuelles inter-groupes de la deuxième condition pourrait potentiellement renforcer cette explication, car nous constatons sur la Figure 3.3 que la cohérence augmente de façon constante à mesure que l'échantillon de participants s'élargit. Cependant, il est important de souligner que la deuxième condition ne peut pas être considérée comme un pur plan d'expérience inter-sujets, car les participants ont été exposés aux deux conditions. Ainsi, nous pouvons émettre l'hypothèse que les participants ont eu des difficultés à répondre aux différentes questions des questionnaires d'incarnation de manière absolue.

Une explication possible des divergences entre la première et la deuxième condition est que les participants ont d'abord répondu aux questions de manière approximative. Ils auraient alors mieux compris comment y répondre, et à quels aspects de la tâche ils devaient prêter attention lors de la deuxième condition. Ensuite, lorsqu'ils remplissent le questionnaire une deuxième fois pour l'autre condition, ils répondent aux questions de manière relative, en se basant sur ce dont ils se souviennent de leurs réponses aux questions précédentes. Toutefois, si les participants n'avaient répondu que de manière relative, s'ils n'avaient pas remarqué de différence entre les deux conditions, les résultats obtenus pour la deuxième condition auraient pu rester similaires à ceux de la première condition.

Par exemple, des études antérieures concernant l'illusion de la main en caoutchouc [13] ont fait valoir que c'est la comparaison entre les conditions qui est intéressante. Ce point de vue est étayé par les commentaires informels de quelques participants sur la façon dont ils ont interprété le questionnaire et sur la stratégie qu'ils ont adoptée. Six participants ont mentionné à la fin de l'expérience qu'ils s'étaient davantage concentrés sur ce qui se passait pendant la deuxième tâche après avoir répondu une fois au questionnaire sur l'incarnation et avoir eu une "idée de ce qu'on attendait d'eux", comme l'a dit l'un d'eux. Un participant, après avoir demandé de l'aide pour comprendre un élément particulier du premier questionnaire, a dit à l'expérimentateur que c'était « plus facile la deuxième fois, parce qu'[ils ont] une référence maintenant ». D'autres études, sous forme d'entretiens semi-structurés après avoir rempli les questionnaires, seraient nécessaires pour mieux comprendre la stratégie suivie par les participants lorsqu'ils répondent. Si ce type de stratégie s'avère commun, cela signifierait que les protocoles d'étude de l'incarnation doivent être affinés. Pour les études inter et intra-sujets, une solution serait d'aider les participants à répondre aux questionnaires de manière absolue, en présentant par exemple des exemples de situations pour les deux extrêmes de l'échelle pour chaque question. Une autre solution serait de mettre en place une phase de formation où les participants découvrirait une condition de référence ainsi que le questionnaire d'incarnation avant de passer à la condition expérimentale. L'inconvénient découlant directement d'une telle solution serait que les participants

auraient connaissance du questionnaire, tout comme dans un plan intra-sujets. Cela diminuerait ainsi l’attrait des protocoles inter-sujets. Pour les études intra-sujets, d’autres solutions peuvent être envisagées. Par exemple, les réponses au questionnaire de la condition précédente peuvent être présentées aux participants pour les aider à répondre à la condition actuelle de manière relative. Une autre solution serait de fournir des questionnaires avec des échelles relatives, auxquels il faudrait répondre relativement par rapport aux réponses de la condition précédente (‘L’expérience était-elle meilleure ou dégradée par rapport à votre passage précédent’).

Le fait qu’un certain nombre d’études d’incarnation aient trouvé des différences significatives avec des protocoles inter-sujets pourrait s’expliquer par la taille d’effet plus petite trouvée dans notre étude. Dans l’ensemble, nos résultats suggèrent qu’une conception intra-sujets devrait être préférée à une conception inter-sujets dans les études d’incarnation lorsque cela est possible.

3.6 Limitations

La principale limite de cette étude concerne la généralisation de nos résultats. Ils sont en effet liés à la taille de l’effet qui dépend de la valeur de la latence utilisée dans la condition asynchrone. Des valeurs plus élevées de latence augmenteraient la taille de l’effet et augmenteraient les chances de détecter l’effet en utilisant un design inter-sujets. Il est également possible que la taille de l’échantillon pour le plan d’étude inter-sujets soit trop petite, car l’analyse de puissance post-expérimentale a montré qu’un échantillon de 170 participants était nécessaire. Néanmoins, les différences constatées entre les plans intra et inter-sujets pourraient être liées à la mesure de l’incarnation mise en place pour notre expérience.

En effet, l’incarnation peut être mesurée en utilisant des mesures subjectives avec des questionnaires mais aussi des mesures objectives. Nous n’avons utilisé que des mesures subjectives pour garder l’expérience simple, et en particulier, un seul questionnaire d’incarnation mesurant les valeurs absolues de l’incarnation. D’autres questionnaires d’incarnation auraient pu être utilisés [199], ce qui aurait pu donner des résultats différents. Les travaux futurs pourraient combiner des mesures subjectives avec des mesures objectives afin de mieux caractériser la capacité à détecter les effets lorsqu’ils existent.

En outre, en raison de la grande hétérogénéité des expériences évaluant l’incarnation, les questionnaires d’incarnation doivent être adaptés à chaque expérience. Nous avons adapté un questionnaire sur l’incarnation au mieux de nos connaissances, mais la formulation des questions pourrait introduire un certain bruit dans les réponses aux questions. D’autres travaux comparant différentes adaptations d’un questionnaire à une expérience donnée pourraient aider à mesurer l’impact de l’adaptation des questionnaires.

3.7 Travaux futurs

Nous avons évoqué dans les Sections 3.3.6 et 3.3.6 des questionnaires un ensemble de questionnaires permettant de qualifier des traits individuels chez des participants, sans expliquer l’objectif d’avoir mis en place ces questionnaires ni mentionner d’analyses ayant été effectuées dessus. Dans cette section, nous nous proposons de revenir sur une démarche qui a sous-tendu les travaux présentés dans le chapitre, et qui nous permettra de justifier de la récolte des données issues des questionnaires en question.

Les questionnaires présentés en Section 3.3.6 ont pour but d’évaluer l’état global d’une personne au moment où ils sont administrés, selon un ensemble de métriques qui ont déjà été corrélées, positivement ou négativement, avec l’incarnation (voir Section 2.3.6 de notre revue de la littérature). En incluant ces questionnaires, nous avons pour objectif de récolter des données corrélées à l’incarnation qui permettraient à terme de concevoir un sous-questionnaire prédisant le sentiment d’incarnation chez des participants. Ce sous-questionnaire servirait d’outil pour permettre aux chercheurs étudiant le sentiment d’incarnation virtuelle d’anticiper, ou du moins de palier aux biais introduits par les différences inter-personnelles lors de la conception de protocole inter-sujets. Ce questionnaire devrait être capable d’anticiper si un groupe formé arbitrairement dans le cadre d’un protocole inter-sujets est homogène ou non. Idéalement, il serait capable de prédire chez un participant la capacité à s’incarner, que l’on appellerait *incarnabilité*.

Nous avons fait l’hypothèse qu’il était possible d’extraire, à partir de ces différentes métriques, un sous-échantillon de questions issues desdites métriques, qui fournirait un pouvoir prédictif sur l’incarnation individuelle. Ce sous-échantillon de questions servirait de critère permettant d’évaluer, théoriquement, l’incarnabilité d’un individu. Une fois ce nouveau questionnaire obtenu, et en faisant l’hypothèse que celui-ci est validement construit, il deviendrait alors possible de se servir de cette nouvelle métrique d’incarnabilité pour anticiper, chez un participant quelconque, le niveau d’incarnation attendu chez ce participant, en amont de l’expérience. Cette métrique pourrait alors être utilisée pour créer des groupes homogènes en incarnabilité.

Il resterait alors, en dernier objectif, à montrer que ces groupes homogènes en incarnabilité sont aussi, effectivement, homogènes en incarnation. Pour ce faire, nous avons imaginé une démarche en plusieurs étapes. Dans un premier temps, en partant des données issues de notre expérience, calculer les scores d’incarnabilité de nos participants. Dans un second temps, créer des sous-groupes issus de l’échantillon initial limité à la première condition de chaque participant. Chacun de ces sous-groupes serait classifié selon un critère : leur conformité aux résultats initiaux. A ce stade de l’analyse, il est nécessaire qu’il y ait effectivement une différence significative en termes d’incarnation entre les deux conditions expérimentales dont sont issues les données globales pour l’ensemble de l’échantillon, quel que soit le type d’analyse – intra-sujets ou inter-sujets. Cela signifierait que l’échantillon est globalement homogène, et qu’un

sous-groupe homogène devrait lui aussi donner des résultats observables similaires – une différence significative entre les conditions. Ainsi, si un sous-groupe est homogène, on retrouvera une différence significative en termes d’incarnation, et inversement, s’il n’est pas homogène, on ne retrouvera pas cette différence, ou pire, on trouvera une différence dans l’autre sens (la condition expérimentale théoriquement dégradée plus haute que la condition optimale). En tirant aléatoirement ces sous-groupes, on obtiendra un pourcentage $n\%$ de sous-groupes conformes, et donc par suite, sensiblement homogènes en incarnation. Il conviendrait ensuite d’introduire notre métrique d’incarnabilité, au moment d’effectuer le tirage, pour discriminer certains groupements. On obtiendrait ainsi un pourcentage $m\%$ de sous-groupes conformes, et l’on pourrait ainsi comparer m et n pour évaluer la qualité de la métrique proposée.

Ce cheminement complet, qui aboutit à la validation du questionnaire d’incarnabilité, peut donc se résumer en deux étapes qui viennent à la suite de celles introduites plus tôt dans le chapitre :

- Mise en place et réplication d’un protocole sur l’incarnation virtuelle, avec 2 conditions expérimentales significativement différentes.
- Ajout des questionnaires corrélés à l’incarnation dans le protocole expérimental.
- Comparaison des résultats en analyse intra-sujets et inter-sujets.
- Analyse de l’influence du nombre de participants sur la capacité des protocoles à détecter des effets.
- Détermination des critères avec le meilleur pouvoir prédictif du sentiment d’incarnation.
- Tirage et comparaison des sous-groupes aléatoires ou basés sur le critère d’incarnabilité.

Nous avons mis en place plusieurs méthodes pour être en mesure de prédire le niveau d’incarnation chez les participants. Premièrement, en considérant notre protocole expérimental, il y a plusieurs façons de considérer l’incarnation : il est possible de s’intéresser à l’incarnation optimale, qui correspond donc à la condition SYNCHRO, et trouver les items du questionnaire post-expérimental qui prédit au mieux ce niveau d’incarnation. Il est aussi possible de considérer que ce qui est évalué, au travers du protocole intra-sujets, est la différence entre la condition optimale et la condition dégradée soit SYNCHRO – ASYNCHRO. Enfin, on peut aussi considérer que le niveau d’incarnation de la condition dégradée, ASYNCHRO, est plus représentatif des différences entre participants. Nous pensons que le niveau d’incarnation de ASYNCHRO n’était pas utile dans l’optique de proposer une métrique d’incarnabilité, car trop spécifique à notre contexte expérimental. La conception du questionnaire d’incarnabilité pourrait reposer sur les différentes méthodologies proposées dans des travaux proches [67, 185, 204], par réduction de dimension et établissement de corrélations significatives, puis par itérations successives.

Dans les faits, nous n’avons pas trouvé de différence significative entre les conditions expérimentales dans les analyses de l’échantillon global en analyse inter-sujets. Cette hypothèse est nécessaire dans la démarche afin de pouvoir discriminer les sous-groupes créés durant nos

simulations entre les sous-groupes conformes et les non-conformes. Nous n'avons donc pas pu mener notre démarche jusqu'au bout. Il serait donc nécessaire de concevoir un nouveau protocole expérimental – avec une latence plus importante par exemple – pour récolter de nouvelles données qui permettent de mener cette démarche jusqu'à son terme. Nous pensons néanmoins que des outils méthodologiques propres à l'étude de l'incarnation et de l'expérience utilisateur sont nécessaires pour réaliser des expériences suivant des protocoles inter-sujets.

3.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une méthodologie permettant de comparer les plans intra-sujets et inter-sujets. À partir d'une vérité de terrain établie par la littérature, notre étude a réussi à montrer que, selon le plan expérimental et la taille de l'effet, il était possible de ne pas détecter un effet pourtant existant. Alors que nous avons observé l'effet attendu de la latence sur l'incarnation avec un plan intra-sujets, nous ne l'avons pas détecté avec un plan inter-sujets. Dans l'ensemble, la conception intra-sujets est beaucoup plus apte à détecter des effets de taille petite à moyenne, avec un nombre de participants requis plus faible. Nous avons proposé des explications possibles à ce résultat. Les participants ont très probablement répondu au deuxième questionnaire par rapport au premier, et la différence mesurée dans l'incarnation est due à cette différence, et non aux valeurs absolues. Par conséquent, nous recommandons, pour les études sur l'incarnation, d'utiliser un protocole intra-sujets. Cependant, nous reconnaissons que certaines tâches expérimentales requièrent un plan inter-sujets. Nous prévoyons donc de mener des entretiens semi-structurés afin de mieux caractériser la façon dont les participants répondent aux questionnaires sur l'incarnation. Ensuite, nous étudierons les méthodes de calibration qui pourraient permettre aux participants de donner de meilleures évaluations de l'incarnation dans les études de conception inter-sujets. Cela pourrait prendre la forme d'une condition de base avec un questionnaire d'incarnation, qui pourrait donner aux participants le recul nécessaire pour répondre de manière moins arbitraire. Une autre possibilité est de donner aux participants une idée de ce que pourraient être des niveaux extrêmes d'incarnation virtuelle, de manière similaire à Kokkinara *et al.* [131].

Nos hypothèses initiales n'ayant pas été validées, nous n'avons pas pu mener notre démarche jusqu'au bout, et n'avons pas pu proposer d'échelle mesurant l'incarnabilité. Néanmoins, nous pensons que cette démarche peut effectivement être mise en place dans l'optique de proposer un questionnaire d'incarnabilité. Il serait plus qu'intéressant de reprendre cette démarche avec un protocole expérimental similaire ayant déjà été validé pour des protocoles inter-sujets, en tenant compte des différentes observations que nous avons faites au cours du projet, notamment sur les tailles d'effets et sur les mesures de l'incarnation.

Pris dans leur ensemble, nos résultats nous amènent à nous questionner sur les pratiques méthodologiques actuelles. En effet, nous n’avons pas réussi à répliquer pour tout type de protocole ce qui est pourtant une vérité de terrain communément admise. Nous avons aussi pu mettre en évidence le caractère crucial des tailles d’échantillons et des tailles d’effets dans la capacité à détecter des effets au cours d’expériences sur l’incarnation virtuelle. Nous esquissons aussi une méthodologie pour répondre à des problématiques liées aux différences individuelles en RV. Les enseignements de ce projet vont ainsi aider les chercheurs de la communauté de RV à concevoir des expériences plus robustes.

Dans le prochain chapitre, nous nous intéresserons toujours à l’incarnation virtuelle, vue au travers du prisme du retour haptique. Particulièrement, nous essayerons de voir comment la cohérence du retour haptique par rapport à l’EVI et aux interactions entre l’EVI et l’utilisateur peut impacter l’incarnation virtuelle.

CHAPITRE 4

MODALITÉS DU RETOUR HAPTIQUE ET INCARNATION

Résumé

Dans ce chapitre, nous nous intéressons aux deux notions clés de ces travaux de thèse, nommément le retour haptique, et son impact sur le sentiment d'incarnation en EVI. Nous présentons une expérience dans laquelle les participants, incarnés dans des avatars, devaient réaliser une tâche de dessin sous plusieurs conditions expérimentales. Dans ces conditions, nous avons fait varier la forme du retour haptique mis en place lorsque les utilisateurs interagissaient avec des objets de l'environnement virtuel. Nous avons mesuré l'incarnation virtuelle des participants au travers d'un questionnaire d'incarnation, ainsi que la charge de travail subjective ressentie et les performances des participants à la tâche de dessin. Pris dans leur ensemble, nos résultats vont aider à concevoir à mieux intégrer le retour haptique en expérience en EVI, et apportent des éclaircissements sur les liens entre forme du retour et sentiment d'incarnation.

Les travaux présentés dans ce chapitre ont fait l'objet d'une publication dans le journal *Frontiers in Virtual Reality and Humand Behaviors* [194].

4.1 Contexte

Comme nous avons pu le voir dans notre revue de la littérature, l'incarnation est souvent étudiée lorsqu'elle est suscitée par intégration multisensorielle visuomotrice et/ou visuotactile [131, 132, 203, 224], tandis que le retour haptique est souvent décomposé en informations kinesthésiques et tactiles. Cette dichotomie se retrouve aussi dans la simulation du retour haptique en EVI. En effet, l'approche la plus répandue en RV consiste à implémenter un retour de force [33, 51, 159] ou un retour tactile [39, 116, 123], tandis que les autres formes du retour haptique, comme le retour vestibulaire [229, 247], sont moins fréquents. Aujourd'hui, l'intégration du retour haptique suscite l'attention en ce qui concerne l'incarnation [52, 79, 134, 192] mais les études liées à ce sujet particulier n'ont jamais combiné la RV et les différentes formes de retour haptique pour étudier l'incarnation. Ainsi, il reste à éclaircir la façon dont les différents types de retour haptique peuvent influencer le sentiment d'incarnation en RV.

Dans ce chapitre, nous explorons l'effet de différents types de retour haptique sur le sentiment d'incarnation dans les environnements virtuels pendant une tâche de dessin. En particulier, nous voulons voir s'il existe un type de retour haptique qui est plus adapté à la tâche proposée en termes d'incarnation et de performance. Une expérience contrôlée, avec des interactions similaires à celles de l'étude de Burin *et al.* [36], a été conçue dans laquelle les participants pouvaient interagir librement avec l'environnement, et devaient colorier des dessins dans un temps limité. Deux formes de retour haptique ont été implémentées et évaluées : retour de force, et retour vibrotactile. Ces deux conditions ont été comparées à une condition de contrôle sans retour haptique. Il était principalement demandé aux utilisateurs d'interagir avec des objets virtuels qui sont que l'ont peut toucher dans la réalité. Ainsi, le retour de force correspondait davantage à la réalité et constituait un type de retour plus écologique, tandis que le retour vibrotactile pouvait être considéré comme symbolique. L'incarnation virtuelle a été étudiée à travers ses trois principales sous-composantes, la propriété, l'agentivité et l'auto-localisation, et à travers les sensations tactiles. La charge de travail et les performances ont également été évaluées. Les participants ont rapporté leur niveau d'incarnation et de charge de travail perçus par le biais de questionnaires, et la performance a été évaluée en analysant les dessins réalisés.

L'hypothèse principale était que le retour haptique augmenterait le sentiment d'incarnation. Nous avons également supposé que le retour le plus écologique augmenterait davantage l'incarnation que le retour symbolique, et donc que le retour de force fournirait une plus grande incarnation que le retour vibrotactile.

Les résultats montrent que l'incarnation est liée à la forme du retour haptique, le retour de force entraînant un sentiment d'incarnation global significativement plus élevé que l'absence de retour haptique. Le retour de force réduit également de manière significative la charge de travail subjective par rapport au retour vibrotactile et à l'absence de retour haptique. La contribution de

cette étude aidera à concevoir des interactions haptiques en ce qui concerne l'incarnation dans les EVI.

4.2 Protocole expérimental

L'objectif principal de l'expérience est d'étudier comment l'utilisation du retour haptique peut améliorer le sentiment d'incarnation des participants dans un EVI, et de comparer l'influence relative de différents retours haptiques, par exemple le retour de force et la stimulation vibrotactile.

4.2.1 Hypothèses

D'après notre revue de la littérature, notre première hypothèse de recherche découle directement du paradigme de l'illusion de la main en caoutchouc et sa réplication en EVI [30, 203, 224] et des différentes études sur l'incarnation en corrélation avec le retour haptique [52]. Ces études montrent que l'intégration multisensorielle conduit à des niveaux plus élevés d'incarnation et en particulier d'appropriation corporelle. On pourrait donc en déduire que les résultats concernant les différentes modalités haptiques ne diffèrent pas des résultats précédents. De plus, dans un contexte où le retour haptique simule des surfaces physiques, le retour de force est plus écologique et cohérent que le retour vibrotactile, car il correspond davantage à la réalité. Nous émettons l'hypothèse que *le retour haptique augmenterait le niveau d'incarnation (H1)* et que *le retour de force susciterait un niveau d'incarnation plus élevé que le retour vibrotactile. (H1.1)*.

De plus, le principe de cohérence, tel que décrit par Jeunet *et al.* [118] nous amène à penser que le retour haptique le plus cohérent apportera un sentiment d'agentivité plus élevé. Nous supposons ici qu'un contrôle plus fin de l'avatar, par le biais d'une amélioration de l'agentivité, diminuerait la charge de travail perçue et augmenterait les performances, puisque le contraire, une dégradation de l'agentivité conduisant à une performance inférieure, est vrai [252]. Comme des études l'ont déjà montré [48, 133], le retour haptique peut augmenter la performance, en particulier le temps de réalisation de tâches. À ce titre, nous émettons l'hypothèse que *le retour de force susciterait une agentivité plus élevée que le vibrotactile et l'absence de retour haptique. (H2)* et que *le retour haptique augmenterait la performance, et le retour de force l'augmenterait davantage que le retour tactile. (H2.1)*.

L'étude de Fröhner *et al.* [79], et les différentes expériences reproduisant l'illusion de la main en caoutchouc [30, 203, 242] montrent un changement du sens de la localisation de soi, par un décalage proprioceptif, décalage qui se réalise en direction de la main en caoutchouc. Pour rappel, le décalage proprioceptif (*proprioceptive drift*) caractérise le phénomène qui peut surve-

nir lorsqu'un individu s'incarne dans un corps étranger, comme la main factice dans l'illusion de la main en caoutchouc, éloigné du sien. L'individu, lorsqu'il lui est demandé de positionner sa propre main sans aide visuelle, et donc en se reposant uniquement sur sa perception proprioceptive, tend à positionner son membre ou son corps plus près du corps étranger. Sa perception s'est donc *décalée* vers le corps étranger dans lequel il s'est incarné. Dans les études citées plus haut, qui mettent en évidence ce phénomène de décalage proprioceptif, la dérive provient de la différence de position apparente entre le corps réel et le corps factice ou virtuel. Dans notre expérience, le corps réel et l'avatar sont co-localisés. Cependant, en RV, si un utilisateur veut interagir avec un objet virtuel fixe dans l'espace par le biais de l'avatar, il y a deux possibilités. Soit la représentation virtuelle *traverse* les objets virtuels et la position de l'avatar reste la même que celle de l'utilisateur, soit l'avatar ne *traverse* pas, et lors de l'interaction avec un objet virtuel, il y aura un décalage entre l'avatar et l'utilisateur égal à la pénétration dans l'objet virtuel, ce que l'on appellera *interpénétration* par la suite dans ce chapitre. La deuxième possibilité est la manière standard d'implémenter l'haptique dans les IVE, en utilisant un *proxy* [165], et c'est donc cette possibilité qui a donc été utilisée dans cette expérience. Un *proxy* représente la position de l'interface haptique au sein de l'EVI. En utilisant un proxy, il y a découplage de la position réelle de l'interface et du proxy lors d'un contact avec un objet virtuel (voir figure 4.1) Cela signifie que dans les conditions sans retour haptique et avec retour vibrotactile, la main réelle des participants ne correspond pas à celle de l'avatar lorsqu'ils touchent des objets virtuels fixes, ce qui peut faire baisser le niveau d'auto-localisation. Nous avons donc émis l'hypothèse que le retour de force seul augmenterait le sentiment d'auto-localisation (**H3**).

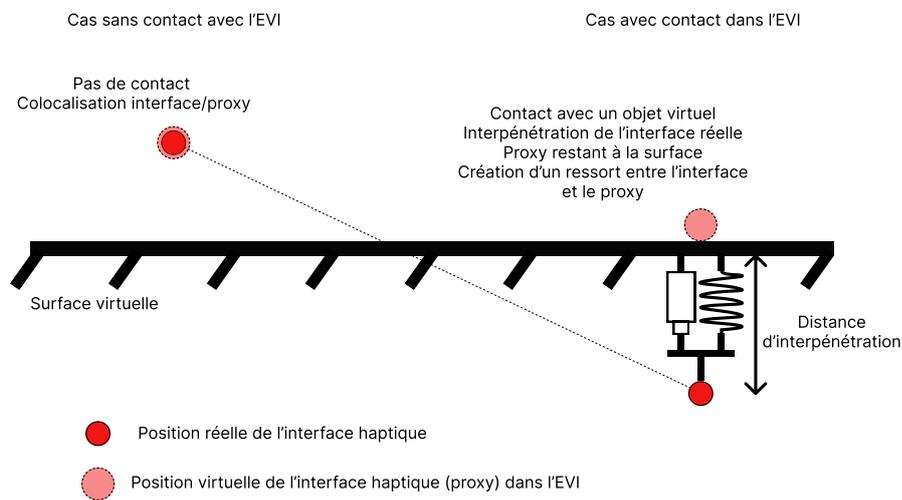


FIGURE 4.1 – Illustration du fonctionnement d'un proxy haptique en EVI avec et sans contact virtuel.

4.2.2 Participants

Cette étude d'utilisateur a été réalisée auprès de 24 participants (13 hommes et 11 femmes), âgés de 23 à 51 ans ($M = 30,8$; $\sigma = 7,7$). Les participants ont été recrutés au sein du laboratoire, et étaient naïfs quant aux hypothèses expérimentales. Treize avaient une expérience préalable en RV, deux étaient familiers avec la technologie, et le reste n'avait aucune expérience préalable. Deux participants masculins étaient gauchers, et les autres étaient droitiers. Les participants n'ont reçu aucune compensation et ont pris part à l'étude en tant que volontaires.

4.2.3 Tâche

La tâche consistait à colorier un mandala, comme représenté sur la figure 4.2. Cette tâche a été inspirée par l'étude de Burin *et al.* [36], qui a évalué l'appropriation du corps dans la RV en utilisant une tâche de dessin. Cette tâche de manipulation fine nous semblait également adaptée pour explorer l'influence du retour haptique sur l'incarnation.

Le diamètre du mandala était de 300 mm. Les participants incarnaient un avatar humanoïde, soit masculin, soit féminin (voir figure 4.2). Les participants tenaient un pinceau dans leur main dominante et pouvaient changer la couleur du dessin en touchant avec le pinceau la sphère correspondante au bas du mandala. Chaque sphère représentait une couleur de peinture différente. La taille du trait a été définie et implémentée pour augmenter de façon linéaire avec la distance d'interpénétration (telle que définie dans la section 4.2.1). La taille minimale du trait a été fixée à 3 mm et la taille maximale à 60 mm. La taille minimale et maximale du trait était la même pour chaque condition, mais les trois conditions différaient dans la relation linéaire entre la taille du trait et l'interpénétration. En effet, les distances d'interpénétration réelles, au cours de l'expérience, sont différentes suivant la condition expérimentale. Pour les conditions sans retour haptique ou avec retour vibrotactile, comme nous l'avons évoqué dans nos hypothèses (section 4.2.1), le pinceau et la main des participants vont traverser les objets virtuels, et particulièrement le mandala, causant une interpénétration relativement importante, et assez difficile à remarquer, tandis qu'au cours de la condition à retour de force, le périphérique haptique va créer des surfaces tangibles *dures* pour que les participants puissent toucher les objets virtuels. Ainsi, cela va naturellement grandement réduire l'interpénétration. L'interpénétration maximale a été fixée à 80 mm pour l'absence de retour haptique et vibrotactile et à 10 mm pour le retour de force. Ces valeurs ont été obtenues par des tests préliminaires. Plus de détails concernant les conditions sont donnés dans la sous-section ci-dessous.

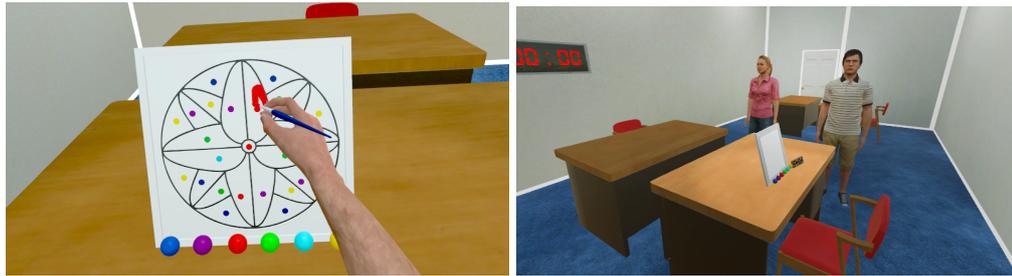


FIGURE 4.2 – L’environnement virtuel du point de vue de la première personne durant la tâche (à gauche), et vue générale de l’environnement avec les deux avatars (à droite).

4.2.4 Dispositif technologique

Le dispositif expérimental était composé d’un *HTC Vive*¹, pour le retour visuel, et un *Phantom Desktop* de *3D Systems* [159, 236] pour interagir avec l’environnement et intégrer le retour haptique. Les participants ont utilisé le stylet du *Phantom Desktop* pour contrôler la position et l’orientation en 3D d’un pinceau virtuel. La configuration comprenait également un casque de réduction du bruit 3M 1435 offrant une réduction du bruit de 19 dB (SNR) à 250 Hz². L’expérience a été réalisée avec *Unity 3D 2018.3.11.f1*, et le plugin *Steam VR* pour prendre en charge la RV dans *Unity*. Le *3D Systems Openhaptics Unity Plugin* nous a servi pour fournir la position et l’orientation du stylet et pour envoyer le vecteur de force au périphérique haptique. Ce plugin permettait en outre de compenser artificiellement le poids inhérent du stylet du *Phantom Desktop*. L’ordinateur sur lequel se déroulait l’expérience était équipé de deux processeurs Intel Xeon(R) E5-2630 cadencés à 2,20 GHz, d’une carte graphique Nvidia GeForce GTX 1080 et de 64 Go de RAM.

Les représentations virtuelles des participants étaient deux avatars de genre masculin et féminin de la bibliothèque *RocketBox* [93]. Les avatars étaient contrôlés par cinématique inverse [197], la position et la rotation du HMD étant liées à la tête, et le stylet à la main dominante. Le roulis (la rotation autour de l’axe du stylet) a été supprimé dans l’EVI et fixé à une valeur arbitraire en raison du nombre limité de degrés de liberté dans l’avatar, qui autrement entraînerait des mouvements de bras irréalistes, particulièrement au niveau du poignet et du coude. Avec ce dispositif (le bras et la main de l’avatar contrôlé par cinématique inverse avec la position et l’orientation du stylet), il n’est pas possible de retranscrire les mouvements des doigts relativement à la paume de la main, tel que nécessaire pour manipuler le pinceau aussi fidèlement/finement qu’on le ferait avec un vrai pinceau. Cette limitation est toutefois présente sur toutes les conditions expérimentales. Les rotations de lacet et de tangage ont été conservées,

1. Vive VR System, HTC & Valve, https://www.vive.com/eu/support/vive/category_howto/about-the-headset.html, consulté le 27/12/2022

2. Casque de réduction du bruit 1435, 3M, <http://multimedia.3m.com/mws/media/4606980/3m-general-purpose-ear-muff-1435.pdf>, consulté le 17/11/2022

avec un rapport entre les rotations réelles et virtuelles de 1 : 1. Le reste du corps virtuel a été disposé de manière à être en position assise. Le *Phantom Desktop* était posé sur un bureau, devant les participants, centré de manière à pouvoir être manipulé de la même manière par les participants droitiers et gauchers (voir la vidéo associée³).

L'espace de travail du *Phantom Desktop* étant petit ($360 \times 180 \times 180$ mm, mesuré expérimentalement), un ratio mouvement dans l'EVI/mouvement réel de 1,4 a été utilisé, restant sous le seuil de 50 % de divergence trouvé par Burns *et al.* [37].

Dans la condition de retour de force, les objets interactifs de la scène pouvaient être ressentis soit par leur surface, pour les objets tangibles, soit par leur viscosité, pour les liquides (par exemple, les sphères représentant la peinture). Le retour de force a été calculé à partir d'*Unity 3D*, en utilisant le *plugin Openhaptics*. Les surfaces tangibles ont été simulées par le composant *Surface haptique* du *plugin* (avec une rigidité de 0,7, un amortissement de 0,1, une friction statique de 0,2 et une friction dynamique de 0,3), la viscosité a été simulée grâce au composant *Effet haptique* (type d'effet visqueux, gain et magnitude fixés à 0,6). Une rigidité de 0,7 donne une force continue d'environ 1,2N, ce qui est de l'ordre de grandeur d'une interaction habituelle [159]. Ces valeurs ont été ajustées par des études pilotes informelles, réalisées avec 4 participants.

Pour le retour tactile, un vibreur EAI C2⁴, également connu sous le nom de *tactor*, a été utilisé. Le vibreur a été fixé sous le stylet du *Phantom*, à sa pointe, à l'aide d'un élastique, comme illustré sur la Figure 4.4. Un contact rigide a été assuré entre eux, et l'élastique a été placé de telle sorte à ce que la partie mobile du vibreur ne soit pas bloquée dans ses mouvements vibratoires pour ne pas atténuer la vibration en sortie. L'emplacement du *tactor* sur le stylet a permis une bonne transmission des vibrations le long du boîtier du stylet, sans gêner les participants dans leurs mouvements. Le *tactor* a été connecté à une carte *Arduino Leonardo* par le biais d'une carte électronique sur mesure équipée d'une porte CMOS NAND pour moduler le retour tactile. Un signal classique synthétique et basé sur une forme carrée a été utilisé [99]. Le retour tactile consistait en un signal de forme carrée de 250 Hz [89], modulé par un signal carré de 31 kHz avec un rapport cyclique variable pour contrôler l'amplitude, tel qu'illustré dans la Figure 4.3. Avec un microcontrôleur cadencé à 16 MHz et 256 niveaux de précision dans le rapport cyclique, 31 KHz est le signal d'horloge le plus rapide que l'on puisse obtenir. Les informations tactiles ont été transmises à la carte *Arduino* à 1000 Hz pour minimiser les délais de communication [44]. L'amplitude des vibrations a été simulée par une relation linéaire en fonction de la distance d'interpénétration pour les contacts rigides [48]. Un test préliminaire informel a été réalisé avec 4 participants pour déterminer la distance d'interpénétration maximale préférée. Quatre valeurs ont été comparées : 60 mm, 80 mm, 100 mm et 120 mm. Les valeurs les plus petites ne

3. https://youtu.be/o_Vb2AdBK0E

4. C-2 Tactor, Engineering Acoustics, Inc., <https://www.eaiinfo.com/product/c2/>, Accessed on 17/11/2022

permettaient pas aux participants des pré-tests de contrôler l'épaisseur assez finement, tandis que les valeurs plus grandes empiétaient trop sur l'espace de travail de l'appareil. L'amplitude maximale a été fixée à une distance de 80 mm comme compromis. Pour les contacts non rigides (par exemple, le contact visqueux avec les sphères de peinture), il n'y a pas eu de modulation de l'amplitude, et les vibrations ont été fixées à 30 % de l'amplitude maximale.

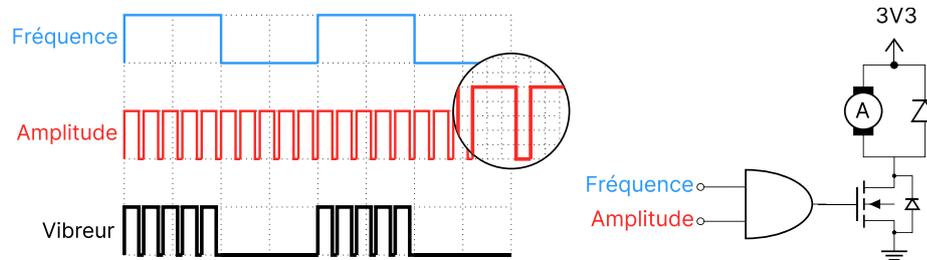


FIGURE 4.3 – Résultante du signal au niveau du vibreur pour contrôler l'amplitude et la fréquence (à gauche), et le circuit électrique simplifié (à droite) [188].

4.2.5 Plan expérimental

L'expérience a été conçue selon un plan intra-sujets avec une variable indépendante, à savoir le *type de retour*, administré selon trois niveaux : aucun retour haptique (CTRL), retour de force (FFB) et retour vibrotactile (VBT). Le retour visuel était le même dans toutes les conditions. Le *type de retour* était contrebalancé par un carré latin afin de minimiser les effets d'ordre.

En résumé, notre plan expérimental était le suivant : 24 participants \times 3 *types de retour* = 72 *trials*.

4.2.6 Procédure

Les participants ont été invités à s'asseoir devant le bureau utilisé pour l'expérience et à remplir un formulaire de consentement et un questionnaire contenant des informations démographiques. Ils ont reçu des informations concernant le dispositif haptique et la prudence requise pour sa manipulation, puis ont été invités à tenir le stylet du périphérique haptique comme s'ils tenaient un stylo, et enfin, à s'équiper du casque de RV. Pour chaque condition, il leur a été demandé de porter un casque de réduction du bruit. Étant donné qu'il n'y avait aucun moyen de détecter la posture des doigts lorsqu'ils tenaient le stylet, les participants devaient également tenir le stylet du *Phantom* à tout moment et de la même manière que la main virtuelle (figure 4.4). Ils ont ensuite expérimenté chaque condition qui était divisée en deux parties. La première phase consistait en une période d'entraînement. Les participants se trouvaient devant un bureau virtuel,

au sein de l'EVI, avec une toile blanche en face d'eux. Les participants pouvaient explorer les interactions et se familiariser avec le retour sensoriel. Cette période d'échauffement durait entre 30 s et 80 s, et les participants pouvaient l'interrompre en appuyant sur un bouton qui apparaissait après 30 s à côté du coin inférieur droit de la toile. Dans la deuxième phase, les participants devaient colorier le mandala à l'aide du pinceau. Ils avaient pour instruction de colorier chaque zone du mandala avec la couleur appropriée, et de colorier ce qu'ils pouvaient dans un délai de 300 s et en suivant la stratégie qu'ils voulaient. Après avoir terminé chaque condition, les participants étaient invités à retirer le casque de RV et le casque de réduction de bruit pour remplir un questionnaire en ligne, comme détaillé ci-dessous, avant de passer à la condition suivante.



FIGURE 4.4 – Dispositif expérimental : le périphérique haptique *Phantom Desktop* en gros plan, avec à la base du stylet le vibreur *C2 tactor* et la carte électronique *Arduino Leonardo* en arrière-plan.

4.2.7 Variables dépendantes

Les participants ont rapporté leur sentiment d'incarnation et la charge de travail perçue au moyen d'un questionnaire, en utilisant des échelles de Likert à cinq points. Nous avons utilisé un questionnaire d'incarnation proposé par Gonzalez-Franco & Peck [92]. Ce questionnaire n'est pas le même que celui utilisé dans le premier chapitre (voir table 3.1), qui était issu des travaux de Peck & Gonzalez-Franco [185], pour la simple raison qu'au moment de l'étude présentée dans ce chapitre, le questionnaire susmentionné n'avait pas été encore publié. Dix questions ont été sélectionnées (dix premières questions dans le tableau 4.1), concernant les sous-composantes de l'incarnation qui étaient pertinentes dans notre contexte. Les questions concernant la perception des sensations tactiles, qui sont "présentes chaque fois qu'il y a une stimulation tactile ou haptique pour renforcer l'illusion d'incarnation" [92], ont également été sélectionnées, car elles étaient pertinentes pour notre étude (questions T-1 à T-4 dans le tableau 4.1). La charge de travail a été mesurée à l'aide du questionnaire standard NASA-TLX [103].

ID	Questions
Agentivité	
A-1	J'avais l'impression que je pouvais contrôler le corps virtuel comme s'il était le mien.
A-2	Les mouvements du corps virtuel étaient causés par mes propres mouvements.
A-3	J'avais l'impression que les mouvements du corps virtuel influençaient mes propres mouvements.
A-4	J'avais l'impression que le corps virtuel se déplaçait tout seul.
Appropriation corporelle	
O-1	J'avais l'impression que le corps virtuel était mon propre corps.
O-2	J'avais l'impression que le corps virtuel que je voyais était celui d'une autre personne.
O-3	J'avais l'impression d'avoir plus d'un corps.
Auto-localisation	
SL-1	J'avais l'impression que mon propre corps était situé là où je voyais le corps virtuel.
SL-2	J'avais l'impression d'être sorti de mon propre corps.
SL-3	J'avais l'impression que mon propre corps se déplaçait vers le corps virtuel ou que le corps virtuel se déplaçait vers mon propre corps.
Sensations tactiles	
T-1	J'avais l'impression que le toucher que je ressentais était situé quelque part entre mon corps physique et le corps virtuel.
T-2	J'avais l'impression que le toucher que je ressentais était causé par l'environnement entrant en contact avec le corps virtuel.
T-3	J'avais l'impression que mon propre corps touchait l'environnement.
T-4	J'avais l'impression que mon propre corps pouvait être affecté par les collisions avec l'environnement virtuel.
Charge de travail	
W-Effort	J'ai eu l'impression que je devais fournir beaucoup d'efforts pour atteindre mon niveau de performance.
W-Frustration	J'ai eu l'impression d'être peu sûr de moi, découragé, irrité, stressé et énervé.
W-Performance	J'ai eu l'impression que la tâche était exigeante sur le plan mental.
W-Success	J'ai eu l'impression de réussir à accomplir la tâche qu'on m'avait demandée.
W-Physical	J'ai eu l'impression que la tâche était exigeante sur le plan physique.
W-Temporal	J'ai eu l'impression que le rythme de la tâche était trop rapide ou précipité.

TABLE 4.1 – Questionnaire post-condition portant sur l'incarnation et la charge de travail. Il présente 5 dimensions : l'incarnation (Agentivité A, appropriation corporelle O, auto-localisation L, sensations Tactiles T), et la charge de travail W.

4.2.8 Mesures objectives

Pour évaluer la performance, le degré de complétude et le degré de précision des peintures ont été mesurés. Le degré de complétude a été défini comme le pourcentage de pixels colorés, en utilisant n'importe quelle couleur. Le degré de précision a été mesuré comme le rapport entre les pixels correctement colorés et le nombre total de pixels colorés. Le nombre total de pixels correctement colorés a été calculé en comptant pour chaque zone le nombre de pixels colorés en utilisant la couleur appropriée. Pour calculer ces deux valeurs, seules les zones situées à l'intérieur du cercle défini par les contours du mandala ont été utilisées.

4.3 Résultats

Comme les données recueillies par le biais des questionnaires étaient ordinales et ne suivaient pas des distributions normales, chaque item a été analysé à l’aide de tests non paramétriques en utilisant l’analyse de Friedman et les tests par paires post-hoc de Wilcoxon avec correction de Bonferroni.

Une ANOVA à mesures répétées sur les données transformées par rangs alignés [257], où l’ordre de présentation a été traité comme une variable indépendante inter-sujets et le type de retour comme une variable intra-sujets, n’a pas montré que l’ordre de présentation avait un effet significatif ou une interaction sur aucune de nos variables dépendantes. Ainsi, nous pouvons supposer que l’ordre de présentation n’a pas d’effet sur nos variables dépendantes.

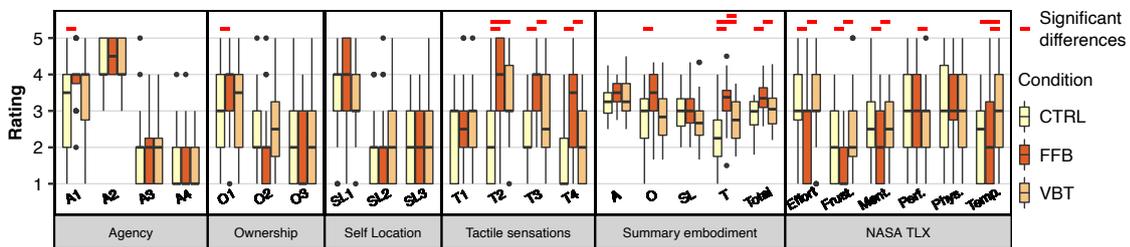


FIGURE 4.5 – Boîtes à moustaches pour l’évaluation de chaque question portant sur l’incarnation et sur la charge de travail, comme décrit dans le tableau 4.1, et regroupées par chaque sous-catégorie d’incarnation. Les lignes rouges au-dessus des boîtes représentent les différences significatives trouvées entre les conditions.

4.3.1 Incarnation

Le score pour chaque sous-dimension de l’incarnation (agentivité, auto-localisation et appropriation) et un score générique pour l’incarnation ont été calculés en regroupant les éléments, comme décrits par Gonzalez-Franco & Peck [92], et rééchelonnés entre 1 et 5.

Une analyse de Friedman sur les scores d’**incarnation globale** a révélé un effet significatif du type de retour haptique ($\chi^2(3) = 52.0, p < 0.0001$). Une analyse post-hoc de Wilcoxon a révélé des différences significatives ($p < 0,005$) entre FFB ($Mdn = 3,35$) et CTRL ($Mdn = 2,99$) et entre FFB et VBT ($Mdn = 3,05$) (voir figure 4.5 - résumé).

Une seconde analyse de Friedman a révélé un effet significatif du type de retour haptique sur les items groupés pour l’**agentivité** ($\chi^2(2) = 10,9, p = 0,004$) mais les comparaisons post-hoc de Wilcoxon n’ont pas révélé de différences significatives. Cependant, une analyse de Friedman sur chaque élément individuel de l’agentivité a révélé un effet significatif de type de retour hap-

tique sur A-1 ($\chi^2(2) = 11,7, p = 0,003$) avec des comparaisons post-hoc montrant une différence significative ($p = 0,01$) entre FFB ($Mdn = 4$) et CTRL ($Mdn = 3,5$).

Aucun effet significatif n'a été trouvé pour les items groupés ou les items individuels de l'**auto-localisation**.

L'analyse de Friedman a révélé un effet significatif du *type de retour* sur les items groupés d'**appropriation corporelle** ($\chi^2(2) = 11,9, p = 0,002$) avec des comparaisons post-hoc révélant une différence significative ($p < 0,01$) entre FFB ($Mdn = 3,5$) et CTRL ($Mdn = 3$). Une analyse de Friedman plus poussée sur chaque élément de propriété a montré un effet significatif du *type de retour* sur O-1 ($\chi^2(2) = 9,7, p = 0,007$) et O-2 ($\chi^2(2) = 6,2, p = 0,04$). Cependant, les comparaisons post-hoc de Wilcoxon n'ont pas révélé de différences significatives pour O-2, mais ont montré une différence significative ($p < 0,05$) entre FFB ($Mdn = 4$) et CTRL ($Mdn = 3$) pour O-1.

Enfin, une analyse de Friedman a révélé un effet significatif du *type de retour haptique* sur les items groupés portant sur les **sensations tactiles** ($\chi^2(2) = 18,7, p < 0,0001$). Les comparaisons post-hoc ont révélé des différences significatives ($p < 0,03$) entre tous les *types de retour* (FFB : 3,38, VBT : 2,75, CTRL : 2,25). L'analyse de Friedman sur chaque question évaluant les sensations tactiles a montré un effet significatif du *type de retour haptique* sur T-2 ($\chi^2(2) = 14,1, p < 0,0001$), T-3 ($\chi^2(2) = 16,1, p < 0,0001$) et T-4 ($\chi^2(2) = 11,2, p = 0,004$). Pour T-2, les comparaisons post-hoc ont révélé une différence significative ($p < 0,007$) entre FFB ($Mdn = 4$) et CTRL ($Mdn = 2$) et une différence significative ($p < 0,01$) entre VBT ($Mdn = 3$) et CTRL ($Mdn = 2$). En ce qui concerne T-3, des différences significatives ($p < 0,003$) ont été constatées entre FFB ($Mdn = 4$) et CTRL ($Mdn = 2$) et entre FFB ($p < 0,03, Mdn = 4$) et entre VBT ($Mdn = 2,5$). Pour l'item T-4, des différences significatives ont été trouvées entre FFB ($p < 0,006, Mdn = 3,5$) et CTRL ($Mdn = 1$) et entre FFB ($p < 0,01, Mdn = 3$) et VBT ($Mdn = 2$).

4.3.2 Charge de travail

L'analyse de Friedman a révélé un effet significatif du *type de retour haptique* sur l'**effort** ($\chi^2(2) = 9,5, p = 0,009$) avec des comparaisons post-hoc révélant des différences significatives entre FFB ($p < 0,04, Mdn = 3$) et VBT ($Mdn = 3$) et entre FFB ($p < 0,03, Mdn = 3$) et CTRL ($Mdn = 3$).

On observe également un effet significatif du *type de retour haptique* sur la **frustration** ($\chi^2(2) = 10,8, p = 0,005$), les comparaisons post-hoc révélant des différences significatives entre FFB ($p < 0,02, Mdn = 1$) et VBT ($Mdn = 2$) et entre FFB ($p < 0,05, Mdn = 1$) et CTRL ($Mdn = 2$).

On observe également un effet significatif du *type de retour haptique* sur l'aspect **mental** ($\chi^2(2)=7,3, p=0,03$), les comparaisons post-hoc révélant des différences significatives entre FFB ($p < 0,05, Mdn = 2$) et CTRL ($Mdn = 2,5$) et entre FFB ($p < 0,04, Mdn = 2$) et VBT ($Mdn = 2,5$).

On observe également un effet significatif du *type de retour haptique* sur la **performance** ($\chi^2(2)=9,5, p=0,009$), les comparaisons post-hoc révélant des différences significatives entre FFB ($p < 0,02, Mdn = 3$) et VBT ($Mdn = 3$).

L'analyse n'a pas révélé d'effet significatif du *type de retour haptique* sur l'aspect **physique** ($\chi^2(2)=2,3, p=0,33$).

Enfin, on observe également un effet significatif du *type de retour haptique* sur la **charge temporelle** ($\chi^2(2)=9,3, p=0,01$), les comparaisons post-hoc révélant des différences significatives entre les FFB ($p < 0,05, Mdn = 2$) et VBT ($Mdn = 3$) et entre CTRL ($p < 0,03, Mdn = 2,5$) et VBT ($Mdn = 3$).

4.3.3 Mesures objectives

Une ANOVA à mesures répétées sur les données Transformées par Classement Aligné (*Aligned Ranked Transformed*) [257] n'a pas montré de différence significative entre les conditions pour les mesures de complétion et de précision au niveau des dessins réalisés par les participants ($p = 0,27$ et $p = 0,28$ respectivement).

4.4 Discussion

Dans cette étude, nous avons cherché à évaluer le lien entre le type de retour haptique et l'incarnation virtuelle. Pris dans leur ensemble, les résultats de notre expérience montrent que, dans la tâche de dessin mise en place, il y a une influence du retour haptique sur l'expérience subjective des utilisateurs : la condition avec retour de force suscite une meilleure incarnation que la condition sans retour haptique, et les participants se sentent plus performants durant la condition avec retour de force par rapport à la condition vibrotactile ou sans retour haptique. Cela peut s'expliquer principalement par de meilleures sensations tactiles, mais aussi par une meilleure appropriation et, dans une moindre mesure, une meilleure agentivité.

Nous pouvons affirmer que le retour de force permet une meilleure incarnation par rapport à l'absence de retour haptique, ce qui est cohérent avec les résultats précédents, l'intégration multisensorielle étant déterminante pour susciter l'émergence d'appropriation corporelle et par suite l'incarnation [30, 242].

Nous pouvons ainsi valider partiellement aux hypothèses (H1), *le retour haptique entraînerait une plus grande appropriation* et (H1.1), *la rétroaction de force entraînerait une plus grande appropriation que l'absence de rétroaction haptique ou vibrotactile*. Le niveau d'appropriation corporelle autorapportée montre une supériorité significative du retour de force sur le retour non haptique dans ce contexte particulier. Pourtant, nos résultats ne corroborent pas les conclusions concernant le retour vibrotactile [79, 134]. Cela pourrait s'expliquer par la polarisation de la réaction des participants à l'égard de la condition vibrotactile : certains participants considéraient le retour vibratoire comme tout à fait correct, tandis que d'autres ne l'appréciaient pas pendant la tâche (comme l'un des participants s'est exclamé pendant le VBT, "C'est vraiment stressant. J'ai l'impression que mon réveil est en train de sonner en permanence"). Pour illustrer davantage ce point, il est intéressant de noter que le retour vibrotactile et l'absence de retour haptique étaient significativement plus frustrants que le retour de force. Nous pensons que, dans un contexte où les utilisateurs doivent interagir avec des objets communs palpables et tangibles, le retour vibrotactile est trop symbolique pour pouvoir concurrencer le retour de force. Des travaux ont montré l'importance de la congruence temporelle et spatiale [213, 243] pour susciter l'incarnation, mais nos résultats suggèrent que le retour haptique doit également reposer sur la congruence contextuelle, que l'on pourrait nommer, à l'instar de Skarbez *et al.* [218], plausibilité du scénario. Cette congruence contextuelle pourrait être liée au principe de cohérence qui a été mis en évidence par Jeunet *et al.* [118] pour le sentiment d'agentivité. L'étude d'Alimardani *et al.* [5] trouve des résultats assez similaires, bien que ne traitant pas directement du retour haptique. Dans leur travail, l'incarnation a été étudiée en comparant deux conditions : un contrôle visuomoteur direct de l'avatar, et un contrôle par imagerie avec une interface cerveau-ordinateur (*Brain Computer Interface Imagery, BCI Imagery*). Les participants pouvaient contrôler les mains d'un robot humanoïde dans lequel ils s'incarnaient en vue à la première personne grâce à un casque de RV. Ils ont introduit un délai pour les deux conditions, mais le délai pour la condition BCI était deux fois plus long. Les résultats ont montré que la condition BCI a permis d'obtenir un niveau d'incarnation beaucoup plus élevé. Même avec un délai plus long, la mise en place d'un contrôle de l'avatar par une interface cerveau-ordinateur, qui n'induit pas de décalage entre le retour visuel et proprioceptif, s'est avérée plus écologique pour ce type de tâche de téléopération. Il est important de noter que l'incarnation, tout comme la notion de cohérence, dépend de la tâche et qu'il est difficile de généraliser ces résultats.

Si l'on considère l'hypothèse H2, *le retour de force susciterait une agentivité plus élevée que le retour tactile*, aucun résultat significatif ne vient l'étayer. Nous n'avons pas détecté de différence significative dans l'agentivité globale, bien que nous ayons trouvé une différence significative entre le retour de force et l'absence de retour haptique pour la question A1. Il serait plus approprié de dire que le retour de force suscite un sentiment d'agentivité plus élevé que l'absence de retour haptique. Si l'on considère que le retour de force est plus écologique que les deux autres conditions, conformément au principe de cohérence [118], l'agentivité devrait être significativement plus élevée dans la condition de retour de force. Cependant, il n'y a pas

de preuve pour soutenir l'hypothèse, et des tests supplémentaires sont nécessaires pour conclure sur le rôle du retour haptique concernant l'agentivité.

En ce qui concerne H2.2, *Le retour haptique augmenterait la performance durant la tâche, et le retour de force l'augmenterait davantage que le retour tactile*, les mesures quantitatives sur les dessins ne révèlent aucune différence significative. Cela ne nous permet pas de corroborer nos résultats avec les conclusions précédentes concernant le rôle du retour haptique sur la performance [133]. La performance est généralement dépendante de la tâche, il est donc difficile de généraliser cette absence de résultat. Pourtant, les résultats subjectifs du questionnaire TLX montrent des différences significatives pour la charge de travail perçue. Ainsi, le retour de force a été signalé comme étant mentalement moins exigeant, suscitant moins de frustration et demandant moins d'efforts par rapport aux deux autres conditions, et la performance perçue était significativement meilleure pour le retour de force que pour le retour vibrotactile. L'absence d'instructions spécifiques données aux participants pour insister sur la performance dans le dessin (que ce soit en terme de précision ou de complétude) pourrait également expliquer l'absence de différence significative entre les types de retour.

Enfin, l'hypothèse H3, *le retour de force augmenterait le sentiment d'auto-localisation*, n'a pas de résultat significatif pour la soutenir. Comme nous l'avons mentionné plus haut dans ce chapitre, les participants étaient colocalisés avec l'avatar, et il se peut que la différence n'ait pas été suffisante, même avec le rapport mouvement virtuel/mouvement réel de 1,4 pour 1, créant implicitement un décalage entre la position virtuelle et la position réelle de la main des participants, et donc un potentiel changement au niveau de l'auto-localisation. Il est important de noter que seul un participant a remarqué ce rapport 1,4/1 au début de l'expérience, et a rapporté aux expérimentateurs qu'il n'était plus perceptible après quelques secondes d'interaction avec l'environnement. Ceci tend à valider un seuil admissible jusqu'à 1,5 trouvé par Burns *et al.* [37]. Ainsi, on peut supposer, comme le montre Fröhner *et al.* [79], que le retour haptique modifie le sens de la localisation de soi, mais qu'une non colocalisation constante entre le corps réel des utilisateurs et leur avatar est une condition nécessaire pour provoquer ce changement et observer le phénomène.

4.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une étude utilisateur s'intéressant au rôle du retour haptique sur l'incarnation virtuelle dans un environnement immersif. Le but de l'étude était d'évaluer et de comparer différents types de retour haptique par rapport au sentiment d'incarnation envers l'avatar humanoïde. Trois conditions différentes ont été comparées : retour de force, retour vibrotactile et aucun retour haptique. Nous avons pu observer que le retour de force

suscitait un sentiment d'incarnation et d'appropriation corporelle plus forts. Contrairement aux résultats d'études précédentes, le retour vibrotactile n'a pas amélioré de manière significative l'incarnation, ni l'appropriation corporelle, et de plus, il semble que les vibrations aient même diminué la performance subjective. Nous avons concentré notre étude sur une tâche de manipulation fine qui semble représentative des interactions quotidiennes avec les mains et les outils. Le retour haptique était donc simulé et restitué principalement sur la main des participants, tandis que visuellement, les participants voyaient principalement le bras de l'avatar. Dans ce contexte particulier, le retour de force était un retour écologique et le retour vibrotactile était plus symbolique. Nos résultats suggèrent que le type de retour haptique approprié pourrait dépendre du contexte : plus il est écologique, meilleur serait le retour. Il serait intéressant de développer d'autres expériences où le retour vibrotactile serait plus écologique tandis que le retour de force serait considéré comme symbolique pour voir si ces résultats se maintiennent. Enfin, le retour vibrotactile mis en place dans notre expérience était limité à une seule source de vibration, situé directement sur le bras à retour de force. Il est possible d'enrichir le retour vibrotactile en intégrant de multiples vibreurs, comme nous l'avons expliqué dans une partie de la revue de littérature (voir section 2.4.4). Dans le chapitre suivant, nous présentons un prototype de manette pour les interactions en RV qui propose un retour vibrotactile intégrant plusieurs vibreurs. Nous évaluons le prototype proposé en termes de perception mais aussi d'expérience haptique, et montrons que la spatialisation de la vibration est un moyen efficace pour enrichir l'expérience utilisateur en RV.

Résumé Dans ce chapitre, nous proposons le prototype d'une manette à retour vibrotactile spatialisé pour les interactions en RV. Nous décrivons la théorie derrière la spatialisation de la vibration pour notre prototype, l'effet de funneling. Nous proposons ensuite trois expériences pour évaluer les performances du prototype. Les deux premières expériences sont basées purement sur la perception des vibrations et la capacité de spatialisation du prototype. La première expérience évalue la capacité des participants à percevoir des vibrations spatialisées de façon statique – la vibration reste au même endroit. La deuxième expérience évalue la capacité des participants à percevoir et reconnaître des vibrations spatialisées dynamiques, sous la forme de motifs. Enfin, la troisième expérience cherche à mesurer l'apport de la spatialisation telle que conçue pour le prototype sur l'expérience haptique des utilisateurs, dans un contexte d'interaction avec l'environnement.

Nous avons pu, dans le Chapitre 3, voir que la conception d'expériences en EVI portant sur l'incarnation comportait de nombreux enjeux méthodologiques, avec certaines questions encore non résolues. Dans un second temps, avec le Chapitre 4 nous avons voulu étudier le sentiment d'incarnation en EVI, et mettre en place un protocole expérimental en suivant les conclusions de notre premier chapitre, avec le prisme particulier du retour haptique. Nous avons ainsi comparé différents retours haptiques, avec des solutions haptiques déjà existantes, par rapport à l'incarnation. De ce chapitre, il apparaît que les différents retours haptiques, et leurs solutions technologiques respectives, sont très contextuels. Nous avons introduit à ce moment la notion d'*écologisme*, rapporté à la cohérence du retour haptique par rapport à l'interaction à réaliser

au sein de l'EVI. Le niveau d'écologisme, particulièrement, semble influencer l'apport de l'haptique quant à l'expérience du participant au sein de l'EVI. Nous nous sommes ainsi rendu compte que l'intégration d'un retour vibrotactile pouvait ne pas améliorer l'expérience utilisateur, voire même la dégrader, lorsque le retour n'est pas assez cohérent avec l'environnement. Le retour vibrotactile présente pourtant des propriétés intéressantes, et il est possible d'enrichir ce retour avec de la spatialisation, notamment grâce aux illusions que nous avons passées en revue dans le Chapitre 2, comme le phénomène de *saltation* ou encore de *funneling* (voir Section 2.4.4). C'est aussi la modalité de retour haptique que l'on retrouve le plus souvent dans les manettes de RV grand public et dans les systèmes vendus à grande échelle.

Dans ce chapitre, et dernier volet de ce manuscrit, nous nous intéressons à la conception d'une manette de RV, augmentée de vibreurs permettant de spatialiser des vibrations. Après avoir expliqué ce qui a motivé ce projet, et les objectifs de celui-ci, nous expliquerons comment nous avons conçu notre prototype, et les itérations successives que ce dernier a subies. Nous verrons ensuite trois expériences contrôlées mises en place afin de valider les capacités du prototype à effectivement spatialiser les vibrations. La première expérience nous permettra de démontrer les capacités de la manette à spatialiser des vibrations statiques, tandis que dans la seconde, nous verrons comment celle-ci peut aussi simuler des motifs vibratoires spatialement dynamiques – dont la position de la vibration évolue dans le temps. La troisième expérience explore l'apport du retour spatialisé sur l'expérience utilisateur, en comparant notre prototype à des manettes de RV grand public. Enfin, nous verrons les premières pistes envisagées pour continuer à améliorer notre prototype et étudier son impact sur les expériences en EVI.

5.1 Contexte

Aujourd'hui, lorsque l'on s'intéresse au retour haptique dans des contextes immersifs pour le grand public, deux possibilités émergent : se procurer des périphériques haptiques de pointe, encore en phase de développement et ajoutant un coût non négligeable, comme Dexmo [98], ou se contenter du retour haptique fourni dans les manettes accompagnant les casques de RV. Pour de telles manettes, le retour haptique est exclusivement vibrotactile. Les dernières générations de manettes grand public, comme le Valve Index [248] intègrent des actionneurs linéaires résonnants (LRA) de haute précision, qui peuvent affiner le retour vibrotactile mais restent relativement basiques. De plus, le retour est unique, et fait vibrer tout le châssis de la manette.

Plusieurs projets de recherche se sont penchés sur la conception de manettes proposant un retour haptique plus riche qu'une vibration unique. Certains ont réutilisé des technologies vibrotactiles, comme le projet *DualVib* [238], permettant de simuler des masses virtuelles dynamiques, au moyen de 4 vibreurs disposés à l'intérieur d'une manette prototypique pour la RV.

D'autres ont exploré d'autres formes de retour tactile, comme l'électro-tactile [120], ou encore du retour tactile par pression aux moyens d'actionneurs, comme le projet *HapticVec* [47]. Le projet *HapticVec* est intéressant pour sa conception du châssis, qui propose une matrice de 15 actionneurs répartis régulièrement dans un cylindre imprimé en 3D, stimulant la surface intérieure de la main des participants au niveau de la palme, des métacarpes, et des phalanges intermédiaires. Avec leur prototype, Chen *et al.* ont montré que les utilisateurs étaient capables de discriminer la direction de projectiles et de percevoir 8 directions distinctes. Le projet de Kajimoto *et al.* [120] est assez similaire en termes de conception du châssis, en proposant une manette cylindrique avec des stimulations surfaciques à l'aide d'une matrice très dense d'électrodes, permettant de créer des motifs électrotactiles perceptibles par les utilisateurs. Les protocoles mis en place pour évaluer ces prototypes se basaient sur la reconnaissance par les participants des informations transmises par le prototype, que ce soit des motifs [120, 238], ou des directions [47]. *DualVib* proposé par Tanaka *et al.* [238] met en place un retour vibrotactile que l'on pourrait qualifier de *volumique*, tandis que le prototype de Kajimoto *et al.* met en place un retour électrotactile *surfacique*. Nos recherches ne nous ont pas permis de trouver de projets ayant mis en place de prototype basé sur un retour vibrotactile spatialisé *surfacique*.

Lorsque l'on s'intéresse au retour vibrotactile, il est possible d'envisager deux dimensions principales dans l'objectif d'améliorer le retour. La première dimension, que nous avons évoquée un peu plus haut, est la transition vers des vibreurs haute définition, comme le LRA du *Valve Index* [248] ou le LRA *HapCoil* d'*Actronika* [3]. La seconde dimension, que nous voyons prendre de l'ampleur dans l'industrie des jeux vidéo [228], consiste à intégrer plusieurs actionneurs au niveau des différents boutons de la manette. En intégrant plusieurs vibreurs, il devient possible de créer des sensations vibrotactiles localisées ponctuellement, et d'enrichir le retour avec une spatialisation de l'information vibrotactile. Il peut être difficile d'intégrer un nombre important de vibreurs dans une seule manette, au vu des contraintes de dimensionnement, et de la taille des vibreurs, mais il est possible de pallier à cette contrainte en exploitant certaines illusions vibrotactiles, que nous avons évoquées dans notre revue (section 2.4.4). En effet, avec plusieurs vibreurs, il devient possible de spatialiser la vibration, en mettant en place l'effet de *funneling*, illusion au cours de laquelle plusieurs vibrations de même fréquence sont perçues comme une unique vibration [6, 116, 146, 182]. Cela est réalisé en jouant sur la perception cutanée de vibrations proches, ainsi que sur la modulation de l'intensité des vibreurs impliqués [116]. Grâce à cette illusion, aussi connue sous le nom de sensations fantômes (*Phantom Sensations*) [6], il est théoriquement possible de spatialiser des vibrations entre deux vibreurs, voire sur toute une surface en deux dimensions [146]. Les autres effets de spatialisation, comme le SOA et la *saltation* permettent aussi de spatialiser des vibrations, mais seulement sur des motifs préenregistrés, et donc offrent moins de possibilités pour de l'interaction en temps réel, comme c'est le cas en RV.

Si la première dimension a commencé à être intégrée aux manettes de VR grand public de dernière génération, la deuxième dimension reste encore limitée à des projets de recherche, et il n'existe encore aucun prototype de recherche pour la RV qui se soit intéressé à la spatialisation d'information vibrotactile par effet de *funneling*. Nous proposons, avec ce projet, une manette équipée de vibreurs simples, mais utilisant le *funneling* pour spatialiser un retour vibrotactile dans la main des participants.

5.2 Conception du prototype et mise en place

Nous présentons dans cette section le prototype que nous avons développé.



FIGURE 5.1 – Vues du prototype. À gauche, le modèle du châssis formé par les 3 modules pour vibreurs, le chapeau et le *Vive Tracker*. Au milieu, le modèle avec les vibreurs. À droite, le prototype et la carte électronique.

5.2.1 Objectifs

L'objectif général de la conception de cette manette haptique est de s'inspirer des manettes de RV grand public actuelles et de les enrichir d'un retour vibrotactile qui transmet plus d'informations relatives au contact avec les EVIs, ou les transmet mieux. Nous avons décidé de conserver la technologie utilisée dans les manettes de RV actuelles, à savoir le retour vibrotactile, et d'utiliser des connaissances issues de la littérature. Comme nous l'avons rappelé dans la mise en contexte de ce chapitre, en utilisant plusieurs vibreurs, il est possible de spatialiser des vibrations, et de les déplacer en jouant sur l'intensité des vibreurs.

Nous avons ainsi posé comme objectif de concevoir un prototype qui puisse être répliqué à bas coût, et facilement, et qui puisse servir de moyen d'interaction avec un EVI et donc servir de manette de RV. Ce prototype devait pouvoir être équipé d'une matrice de vibreurs, qui pourraient être contrôlés en intensité et en fréquence, pour générer l'effet de *funneling* sur la surface couverte par la matrice. En nous inspirant du prototype de Chen *et al.* [47], nous avons voulu reproduire un schéma matriciel d'actionneurs similaire, avec 2 vibreurs par doigt, pour un total de 10 vibreurs.

La conception d'une telle manette à retour vibrotactile spatialisé soulève plusieurs questions de recherche, principalement en termes de rendu haptique (comment mettre en place un retour spatialisé, et suivant quels modèles ?), de perception pour les utilisateurs (quel est le niveau d'information spatialisée que les utilisateurs sont capables de percevoir ?), et enfin, d'expérience d'utilisateur (comment et dans quelle mesure le retour spatialisé améliore-t-il l'expérience au sein des EVIs ?). Avant de décrire les différentes expériences mises en place pour répondre à ces questions de recherche, nous décrivons la solution électronique mise en place pour contrôler ces vibreurs dans la sous-section suivante.

5.2.2 Carte électronique

Nous avons pour objectif de garder les dimensions de notre prototype proches des manettes existantes. C'est une contrainte forte en termes de volume/surface disponible. Les vibreurs utilisés sont des *HiWave Haptic Exciter* [239], long de 26mm et large de 12mm. Les 10 vibreurs ont été disposés sur le châssis tel que décrit dans la sous-section suivante (section 5.2.3). Les vibreurs sont connectés à une carte *Teensyduino* par le biais d'une carte électronique sur mesure équipée d'une porte CMOS NAND pour moduler le retour tactile. Un signal classique synthétisé basé sur un signal créneau est utilisé [99]. Le retour tactile consiste en un signal de forme carrée de 250 Hz [89], modulé par un signal carré de 31 kHz avec un rapport cyclique variable pour contrôler l'amplitude. 31 KHz est le signal de type horloge le plus rapide avec un microcontrôleur de 16 MHz et 256 niveaux de rapport cyclique de précision. Les informations tactiles sont transmises à la carte *Teensyduino* à 1000 Hz pour minimiser les délais de communication [44].

5.2.3 Châssis et vibreurs

Pour positionner les actionneurs, nous avons décidé de créer le cadre de manière similaire à *HapticVec* [47], avec une matrice d'actionneurs, comme indiqué sur la Figure 5.2. Nous avons d'abord conçu des cylindres modulaires plus petits pouvant accueillir chacun 5 actionneurs. Ces cylindres modulaires ont un diamètre de 40mm, et une hauteur de 30mm de hauteur. Ces modules présentent des cavités pour accueillir les vibreurs ; ces cavités ont été conçues pour que

la partie en mouvement des vibreurs, qui va effectivement transmettre la vibration ne soit pas en contact direct avec le châssis, afin d'éviter que celui-ci résonne lorsque les vibreurs sont actifs. Si le châssis entier résonne suite à l'activation d'un vibreur, il ne sera plus possible de localiser la vibration à un endroit précis de la main. Ainsi, cet aspect de la conception est crucial : en cas de résonance, la spatialisation n'est plus possible.

Les cavités pour vibreurs sont distantes d'environ 25mm les unes des autres. Les modules ont été collés pour aligner verticalement la position des vibreurs. Le cadre du contrôleur est constitué de trois de ces cylindres modulaires collés ensemble, en ajoutant un capuchon sur le dessus pour fixer le capteur de position *Vive Tracker*. Il propose une matrice d'actionneurs allant jusqu'à quinze actionneurs, jusqu'à 3 actionneurs verticalement, et 5 actionneurs par anneau (Figure 5.1). Pour positionner les actionneurs par rapport à la main des utilisateurs potentiels, nous avons décidé de faire correspondre les dix actionneurs au bout de chaque doigt, et à chaque métacarpe, car ce sont, avec la troisième phalange, parmi les parties de la main les plus sensibles aux vibrations dans les fréquences que nous avons utilisées [205, 249, 250].

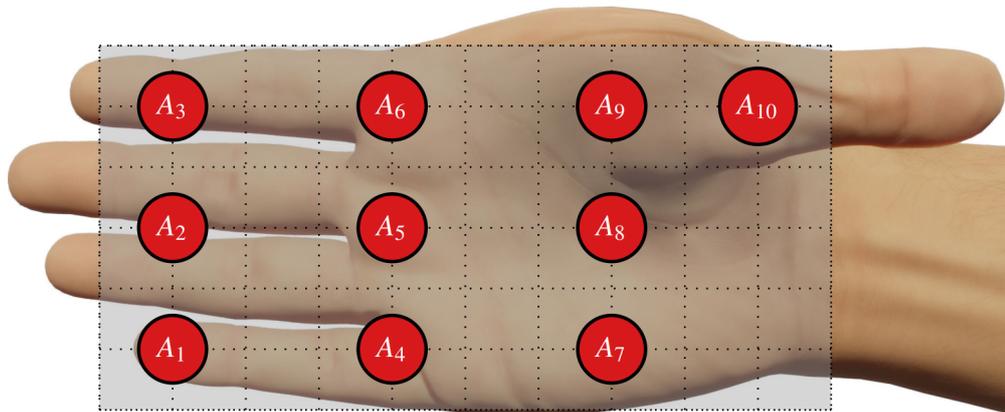


FIGURE 5.2 – Matrice des vibreurs projetées en deux dimensions sur une main (la position réelle des vibreurs peut varier selon la morphologie de la main).

5.2.4 Modèle vibratoire

L'objectif principal du prototype que nous avons conçu est de pouvoir spatialiser des vibrations. Pour ce faire, nous nous sommes basés sur l'illusion du *funneling*, présentée dans notre revue de la littérature et rappelée dans l'introduction de ce chapitre, pour simuler des vibrations virtuelles entre les vibreurs. Pour résumer simplement, l'effet de *funneling* consiste en une illusion simple : lorsque le corps humain perçoit deux vibrations de même fréquence, ces vibrations sont perçues comme une seule et même vibration à un point intermédiaire entre les deux vibrations. Nous nommons ce point de vibration illusoire *vibration virtuelle* (voir Figure 5.3).

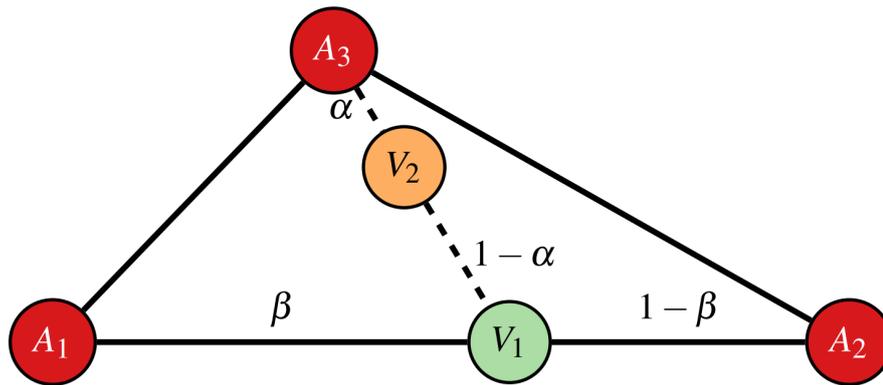


FIGURE 5.3 – Modèle de *funneling* de vibration basé sur 3 vibreurs.

Dans notre modèle, les vibrations simulées au moyen de l'effet de *funneling* sont basées sur le modèle de somme de l'énergie (*energy summation model*) des canaux de perception Paciniens [116, 153]. Ce modèle, pris pour une illusion de *funneling* à une dimension, soit entre deux vibreurs, comme illustré avec le côté inférieur du triangle dans la Figure 5.3, met en équation l'intensité de la vibration virtuelle comme la racine carrée de la somme des intensités au carré des deux vibreurs :

$$I_{V_1}^2 = I_{A_1}^2 + I_{A_2}^2 \quad (5.1)$$

où I_{A_1} et I_{A_2} sont les intensités des vibreurs A1 et A2, et I_{V_1} l'intensité de la vibration virtuelle 1 résultante.

Ce modèle permet de mieux contrôler à la fois l'intensité et la localisation perçues de la vibration virtuelle que les modèles linéaire ou logarithmique proposés par des travaux antérieurs [6, 116, 182].

Pour contrôler la position de la vibration virtuelle, il suffit de contrôler l'intensité des vibreurs A1 et A2. En tout point de vibration virtuelle entre les deux vibreurs, l'intensité de chacun est inversement proportionnelle à sa distance à la vibration virtuelle :

$$\beta I_{A_1}^2 = (1 - \beta) I_{A_2}^2 \quad (5.2)$$

si l'on prend les ratios illustrés dans la Figure 5.3, où β correspond au rapport de la distance entre le vibreur A1 et la vibration virtuelle et la distance séparant les deux vibreurs. En remplaçant, à partir de l'équation 5.2, dans l'équation 5.1, on obtient les valeurs d'intensité des vibreurs A1 et A2 par rapport à l'intensité de la vibration virtuelle en fonction de sa position entre les deux vibreurs physiques :

$$\begin{cases} I_{A_1} = I_{V_1} \sqrt{1 - \beta} \\ I_{A_2} = I_{V_1} \sqrt{\beta} \end{cases} \quad (5.3)$$

Il est possible, théoriquement, d'élargir le *funneling* et de transformer le modèle initial sur une dimension à un modèle à deux dimensions. Dans la revue de la littérature, nous avons pu voir particulièrement deux modèles élargissant le *funneling* en deux dimensions. Les travaux de Lipari [146] ont apporté beaucoup de connaissances pertinentes à ce niveau. Lipari propose de généraliser l'approche uni-directionnelle du *funneling* avec 4 vibreurs, ou 3 vibreurs, afin de simuler le point de vibration virtuelle partout sur la surface créée par ces vibreurs.

Le modèle à 4 vibreurs est très pertinent et facile à mettre en place pour des matrices de vibreurs disposés régulièrement. Dans le cas d'une matrice sans positionnement régulier, le modèle à 3 vibreurs est plus intéressant, car généralisable sur des matrices irrégulières. La matrice que nous avons proposée (voir Figure 5.2) est majoritairement régulière, mais la zone autour du vibreur 10, au niveau du pouce, ne l'est pas. Nous avons ainsi choisi de mettre en place le modèle à 3 vibreurs (voire Figure 5.3).

Nous avons exprimé l'intensité des vibreurs A1 et A2 dans l'équation 5.3. De même, nous pouvons exprimer l'intensité du vibreur A3 et celle de la vibration virtuelle V1 en fonction de l'intensité de la vibration virtuelle V2 :

$$\begin{cases} I_{A_3} = I_{V_2} \sqrt{1 - \alpha} \\ I_{V_1} = I_{V_2} \sqrt{\alpha} \end{cases} \quad (5.4)$$

Finalement, en exprimant toutes les intensités en fonction de la vibration virtuelle résultante V2, l'on obtient :

$$\begin{cases} I_{A_1} = I_{V_2} \sqrt{\alpha (1 - \beta)} \\ I_{A_2} = I_{V_2} \sqrt{\alpha \beta} \\ I_{A_3} = I_{V_2} \sqrt{1 - \alpha} \end{cases} \quad (5.5)$$

5.2.5 Evaluation du prototype

Nous avons conçu un total de 3 expériences pour évaluer et valider la conception de notre contrôleur, et sa capacité à fournir un retour vibrotactile spatialisé basé sur l'effet de *funneling*. Nous présentons ces expériences dans les sections suivantes. Les questions de recherche qui

sous-tendent ces expériences sont relativement simples. Nous voulons *in fine* montrer que la spatialisation du retour vibrotactile peut améliorer l'interaction en EVI et l'expérience des utilisateurs en RV. La première question de recherche porte sur le rendu vibrotactile et la perception du retour par des participants, tandis que la seconde question de recherche porte plus directement sur l'expérience haptique et l'apport du retour spatialisé vis-à-vis de celle-ci.

Les deux premières expériences évaluent la capacité de la manette à spatialiser les informations vibrotactiles au niveau de la main d'un utilisateur, lorsque celui-ci perçoit les vibrations passivement, sans mouvement actif de sa part. La première expérience évalue cela avec des vibrations qui ne bougent pas - des vibrations spatialement statiques. La seconde expérience s'intéresse quant à elle à des motifs vibratoires, qui vont se déplacer au cours du temps - des vibrations spatialement dynamiques. Enfin, la troisième expérience s'intéresse à l'apport du retour spatialisé sur l'expérience haptique des participants dans un contexte ouvert d'interaction avec l'environnement.

5.3 Première expérience

La première expérience visait à valider la conception du contrôleur, en montrant la capacité des participants à percevoir des vibrations ponctuelles et statiques. Par ponctuel, nous signifions qu'il n'y avait qu'un seul point de vibration virtuelle à tout moment, et par statique, nous signifions que le point de vibration virtuel ne bougeait pas au cours du temps.

5.3.1 Objectifs

L'objectif de cette première expérience était de montrer qu'une telle conception pouvait produire des vibrations virtuelles entre les actionneurs par l'effet de *funneling*. Nous avons donc proposé une tâche expérimentale simple où les participants devaient ressentir des vibrations - soit des vibrations fantômes, soit des vibrations d'un seul actionneur - et leur demander de positionner chaque vibration sur le cadre. La conception de notre manette est telle que la matrice de vibreurs n'est pas homogène, nous étions donc intéressés de voir si la précision des participants pour localiser les vibrations fantômes serait différente en fonction de la zone visée au niveau de la manette.

5.3.2 Protocole

Nous décrivons dans les sous-sections suivantes les hypothèses qui ont sous-tendu à cette première expérience de validation, le déroulé de l'expérience, puis nous discuterons des résultats.

Hypothèses

Pour cette expérience, nous avons pris pour hypothèse principale que les participants seraient capables de localiser les vibrations produites par un seul vibreur, pour chacun des 10 vibreurs (**H1**), et que les vibrations fantômes produites par l'illusion de *funneling* entre deux vibreurs ou plus seraient ressenties comme une seule vibration (**H2.1**), aussi précisément que les vibrations d'un seul vibreur (**H2.2**).

Participants

11 participants ont pris part à cette expérience ($\mu = 30,1, \sigma = 6,8$). Ces participants ont été recrutés par bouche-à-oreille, et discriminés selon leur main dominante. Nous n'avons gardé que des droitiers pour cette première expérience, le prototype conçu ayant été pensé pour une utilisation avec la main droite. Nous avons exclu les résultats d'un participant, qui ne pouvait se saisir correctement de la manette, et a dû ajuster sa main plusieurs fois durant l'expérience, sans jamais y parvenir. Cette expérience a été validée par le comité d'éthique d'Inria.

Méthodologie

Pour répondre à notre première question de recherche, portant sur le rendu vibrotactile spatialisé et la perception de celui-ci, nous avons proposé une tâche expérimentale qui met en œuvre 30 vibrations ponctuelles statiques à différents endroits de la main. Comme l'objectif final du contrôleur proposé est d'être utilisé dans des contextes de RV, nous avons opté pour une mise en œuvre de l'expérience en RV, afin d'observer la manette et le retour dans le contexte d'utilisation envisagé, et de ne pas permettre aux participants d'utiliser des informations du monde réel pour pouvoir localiser la position des vibrations.

Les participants ont d'abord reçu des informations concernant la procédure et l'expérience : ce qu'ils étaient sur le point de ressentir, comment accomplir la tâche et répondre, et ce sur quoi se concentrer pendant l'immersion. Ensuite, ils ont été invités à signer un formulaire de consentement éclairé et à répondre à des questions démographiques de base. Les participants ont reçu l'instruction de s'asseoir sur une chaise réelle devant un bureau, tous deux colocalisés

avec la chaise et le bureau virtuels dans l'EVI (voir la figure 5.4). Ils ont reçu le prototype de contrôleur avant tout autre matériel et ont été informés de la manière de le tenir et de positionner leur main correctement. Il était demandé aux participants de tenir la manette avec leur main dominante, la droite. De ce fait, les participants connaissaient avant le début de l'expérience la position des vibreurs sur la manette. Au sein de l'EVI, le prototype était représenté par un cylindre simple de la taille du châssis (voir Figure 5.4). Sur cette représentation de la manette, nous avons ajouté une indication visuelle de la position du vibreur 10, situé au niveau du pouce des participants, pour qu'ils puissent se repérer dans les mouvements de rotation.

L'expérience a commencé par une phase de calibrage, au cours de laquelle tous les vibreurs se sont déclenchés un par un pendant 2 secondes chacun. Cette phase de calibrage avait deux objectifs : le premier, pour l'expérimentateur, afin de s'assurer du bon fonctionnement du prototype et de chacun des vibreurs ; le second, pour le participant, afin de vérifier si sa préhension du prototype lui permet effectivement de ressentir les vibrations de chaque vibreur, et d'ajuster celle-ci si nécessaire. Les participants ont été invités à signaler à l'expérimentateur s'ils avaient cessé de ressentir des vibrations à un moment quelconque de cette phase. Ensuite, ils ont suivi un exemple du protocole de réponse utilisé pour chaque essai. Le protocole de réponse était le suivant : après la fin d'une vibration spécifique, une interface utilisateur s'affichait, et il était demandé aux participants s'ils avaient ressenti la vibration. S'ils n'avaient pas perçu la vibration, les participants répondaient 'Non' et passaient à l'essai suivant. S'ils répondaient 'Oui', l'interface utilisateur leur demandait ensuite de positionner sur le prototype virtuel l'emplacement de la vibration qu'ils avaient ressentie, en déplaçant la main gauche par rapport à la main droite. En cas de mauvais positionnement, ils pouvaient le réinitialiser en appuyant sur un bouton 'Reset' de l'interface utilisateur (voir la figure 5.4). Une fois correctement positionnée, ils devaient indiquer l'intensité de la vibration sur une échelle de Likert à 7 points, en déplaçant la main gauche latéralement.



FIGURE 5.4 – Vue de l'environnement virtuel de la première expérience et du protocole de réponse - positionnement de la vibration (à gauche), avec le dispositif expérimental - casque de RV, casque antibruit, et manettes (à droite).

Après le calibrage, l'expérience commence. Nous voulions évaluer 30 vibrations différentes. Chaque vibreur avait son essai propre, où il vibrait seul, soit 10 vibrations avec vibreur unique. Les 20 vibrations restantes correspondent à des vibrations basées sur le *funneling*. Parmi ces vibrations, 12 vibrations sont situées exactement entre 2 vibreurs, configurations potentiellement plus simples car n'impliquant les vibrations que de deux vibreurs, et 8 autres étaient disposées dans des triangles formés par des vibreurs, 4 dans des zones moins denses en termes de vibreurs, et 4 dans des zones plus denses en vibreurs. L'expérience était composée de 4 blocs, chaque bloc comprenant les 30 vibrations, pour un total de 120 essais. Chaque essai se déroulait de la même manière. Les participants devaient appuyer sur la gâchette de la manette de gauche pour déclencher la vibration. Chaque vibration durait 2 secondes. Ensuite, le protocole de réponse commençait. L'ordre de présentation des 30 vibrations différentes était aléatoire au sein d'un bloc et répété sur les 4 blocs. Toutes les vibrations ont été mises en place au travers du modèle de *funneling* en deux dimensions tel que présenté dans la Section 5.2.4, et l'intensité résultante était maximale. Les vibrations étant relativement courtes (2 secondes), nous avons décidé de privilégier une intensité de vibration forte pour maximiser la perception des participants.

Matériel

Les participants étaient immergés dans l'EVI en portant un casque *Valve Index*, qui fournissait un retour visuel et un suivi de tête 6-DOF. Les participants tenaient dans leur main gauche la manette Valve Index et la manette du prototype dans leur main droite. L'environnement virtuel a été mis en œuvre à l'aide de *Unity3D* (2019.2.12f1) et du plugin *Unity Steam VR*. L'expérience s'est déroulée sur un processeur Intel(R) Core(TM) i7-9750H 2,60 GHz avec 32 Go de RAM et un GPU Nvidia 2070 RTX GeForce de 8 Go. Il n'y avait aucune représentation virtuelle des participants à l'intérieur de l'EVI en dehors des contrôleurs gauche et droit (voir figure 5.4). De plus, les vibrations étant bruyantes, et pour éviter tout biais lors des réponses, les participants étaient équipés d'un casque à réduction de bruit Peltor 3M X3AC1 33dB.

Mesures

Afin d'évaluer le prototype et sa capacité à générer des vibrations fantômes, nous avons généré des essais avec des vibrations à un seul actionneur, des vibrations à deux actionneurs et des vibrations à trois actionneurs. Pour chaque essai, les participants devaient localiser la position estimée de la vibration qu'ils ressentaient, s'ils avaient perçu la vibration comme venant d'un vibreur unique ou de plusieurs vibreurs, et l'intensité globale perçue. Concernant l'évaluation de la position de la vibration par les participants, nous avons mesuré la différence entre la position théorique de la vibration pour l'essai en cours et la position évaluée. L'intensité de la vibration a été évaluée par les participants sur une échelle de Likert à 7 points.

5.3.3 Résultats

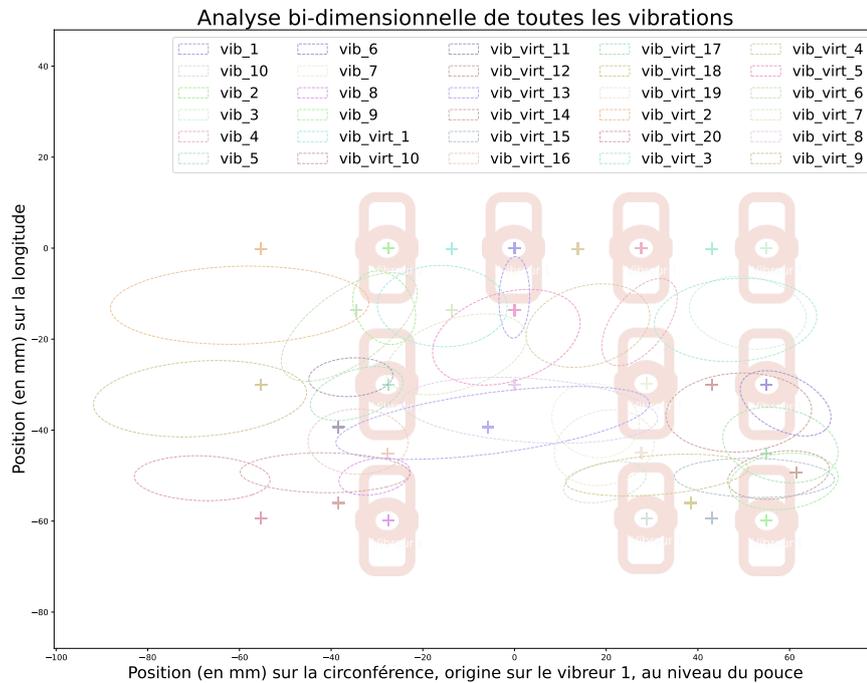


FIGURE 5.5 – Analyse bi-dimensionnelle de l'écart-type des réponses des participants. Les marqueurs en croix représentent les positions théoriques des vibrations des essais. Les ellipses regroupent 68% des réponses par essai (1 écart-type).

Distribution spatiale des résultats Avec cette première expérience pilote, nous avons pu observer la capacité des participants à percevoir et restituer les vibrations jouées. Les vibrations théoriques jouées lors des essais sont représentées par des croix sur la figure 5.5, tandis que les ellipses représentent la distribution des réponses en deux dimensions, ne gardant que 68% du total des réponses (68% représentant un écart-type dans une distribution normale).

Intensité de la vibration En ce qui concerne l'intensité perçue des vibrations par les participants, nous résumons les résultats essai par essai de la figure 5.6.

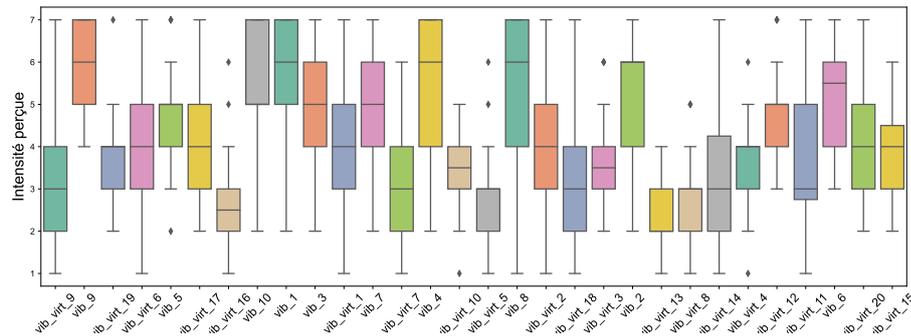


FIGURE 5.6 – Boîtes à moustache représentant l'intensité perçue pour chaque essai.

Perception des vibrations Enfin, nous avons résumé les données propres à la perception des vibrations par les participants. Pour chaque essai, les participants devaient indiquer si la vibration qu'ils avaient ressentie provenait d'un vibreur unique ou de plusieurs vibreurs. Nous représentons ces données sous la forme d'un histogramme, avec une barre par essai (voir figure 5.7).

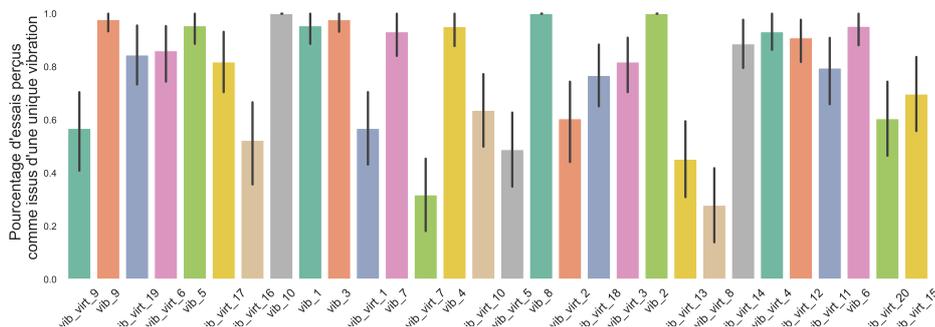


FIGURE 5.7 – Diagramme en barres représentant le pourcentage d'essais perçus comme étant une vibration unique (à un seul vibreur).

5.3.4 Discussion

Cette première expérience nous donne un premier aperçu des capacités de la manette à spatialiser la vibration. Nous discutons ici des résultats, à la fois des performances des participants à la tâche de positionnement des vibrations perçues, de l'intensité pour chaque essai, mais aussi des retours informels qui nous ont été faits.

Dans l'ensemble, un des retours informels qui est souvent revenu était lié à la difficulté de la tâche. Un participant en particulier a articulé son ressenti de façon très claire : « la tâche en soi était dure, parce qu'il fallait se souvenir de là où j'avais ressenti la vibration, et il fallait aussi que je visualise ma main dans l'environnement et que je me souvienne de la façon dont ma main s'enroule sur la manette avant de pouvoir répondre. Sauf que plus j'attends, moins je me souviens où j'ai ressenti la vibration ! »

Distribution spatiale des résultats La première chose que nous pouvons remarquer, lorsque l'on se penche sur la figure 5.5, est l'importante disparité de l'ensemble des résultats de positionnement. Malgré cela, des tendances se dégagent : les ellipses correspondant aux essais avec un seul vibreur, nommés *vib 1* à *vib 10*, sont beaucoup moins étendues, et révélant une précision plus grande que pour les essais à 2 ou trois vibreurs. Pour les essais à 2 ou 3 vibreurs, nommés *vib virt 1* à *vib virt 20*, la précision semble avoir été la plus importante pour les essais dans les zones les plus denses en vibreur, bien qu'inférieure aux essais à vibreur unique. Les essais situés dans la zone située sous le pouce, entre les vibreurs A2 et A8, et A1 et A7, ainsi que la zone entre les vibreurs A6 et A9, qui sont les zones les moins denses en vibreurs, semblent ainsi être les plus difficiles à positionner en termes de position angulaire.

On constate aussi, pour l'ensemble des résultats, que les participants ont eu tendance à positionner les vibrations sur le premier module de la manette plus bas qu'elles ne l'étaient réellement, et à positionner celles du dernier module plus haut. Les réponses liées aux essais sur l'anneau intermédiaire ne montrent pas d'effets similaires. Les participants ont donc eu tendance à *décaler* les vibrations vers le centre de la manette. Nous rappelons que dans l'EVI de l'expérience, seule la manette était représentée (comme un cylindre simple), et seule la position du vibreur A10, le vibreur situé au niveau du pouce, était donnée comme point de repère aux participants. Ainsi, il semble que cette absence de référentiel ait eu tendance à compresser les réponses des participants vers le centre.

Intensité et perception de la vibration Dans l'ensemble, en nous basant sur les résultats en termes d'intensité et de perception unique ou multiple de la vibration, les participants ont su distinguer entre les essais à vibreur unique et ceux mettant en place le *funneling*. En effet, les essais à vibreur unique ont été perçus correctement à plus de 95% (100% pour *vib 8* et *vib 2*, correspondant aux vibrations sur le petit doigt et sur l'index), tandis que les vibrations virtuelles sont beaucoup plus mitigées. 8 des 20 des vibrations virtuelles étaient suffisamment convaincantes pour être jugées comme issues d'un vibreur unique à plus de 80%, tandis que d'autres n'ont trompé les participants que 20% à 40% du temps. Les 8 vibrations virtuelles convaincantes (vibrations virtuelles 3, 4, 6, 11, 12, 14, 17, 19) sont réparties sur toute la surface de la manette, et ne semblent pas partager de similarité évidente.

En ce qui concerne les intensités des vibrations, on observe des différences entre les essais à vibreur unique et les vibrations virtuelles. Nous rappelons que l'intensité était évaluée selon une échelle de Likert à 7 points, sachant que lors de la phase de calibration, les participants prenaient connaissance de l'intensité maximale pour chaque vibreur. L'intensité des essais à vibreur unique est notée en moyenne 5 ou 6 par les participants, sauf pour les vibreurs A3 et A8, notés 4, tandis que les vibrations virtuelles ont été évaluées en moyenne entre 2 et 4.

Parmi les vibrations virtuelles qui ont été le moins convaincantes, on peut noter les essais *vib virt 7* et *vib virt 8*, impliquant les vibreurs A10/A8 et A8/A2 respectivement. Ces vibrations virtuelles sont situées dans la zone non couverte par la main, en dessous du pouce, même si les vibreurs impliqués dans ces vibrations virtuelles étaient bels et bien couverts par la main. Cette zone non couverte par la main correspond à la distance entre l'extrémité des doigts et le bas de la paume. En effet, avec la manette tenue en main, il reste une zone du châssis qui n'est pas couverte par la main (voir Figure 5.8) la manette étant trop large pour réussir à en faire tout le tour. Il y a donc une discontinuité de contact entre le bout des doigts et l'extrémité de la paume. Cette discontinuité pourrait expliquer pourquoi les vibrations de cette zone n'ont pas fait émerger l'illusion des vibrations fantômes. Les deux vibrations en question, les essais *vib virt 7* et *vib virt 8* ont aussi été les essais dont l'intensité perçue par les participants a été la plus faible.



FIGURE 5.8 – Prototype tenu en main. On peut observer la zone non couverte par la main sous le pouce.

5.3.5 Conclusion

Cette première expérience nous a permis de tester dans un premier protocole les capacités de la manette à spatialiser les vibrations. Les résultats montrent que le *funneling* fonctionne, mais que certaines zones (particulièrement les zones pour lesquelles la main n'est pas en contact avec la manette) ne font pas émerger l'illusion des vibrations fantômes, résultat qui paraît raisonnable et auquel nous nous attendions.

Il y a un certain nombre de limitations inhérentes au protocole de cette première expérience. La première concerne le retour vibrotactile en tant que tel. Dans cette première expérience, nous nous sommes limités à des vibrations ponctuelles statiques. Nous pensons qu'un retour statique permettrait de mieux évaluer la capacité de spatialisation du prototype, mais il est aussi possible que ce retour ne soit pas assez riche. Ainsi, dans la deuxième expérience, nous présenterons un retour spatialisé dynamique.

La deuxième concerne le protocole de réponse. Durant l'expérience, chaque vibration n'était jouée que 2 secondes, et les participants devaient donc faire un effort conscient de mémorisation perceptuelle avant de répondre et positionner la vibration ressentie. Nous avons pris en compte les retours de nos participants dans l'élaboration de notre deuxième expérience.

Enfin, la troisième limitation est en lien avec l'absence de représentation de la main de l'utilisateur par rapport à la manette. Sans retour visuel de la position de leur main, les participants, avant de restituer la position de la vibration ressentie, devaient mémoriser les informations sur la position de la vibration au niveau de leur main, puis visualiser la position de leur main sur la manette au travers des informations proprioceptives de leur main, pour enfin pouvoir positionner la vibration. Idéalement, il faudrait avoir une représentation virtuelle de la main tenant la manette basée sur la préhension réelle des participants, ou un *design* qui forcerait les participants à tenir la manette d'une façon anticipée, et une représentation équivalente.

Dans la prochaine section, nous décrivons la deuxième expérience mise en place pour évaluer la capacité de notre manette à spatialiser les vibrations. Comme mentionné plus haut, cette expérience est basée sur des motifs vibratoires dynamiques, qui vont bouger au cours du temps.

5.4 Deuxième expérience

Après la première expérience décrite dans la section précédente, qui s'est limitée, comme nous l'avons vu, à des vibrations statiques, nous présentons dans cette section, une seconde expérience de validation du prototype, montrant la capacité de la manette conçue à proposer des effets et motifs vibratoires dynamiques, reconnaissables par les utilisateurs.



FIGURE 5.9 – Dispositif expérimental, avec le casque de RV, la manette prototype, la manette Valve Index, et le casque de réduction de bruit (gauche), et l’environnement virtuel avec les différents motifs (droite).

5.4.1 Objectifs

Cette expérience avait pour objectif de démontrer la capacité du prototype à fournir un retour purement haptique (sans retour visuel associé) contenant des informations dynamiques, comme des mouvements ou des directions. Nous voulions montrer que les utilisateurs pourraient sentir et suivre un point vibratoire se déplaçant selon des motifs simples, comme des cercles, des lignes ou des motifs plus complexes. Cette seconde expérience est liée aux mêmes questions de recherche que la première, portant sur le rendu haptique et sur la perception des vibrations.

5.4.2 Protocole

Le protocole de cette expérience est partiellement inspiré des travaux de Kajimoto *et al.* [120], travaux introduits dans la revue de littérature. En effet, en termes de prototype, leur manette à retour électrotactile était ce qu’il y avait de plus proche de notre démarche. Dans leur article, Kajimoto *et al.* proposent un protocole dans lequel les participants sont soumis à des motifs de stimulation électro-tactile se déplaçant autour de la circonférence du prototype, avec pour but de reconnaître la direction et le mouvement général du motif. Cependant, peu de détails sont fournis quant à la mise en place générale de leur protocole. De plus, le rendu électrotactile est différent du rendu vibrotactile, et il n’existe, à notre connaissance, pas d’équivalent au *funneling* pour des stimulations électrotactiles. Ainsi, partant de cette idée et de leurs travaux, nous avons proposé une version revisitée de ce protocole expérimental.

Hypothèses

Nos hypothèses, pour cette expérience, sont assez proches des hypothèses de la première expérience. La première hypothèse porte sur la capacité des participants à suivre un motif vibratoire dynamique, et à le reconnaître parmi un ensemble d'autres motifs (**H1**).

Cette première hypothèse se décompose à nos yeux en deux sous-hypothèses, une première portant sur la capacité des participants à reconnaître la direction générale du motif vibratoire (**H1.1**), et une seconde, portant sur leur capacité à positionner précisément le motif par rapport à leur main, et en second lieu, par rapport à la manette (**H1.2**).

La seconde hypothèse de cette expérience est liée à la qualité des effets vibratoires, et à la perception de la continuité des vibrations par les participants. Théoriquement, le modèle vibratoire décrit plus haut (Section 5.2.4) est tel qu'il n'y a pas de discontinuité d'intensité de la vibration, que ce soit au niveau de la résultante, ou au niveau des vibreurs utilisés comme sommet. Nous avons donc fait l'hypothèse que les motifs de vibration proposés seraient perçus comme continus par les participants (**H2**). Pour répondre à ces questions de recherche, nous avons mis en place un protocole expérimental basé sur un environnement de RV, proposant 12 motifs vibratoires, joués successivement sur le prototype, et parmi lesquels les participants devaient choisir le bon motif. Ces motifs sont présentés dans la Figure 5.10.

Matériel

L'expérience se déroulant dans un contexte identique à la première expérience, le matériel utilisé était identique à celui décrit dans la sous-section 5.3.2.

Déroulement

Tout comme pour la première expérience, et pour les mêmes raisons, le second protocole s'est déroulé dans un contexte de RV. Chaque participant était tout d'abord informé des modalités de l'expérience, son objectif général, et les tâches qu'il aurait à réaliser. Une attention particulière, comme lors de la première expérience, était portée sur la façon de tenir la manette prototype, afin que chacun des vibreurs soit couvert. Nous leur soumettions ensuite un formulaire de consentement et récoltions des informations générales (âge, genre, et latéralité). Le participant était ensuite invité à s'asseoir sur une chaise, à s'équiper du matériel de RV, du prototype, puis du casque antibruit. L'expérimentateur guidait le participant pour repositionner correctement sa main sur le prototype. L'expérience commençait de la même façon que la première expérience, avec la phase de calibration décrite en section 5.3.2, avec une activation successive

de chaque vibreur individuellement. Tout comme pour la première expérience, cette phase de calibrage avait deux objectifs : le premier, pour l'expérimentateur, afin de s'assurer du bon fonctionnement du prototype et de chacun des vibreurs ; le second, pour le participant, afin de vérifier si sa préhension du prototype lui permet effectivement de ressentir les vibrations de chaque vibreur, et d'ajuster celle-ci si nécessaire. Ensuite, commençait l'unique tâche de l'expérience, décomposée en 60 essais. Chaque essai se déroulait de manière identique : les utilisateurs pouvaient démarrer un essai en appuyant sur la gâchette de la manette gauche, et une demi-seconde plus tard, un motif vibratoire aléatoire était joué sur le prototype et une interface graphique était projetée devant le participant, proposant 12 choix de motifs (voir Figure 5.10). Le participant pointait ensuite avec la main gauche le motif qui lui semblait être celui qu'il percevait. Pour chaque essai, les participants avaient jusqu'à 30 seconds pour choisir un motif. Passé ce délai, l'essai se terminait automatiquement, et était enregistré comme un choix erroné. L'essai finissait lorsque le participant choisissait le motif en appuyant sur la gâchette. Nous avons proposé 12 motifs vibratoires différents pour cette expérience, et ces motifs ont été répétés selon 5 blocs, donnant ainsi un total de 60 essais. Ces motifs sont décrits dans la sous-section suivante.

Motifs vibratoires

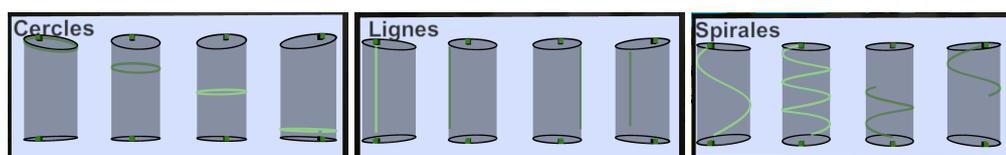


FIGURE 5.10 – Matrice des motifs vibratoires. Les cercles, avec les motifs cercle1 à cercle 4 de gauche à droite (gauche), les lignes, avec les motifs ligne1 à ligne4 de gauche à droite (milieu), et les spirales, avec les motifs spirale1 à spirale4 de gauche à droite (droite).

Le but de l'expérience étant d'évaluer la capacité de la manette à produire des effets vibratoires dynamiques compréhensibles par les utilisateurs, nous voulions proposer un éventail de motifs allant de motifs très simples (des cercles parcourant la circonférence de la manette, ou des lignes verticales), à des motifs plus complexes (des spirales, combinant ainsi les motifs simples à des degrés divers). Au total, ont été proposés 4 motifs de cercles, 4 lignes, et 4 spirales. Ces motifs sont représentés en figure 5.10. Chacun de ces 12 motifs était reproduit visuellement dans l'interface graphique de choix durant les essais.

Les motifs vibratoires étaient joués à vitesse constante lors de l'expérience. La vitesse utilisée dans l'expérience a été calibrée au cours de pré-tests, auxquels cinq participants ont pris part. Durant ces pré-tests, les participants devaient paramétrer eux-mêmes en vitesse et en intensité deux motifs vibratoires simples, un cercle et une ligne. Ils choisissaient d'abord la vitesse

pour chaque motif : l'effet était joué en boucle, et le participant pouvait augmenter ou baisser la vitesse en direct en appuyant sur les boutons de la manette gauche (la manette de VR, et non la manette prototypique). L'effet joué était représenté en direct sur la manette au moyen d'une sphère suivant la vibration. Les participants pouvaient donc visualiser la vibration (et la vitesse) en direct. Pour valider le paramétrage de la vitesse, il leur était demandé de chercher une valeur de vitesse pour laquelle ils étaient certains de pouvoir reconnaître le motif de l'effet, même sans indication visuelle. Les pré-tests ont été réalisés sur six participants différents, et ont donné un paramètre de vitesse d'environ 8cm/s , et un paramètre d'intensité de 80% de l'intensité maximale. Le paramètre de vitesse est issu de la moyenne des valeurs choisies par les 5 participants. Ces valeurs individuelles varient entre environ 6cm/s et 12cm/s . Chacun ayant une longueur différente, particulièrement les motifs en spirale, la durée de jeu de chaque motif différait.

En intégrant des motifs en spirale, combinant des motifs de cercle et ligne, nous avons voulu introduire des motifs pouvant prêter à confusion entre eux, afin d'être en mesure d'observer des erreurs dans le choix des participants.

Mesures

Au cours de l'expérience, nous avons mesuré les temps de réponse des participants, et les réponses sélectionnées à chaque essai. Nous avons aussi récolté des réponses à deux questions post-expérimentales, une portant sur la continuité des motifs vibrotactiles présentés au cours de l'expérience, et une autre portant sur le confort des vibrations. Pour ne pas surcharger les participants, ces questions sont restées générales (portant sur l'ensemble des motifs), mais les participants pouvaient préciser leur réponse au moyen d'un texte. Les participants étaient ensuite invités à détailler par des commentaires supplémentaires tout retour sur les vibrations, le modèle vibratoire, ou des remarques plus générales sur la manette et sa forme. Ces deux questions étaient évaluées au moyen d'une échelle de Likert à 7 points, les choix proposés allant de 1 - Pas du tout continus/confortables à 7 - Parfaitement continues/confortables.

Participants

21 participants ont pris part à notre expérience ($\mu = 32.2$, $\sigma = 7.6$). Ces participants ont été recrutés par le bouche-à-oreille. Nous avons recruté des droitiers ($n = 16$) comme des gauchers ($n = 5$), en formulant l'hypothèse qu'il n'y aurait pas d'incidence de la latéralité sur les performances. Le châssis de la manette a été utilisé comme critère discriminant pour les participants potentiels. Ceux-ci devaient pouvoir tenir le châssis en étant en contact avec tous les vibreurs pour pouvoir participer éventuellement.

5.4.3 Résultats

Nous avons réalisé plusieurs analyses des données récoltées. La première, la plus générale, correspond à la matrice de confusion générale des essais réalisés par les participants 5.1.

TABLE 5.1 – Matrice de confusion. Les lignes correspondent aux motifs des essais, et les colonnes aux réponses des participants. Les valeurs sont des pourcentages du nombre d’essai total par motif. La couleur est basée sur un gradient allant de 0 à 100%. La colonne Miss représente les pourcentages d’essais où les participants n’ont pas répondu avant que le temps soit écoulé.

		Circles				Lines				Spirals				Miss
		C1	C2	C3	C4	L1	L2	L3	L4	S1	S2	S3	S4	
Circles	C1	69	27	1	0	0	0	0	0	0	1	0	3	0
	C2	6	20	29	1	1	0	0	0	2	2	4	29	7
	C3	0	9	73	0	0	0	0	1	2	0	11	3	1
	C4	0	0	0	87	1	0	1	1	0	1	9	0	0
Lines	L1	4	3	0	2	23	1	8	3	27	3	7	4	9
	L2	0	0	1	0	9	81	0	2	1	3	2	0	1
	L3	0	3	2	3	14	1	55	4	4	1	9	0	5
	L4	0	1	3	2	2	2	14	53	4	5	7	3	4
Spirals	S1	1	0	3	1	3	0	1	6	40	20	6	18	3
	S2	1	0	1	0	0	0	0	0	1	76	5	6	0
	S3	0	0	3	13	0	5	0	1	5	4	69	0	2
	S4	2	4	3	0	1	0	1	1	13	9	6	54	7

Dans cette matrice, nous pouvons voir les pourcentages de réussite aux essais, pour chacun, et les confusions entre essais. Il est aussi possible de calculer le pourcentage moyen de réussite des participants durant l’expérience. Les résultats rendent d’un pourcentage de réussite moyen de 58.2% avec un écart-type sur les participants de 12,6%.

Des ANOVAs à mesures répétées sur les données transformées par rangs alignés [257] ont été mises en place afin de tester de potentiels effets d’apprentissage. Dans un premier temps, nous avons évalué l’effet du bloc sur le succès et le temps de réponse aux essais. Ces ANOVAs ont mis en évidence un effet significatif du bloc sur le temps de réponse ($F_4 = 22,4$, $p = 0,0001$; $bloc1 : 15,8s$, $bloc2 : 14,5s$, $bloc3 : 14,3s$, $bloc4 : 13,6s$, $bloc5 : 12,4s$). Nous ne pouvons cependant pas conclure à un effet significatif du bloc sur le succès aux essais ($F_4 = 2.17$, $p = 0.07$).

Dans un second temps, nous avons évalué l’effet du type de motif vibratoire sur le succès et le temps de réponse aux essais. Ces deux ANOVAs ont mis en évidence un effet significatif du motif vibratoire sur le temps de réponse ($F_{11} = 22,4$, $p = 0,0001$) et un effet significatif du motif vibratoire sur le succès aux essais ($F_{11} = 24,8$, $p = 0,0001$). Nous avons de plus évalué l’effet de la famille (ou du type) des motifs (cercle, ligne ou spirale) sur le temps de réponse

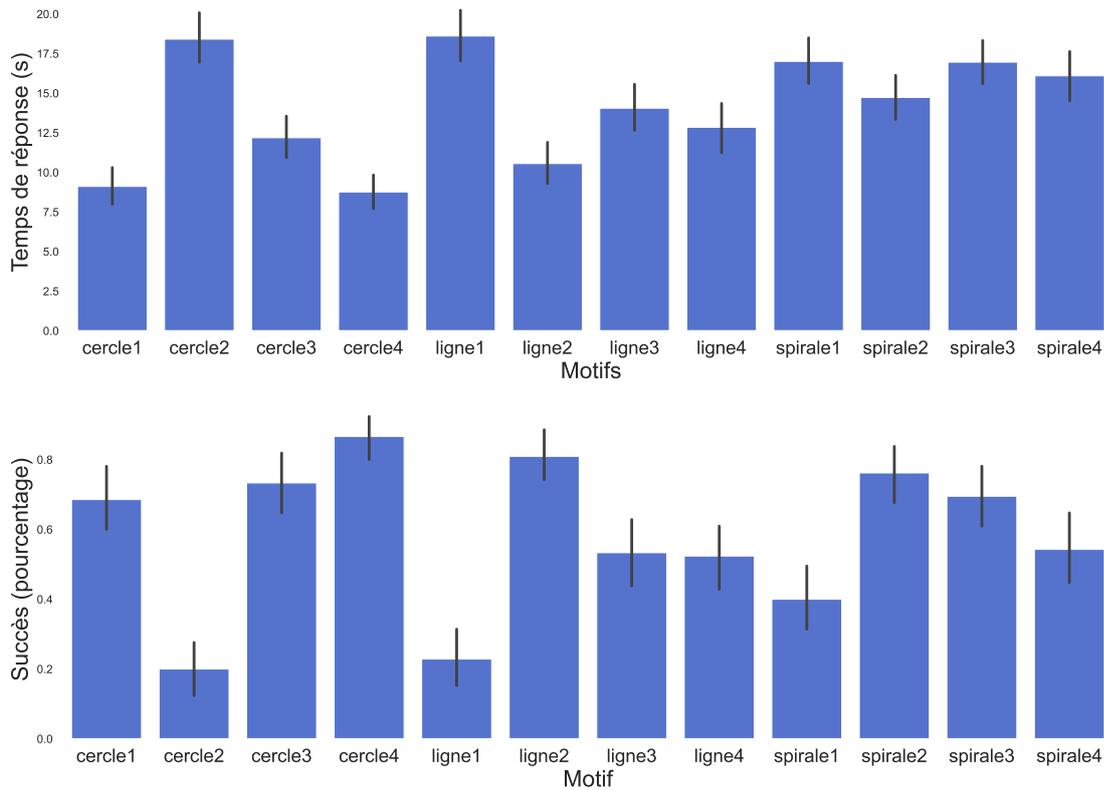


FIGURE 5.11 – En haut, histogramme représentant le temps de réponse des participants en fonction des motifs. En bas, histogramme représentant le taux de réussite des participants en fonction des motifs.

aux essais. L'ANOVA a révélé un effet significatif du type de motif sur le temps de réponse ($F_2 = 27,5$, $p = 0,0001$; *cercles* : 12,1s, *lignes* : 14,0s, *spirales* : 16,2s). Les moyennes par essai sont récapitulées dans la 5.11.

Nous avons aussi mis en place une démarche de réduction d'incertitude. Cette méthode d'analyse, proposée par Senders [212], propose de quantifier l'information totale transmise, sur la base d'une grille de choix.

Soit y ce que l'on veut prédire. S'il y a n items équiprobables dans la grille de choix, l'incertitude originale s'exprime comme suit :

$$\hat{H}(y) = \log_2(n) \quad (5.6)$$

L'incertitude de y sachant x , x correspondant à une prédiction, s'exprime comme suit :

$$\hat{H}_x(y) = -\sum p(i) * \log_2(i) \quad (5.7)$$

Enfin, la réduction d'incertitude s'exprime comme la différence de l'incertitude originale et l'incertitude conditionnelle :

$$\hat{H}(y) - \hat{H}_x(y) \quad (5.8)$$

Avec cette analyse, il est possible d'estimer la quantité d'information transmise au participant, et la part d'information perdue. Nous avons douze possibilités dans notre expérience (les douze motifs vibratoires), tous équiprobable. L'information totale est donc de $\log_2(12) \approx 3,59bits$.

Senders propose ensuite de calculer l'incertitude de ce que l'on veut prédire, sachant que l'on est confronté à une prédiction particulière (voir Formule 5.8). On vient ainsi calculer, pour chaque motif vibratoire, l'incertitude du choix des participants, sachant le motif (Formule 5.8 : $\hat{H}_{motif}(choix_participant)$). Cette incertitude correspond, pour chaque motif, à la somme, sur chaque ligne de la matrice de confusion (Figure 5.1), des pourcentages multipliés par le logarithme base 2 du même pourcentage. On somme alors ces incertitudes conditionnelles rapportées à leur nombre d'essais, et l'on parvient alors à l'incertitude globale, qui correspond dans notre cas à l'information perdue. L'information perdue est de $1,83bits$, ce qui nous donne une information transmise de $1,76bits$.

Enfin, nous avons aussi récolté les réponses de chaque participant après leur passage quant à la continuité des motifs et le confort des vibrations. Comme nous l'avons dit dans la section précédente, ces deux questions étaient évaluées au moyen d'une échelle de Likert sur 7 points. Nous rapportons pour chaque question sa médiane et son écart-type. Les participants ont trouvé les vibrations assez confortables ($M = 5; std = 1,3$) et les motifs assez continus ($M = 5; std = 1,2$), en reportant les valeurs médianes à l'échelle des réponses proposées dans l'échelle de Likert.

Cela couvre l'ensemble des analyses menées sur les résultats de cette deuxième expérience. Ces résultats, assez hétérogènes dans leur fond et dans leur forme, amènent un certain nombre de réflexions que l'on se propose d'explorer dans la section suivante.

5.4.4 Discussion

Cette seconde expérience de validation du prototype nous aura apporté beaucoup de retours et résultats intéressants. Nous proposons d'abord de passer en revue les résultats généraux dans

une première sous-section, avant de s'intéresser plus près aux résultats motif par motif, pour enfin discuter des différents retours que nous ont faits les participants, et comment cela rejoint les résultats observés.

5.4.4.1 Résultats généraux

Dans un premier temps, nous pouvons qualifier la performance globale des participants sur l'ensemble de cette expérience. Comme décrit dans la section précédente, en moyenne, les participants ont réussi à identifier correctement le motif joué parmi les 12 motifs à 58% environ. Ce résultat peut sembler modéré, mais il s'agit de considérer le protocole dans son ensemble.

En effet, dans cette seconde expérience de validation du prototype, les participants étaient immergés en VR, donc coupés du monde physique. Les informations que les participants recevaient étaient donc essentiellement d'ordre haptique (tactile, par la stimulation vibratoire de la manette, et kinesthétique par la position de leur main et de leurs doigts) sans indication visuelle quant au motif, alors que la vue reste le sens majoritaire chez l'humain dans l'élaboration d'un jugement sensoriel [157].

Nous avons réalisé plusieurs pré-tests avant de lancer cette seconde expérience. Un des premiers pré-tests incluait une indication visuelle des motifs. Les premiers résultats de ce pré-test indiquaient premièrement que les participants se reposaient énormément sur cela, et deuxièmement, que leurs performances étaient bien meilleures. Nous avons ainsi voulu restreindre le plus possible l'utilisation de la vue dans cette expérience, afin de ne garder que des informations haptiques, voire tactiles. De ce fait, nous nous attendions à ce que la tâche soit difficile. Cela s'est confirmé suite aux passations, avec une part non négligeable de participants dont la première réaction était de réagir à la difficulté de la tâche au début de l'expérience. Malgré cela, les participants ont globalement réussi à correctement identifier les motifs lors de leurs essais : une réussite de 58,2% contre 8,3% pour des choix aléatoires. Ces résultats montrent que les participants ont bien perçu et identifié correctement des informations purement tactiles. De plus, il est important de noter que les participants n'étaient pas entraînés lorsqu'ils démarraient la tâche de l'expérience : ils n'avaient aucune notion des motifs proposés, ou de la *forme sensorielle* qu'allaient prendre ces motifs. Il est possible d'imaginer que le pourcentage de réussite aurait été plus élevé avec une phase d'entraînement et/ou d'habituation à la forme du retour. Il nous faut toutefois nuancer cette remarque. En effet, l'analyse ANOVA a montré que les participants étaient plus rapides dans leur choix à mesure que l'expérience avançait, mais nous n'avons pas pu observer d'effet significatif de l'avancement sur la réussite des participants.

Ces informations correctement transmises aux utilisateurs ont été quantifiées au travers de la méthode de réduction de l'incertitude [212]. Cette méthode d'analyse nous permet de quanti-

fier l'information à transmettre, transmise, et perdue, aux participants, en bits. Au départ, nous essayons de faire deviner 12 motifs aux participants, soit un peu moins de 4 bits. Par la méthode d'analyse exposée à la section précédente, nous arrivons à quantifier l'information perdue, légèrement inférieure à 2bits , ce qui donne une information effectivement transmise de 1.76bits . Concrètement, cela signifie que nous arrivons à transmettre correctement un peu moins de 4 motifs vibratoires. Si l'on se réfère à la matrice de confusion globale, cette analyse sur l'information transmise semble être pertinente : 3 motifs présentent un taux de réussite de plus de 75%, quelques-uns sont un peu en dessous de 70%, les autres sont beaucoup plus faibles.

Nous arrivons, malgré tout, à transmettre une partie de l'information, dans un contexte défavorable, car purement perceptuel. La manette est capable de transmettre de l'information de spatialisation de façon purement tactile, sans avoir recours à la combinaison congruente des sens visuel et haptique. Nous pouvons donc partiellement valider notre hypothèse, selon laquelle notre prototype permettrait d'améliorer les capacités interactives d'une manette de réalité virtuelle en spatialisant des effets vibrotactiles.

En nous basant sur les résultats des ANOVAs présentées dans la section précédente, et en observant la Table 5.1, on peut remarquer que les résultats sont très inégaux en fonction du motif vibratoire. En effet, nous observons un effet significatif du motif vibratoire sur la réussite des participants. Nous discutons de possibles explications ci-dessous.

5.4.4.2 Résultats par motif

Les analyses ANOVAs par motif et l'observation de la matrice de confusion globale (voir 5.1) montrent que les motifs vibratoires sont très inégaux entre eux en termes de réussite. Il suffit de comparer, par exemple, la ligne 1 et la ligne 2, ou le cercle 2 et le cercle 3, pour rester au sein d'une même famille de motif. Pourquoi certains motifs, très proches en théorie, et de même forme, donnent-ils des résultats si différents ?

Les résultats pour certains motifs peuvent s'expliquer avec des hypothèses basées sur leur forme et sur leur position, comme pour le motif *ligne1*, dont le pourcentage de reconnaissance est très faible (environ 20%), mais aussi très souvent confondu avec toute autre sorte de motifs, ayant été plus souvent confondu avec le motif *spirale1* que correctement identifié. Ce motif propageait une ligne verticale longitudinalement sur la manette, en partant du vibreur A10, localisé au niveau du pouce (voir les Figures 5.10 et 5.2) puis par les vibreurs A8 et A2, puis les vibreurs A7 et A1, correspondant approximativement au bout des doigts (majeur, annulaire, auriculaire) pour les vibreurs A1 et A2, et le milieu et le bas de la paume pour les vibreurs A7 et A8. De ce fait, le motif partait d'un vibreur unique localisé par un doigt, pour se décomposer en deux vibrations à deux extrémités de la main (extrémité des doigts et bas de la paume). Cela implique

que les participants devaient comprendre implicitement qu'il y avait une *continuité vibratoire* entre l'extrémité de leurs doigts et le bas de leur main. Par continuité vibratoire, nous voulons faire comprendre que les effets vibratoires se propagent selon la surface du cylindre, sans prise en compte de la position réelle de la main des utilisateurs. En se référant à la Figure 5.2, si l'on veut faire vibrer un point de vibration virtuelle entre les vibreurs A2 et A8, cette vibration sera théoriquement à un endroit où la main de l'utilisateur n'est pas en contact avec la manette. La vibration produite est propagée sur une forme physique cylindrique, donc fermée sur elle-même, qui *boucle*. Mais, du côté perceptuel, la main de l'utilisateur n'a pas cette propriété de fermeture circulaire, même quand la main est enroulée autour de la manette. Ainsi, l'utilisateur doit comprendre que des vibrations concomitantes sur l'extrémité des doigts et le bas de la main doivent être interprétées en tenant compte de la forme de la manette, avec une forme qui boucle sur elle-même. Pourtant, les résultats des participants pour les motifs circulaires montrent qu'ils sont malgré tout parvenus à un niveau d'abstraction suffisant et à projeter les sensations perçues dans leur main sur la forme de la manette. Les motifs circulaires ne font passer la vibration qu'une fois par révolution par la zone de jonction qui pourrait être problématique, tandis que pour le motif *ligne1*, la vibration reste tout du long dans cette zone. De plus, on voit que ce n'est pas la forme générale des motifs linéaires qui pose problème aux participants : le motif *ligne2* a été reconnu avec succès à plus de 80%. Ainsi, le faible taux de reconnaissance du motif *ligne1* s'explique plutôt par sa position, dans une zone difficile à interpréter pour les participants. Nous reviendrons dans la sous-section suivante sur les retours des participants suite à l'expérience, mais il est utile d'évoquer dès maintenant que plusieurs participants nous ont rapporté avoir procédé par élimination pour déterminer les motifs en spirale. La *ligne1* est positionnée sur une zone de jonction, comme expliqué plus haut, et peut ainsi donner l'illusion de tourner autour de la manette. Ceci pourrait expliquer la confusion fréquente avec des motifs en spirale, comme la *spirale1*, spirale la moins enroulée parmi les motifs en spirale proposés.

D'autres motifs ont des taux de réussite beaucoup plus faibles que la moyenne, sans pour autant avoir été confondus avec autant de motifs différents que dans le cas de la *ligne1*. En se référant à la matrice de confusion en 5.1, c'est le cas pour le motif *cercle2*. Ce motif circulaire, situé entre les anneaux de vibreurs du haut et du milieu, a été correctement identifié 20% du temps, mais il a été confondu près de 30% du temps avec le motif *cercle3*, motif de même famille situé juste en dessous, et près de 30% du temps avec la *spirale4*, motif relativement proche, en termes de position et d'activation de vibreurs. Le *cercle2* est le motif le moins correctement identifié, tous motifs confondus. Pourtant, il a été confondu avec des motifs plus proches, et de façon plus constante, que dans le cas de la *ligne1*. Le *cercle2* avait été choisi pour solliciter les 7 vibreurs supérieurs, pouvant ainsi être confondu avec un motif en spirale comme la *spirale4*, celle-ci étant limitée à la moitié supérieure de la manette, ou les deux motifs circulaires, *cercle1* et *cercle3*, situés au-dessus et en dessous, avec des vibreurs communs. Il est intéressant de voir que le *cercle2* a finalement été peu confondu avec le *cercle1* tandis que l'inverse n'est pas vrai, avec plus de 25% d'erreurs lors des essais avec le motif *cercle1*. Cela peut faire écho aux analyses

de la première expérience, où nous avons pu voir les participants positionner les vibrations en les décalant vers le milieu de la manette.

Il est aussi intéressant de discuter des motifs ayant été beaucoup mieux identifiés que le reste. C'est le cas principalement pour le *cercle4*, la *ligne2* et la *spirale2*, avec des taux de réussite respectifs de 87%, 81%, et 76%.

La *ligne2* correspondait à la propagation longitudinale des vibrations à 90° du pouce, du côté de l'extrémité des doigts. Nous nous attendions à une forte reconnaissance par les participants pour les motifs passant par cette zone, car le bout des doigts est une des zones du corps humain le plus densément fourni en capteurs tactiles. De fait, le *cercle2*, passant par l'extrémité des 4 doigts à l'exclusion du pouce, est un motif sollicitant des zones particulièrement sensibles, et la réussite élevée pour ce motif précis n'est pas surprenante.

Concernant le *cercle4*, il s'agit du motif circulaire se propageant au niveau de l'auriculaire et du bas de la paume de la main. Cette zone n'est pas particulièrement plus sensible, mais selon plusieurs participants, plus facile à discriminer car sur une extrémité de la main.

La *spirale2*, quant à elle, était le motif qui durait le plus longtemps, car le modèle vibratoire était basé sur une propagation à vitesse constante de la vibration. Ainsi, il n'est pas surprenant que ce soit le motif en spirale qui soit le plus facilement reconnaissable, car le plus différent de tous les autres motifs, bien que sollicitant tous les vibreurs.

Enfin, il semblerait que les spirales soient globalement dans la moyenne du taux de réussite, mais que les participants les aient particulièrement plus confondues entre elles, au sein de la famille des spirales, que pour le reste des motifs. Ce sont aussi les spirales qui, en tant que famille, ont pris le plus de temps en moyenne aux participants pour réaliser leur choix. Nous discutons dans la sous-section suivante les explications que ces derniers nous ont apportées suite à leur passage dans l'environnement virtuel.

5.4.4.3 Retours des participants

Les participants étaient invités, après avoir répondu aux deux questions post-expérimentales, à faire des retours informels sur leur expérience. Ces retours nous ont beaucoup apporté, en termes de compréhension et de recul sur les résultats objectifs observés.

Positionnement de la main Premièrement, nous avons pu voir que, quelles que soient les performances objectives des participants, la grande majorité des participants a trouvé la tâche relativement difficile. 4 participants ont explicitement déploré l'absence de retour visuel accom-

pagnant le retour tactile, et nous avons pu observer 6 participants fixer le prototype durant les essais. Interrogés à ce sujet, ils nous ont expliqué que cela leur facilitait la représentation mentale de leur main englobant la manette. Nous formulons l'hypothèse qu'ils utilisaient les informations proprioceptives pour s'aider, et mieux visualiser le déplacement de la vibration par rapport à leur main réelle. Certains participants ont fait des retours sur la forme de la manette, qui pourrait adopter un châssis plus proche d'une manette de *Valve Index*, par exemple, pour que les doigts se positionnent plus naturellement, en avançant le fait que cela faciliterait la localisation des vibrations. Dans le contexte de notre expérience, cela serait revenu à rajouter des informations visuelles par un couplage visuo-proprioceptif. C'est néanmoins une piste intéressante qu'il conviendra d'étudier dans le futur. Cette remarque des participants quant au positionnement des doigts sur le châssis nous permet de mettre en avant la nécessité, ou l'utilité tout du moins, d'une matrice de capteurs capacitifs, qui fonctionnerait en parallèle du modèle vibratoire, pour ajuster et affiner les intensités de chaque vibreur en fonction des contacts effectifs à un instant donné.

Stratégie d'identification des motifs Un nombre non négligeable de participants nous a, très tôt dans les passations, indiqué fonctionner par exclusion pour identifier les spirales. Le commentaire du participant 4003 nous a paru particulièrement révélateur de cette démarche : "Si ça tournait à niveau constant, c'était un cercle ; si ça sollicitait tous les doigts ou toute la paume sans tourner, c'était une ligne ; sinon c'était une spirale". Nous avons ainsi orienté les questions informelles dans nos échanges post-expérimentaux pour déterminer la stratégie employée par les participants, et il s'avère que 13 d'entre eux ont effectivement eu un raisonnement analogue. Cela se confirme en observant les temps de réponse moyens par essais, ou par famille d'essai, qui montrent que les motifs circulaires ont pris significativement moins de temps que les motifs linéaires, qui ont eux-mêmes pris significativement moins de temps que les motifs en spirale.

Perception des vibrations Enfin, nous avons eu quelques retours de participants à propos des vibrations. Deux participants nous ont explicitement parlé de certains motifs, pour lesquels ils "ressent[ent] les vibreurs séparément" et pour lesquels ils faisaient consciemment la somme des vibrations. Nous n'avons pas pu savoir avec exactitude à quels motifs ces participants se référaient. Plus globalement, la méthode d'interpolation des vibreurs en deux dimensions telle qu'envisagée par Lipari [146], et implémentée avec la méthode de sommation d'énergie [116], produit effectivement des vibrations continues, ou jugées comme telles par les participants.

Pris dans leur ensemble, ces résultats nous permettent de valider la capacité de la manette à transmettre des informations tactiles spatialisées dynamiques, que ce soit au travers de la quantité d'information effectivement transmise ou le taux de réussite des participants. Cette deuxième expérience de validation se concentrait sur des motifs et des vibrations dynamiques, et donne des résultats plus encourageants que la première expérience. Néanmoins, il reste un certain nombre

de limitations inhérentes au protocole mis en place, et à la conception de la manette, dont nous discutons dans la sous-section suivante.

5.4.5 Limitations

Comme nous avons pu le voir, malgré le fait que les participants aient réussi à identifier correctement dans l'ensemble les motifs vibratoires, et à suivre les vibrations basées sur le modèle de *funneling*, il y a un certain nombre de limitations qu'il convient de souligner. En premier lieu, le protocole expérimental mis en place, inspiré du protocole de Kajimoto *et al.* [120], reste limité en termes d'exploration de motifs vibratoires, en limitant les choix à trois familles différentes, et douze motifs au total. Les motifs ont été choisis pour explorer les deux dimensions principales d'une manette cylindrique (la longueur et la circonférence), avec plusieurs positions, pour mettre en évidence les différentes zones utiles en termes de perception. Pourtant, le protocole, forçant le choix à chaque essai parmi les seuls motifs effectivement mis en place, introduit un biais d'*élimination*, biais que l'on a effectivement pu observer lors des passations. Les participants n'avaient pas à purement reconnaître les motifs, mais à les discriminer entre eux. On pourrait arguer que la discrimination entre différentes stimulations tactiles est déjà une avancée en termes de possibilité d'interaction pour une manette de VR. Nous avons considéré des protocoles plus élaborés, dans lesquels les participants auraient à dessiner en VR les motifs qu'ils auraient perçus, mais cela aurait alors introduit d'autres étapes dans le protocole, et possiblement d'autres biais, assez proches de ceux évoqués dans les limites du premier protocole. Par exemple, il y a une potentielle perte d'information entre la perception et la restitution par le participant : le fait que sans voir la main et la manette réelles, il est difficile de s'assurer que les participants retranscrivent correctement ce qu'ils ont ressenti. Il serait possible de bien percevoir le motif, mais de mal le restituer.

Une autre limitation principale concerne le recrutement et la prise en main - littérale - du prototype. Nous avons dû, lors de la phase de recrutement, discriminer les participants, pour ne garder que ceux qui pourraient être en contact effectif avec tous les vibreurs. Cela a évité certains problèmes rencontrés lors de la première expérience, avec certains participants qui ne percevaient pas certains vibreurs. Pourtant, malgré cela, plusieurs participants ont rapporté la difficulté à maintenir la même position le long de l'expérience, et surtout, l'incapacité à savoir s'ils avaient changé leur tenue de la manette lors de leur passage. Cette limite technique pourrait être palliée par l'ajout de la matrice de capteurs capacitifs, voire un changement de forme dans le châssis, qui permettrait un positionnement (et un repositionnement) naturel.

5.4.6 Conclusion

Nous avons vu, dans cette section, une expérience visant à valider la spatialisation dynamique de motifs tactiles, produits au moyen du prototype que nous avons élaboré et décrit dans ce chapitre. Le protocole expérimental mis en place dans cette expérience était inspiré par des études portant sur des prototypes proches du nôtre. Au cours de ce protocole, les participants étaient immergés dans un environnement de réalité virtuelle, et devaient identifier visuellement des motifs qui leur étaient joués en vibration dans la paume de leur main droite.

Les résultats de cette expérience ont permis de montrer que les participants réussissaient à identifier les motifs joués à presque 60%. Malgré les pertes d'information, le prototype et le modèle de vibration mis en place sont capables d'informer des utilisateurs sur des motifs relativement complexes, impliquant parfois jusqu'à 10 vibreurs de façon succincte, et 3 vibreurs en simultanés. Le modèle mis en place, inspiré par les travaux de Lipari [146], permet de simuler des vibrations virtuelles en tout point de la surface cylindrique du prototype. Les vibrations dynamiques produites grâce à ce modèle ont été jugées plutôt favorablement par les participants en termes de continuité et de confort.

En prenant du recul par rapport à cette seconde expérience, il faut aussi prendre en compte le fait que nous cherchons à concevoir une manette qui doit pouvoir servir dans un contexte de RV, mais un contexte interactif. Il est alors important de s'intéresser aux capacités et avantages de notre prototype dans un contexte interactif d'exploration active. Dans la section suivante, nous présentons la troisième et dernière expérience qui explore différentes modalités d'interaction basées sur le retour spatialisé lors de mouvements actifs, et leur apport vis-à-vis de l'expérience haptique de l'utilisateur.

5.5 Troisième expérience

Dans le cadre de la validation de prototype, nous avons conçu une troisième expérience au cours de laquelle les participants interagissaient avec des objets virtuels au travers de mouvements actifs. Nous avons comparé l'expérience haptique des participants suite à leurs interactions avec l'EVI selon 3 conditions expérimentales distinctes : condition de contrôle avec une manette *Valve Index* et retour haptique intégré, manette prototype et retour haptique non spatialisé, et manette prototype avec spatialisation.

5.5.1 Objectifs

Cette troisième expérience s'intéresse à la troisième question de recherche développée plus tôt dans ce chapitre, à savoir l'apport du retour haptique spatialisé sur l'expérience utilisateur. Dans quelle mesure la spatialisation du retour vibrotactile va-t-elle améliorer l'expérience utilisateur, et particulièrement l'expérience haptique, en termes de réalisme, d'immersion, et de diversité? Notre objectif est de comparer notre solution haptique (le prototype et le modèle de vibration spatialisée) avec une manette grand public dans un contexte interactif en RV, par rapport à l'expérience haptique des participants.

5.5.2 Protocole expérimental

Nous avons mis en place une expérience dans laquelle les participants interagissent activement avec l'EVI, et perçoivent les contacts avec celui-ci selon plusieurs modalités vibrotactiles.

Matériel

Les participants étaient immergés dans l'EVI en portant un casque *Valve Index*. Pour les interactions avec l'environnement, les participants tenaient dans leur main gauche une manette *Valve Index* et tenaient dans la main droite la manette liée à la condition expérimentale, à savoir notre prototype ou une manette *Valve Index* (voir la sous-section suivante qui détaille les conditions expérimentales). L'environnement virtuel a été mis en œuvre à l'aide de *Unity3D* (2019.2.12f1) et du plugin *Unity Steam VR*. L'expérience s'est déroulée sur un processeur Intel(R) Core(TM) i7-9750H 2,60 GHz avec 32 Go de RAM et un GPU Nvidia 2070 RTX GeForce de 8 Go. De plus, les participants étaient équipés d'un casque à réduction de bruit Peltor 3M X3AC1 33dB.

Conditions expérimentales

Nous avons conçu trois conditions expérimentales pour cette expérience. La première condition est une condition de contrôle, nommée *CONTROLE*. Elle utilise une manette *Valve Index* et implémente un retour vibrotactile basé sur les vibrations inhérentes à cette manette et aux interactions haptiques disponibles sur le plugin *SteamVR*.

La seconde condition, nommée *VIBUNIFORM*, est basée sur la manette prototypique, mais le retour vibrotactile est dégradé. Seule une activation *booléenne* est implémentée : les 10 vibreurs de la manette sont activés à même intensité et même fréquence en même temps lors des

interactions. Cette condition représente un retour vibrotactile naïf, sans spatialisation, pour une manette équipée d'un unique vibreur faisant vibrer tout le châssis.

La troisième condition, nommée VIBSPATIAL, est basée sur la manette prototypique avec le retour vibrotactile spatialisé basé sur le modèle de *funneling* surfacique en 2 dimensions tel que présenté plus tôt dans ce chapitre.

Mesures

Nous voulions évaluer l'expérience utilisateur des participants sous le prisme du retour haptique. Nous avons introduit dans notre état de l'art les travaux conceptuels récents sur l'expérience haptique, par Kim & Schneider [127]. L'expérience haptique est ainsi décomposée en 4 dimensions : utilité, causalité, cohérence, saillance. Ces travaux ont fait l'objet d'une proposition de métrique pour la mesurer [204], sous la forme d'un questionnaire de 20 items. Ce questionnaire intègre les 4 dimensions de l'expérience haptique de Kim & Schneider en plus d'intégrer une dimension immersive, ce qui nous paraît approprié pour évaluer une solution haptique. Le questionnaire complet est présenté en Table 5.2. Pour chaque condition expérimentale, nous avons évalué l'expérience haptique des participants après leur passage dans l'environnement de l'expérience. Nous avons de plus demandé aux participants, à l'issue de l'expérience, de noter chaque condition expérimentale sur une échelle de 1 à 10 en fonction de leur appréciation de chaque dans leur globalité.

Hypothèses

Notre objectif est de montrer l'intérêt de la spatialisation du retour vibrotactile pour l'expérience haptique de l'utilisateur. Cette spatialisation devrait permettre d'enrichir le retour haptique, et d'exprimer une plus grande diversité en termes d'interaction avec l'environnement. Nous faisons donc l'hypothèse que la condition VIBSPATIAL va être significativement supérieure aux conditions CONTROLE et VIBUNIFORM en termes d'expérience haptique globale (H1), et particulièrement en termes d'expressivité (H1.1), d'immersion (H1.2) et de réalisme (H1.3).

La condition VIBUNIFORM propose un retour haptique très limité, et assez rigide, car sans variation. Nous faisons l'hypothèse que ce retour sera considéré peu réaliste, mais aussi jugé comme non harmonieux par les participants. Ainsi nous faisons l'hypothèse que la VIBUNIFORM sera significativement moins harmonieuse que VIBSPATIAL et CONTROLE (H2).

ID	Questions
Autotélisme	
H-2	J'ai aimé avoir un retour haptique dans le cadre de l'expérience.
A-2	J'ai aimé le retour haptique pour ce qu'il était, indépendamment de son rôle dans le système.
A-3	Je n'ai pas aimé le retour haptique.
A-4	J'aurais préféré le système sans retour haptique.
A-1	Le retour haptique était satisfaisant
Expressivité	
E-2	J'ai ressenti des variations adéquates dans le retour haptique.
E-4	Le retour haptique a changé en fonction de la manière dont les choses ont changé dans le système.
E-5	Le retour haptique reflète les différentes entrées et événements.
E-1	Le retour haptique a toujours semblé le même.
Immersion	
I-4	Le retour haptique a augmenté mon engagement par rapport à la tâche.
I-3	Le retour haptique m'a aidé à me concentrer sur la tâche.
E-3	Le retour haptique m'a aidé à distinguer ce qui se passait.
I-2	Je me suis engagé avec le système grâce au retour haptique.
Réalisme	
R-1	le retour haptique était réaliste.
R-2	Le retour haptique était crédible.
R-3	Le retour haptique était convaincant.
Harmonie	
H-3	Le retour semblait déconnecté du reste de l'expérience.
H-5	Le retour haptique semblait déplacé.
I-1	Le retour haptique m'a distrait de la tâche.
H-4	Le retour haptique m'a semblé approprié à l'endroit et au moment où je l'ai ressenti.

TABLE 5.2 – Questionnaire post-condition portant sur l'expérience haptique, traduit de Sathiyamurthy *et al.* [204].

Déroulement

L'expérience se déroulait en suivant un protocole intra-sujets, donc chaque participant était soumis aux trois conditions expérimentales. L'ordre de passage des conditions a été contrebalancé suivant un carré latin. En arrivant dans la pièce d'expérimentation, les participants étaient invités à lire puis à signer un formulaire de consentement, puis à renseigner un questionnaire sur les données démographiques basiques d'âges, de genre, et d'expérience avec la RV.

Nous décrivons ici le protocole pour une condition expérimentale particulière. Ce protocole était répété trois fois par participant, pour chacune des conditions. Les participants, aidés de l'expérimentateur, s'équipaient du matériel pour l'expérience, à savoir le casque et les manettes, puis étaient immergés dans l'EVI. Une fois dans l'EVI, les participants se trouvaient au milieu d'une pelouse entourée d'arbres et avaient pour seule représentation des mains virtuelles (voir Figure 5.12). Une interface utilisateur (UI) simple souhaitait la bienvenue aux utilisateurs sous forme de texte. Cette UI servira tout le long de l'expérience pour guider les utilisateurs. Les participants étaient invités à réaliser une série de mouvements avec la main droite, aidés d'une main

animée exécutant la démonstration des mouvements. Il y avait 4 types de mouvements, chaque mouvement étant répété 10 fois, pour un total de 40 mouvements. Les quatre mouvements à réaliser étaient : un mouvement de rotation, un mouvement descendant, un mouvement ascendant, et un mouvement combinant le mouvement ascendant et descendant. Pour chaque mouvement, les participants devaient rester en contact avec l'arête d'un cube, et avaient pour consigne de se concentrer sur les sensations haptiques perçues durant le contact. Après avoir réalisé l'ensemble des mouvements, les participants remplissaient le questionnaire d'expérience haptique. À l'issue des trois conditions, il était demandé aux participants de noter chaque condition sur une échelle de 1 à 10.



FIGURE 5.12 – Vue de l'environnement virtuel de la troisième expérience et de la manette interagissant avec le cube, avec la main animée sur l'arrière du cube (à gauche), et participant avec le dispositif expérimental - casque de RV, casque antibruit, et manettes (à droite).

Participants

18 participants ont pris part à cette expérience ($\mu = 29,8; \sigma = 7,9$). Tous les participants étaient des hommes, recrutés sur leur capacité à se saisir correctement de la manette, comme durant le recrutement de l'expérience précédente. Ces participants ont été recrutés par bouche-à-oreille. Cette expérience a été validée par le comité d'éthique d'Inria.

5.5.3 Résultats

Nous avons analysé les données obtenues au cours de cette troisième expérience. Comme les données recueillies par le biais des questionnaires étaient ordinales et ne suivaient pas des distributions normales, chaque item a été analysé à l'aide de tests non paramétriques en utilisant l'analyse de Friedman et les tests par paires post-hoc de Wilcoxon avec correction de Bonferroni.

Score global des conditions

Une analyse de Friedman sur les **scores globaux d’appréciation** a révélé un effet significatif entre les différentes conditions expérimentales ($\chi^2(3) = 17.1, p < 0.0001$). Une analyse post-hoc de Wilcoxon a révélé des différences significatives entre VIBSPATIAL ($Mdn = 8$) et les deux autres conditions, CONTROLE ($Mdn = 6,5; p < 0,003$) et VIBUNIFORM ($Mdn = 6,5; p < 0,0001$) (voir Figure 5.13).

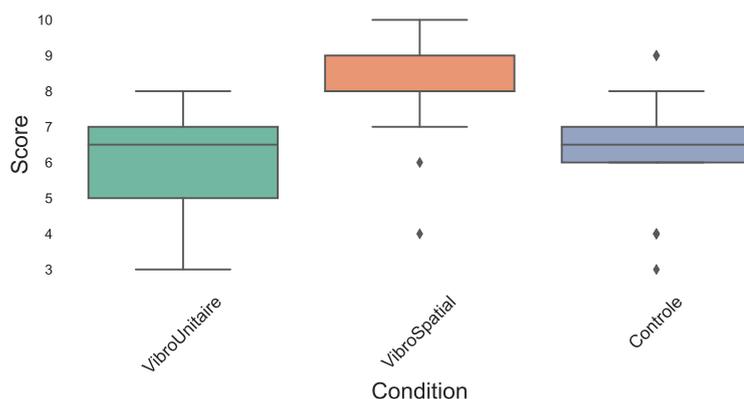


FIGURE 5.13 – Scores agrégés de l’appréciation globale des conditions par les participants, rapportés sur une échelle de 1 à 10.

Expérience haptique

Nous avons réalisé des analyses de Friedman sur l’ensemble des questions du questionnaire d’expérience haptique. Pour les items dont le test était significatif, nous avons réalisé des analyses post-hoc de Wilcoxon. Ces analyses ont révélé des différences significatives pour les items A3, A4, A1, E2, E4, E5, E1, I4, E3, R1, R2, R3, H3, H5 et H4. L’ensemble des réponses au questionnaire d’expérience haptique est résumé dans la Figure 5.14.

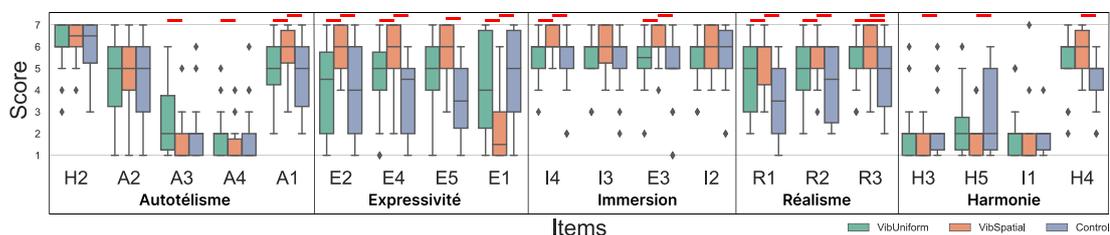


FIGURE 5.14 – Diagramme en boîtes à moustaches représentant les scores au questionnaire d’expérience haptique. Les barres rouges représentent une différence significative entre les deux conditions.

Le questionnaire utilisé dans cette expérience mesurant l'expérience haptique a été proposé récemment par Sathiyamurthy *et al.* [204]. Il n'a pas encore été validé par d'autres expériences. Dans l'objectif de fournir des données supplémentaires, nous avons reproduit la démarche de réduction de dimension pour vérifier que nous obtenions une répartition des différents items proche de celle proposée par les auteurs du questionnaire. Le résumé de ces analyses est présenté dans la Table 5.3.

Question	TC1	TC2	TC3	TC4	TC5
H-2	-0,02	-0,62	0,28	0,4	-0,08
A-2	0,05	-0,12	0,89	-0,15	-0,02
A-3	0,05	0,84	0,13	-0,19	-0,2
A-4	0,04	0,74	-0,25	-0,25	0,03
A-1	0,39	-0,21	0,29	-0,02	0,39
E-2	0,29	-0,04	-0,03	-0,22	0,77
E-4	-0,09	-0,03	0	0,1	0,93
E-5	0,2	-0,01	-0,04	-0,01	0,84
E-1	0,28	-0,06	-0,16	-0,27	-0,78
I-4	0,72	-0,06	0,06	0,32	0,02
I-3	0,56	-0,51	0,07	-0,1	0,07
E-3	0,45	0	0,15	0,55	0,11
I-2	0,87	0,03	0,02	0,15	-0,02
R-1	0,61	-0,08	0,05	-0,16	0,41
R-2	0,4	-0,04	0,33	0,21	0,3
R-3	0,24	-0,09	0,33	0,42	0,3
H-3	0,03	0,23	0,18	-0,66	-0,31
H-5	-0,16	0,12	0,13	-0,84	0,01
I-1	-0,11	0,76	0,42	-0,04	0,13
H-4	0,4	0,15	0,05	0,52	0,31
Valeurs propres	3,77	3,03	1,82	3,11	4,29
Pourcentage de variance	0,24	0,19	0,11	0,19	0,27
Corrélation avec TC1	1	-0,3	0,14	0,31	0,43
Corrélation avec TC2	-0,3	1	-0,2	-0,27	-0,15
Corrélation avec TC3	0,14	-0,2	1	0,13	0,34
Corrélation avec TC4	0,31	-0,27	0,13	1	0,32
Corrélation avec TC5	0,43	-0,15	0,34	0,32	1

TABLE 5.3 – Analyse de composante principale des données issues du questionnaire d'expérience haptique. La première partie détaille les corrélations pour chaque critère. La deuxième partie détaille les valeurs propres (*eigenvalues*) et le pourcentage de variance expliquée par l'analyse de composante principale. La troisième partie montre les corrélations entre composantes.

5.5.4 Discussion

Dans cette expérience, nous avons cherché à évaluer l'apport de notre prototype par rapport à l'expérience utilisateur, au travers de l'expérience haptique. Pris dans leur ensemble, nos ré-

sultats montrent que la manette, dans la conception du châssis et la disposition des vibreurs, est convaincante, et que le retour vibrotactile spatialisé, basé sur le *funneling*, a un effet mélioratif significatif sur l'expérience haptique et sur l'appréciation globale des participants. En effet, les résultats montrent des différences significatives à plusieurs niveaux entre le prototype couplé au retour vibrotactile spatialisé comparé à la condition de contrôle (la manette *Valve Index*) et au prototype couplé au retour unitaire.

Revenons aux hypothèses de cette troisième expérience. Avec notre première hypothèse, **H1**, nous stipulions que la condition VIBSPATIAL serait supérieure aux deux autres conditions en termes d'expérience haptique. Sur les 20 questions composant le questionnaire, 8 d'entre eux montrent des différences significatives dans les deux sens (VIBSPATIAL supérieure aux deux autres). Nous pouvons ainsi valider **H1**. Nous avons aussi émis l'hypothèse que VIBSPATIAL serait supérieure en termes d'expressivité (**H1.1**), d'immersion (**H1.2**) et de réalisme (**H1.3**). En ce qui concerne l'expressivité, composés des items E2, E4, E5 et E1, nous pouvons confirmer l'hypothèse **H1.1** : seul E5 montre une unique différence significative entre VIBSPATIAL et CONTROLE, tandis que les 3 autres montrent une différence significative dans les deux sens. Quant au réalisme, composé des items R1, R2, R3, les résultats sont similaires à l'expressivité : les items R1 et R2 montrent la supériorité significative de VIBSPATIAL dans les deux sens. La question R3, qui évaluait l'aspect *convaincant* du retour, diffère légèrement : CONTROLE est significativement inférieure aux deux autres conditions, à notre surprise. Nous interprétons ce résultat comme l'expression d'une attente plus grande quant au retour haptique proposé par la manette *Valve Index* par les participants, qui a semblé, suite au retour de plusieurs participants, « plus ergonomique quand même ! ». Avec ces résultats, nous pouvons valider **H1.3**. Les résultats sont plus nuancés en ce qui concerne l'immersion (items I4, I3, E3, I2). Les items I4 et E3 montrent des différences significatives dans les deux sens, ce qui est très encourageant. Toutefois, les analyses statistiques n'ont pas révélé de différence entre les conditions pour les items I3 et I2. Pour la question I3, qui portait sur l'aide à la concentration pour compléter la tâche, nous considérons que, étant donné le protocole expérimental et la tâche à réaliser, ce n'est pas surprenant : la tâche était exclusivement basée sur le retour haptique, et les participants avec pour consigne de se concentrer sur les sensations haptiques. Ainsi, il nous paraît raisonnable que les différentes modalités haptiques n'aient pas contribué différemment à la concentration durant la tâche. Nous pouvons noter aussi que les scores à cette question étaient très élevés pour les trois conditions. Pour la question I2, qui portait sur l'engagement, nous pensons que la tâche et les interactions n'étaient pas assez variées pour faire apparaître de différences. Il serait intéressant de proposer un contexte interactif plus riche pour vérifier cette nouvelle hypothèse. Nous pouvons tout de même, avec deux items parmi quatre, partiellement valider l'hypothèse **H1.2**.

Enfin, nous avons formulé une hypothèse en rapport avec les deux conditions CONTROLE et VIBUNIFORM. Nous pensions que le réalisme et l'harmonie de CONTROLE serait supérieur à VIBUNIFORM. Nos résultats ne nous permettent pas de confirmer ces hypothèses. Ces résultats

sont positifs : la conception de la manette semble être suffisamment bonne pour que les participants la jugent convenable en tant que manette, même quand elle est comparée à la manette du *Valve Index*. Les scores d'appréciation globale vont dans ce sens, CONTROLE, la condition avec la manette *Valve Index*, et VIBUNIFORM ayant une médiane égale. Les scores de VIBUNIFORM présentent malgré tout une variance plus importante.

Enfin, nous avons réutilisé pour cette expérience un questionnaire récent, qui demande encore des données afin de le valider. Nous avons reproduit une démarche similaire à celle présentée dans les travaux introduisant ce questionnaire [204]. Avec 80% d'explication de la variance, nous pouvons avancer que la décomposition en 5 sous-composantes proposée par les auteurs du questionnaire est valide. Nous retrouvons, pour certaines questions, la distribution dans les sous-composantes proposées initialement : le regroupement des items E2, E4, E5 et E1, formant la sous-composante TC5 (Expressivité dans le questionnaire initial). Cette composante étant la plus impactée par les différentes conditions expérimentales, dans notre protocole, ceci était attendu. Nous retrouvons aussi certains items formant la composante d'Harmonie, avec les items H3, H4, H5, auxquels se rajoutent les items E3 et R3. Les sous-composantes d'Immersion et de Réalisme (items I4, I3, E3 et I2 d'une part, et R1, R2 et R3 de l'autre) semblent être agrégées dans notre analyse, comme une unique composante (TC1). Le contexte de notre protocole étant limité, ces résultats restent à considérer avec nuance. Il nous apparaît important de faire une remarque sur la notion d'*immersion* telle qu'elle apparaît dans le questionnaire. La formulation des questions liées à l'immersion dans le questionnaire initial (I2, I3, I4, E3) semblent porter sur une perception plus subjective de l'expérience de l'utilisateur que sur les capacités technologiques du système, ce qui correspondrait ainsi plutôt à l'aspect présence et engagement que la notion d'immersion, dans la conception de ces notions telles qu'avancées par Slater [220]. Il serait souhaitable de clarifier l'appellation des sous-composantes en les basant sur les recommandations de la littérature, pour éviter toute confusion. Nous espérons que d'autres études utiliseront ce questionnaire dans des contextes et des tâches expérimentales différents.

5.5.5 Conclusion

Avec cette troisième expérience, nous nous sommes intéressés à l'apport de la manette et du modèle de vibration spatialisé par rapport à l'expérience utilisateur, et particulièrement l'expérience haptique. Cette expérience conclut l'ensemble des expérimentations menées dans le cadre de ce projet, mises en place pour évaluer et valider la conception de notre manette. Nos résultats montrent que les vibrations basées sur le *funneling* ont permis d'améliorer significativement l'expérience haptique, et que les participants ont globalement mieux apprécié notre prototype que la manette qui a servi de condition de contrôle, à savoir la manette grand public du *Valve Index*. Ces résultats sont très encourageants sur l'apport du *funneling* lors des interactions en EVI. Il serait intéressant de mettre en place une nouvelle tâche expérimentale proposant des interac-

tions plus libres qui puissent explorer différentes implémentations du *funneling*, et observer les apports sur l'expérience utilisateur et haptique. Cela esquisse un ensemble de pistes à explorer pour la suite de ce projet. Nous nous penchons sur celles-ci dans la section suivante.

5.6 Avancement et poursuite

Nous avons présenté, dans les trois sections précédentes, les expériences que nous avons mises en place afin de valider les aspects techniques et les potentialités de notre prototype, en termes de spatialisation des vibrations, puis de son intérêt quant à l'expérience utilisateur. Les résultats de ces expériences nous permettent d'affirmer que notre manette apporte une richesse d'information tactile supplémentaire aux expériences immersives. Malgré ces résultats encourageants, forts des observations issues de ces expériences et des retours de nos participants, il est évident que ce prototype peut évoluer, et amener encore plus de possibilités d'interactions pour les EVIs.

Au niveau de sa conception, les différentes observations faites au cours du projet, et particulièrement lors des deux expériences, associées au retour de nos participants, nous ouvrent des pistes d'amélioration de la manette. En nous basant sur plusieurs retours de participants, que ce soit dans la première, la deuxième ou la troisième expérience, nous pensons qu'il serait pertinent de pouvoir connaître la position de la main qui tient le prototype. Nous avons envisagé que cela pourrait être mis en place en intégrant une matrice de capteurs capacitifs au niveau du châssis du prototype. Cet ajout permettrait d'apporter les informations de contact de la main et des doigts sur le châssis de la manette. Cela permettrait deux choses : premièrement, de représenter fidèlement les contacts de la main sur la manette dans l'environnement virtuel, et donc d'avoir une représentation virtuelle de la main de l'utilisateur en temps réel au sein de l'EVI, afin qu'il puisse faire le lien entre retour visuel et retour tactile. Nous avons pu voir en effet que les participants essayaient de déduire des informations de position de leur main réelle sur la manette au cours de la seconde expérience, en s'informant au travers de la proprioception. Deuxièmement, si une telle matrice capacitive est mise en place, il est alors possible de savoir à tout moment où sont situés les contacts entre la main et la manette. Il devient donc possible d'affiner le modèle de vibration afin qu'il n'active des vibreurs qui sont effectivement couverts par une partie de la main. Cela permettrait de pallier au problème de positionnement forcé de la main par rapport aux vibreurs, et ainsi de permettre à des mains de tout gabarit de se saisir plus naturellement du prototype, qui n'aurait pas besoin d'être décliné en plusieurs tailles, mais aussi de couvrir toute la surface de la manette avec une matrice de vibreurs plus dense (sur toutes les ouvertures des modules imprimés, qui peuvent contenir jusqu'à 5 vibreurs), sans que les vibreurs ajoutés qui ne seraient pas en contact avec la main vibrent dans le vide.

Ce projet avait pour objectif initial de proposer une nouvelle manette de RV, qui enrichirait les expériences interactives en environnement immersif. Avec la troisième expérience mise en place, nous avons pu commencer à étudier l'intérêt et l'apport du *funneling* sur l'expérience utilisateur dans des interactions impliquant des mouvements actifs. Cette expérience s'est aussi limitée à la mesure de l'expérience haptique. Il conviendrait, pour de futures études, de se pencher sur des scénarios intégrant des interactions plus libres, avec des effets haptiques plus divers basés sur le *funneling*. Nous avons déjà envisagé plusieurs scénarios, plus ou moins complexes, explorant plusieurs aspects de l'expérience utilisateur. Nous identifions trois pistes d'exploration concernant l'expérience utilisateur pour qualifier l'apport du retour spatialisé de notre manette.

Immersion La première concerne le niveau technologique global de l'expérience immersive, l'immersion. Plus une expérience en RV ou en EVI est aboutie en terme technologique et de simulation de la réalité, plus l'immersion est importante [104, 222]. De par sa définition, qui correspond à l'intégration technologique pour un EVI, l'immersion devrait augmenter en ajoutant un retour tactile spatialisé.

Présence La seconde concerne la relation entre l'utilisateur et l'environnement, la présence. Comme nous l'avons déjà présenté dans la revue de la littérature, la présence qualifie le sentiment d'un utilisateur à se *sentir là* dans un environnement virtuel immersif [27, 223]. Notre prototype cherche à faciliter et enrichir l'interaction d'un utilisateur équipé d'un matériel standard de RV (casque et manettes). Les mains, et par extension, les manettes de RV dans un contexte d'EVI, sont un des principaux moyens d'interactions avec l'environnement autour de l'homme. Un certain nombre d'études a démontré que l'ajout d'un retour haptique aux expériences en EVIs permettait d'améliorer le sentiment de présence et ses différents aspects [133, 202]. Il est donc raisonnable de formuler l'hypothèse selon laquelle notre prototype, dans des tâches de contact avec l'environnement, en enrichissant ces contacts, suscite un plus haut niveau de présence que des manettes sans retour tactile, ou avec un retour tactile plus limité, comme actuellement fourni dans les manettes de RV grand public. Nous avons imaginé plusieurs protocoles qui pourraient explorer l'apport de notre prototype quant au sentiment de présence. Nous les décrivons succinctement ci-après, et synthétisons l'ensemble des propositions ensuite. L'innovation principale de notre prototype repose sur sa capacité à spatialiser les vibrations à sa surface. Dans un contact direct réel entre la main et un objet, les informations proprioceptives (de direction du mouvement, et d'orientation du contact) sont couplées aux informations tactiles (de textures, de chaleur, etc). En RV, pour une interaction basée sur une manette, les informations proprioceptives relatives à la direction du mouvement, pour aller toucher l'objet, sont toujours présentes - il est impossible de se séparer de son système kinesthétique, et celui-ci ne dépend pas de la vue du corps biologique. Par contre, il est envisageable de remplacer les informations liées aux orientations et directions du contact même, par des informations tactiles spatialisées. Il existe un grand nombre de travaux

explorant la simulation de textures basées sur du retour tactile [65, 234], et bien que cette piste soit intéressante, ce n'est pas celle que nous voulons explorer avec notre prototype. Ces informations sont tout aussi importantes, et devront être incluses dans les EVIs, et mériteront d'être intégrées dans des systèmes de RV pour le grand public. Néanmoins, il y a déjà tout un travail de validation à réaliser avec les informations liées à l'orientation du contact, et la direction du mouvement. Notre première piste pour étudier l'apport de la spatialisation des vibrations sur la présence concerne ainsi des mouvements exploratoires actifs sur des objets à forme simple. Il serait alors possible de s'inspirer voire de réutiliser le contexte expérimental mis en place pour la troisième expérience.

Incarnation La troisième se rapporte à l'incarnation, longuement développée dans ce manuscrit, sentiment qui émerge lorsque les propriétés d'un corps virtuel sont traitées comme les propriétés du corps biologiques. Ce sentiment résulte d'une intégration congruente de retours multisensoriels, comme la vue, l'ouïe, et aussi, le toucher [27, 126, 224]. Dans le paradigme de la RHI, décrit dans notre revue de la littérature en Section 2.3, le sentiment d'incarnation est suscité par stimulation visuo-tactile à la fois sur la main factice et sur la main de participants par un expérimentateur. Une stimulation visuo-tactile synchrone favorisait l'émergence de l'incarnation, tandis qu'une stimulation asynchrone l'empêchait. Dans les répliques ou autres protocoles proches en EVI, c'est aussi un expérimentateur qui vient stimuler tactilement les participants [49, 131]. Nous pensons qu'il serait intéressant et utile de mettre en place un protocole étudiant l'incarnation en EVI en nous basant sur un retour visuo-tactile qui ne serait plus administré par un expérimentateur, mais pré-enregistré et joué directement sur la main des participants par notre prototype. Premièrement, cela permettrait de limiter l'intervention de facteurs externes lors du déroulement de l'expérience. Deuxièmement, et c'est ce point qui nous paraît le plus important, l'automatisation de la stimulation tactile permettrait de contrôler de façon plus précise, et sur plusieurs facteurs, son degré de fidélité. Nous nous expliquons : il sera nécessaire de coupler un retour visuel, qui pourrait s'inspirer du paradigme de la RHI, avec un pinceau, à la stimulation tactile, pour faire émerger le sentiment d'incarnation. Avec le prototype couplé aux vibrations spatialisées, il sera possible, très facilement, de mettre en place des conditions visuo-tactile incohérentes, que ce soit en termes de temporalité (asynchronicité, comme dans la RHI) mais aussi en termes de spatialisation : un participant pourrait voir le pinceau le stimuler le long d'un doigt, du métacarpe jusqu'au bout du doigt, tandis que la vibration serait jouée à 90° par rapport au retour visuel, traversant la main de façon incohérente. Cela permettrait d'explorer systématiquement le degré d'acceptation d'incohérence des participants par rapport à l'incarnation virtuelle. Ce protocole pourrait s'inspirer partiellement de celui mis en place par Cheymol *et al.* [49].

5.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une manette de réalité virtuelle permettant d'enrichir le retour vibrotactile des interactions par la spatialisation des vibrations. La naissance du projet de la conception de notre prototype partait d'un constat relativement simple : le retour vibrotactile est intégré à toutes les manettes grand public qui accompagnent les casques de RV, mais ce retour est pauvre. Sans changer de solution technologique, il est possible de donner plus de variabilité au retour vibrotactile en exploitant certaines illusions de spatialisation. Nous avons ainsi conçu et développé un prototype qui intègre 10 vibreurs à son châssis, et qui permet de spatialiser les vibrations sur toute sa surface grâce à l'effet de *funneling*. Le prototype est ainsi formé de plusieurs modules imprimés en 3D, qui permettent de faire évoluer la position des vibreurs en fonction de l'utilisation et du besoin, voire d'augmenter le nombre de vibreurs. Les vibrations ont été mises en place et contrôlées par un modèle de *funneling* à deux dimensions, inspiré des travaux de la littérature [115, 146]. Enfin, nous avons mis en place trois expériences dans le but de valider la conception du prototype et du modèle de vibration. Dans les deux premières expériences, nous nous sommes concentrés sur les aspects perceptuels et la capacité de la manette à spatialiser les informations. Avec la troisième expérience, nous avons exploré l'apport des vibrations spatialisées sur l'expérience haptique. Pris dans leur ensemble, nos résultats montrent qu'il est possible d'enrichir le retour vibrotactile par spatialisation, et que notre prototype contribue à l'amélioration de l'expérience utilisateur en EVI. Enfin, nous avons proposé un certain nombre de pistes pour poursuivre et améliorer ce projet et le prototype, que ce soit en terme technologique, ou en termes d'expérimentations.

Nous arrivons au terme de ce manuscrit. Dans ce dernier chapitre, nous revenons sur les motivations de nos recherches, et les questions de recherche qui nous ont guidés dans nos travaux. Ces travaux ont abouti à plusieurs contributions que nous résumons avant de discuter des travaux futurs que nous envisageons.

6.1 Synthèse des contributions

L'objectif principal de nos travaux était d'améliorer l'expérience des utilisateurs en réalité virtuelle en intégrant le sens du toucher aux expériences immersives. Nous nous sommes particulièrement intéressés à l'expérience utilisateur sous le prisme de sa relation avec le sentiment d'incarnation, mais aussi de l'expérience haptique. Après un premier chapitre de revue de la littérature, nous nous sommes proposés d'explorer trois axes de recherche principaux.

Dans un premier **axe méthodologique**, nous nous sommes intéressés à correctement étudier l'incarnation en un contexte de RV. Dans un second **axe comparatif**, nous avons étudié quels étaient les facteurs du retour haptique important pour susciter l'incarnation. Enfin, dans un troisième **axe pratique**, nous avons voulu voir comment améliorer les capacités interactives des manettes de réalité virtuelle en gardant un retour vibrotactile. Nos travaux contribuent à la fois sur le plan expérimental, technique, et méthodologique à étendre les connaissances sur le retour haptique, sur le sentiment d'incarnation, et sur les liens qui existent entre ces deux notions.

Nous avons traité ces trois axes dans les trois chapitres principaux de ce manuscrit. Dans le **chapitre 3**, nous avons présenté un projet dans lequel nous avons essayé de proposer des critères permettant de discriminer la capacité des utilisateurs à s’incarner en amont de l’expérience, afin de pouvoir les grouper de façon homogène dans le cadre de protocoles inter-sujets. Nous avons nommé cette capacité *incarnabilité*, la définissant comme la propension d’un individu à s’incarner dans un EVI à un moment donné. Pour cela, nous avons proposé une démarche innovante en plusieurs étapes pour aboutir à une métrique évaluant l’incarnabilité. Pour résumer succinctement, il nous fallait récolter des données sur l’incarnation et sur des métriques corrélées, isoler les items prédisant au mieux l’incarnation, puis utiliser ces items comme critère de création de groupes dans des protocoles inter-sujets, en faisant varier la taille des échantillons. Les résultats que nous avons obtenus suite à notre expérience nous ont obligés à revoir les objectifs globaux de ce projet, une de nos hypothèses cruciales n’ayant pas été validée. Malgré cela, nous avons pu tout de même produire des analyses intéressantes basées sur les données d’incarnation de l’expérience. Nous avons comparé les protocoles inter et intra-sujets, et avons mis en lumière l’influence de la taille de l’échantillon sur la capacité à détecter un effet pour les deux types de protocoles. Nos résultats nous amènent à recommander d’utiliser des protocoles intra-sujets plutôt que des inter-sujets. Pris dans leur ensemble, les résultats de ce projet vont aider les chercheurs s’intéressant à l’expérience utilisateur et à l’incarnation particulièrement à mieux concevoir leurs expériences. Nous espérons que ce projet favorise des réflexions d’ordre méthodologique au sein de la communauté.

Dans le **chapitre 4**, nous avons étudié concrètement les facteurs à considérer lors de l’implémentation d’un retour haptique, en lien avec leur impact sur le sentiment d’incarnation. Nous avons particulièrement comparé deux formes de retour largement répandues, à savoir le retour de force et le retour vibrotactile. Nous avons montré la supériorité du retour de force et son apport vis-à-vis de l’incarnation. Les analyses sur le retour vibrotactile ont aussi montré qu’il avait augmenté la charge de travail perçue par les participants. Nous avançons que la cohérence du retour par rapport à la tâche et à l’environnement est un facteur clé pour concevoir un retour haptique utile pour l’utilisateur. Pris dans leur ensemble, les résultats de ce projet vont servir à mieux implémenter le retour haptique en EVI, et met au centre de la réflexion la notion de cohérence entre la forme du retour et le contexte d’interaction lorsqu’il est question d’incarnation. Ces facteurs serviront à guider les chercheurs dans leurs choix de conception pour mettre en place des solutions haptiques en lien avec l’incarnation en EVI.

Enfin, dans le **chapitre 5**, nous avons conçu et proposé une solution haptique particulière. Nous avons essayé d’améliorer la conception des manettes de RV grand public, disposant actuellement d’un retour vibrotactile à actionneur unique, en équipant le prototype proposé d’une matrice de vibreurs et en nous servant d’une illusion vibrotactile connue, l’effet de *funneling*. Nous avons validé la conception et les capacités de notre manette en termes de perception et

d'amélioration de l'expérience haptique de nos participants. Nos résultats montrent que la spatialisation permet d'améliorer le réalisme et la cohérence du retour haptique.

Sur le plan expérimental, si l'on omet les deux expériences perceptuelles de validation du prototype proposé dans le chapitre 5, nous avons proposé un total de trois expériences utilisateurs qui explorent les liens entre expérience utilisateur et intégration multisensorielle :

- une étude sur le lien entre latence et incarnation (chapitre 3)
- une étude sur le lien entre retour haptique et incarnation (chapitre 4)
- une étude sur le lien entre retour vibrotactile et expérience haptique (chapitre 5)

6.2 Travaux futurs

Nous avons synthétisé les travaux réalisés durant cette thèse, et les contributions qui en ont résulté. Ces travaux ouvrent des perspectives pour des travaux futurs. Nous rangeons ces perspectives dans deux catégories distinctes, selon leur horizon temporel : les travaux à court et moyen terme, et les travaux à long terme.

6.2.1 Perspectives à court et moyen termes

Différences interindividuelles et incarnabilité

Le premier axe de poursuite pour de futurs travaux concerne le projet présenté dans le chapitre 3, et particulièrement tout ce qui a trait à la notion d'incarnabilité. En effet, nous avons élaboré, au cours de ce projet, une démarche théorique pour parvenir à la proposition d'une échelle qui mesurerait ce que nous avons nommé *incarnabilité*, concept qui décrit la capacité d'un individu à s'incarner dans un avatar au sein d'un système immersif. Nous ne décrivons pas à nouveau la démarche complète, mais nous rappellerons que nous n'avons pas pu aller jusqu'au bout suite à l'analyse préliminaire de nos données d'incarnation. Nous continuons de penser que l'incarnabilité est une notion utile et nécessaire si l'on veut mettre en place des protocoles inter-sujets pour étudier l'incarnation. Nous comptons donc repenser le protocole expérimental utilisé pour récupérer les données d'incarnation, et reprendre la démarche proposée initialement pour aboutir au questionnaire mesurant l'incarnabilité. Il faudrait ensuite valider le questionnaire proposé sur des échantillons différents de l'échantillon à partir duquel le questionnaire aura été conçu. En reprenant le processus d'élaboration du questionnaire d'incarnabilité, il sera intéressant de se pencher sur les résultats de corrélation entre les données d'incarnation et les données des questionnaires corrélés (empathie, locus de contrôle, etc), et de formuler des questions de

recherche à ce niveau. En effet, bien que certaines études se soient intéressées aux différences interpersonnelles et leur lien avec l’incarnation virtuelle [67, 76, 156], la variabilité individuelle en rapport à l’incarnation n’est ni comprise ni étudiée dans son ensemble de façon holistique. Les données que nous avons récoltées dans notre expérience pourront servir pour des analyses subséquentes afin de mieux comprendre comment les différences personnelles influent sur le sentiment d’incarnation.

Toujours en lien avec le projet présenté dans le chapitre 3, nous avons remarqué, dans notre revue de la littérature, l’absence de protocole standardisé pour étudier l’incarnation en EVI, et, dans les études sur l’incarnation, le peu de report des tailles d’effets. Lorsque l’on s’intéresse à d’autres domaines, comme la psychologie expérimentale, les protocoles sont moins divers, mais robustes et répliqués, avec des tailles d’effets connues. Cela permet aux chercheurs de mieux concevoir leurs expériences. Nous pensons qu’il serait d’un grand intérêt pour la communauté de formaliser et de valider des protocoles standards pour étudier l’expérience utilisateur, et particulièrement l’incarnation virtuelle en VR, avec des tailles d’effets variables suivant un paramètre unique contrôlable, comme la latence par exemple. Cette démarche, pour aboutir, demandera un nombre de réplifications important, et un travail de recherche qui dépasse très probablement l’horizon à court et moyen terme.

Cohérence du retour haptique et vallée de l’étrange

Le projet présenté dans le chapitre 4 de ce manuscrit s’est intéressé à la comparaison de deux formes de retour haptique comme facteur favorisant l’incarnation. Les conclusions de notre étude nous ont amenés à considérer la notion de cohérence du retour par rapport à la tâche et à l’environnement. Nous avons pu rencontrer cette notion de cohérence à plusieurs moments dans notre revue de la littérature, que ce soit au travers du *principe de cohérence*, composante du sentiment d’agentivité, proposé par Jeunet *et al.* [118], ou du phénomène de la vallée de l’étrange (*uncanny valley*) [167], notion qui a été étendue pour la dimension haptique par Berger *et al.* [25].

Dans notre étude comparant les retours haptiques en lien avec l’incarnation, nous avons pu montrer que le retour de force est supérieur au retour vibrotactile dans le contexte mis en place. Nous pensons qu’il y a matière à développer des contextes où le retour vibrotactile serait plus cohérent, et donc écologique, tandis que le retour de force serait considéré comme symbolique pour voir si ces résultats se maintiennent.

Dans notre dernier projet, présenté dans le chapitre 5, nous avons conçu un prototype de manette à retour vibrotactile spatialisé. Nous avons pu montrer l’apport de notre solution haptique sur l’expérience haptique des utilisateurs dans le cadre d’une expérience. Au cours de celle-ci, les participants percevaient un retour vibrotactile spatialisé de façon cohérente avec leurs

mouvements et les interactions qu'ils réalisaient. Nous pouvons désormais envisager d'utiliser cette solution haptique pour d'autres études, dans lesquelles le retour vibrotactile pourrait être implémenté de façon incohérente, et créer plusieurs conditions expérimentales où le degré d'incohérence varie. De ces incohérences résulteraient des conflits visuo-haptiques, qui devraient empêcher l'émergence du sentiment d'incarnation, ou dégrader l'expérience haptique. Il serait particulièrement intéressant de voir jusqu'à quel point des incohérences entre perception haptique et perception visuelle peuvent être tolérées. Tout comme pour les études portant sur la latence [252], il serait alors possible de déterminer un seuil à partir duquel le retour vibrotactile n'est plus utile pour l'expérience utilisateur. Il serait aussi intéressant de coupler l'utilisation de notre manette et du retour spatialisé dans le cadre d'études liées aux avatars, pour étudier l'incarnation. Nous envisageons de mettre en place un protocole s'inspirant à la fois du protocole initial de la RHI, où un expérimentateur vient stimuler tactilement la main des participants et la main factice, et du protocole proposé par Cheymol *et al.* [49], dans lequel les participants, en EVI, ressentaient des stimulations tactiles sur les doigts avec des représentations fidèles ou dysmorphiques de leur main. Dans le protocole que nous envisageons en Section 5.6, il n'y aurait plus besoin d'expérimentateur pour venir stimuler la main des participants, les stimulations étant assurées par le retour vibrotactile spatialisé. Il serait possible de créer plusieurs conditions expérimentales, dans lesquelles le niveau de cohérence entre le retour visuel et le retour vibrotactile spatialisé varierait. Cela permettrait d'étudier plus systématiquement l'incarnation et l'influence de la stimulation visuotactile.

6.2.2 Perspectives à long terme

Affordance et cognition incarnée

Nous avons traité, dans ce manuscrit, de notions liées aux environnements virtuels immersifs. Les utilisateurs qui interagissent avec ces EVIs le font grâce à leurs capacités perspectives, motrices et cognitives. Ces capacités ne fonctionnent pas de façon séparée, mais au contraire sont unifiées au sein de la boucle sensorimotrice, notion qui cherche à décrire le processus interactif, avec des informations en entrée et en sortie, du point de vue humain [188]. Le retour haptique, en ajoutant des informations de toucher aux EVIs, est une partie intégrante de la boucle sensorimotrice humaine. Les informations haptiques, informations qui résultent purement de la perception de l'utilisateur, sont considérées comme des informations *montantes* (*bottom-up process*). De même, l'incarnation est un processus cognitif qui résulte d'une interaction plus ou moins prolongée entre l'utilisateur et l'EVI. Ce processus cognitif peut influencer sur le comportement et l'expérience utilisateur au cours d'une expérience en EVI [19, 20, 263]. À l'inverse du retour haptique, le sentiment d'incarnation est un processus *descendant* (*top-down*). Le phénomène d'incarnation est pourtant lié nécessairement aux informations montantes : sans

synchronisation visuotactile ou visuomotrice, pas d'incarnation. L'émergence du sentiment d'incarnation est aujourd'hui intégrée dans la théorie de la cognition incarnée [74]. Celle-ci soutient que les processus de pensée et de cognition ne se déroulent pas exclusivement dans le cerveau, mais sont également influencés par les expériences sensorielles et motrices que nous avons dans notre corps et notre environnement. Selon cette théorie, notre corps et ses mouvements sont intégrés dans notre façon de penser et de comprendre le monde qui nous entoure. La théorie de la cognition incarnée met l'accent sur l'importance de l'expérience sensorielle et motrice dans le processus de cognition et soutient que nos corps et nos environnements sont essentiels pour comprendre le monde qui nous entoure. Par exemple, nous pouvons utiliser notre connaissance de la façon dont nous pouvons saisir et manipuler des objets pour comprendre comment ils fonctionnent et comment nous pouvons les utiliser.

Cette théorie intègre la théorie de l'*affordance* et des *signifiers*, proposée par Gibson [86], selon laquelle l'environnement physique offre des possibilités d'action aux individus, qui sont perçues de manière directe par leur organisme. Par exemple, une poignée de porte offre la signification de pouvoir être saisie et tournée pour ouvrir la porte. Ces possibilités d'action sont appelées *signifiers*. L'approche écologique de Gibson est considérée comme un précurseur de la cognition incarnée car elle souligne l'importance de l'interaction de l'organisme avec l'environnement pour façonner la perception et l'action.

Selon l'approche écologique proposée par Gibson, la perception est un processus actif qui implique l'exploration et l'utilisation de l'environnement, ce qui aboutit à la formation de *systèmes perceptifs* qui sont adaptés aux possibilités spécifiques de l'environnement. Cette approche a été pensée pour un environnement calqué sur la réalité, avec des contraintes d'interactions ancrées dans le matériel. L'essor des EVIs, et l'apparition, à terme, des métavers, vont ouvrir de nouvelles perspectives d'interaction, et de nouvelles façons de solliciter la boucle sensori-motrice. Avec la possibilité d'incarner des avatars différents de nos corps biologiques, il est probable que les processus cognitifs d'appréhension des mondes virtuels soient radicalement différents de la façon dont nous appréhendons le monde réel. Il sera intéressant de voir les nouvelles *affordances* spécifiques à la RV qui seront développées en parallèle de la démocratisation des EVIs.

Incarnation virtuelle et sens de Soi

Enfin, au cours de nos travaux, nous avons traité de l'expérience utilisateur principalement sous le prisme de l'incarnation, exprimant le lien entre un utilisateur et son avatar. Dans notre revue de la littérature, nous avons pu voir la différence entre incarnation positive et incarnation négative, souvent appelée *désincarnation* [59, 60]. Le phénomène de désincarnation est souvent liée à des pathologies ou des lésions, et relève plus de la littérature et de considérations psycholo-

giques et médicales. La conception de l'incarnation dans nos travaux était positive : il s'agissait de s'approprier un corps virtuel en plus de notre corps biologique. La littérature et nos différents résultats permettent d'affirmer le rôle favorable de l'intégration multisensorielle dans l'émergence et le renforcement du sentiment d'incarnation en EVI. En simplifiant au maximum des processus complexes, nous pouvons dire que plus l'expérience est engageante, sensoriellement ou émotionnellement, plus le sentiment d'incarnation sera élevé. Cela n'est pourtant pas toujours le cas : des expériences suffisamment intenses et engageantes peuvent au contraire conduire à des phénomènes de désincarnation et de dissolution de l'ego [87, 88]. À la différence des phénomènes de désincarnation pathologiques décrits par De Vignemont [60], dans les études de Glowacki *et al.*, les participants semblent vivre une perte d'identité corporelle comme une vraie *transformation* (étymologiquement parlant, un *passage outre la forme*), et en tirent un *sens* comparable à ce qui peut être vécu au cours ou suite à des expériences psychédéliques. Cette capacité à être dépassé par une expérience esthétique se résume dans la notion de *sublime*, qui implique une « diminution du sens de soi » [Traduction] [9]. Des études récentes s'intéressent désormais plus systématiquement à la création de telles expériences en RV [50].

La notion de *sens* nous paraît à la fois importante, utile et difficile à définir. En effet, le sens attribué à une expérience de vie ou à un fait est purement subjectif, mais la notion même de sens est universellement compréhensible. Mekler & Hornbæk [161] proposent une structure conceptuelle de la notion de sens en contexte d'interaction humain-machine qui se décline en 5 dimensions : interconnexion, but, cohérence, résonance et signification. Ici, la signification (*significance*) se réfère à l'importance et à la persistance de l'expérience vécue ou de l'action, tandis que la résonance décrit l'immédiateté du sens, et l'absence de besoin de réflexion pour le percevoir. Le sens pourrait ainsi correspondre à la connaissance immédiate et intuitive de certaines traditions philosophiques. Cette conception de la connaissance, telle qu'elle est définie particulièrement par Borella [117] ou Guénon [193], correspond à une véritable identification du sujet pensant (ou vivant, si la connaissance vient d'une expérience vécue) avec l'aspect compatible de la connaissance objective que le sujet pensant essaye de s'approprier. Le sens serait ici la perception immédiate a posteriori de l'acte de connaissance. Nous n'entrons pas dans plus de détails ici, mais nous pensons que la notion de sens est un aspect crucial de l'expérience utilisateur en EVI, dépassant et synthétisant les problématiques liées à l'engagement, à l'immersion et à l'incarnation. L'étude de cette notion en lien avec les interactions et les expériences en EVI demande un grand travail conceptuel en amont, qui demanderait une démarche sur le long terme. Nous espérons pouvoir nous pencher sur cette problématique dans nos futures recherches.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Merwan ACHIBET, Adrien GIRARD, Maud MARCHAL et Anatole LÉCUYER. « Leveraging passive haptic feedback in virtual environments with the elastic-arm approach ». In : *Presence: Teleoperators and Virtual Environments* 25.1 (2016), p. 17-32.
- [2] Merwan ACHIBET, Maud MARCHAL, Ferran ARGELAGUET et Anatole LÉCUYER. « The Virtual Mitten: A novel interaction paradigm for visuo-haptic manipulation of objects using grip force ». In : *2014 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)*. 2014, p. 59-66.
- [3] ACTRONIKA. *HapCoil-One Datasheet*. <https://www.actronika.com/haptic-solutions>. Online: accessed 27-December-2022.
- [4] William (Bill) ALBERT et Thomas S. (Tom) TULLIS. « Chapter 8 - Measuring Emotion ». In : *Measuring the User Experience (Third Edition)*. Sous la dir. de William (Bill) ALBERT et Thomas S. (Tom) TULLIS. Third Edition. Interactive Technologies. Morgan Kaufmann, 2023, p. 195-216.
- [5] Maryam ALIMARDANI, Shuichi NISHIO et Hiroshi ISHIGURO. « Removal of proprioception by BCI raises a stronger body ownership illusion in control of a humanlike robot ». In : *Scientific reports* 6 (2016), p. 33514.
- [6] David S ALLES. « Information transmission by phantom sensations ». In : *IEEE transactions on man-machine systems* 11.1 (1970), p. 85-91.
- [7] Ayman ALZAYAT, Mark HANCOCK et Miguel A NACENTA. « Quantitative measurement of tool embodiment for virtual reality input alternatives ». In : *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. 2019, p. 1-11.

- [8] Anastassia ANDREASEN, Niels Christian NILSSON et Stefania SERAFIN. « Agency enhances body ownership illusion of being a virtual bat ». In : *2018 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*. IEEE. 2018, p. 505-506.
- [9] Margherita ARCANGELI, Jérôme DOKIC, Marco SPERDUTI, F COVA et S RÉHAULT. « The beautiful, the sublime and the self ». In : *Advances in Experimental Philosophy of Aesthetics* (2018), p. 175-196.
- [10] Ferran ARGELAGUET, Ludovic HOYET, Michaël TRICO et Anatole LÉCUYER. « The role of interaction in virtual embodiment: Effects of the virtual hand representation ». In : *Virtual Reality (VR), 2016 IEEE*. IEEE. 2016, p. 3-10.
- [11] K Carrie ARMEL et Vilayanur S RAMACHANDRAN. « Projecting sensations to external objects: evidence from skin conductance response ». In : *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences* 270.1523 (2003), p. 1499-1506.
- [12] Bruno ARNALDI, Philippe FUCHS et Jacques TISSEAU. « Traité de la réalité virtuelle, volume 1, chapter Introduction à la réalité virtuelle ». In : *Presses de l'École des Mines de Paris*, (2003), p. 3-21.
- [13] Tomohisa ASAI. « Agency elicits body-ownership: proprioceptive drift toward a synchronously acting external proxy ». In : *Experimental brain research* 234.5 (2016), p. 1163-1174.
- [14] Laura AYMERICH-FRANCH, Sameer KISHORE et Mel SLATER. « When your robot avatar misbehaves you are likely to apologize: an exploration of guilt during robot embodiment ». In : *International Journal of Social Robotics* (2019), p. 1-10.
- [15] Laura AYMERICH-FRANCH, Damien PETIT, Gowrishankar GANESH et Abderrahmane KHEDDAR. « Object touch by a humanoid robot avatar induces haptic sensation in the real hand ». In : *Journal of Computer-Mediated Communication* 22.4 (2017), p. 215-230.
- [16] Mahdi AZMANDIAN, Mark HANCOCK, Hrvoje BENKO, Eyal OFEK et Andrew D WILSON. « Haptic retargeting: Dynamic repurposing of passive haptics for enhanced virtual reality experiences ». In : *Proceedings of the 2016 chi conference on human factors in computing systems*. ACM. 2016, p. 1968-1979.
- [17] Jakki O BAILEY, Jeremy N BAIENSON et Daniel CASASANTO. « When does virtual embodiment change our minds? » In : *Presence* 25.3 (2016), p. 222-233.
- [18] Domna BANAKOU, Raphaela GROTEN et Mel SLATER. « Illusory ownership of a virtual child body causes overestimation of object sizes and implicit attitude changes ». In : *Proceedings of the National Academy of Sciences* 110.31 (2013), p. 12846-12851.
- [19] Domna BANAKOU, Parasuram D HANUMANTHU et Mel SLATER. « Virtual embodiment of white people in a black virtual body leads to a sustained reduction in their implicit racial bias ». In : *Frontiers in human neuroscience* 10 (2016), p. 601.

- [20] Domna BANAKOU et Mel SLATER. « Body ownership causes illusory self-attribution of speaking and influences subsequent real speaking ». In : *Proceedings of the National Academy of Sciences* 111.49 (2014), p. 17678-17683.
- [21] Itxaso BARBERIA, Ramon OLIVA, Pierre BOURDIN et Mel SLATER. « Virtual mortality and near-death experience after a prolonged exposure in a shared virtual reality may lead to positive life-attitude changes ». In : *PloS one* 13.11 (2018), e0203358.
- [22] Ahmad BARGHOUT, Jongeun CHA, Abdulmotaleb EL SADDIK, Julius KAMMERL et Eckehard STEINBACH. « Spatial resolution of vibrotactile perception on the human forearm when exploiting funneling illusion ». In : *2009 ieee international workshop on haptic audio visual environments and games*. IEEE. 2009, p. 19-23.
- [23] Cagatay BASDOGAN, Frédéric GIRAUD, Vincent LEVESQUE et Seungmoon CHOI. « A review of surface haptics: Enabling tactile effects on touch surfaces ». In : *IEEE transactions on haptics* 13.3 (2020), p. 450-470.
- [24] Tim BAYNE et Elisabeth PACHERIE. « Narrators and comparators: the architecture of agentive self-awareness ». In : *Synthese* 159.3 (2007), p. 475-491.
- [25] Christopher C BERGER, Mar GONZALEZ-FRANCO, Eyal OFEK et Ken HINCKLEY. « The uncanny valley of haptics ». In : *Science Robotics* 3.17 (2018), Art-No.
- [26] Anna BERTI et Francesca FRASSINETTI. « When far becomes near: Remapping of space by tool use ». In : *Journal of cognitive neuroscience* 12.3 (2000), p. 415-420.
- [27] F BIOCCA, Yasuhiro INOUE, Andy LEE, Heather POLINSKY et Arthur TANG. « Visual cues and virtual touch: Role of visual stimuli and intersensory integration in cross-modal haptic illusions and the sense of presence ». In : *Proceedings of presence* (2002), p. 410-428.
- [28] Olaf BLANKE et Thomas METZINGER. « Full-body illusions and minimal phenomenal selfhood ». In : *Trends in cognitive sciences* 13.1 (2009), p. 7-13.
- [29] Loën BOBAN, David PITTET, Bruno HERBELIN et Ronan BOULIC. « Changing Finger Movement Perception: Influence of Active Haptics on Visual Dominance ». In : *Frontiers in Virtual Reality* (2022), p. 38.
- [30] Matthew BOTVINICK et Jonathan COHEN. « Rubber hands ‘feel’ touch that eyes see ». In : *Nature* 391.6669 (1998), p. 756.
- [31] Pierre BOURDIN, Itxaso BARBERIA, Ramon OLIVA et Mel SLATER. « A virtual out-of-body experience reduces fear of death ». In : *PloS one* 12.1 (2017), e0169343.
- [32] Elodie BOUZBIB. « Robotised tangible user interface for multimodal interactions in virtual reality: anticipating intentions to physically encounter the user ». Thèse de doct. Sorbonne Université, 2021.

- [33] M. BOUZIT, G. BURDEA, G. POPESCU et R. BOIAN. « The Rutgers Master II-new design force-feedback glove ». In : *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 7.2 (2002), p. 256-263.
- [34] Sidney BOVET, Henrique Galvan DEBARBA, Bruno HERBELIN, Eray MOLLA et Ronan BOULIC. « The critical role of self-contact for embodiment in virtual reality ». In : *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 24.4 (2018), p. 1428-1436.
- [35] Steve BRYSON. « Direct Manipulation in Virtual ». In : *The Visualization Handbook, Charles D. Hansen & Chris R. Johnson, 2005, Elsevier Inc* (2005), p. 413.
- [36] Dalila BURIN, Konstantina KILTENI, Marco RABUFFETTI, Mel SLATER et Lorenzo PIA. « Body ownership increases the interference between observed and executed movements ». In : *PloS one* 14.1 (2019).
- [37] Eric BURNS et Frederick P BROOKS. « Perceptual sensitivity to visual/kinesthetic discrepancy in hand speed, and why we might care ». In : *Proceedings of the ACM symposium on Virtual reality software and technology*. ACM. Lymassol, Cyprus, 2006, p. 3-8.
- [38] Samuel BUTLER. « Erewhon, or: Over the Range [1872] ». In : *Harmondsworth: Penguin* 72 (1970), p. 74-75.
- [39] Pierre-Antoine CABARET, Thomas HOWARD, Claudio PACCHIEROTTI, Marie BABEL et Maud MARCHAL. « Perception of spatialized vibrotactile impacts in a hand-held tangible for Virtual Reality ». In : *International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications*. Springer. 2022, p. 264-273.
- [40] Lucilla CARDINALI, Claudio BROZZOLI et Alessandro FARNE. « Peripersonal space and body schema: two labels for the same concept? ». In : *Brain topography* 21.3-4 (2009), p. 252-260.
- [41] Lucilla CARDINALI, Claudio BROZZOLI, Jacques LUAUTÉ, Alice C ROY et Alessandro FARNÈ. « Proprioception is necessary for body schema plasticity: evidence from a deafferented patient ». In : *Frontiers in human neuroscience* 10 (2016), p. 272.
- [42] Marina CARULLI, Monica BORDEGONI et Umberto CUGINI. « Integrating scents simulation in virtual reality multisensory environment for industrial products evaluation ». In : *Computer-Aided Design and Applications* 13.3 (2016), p. 320-328.
- [43] Polona CASERMAN, Michelle MARTINUSSEN et Stefan GÖBEL. « Effects of end-to-end latency on user experience and performance in immersive virtual reality applications ». In : *Entertainment Computing and Serious Games: First IFIP TC 14 Joint International Conference, ICEC-JCSG 2019, Arequipa, Peru, November 11–15, 2019, Proceedings 1*. Springer. 2019, p. 57-69.

- [44] Géry CASIEZ, Thomas PIETRZAK, Damien MARCHAL, Sébastien POULMANE, Matthieu FALCE et Nicolas ROUSSEL. « Characterizing latency in touch and button-equipped interactive systems ». In : *Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*. 2017, p. 29-39.
- [45] Emilie A CASPAR, Axel CLEEREMANS et Patrick HAGGARD. « The relationship between human agency and embodiment ». In : *Consciousness and cognition* 33 (2015), p. 226-236.
- [46] Gary CHARNESS, Uri GNEEZY et Michael A KUHN. « Experimental methods: Between-subject and within-subject design ». In : *Journal of Economic Behavior & Organization* 81.1 (2012), p. 1-8.
- [47] Daniel KY CHEN, Jean-Baptiste CHOSSAT et Peter B SHULL. « Haptivec: Presenting haptic feedback vectors in handheld controllers using embedded tactile pin arrays ». In : *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. 2019, p. 1-11.
- [48] Li-Te CHENG, Rick KAZMAN et John ROBINSON. « Vibrotactile feedback in delicate virtual reality operations ». In : *ACM Multimedia*. Citeseer. 1996, p. 243-251.
- [49] Antonin CHEYMOL, Rebecca FRIBOURG, Nami OGAWA, Anatole LÉCUYER, Yutaro HIRAO, Takuji NARUMI, Ferran ARGELAGUET et Jean-Marie NORMAND. « Studying the Role of Self and External Touch in the Appropriation of Dysmorphic Hands ». In : *2022 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*. IEEE. 2022, p. 102-111.
- [50] Alice CHIRICO, Francesco FERRISE, Lorenzo CORDELLA et Andrea GAGGIOLI. « Designing awe in virtual reality: An experimental study ». In : *Frontiers in psychology* 8 (2018), p. 2351.
- [51] Inrak CHOI, Eyal OFEK, Hrvoje BENKO, Mike SINCLAIR et Christian HOLZ. « CLAW: A Multifunctional Handheld Haptic Controller for Grasping, Touching, and Triggering in Virtual Reality ». In : *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '18. Montreal QC, Canada : Association for Computing Machinery, 2018, p. 1-13.
- [52] Woong CHOI, Liang LI, Satoru SATOH et Kozaburo HACHIMURA. « Multisensory integration in the virtual hand illusion with active movement ». In : *BioMed research international* 2016 (2016).
- [53] Jacob COHEN. *Statistical power analysis for the behavioral sciences*. Academic press, 2013.
- [54] Marcello COSTANTINI et Patrick HAGGARD. « The rubber hand illusion: sensitivity and reference frame for body ownership ». In : *Consciousness and cognition* 16.2 (2007), p. 229-240.

- [55] Heather CULBERTSON, Samuel B SCHORR et Allison M OKAMURA. « Haptics: The present and future of artificial touch sensation ». In : *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems* 1 (2018), p. 385-409.
- [56] Fabien DANIEAU, Anatole LECUYER, Philippe GUILLOTTEL, Julien FLEUREAU, Nicolas MOLLET et Marc CHRISTIE. « Enhancing audiovisual experience with haptic feedback: a survey on HAV ». In : *IEEE transactions on haptics* 6.2 (2012), p. 193-205.
- [57] Fabien DANIEAU, Thomas LOPEZ, Nicolas MOLLET, Bertrand LEROY, Olivier DUMAS et Jean-Francois VIAL. « Enabling embodiment and interaction in omnidirectional videos ». In : *2017 IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME)*. IEEE. 2017, p. 697-702.
- [58] F DE VIGNEMONT et GD IANNETTI. « How many peripersonal spaces? » In : *Neuropsychologia* 70 (2015), p. 327-334.
- [59] Frédérique DE VIGNEMONT. « Body schema and body image—Pros and cons ». In : *Neuropsychologia* 48.3 (2010), p. 669-680.
- [60] Frédérique DE VIGNEMONT. « Embodiment, ownership and disownership ». In : *Consciousness and cognition* 20.1 (2011), p. 82-93.
- [61] Henrique G DEBARBA, Eray MOLLA, Bruno HERBELIN et Ronan BOULIC. « Characterizing embodied interaction in first and third person perspective viewpoints ». In : *2015 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)*. IEEE. 2015, p. 67-72.
- [62] Henrique Galvan DEBARBA, Ronan BOULIC, Roy SALOMON, Olaf BLANKE et Bruno HERBELIN. « Self-attribution of distorted reaching movements in immersive virtual reality ». In : *Computers & Graphics* 76 (2018), p. 142-152.
- [63] Henrique Galvan DEBARBA, Sidney BOVET, Roy SALOMON, Olaf BLANKE, Bruno HERBELIN et Ronan BOULIC. « Characterizing first and third person viewpoints and their alternation for embodied interaction in virtual reality ». In : *PloS one* 12.12 (2017), e0190109.
- [64] Jean DECETY et Philip L JACKSON. « The functional architecture of human empathy ». In : *Behavioral and cognitive neuroscience reviews* 3.2 (2004), p. 71-100.
- [65] Donald DEGRAEN, André ZENNER et Antonio KRÜGER. « Enhancing texture perception in virtual reality using 3D-printed hair structures ». In : *Proceedings of the 2019 CHI conference on human factors in computing systems*. 2019, p. 1-12.
- [66] Diane DEWEZ, Ludovic HOYET, Anatole LÉCUYER et Ferran ARGELAGUET SANZ. « Towards “avatar-friendly” 3D manipulation techniques: Bridging the gap between sense of embodiment and interaction in virtual reality ». In : *Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. 2021, p. 1-14.

- [67] Diane DEWEZ, Rebecca FRIBOURG, Ferran ARGELAGUET, Ludovic HOYET, Daniel MESTRE, Mel SLATER et Anatole LÉCUYER. « Influence of Personality Traits and Body Awareness on the Sense of Embodiment in Virtual Reality ». In : *2019 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*. IEEE. 2019, p. 123-134.
- [68] Patrick DICKINSON, Kathrin GERLING, Kieran HICKS, John MURRAY, John SHEARER et Jacob GREENWOOD. « Virtual reality crowd simulation: effects of agent density on user experience and behaviour ». In : *Virtual Reality* 23.1 (2019), p. 19-32.
- [69] Lionel DOMINJON, Anatole LÉCUYER, J-M BURKHARDT, Paul RICHARD et Simon RICHIR. « Influence of control/display ratio on the perception of mass of manipulated objects in virtual environments ». In : *IEEE Proceedings. VR 2005. Virtual Reality, 2005*. IEEE. 2005, p. 19-25.
- [70] Timothy DUMMER, Alexandra PICOT-ANNAND, Tristan NEAL et Chris MOORE. « Movement and the rubber hand illusion ». In : *Perception* 38.2 (2009), p. 271-280.
- [71] Marc O ERNST et Martin S BANKS. « When does haptics rule in visual-haptic perception? » In : *Journal of Vision* 1.3 (2001), p. 482-482.
- [72] Franz FAUL, Edgar ERDFELDER, Albert-Georg LANG et Axel BUCHNER. « G* Power 3: A flexible statistical power analysis program for the social, behavioral, and biomedical sciences ». In : *Behavior research methods* 39.2 (2007), p. 175-191.
- [73] Carlos FLAVIÁN, Sergio IBÁÑEZ-SÁNCHEZ et Carlos ORÚS. « The influence of scent on virtual reality experiences: The role of aroma-content congruence ». In : *Journal of Business Research* 123 (2021), p. 289-301.
- [74] Lucia FOGLIA et Robert A WILSON. « Embodied cognition ». In : *Wiley Interdisciplinary Reviews: Cognitive Science* 4.3 (2013), p. 319-325.
- [75] Nicolas FRANCK, Chloé FARRER, Nicolas GEORGIEFF, Michel MARIE-CARDINE, Jean DALÉRY, Thierry D'AMATO et Marc JEANNEROD. « Defective recognition of one's own actions in patients with schizophrenia ». In : *American Journal of Psychiatry* 158.3 (2001), p. 454-459.
- [76] Rebecca FRIBOURG. « Contribution à l'étude des facteurs influençant le sentiment d'incarnation envers un avatar en réalité virtuelle ». Thèse de doct. Université Rennes 1, 2020.
- [77] Rebecca FRIBOURG, Ferran ARGELAGUET, Ludovic HOYET et Anatole LÉCUYER. « Studying the sense of embodiment in VR shared experiences ». In : *2018 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*. IEEE. 2018, p. 273-280.

- [78] Rebecca FRIBOURG, Evan BLANPIED, Ludovic HOYET, Anatole LÉCUYER et Ferran ARGELAGUET. « Influence of Threat Occurrence and Repeatability on the Sense of Embodiment and Threat Response in VR ». In : *International Conference on Artificial Reality and Telexistence & Eurographics Symposium on Virtual Environments (ISMAR)*. 2020, 9p.
- [79] Jakob FROHNER, Gionata SALVIETTI, Philipp BECKERLE et Domenico PRATTICHIZZO. « Can wearable haptic devices foster the embodiment of virtual limbs? » In : *IEEE transactions on haptics* (2018).
- [80] Shaun GALLAGHER. « Multiple aspects in the sense of agency ». In : *New ideas in psychology* 30.1 (2012), p. 15-31.
- [81] Shaun GALLAGHER. « Philosophical conceptions of the self: implications for cognitive science ». In : *Trends in cognitive sciences* 4.1 (2000), p. 14-21.
- [82] Peizhong GAO, Keigo MATSUMOTO, Takuji NARUMI et Michitaka HIROSE. « Visual-auditory redirection: Multimodal integration of incongruent visual and auditory cues for redirected walking ». In : *2020 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*. IEEE. 2020, p. 639-648.
- [83] Gonzalo GARCÍA-VALLE, Manuel FERRE, Jose BREÑOSA et David VARGAS. « Evaluation of Presence in Virtual Environments: Haptic Vest and User’s Haptic Skills ». In : *IEEE Access* 6 (2017), p. 7224-7233.
- [84] Frank A GELDARD. *Sensory saltation: Metastability in the perceptual world*. Lawrence Erlbaum, 1975.
- [85] James J GIBSON. « Observations on active touch. » In : *Psychological review* 69.6 (1962), p. 477.
- [86] James J GIBSON. « The theory of affordances ». In : *Hilldale, USA* 1.2 (1977), p. 67-82.
- [87] David R GLOWACKI, Rhoslyn Roebuck WILLIAMS, Mark D WONNACOTT, Olivia M MAYNARD, Rachel FREIRE, James E PIKE et Mike CHATZIAPOSTOULOU. « Group VR experiences can produce ego attenuation and connectedness comparable to psychedelics ». In : *Scientific Reports* 12.1 (2022), p. 8995.
- [88] David R GLOWACKI, Mark D WONNACOTT, Rachel FREIRE, Becca R GLOWACKI, Ella M GALE, James E PIKE, Tiu de HAAN, Mike CHATZIAPOSTOULOU et Oussama METATLA. « Isness: using multi-person VR to design peak mystical type experiences comparable to psychedelics ». In : *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. 2020, p. 1-14.
- [89] Genevieve D GOFF. « Differential discrimination of frequency of cutaneous mechanical vibration. » In : *Journal of experimental psychology* 74.2p1 (1967), p. 294.

- [90] Eric J GONZALEZ, Eyal OFEK, Mar GONZALEZ-FRANCO et Mike SINCLAIR. « X-Rings: A Hand-mounted 360 Shape Display for Grasping in Virtual Reality ». In : *The 34th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*. 2021, p. 732-742.
- [91] Mar GONZALEZ-FRANCO et Christopher C BERGER. « Avatar embodiment enhances haptic confidence on the out-of-body touch illusion ». In : *IEEE transactions on haptics* 12.3 (2019), p. 319-326.
- [92] Mar GONZALEZ-FRANCO et Tabitha C PECK. « Avatar embodiment. towards a standardized questionnaire ». In : *Frontiers in Robotics and AI* 5 (2018), p. 74.
- [93] Mar GONZALEZ-FRANCO, Eyal OFEK, Ye PAN, Angus ANTLEY, Anthony STEED, Bernhard SPANLANG, Antonella MASELLI, Domna BANAKOU, Núria PELECHANO GÓMEZ, Sergio ORTS-ESCOLANO et al. « The rocketbox library and the utility of freely available rigged avatars ». In : *Frontiers in virtual reality* 1.article 561558 (2020), p. 1-23.
- [94] Geoffrey GORISSE, Olivier CHRISTMANN, Etienne Armand AMATO et Simon RICHIR. « First-and Third-Person Perspectives in immersive Virtual environments: Presence and Performance analysis of embodied Users ». In : *Frontiers in Robotics and AI* 4 (2017), p. 33.
- [95] Geoffrey GORISSE, Olivier CHRISTMANN, Samory HOUZANGBE et Simon RICHIR. « From Robot to Virtual Doppelganger: Impact of Visual Fidelity of Avatars Controlled in Third-Person Perspective on Embodiment and Behavior in Immersive Virtual Environments ». In : *Frontiers in Robotics and AI* 6 (2019), p. 8.
- [96] Geoffrey GORISSE, Olivier CHRISTMANN et Simon RICHIR. « De la présence à l’incarnation: proposition d’un méta-modèle pour la réalité virtuelle ». In : *Interfaces numériques* 7.1 (2018), p. 114-114.
- [97] Robert GROVE et Harry PRAPAVESSIS. *Abbreviated POMS Questionnaire (items and scoring key)*. 2016.
- [98] Xiaochi GU, Yifei ZHANG, Weize SUN, Yuanzhe BIAN, Dao ZHOU et Per Ola KRISTENSSON. « Dexmo: An inexpensive and lightweight mechanical exoskeleton for motion capture and force feedback in VR ». In : *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. 2016, p. 1991-1995.
- [99] Aakar GUPTA, Thomas PIETRZAK, Nicolas ROUSSEL et Ravin BALAKRISHNAN. « Direct manipulation in tactile displays ». In : *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. San Jose, USA, 2016, p. 3683-3693.
- [100] Aron GURWITSCH. « Marginal consciousness ». In : (1985).

- [101] Osama HALABI et Mohammad SALEH. « Augmented reality flavor: cross-modal mapping across gustation, olfaction, and vision ». In : *Multimedia Tools and Applications* 80 (2021), p. 36423-36441.
- [102] Edmund T HALL et Edward T HALL. *The hidden dimension*. T. 609. Anchor, 1966.
- [103] Sandra G HART et Lowell E STAVELAND. « Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research ». In : *Advances in psychology*. T. 52. Elsevier, 1988, p. 139-183.
- [104] Jonathan HARTH, Alexandra HOFMANN, Mike KARST, David KEMPF, Annelie OSTERTAG, Isabell PRZEMUS et Bernhard SCHAEFERMEYER. « Different Types of Users, Different Types of Immersion: A User Study of Interaction Design and Immersion in Consumer Virtual Reality ». In : *IEEE Consumer Electronics Magazine* 7.4 (2018), p. 36-43.
- [105] Vincent HAYWARD, Oliver R ASTLEY, Manuel CRUZ-HERNANDEZ, Danny GRANT et Gabriel ROBLES-DE-LA-TORRE. « Haptic interfaces and devices ». In : *Sensor Review* 24.1 (2004), p. 16-29.
- [106] Carrie HEETER. « Being there: The subjective experience of presence ». In : *Presence: Teleoperators & Virtual Environments* 1.2 (1992), p. 262-271.
- [107] Kenneth M HEILMAN, Edward VALENSTEIN et Robert T WATSON. « Neglect and related disorders ». In : *Seminars in Neurology*. T. 4. 02. © 1984 by Thieme Medical Publishers, Inc. 1984, p. 209-219.
- [108] Seongkook HEO, Christina CHUNG, Geehyuk LEE et Daniel WIGDOR. « Thor’s hammer: An ungrounded force feedback device utilizing propeller-induced propulsive force ». In : *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. 2018, p. 1-11.
- [109] John M HOLLERBACH. « Some current issues in haptics research ». In : *Proceedings 2000 ICRA. Millennium Conference. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Symposia Proceedings (Cat. No. 00CH37065)*. T. 1. IEEE. 2000, p. 757-762.
- [110] Kasper HORNBAEK et Antti OULASVIRTA. « What is interaction? » In : *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. 2017, p. 5040-5052.
- [111] Takayuki HOSHI, Masafumi TAKAHASHI, Takayuki IWAMOTO et Hiroyuki SHINODA. « Noncontact tactile display based on radiation pressure of airborne ultrasound ». In : *IEEE Transactions on Haptics* 3.3 (2010), p. 155-165.
- [112] Ludovic HOYET, Ferran ARGELAGUET, Corentin NICOLE et Anatole LÉCUYER. « “Wow! i have six Fingers!”: Would You accept structural changes of Your hand in Vr? » In : *Frontiers in Robotics and AI* 3 (2016), p. 27.

- [113] Shu IMAIZUMI et Tomohisa ASAI. « Dissociation of agency and body ownership following visuomotor temporal recalibration ». In : *Frontiers in integrative neuroscience* 9 (2015), p. 35.
- [114] Atsushi IRIKI, Michio TANAKA et Yoshiaki IWAMURA. « Coding of modified body schema during tool use by macaque postcentral neurones. » In : *Neuroreport* 7.14 (1996), p. 2325-2330.
- [115] Ali ISRAR et Ivan POUPYREV. « Control space of apparent haptic motion ». In : *2011 IEEE World Haptics Conference*. IEEE. 2011, p. 457-462.
- [116] Ali ISRAR et Ivan POUPYREV. « Tactile brush: drawing on skin with a tactile grid display ». In : *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. 2011, p. 2019-2028.
- [117] Borella JEAN. *Problème de gnose*. Paris : Editions L'Harmattan, 2007.
- [118] Camille JEUNET, Louis ALBERT, Ferran ARGELAGUET et Anatole LÉCUYER. « “Do You Feel in Control?”: Towards Novel Approaches to Characterise, Manipulate and Measure the Sense of Agency in Virtual Environments ». In : *IEEE transactions on visualization and computer graphics* 24.4 (2018), p. 1486-1495.
- [119] Sungchul JUNG, Pamela J WISNIEWSKI et Charles E HUGHES. « In Limbo: The Effect of Gradual Visual Transition between Real and Virtual on Virtual Body Ownership Illusion and Presence ». In : *2018 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*. IEEE. 2018, p. 267-272.
- [120] Hiroyuki KAJIMOTO. « Design of cylindrical whole-hand haptic interface using electrocutaneous display ». In : *International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications*. Springer. 2012, p. 67-72.
- [121] Andreas KALCKERT et H Henrik EHRSSON. « The moving rubber hand illusion revisited: Comparing movements and visuotactile stimulation to induce illusory ownership ». In : *Consciousness and cognition* 26 (2014), p. 117-132.
- [122] Alboukadel KASSAMBARA. *Rstatis*. last checked November 5, 2021. 2021.
- [123] Oliver Beren KAUL, Michael ROHS, Benjamin SIMON, Kerem Can DEMIR et Kamillo FERRY. « Vibrotactile funneling illusion and localization performance on the head ». In : *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. 2020, p. 1-13.
- [124] Asaid KHATEB, Stéphane R SIMON, Sebastian DIEGUEZ, François LAZEYRAS, Isabelle MOMJIAN-MAYOR, Olaf BLANKE, Theodor LANDIS, Alan J PEGNA et Jean-Marie ANNONI. « Seeing the phantom: a functional magnetic resonance imaging study of a supernumerary phantom limb ». In : *Annals of Neurology: Official Journal of the American Neurological Association and the Child Neurology Society* 65.6 (2009), p. 698-705.

- [125] Konstantina KILTENI, Ilias BERGSTROM et Mel SLATER. « Drumming in immersive virtual reality: the body shapes the way we play ». In : *IEEE transactions on visualization and computer graphics* 19.4 (2013), p. 597-605.
- [126] Konstantina KILTENI, Raphaela GROTEN et Mel SLATER. « The sense of embodiment in virtual reality ». In : *Presence: Teleoperators and Virtual Environments* 21.4 (2012), p. 373-387.
- [127] Erin KIM et Oliver SCHNEIDER. « Defining haptic experience: foundations for understanding, communicating, and evaluating HX ». In : *Proceedings of the 2020 CHI conference on human factors in computing systems*. 2020, p. 1-13.
- [128] Hyun K KIM, Jaehyun PARK, Yeongcheol CHOI et Mungyeong CHOE. « Virtual reality sickness questionnaire (VRSQ): Motion sickness measurement index in a virtual reality environment ». In : *Applied ergonomics* 69 (2018), p. 66-73.
- [129] Jinsoo KIM, Seungjae OH, Chaeyong PARK et Seungmoon CHOI. « Body-penetrating tactile phantom sensations ». In : *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. 2020, p. 1-13.
- [130] Youngsun KIM, Jaedong LEE et Gerard KIM. « Extending" out of the body" saltation to 2D mobile tactile interaction ». In : *Proceedings of the 10th asia pacific conference on Computer human interaction*. 2012, p. 67-74.
- [131] Elena KOKKINARA et Mel SLATER. « Measuring the effects through time of the influence of visuomotor and visuotactile synchronous stimulation on a virtual body ownership illusion ». In : *Perception* 43.1 (2014), p. 43-58.
- [132] Elena KOKKINARA, Mel SLATER et Joan LÓPEZ-MOLINER. « The effects of visuomotor calibration to the perceived space and body, through embodiment in immersive virtual reality ». In : *ACM Transactions on Applied Perception (TAP)* 13.1 (2015), p. 3.
- [133] Julian KREIMEIER, Sebastian HAMMER, Daniel FRIEDMANN, Pascal KARG, Clemens BÜHNER, Lukas BANKEL et Timo GÖTZELMANN. « Evaluation of different types of haptic feedback influencing the task-based presence and performance in virtual reality ». In : *Proceedings of the 12th ACM International Conference on PErvasive Technologies Related to Assistive Environments*. ACM. 2019, p. 289-298.
- [134] Claudia KROGMEIER, Christos MOUSAS et David WHITTINGHILL. « Human–virtual character interaction: Toward understanding the influence of haptic feedback ». In : *Computer Animation and Virtual Worlds* (2019), e1883.
- [135] Bettina LAUGWITZ, Theo HELD et Martin SCHREPP. « Construction and evaluation of a user experience questionnaire ». In : *HCI and Usability for Education and Work: 4th Symposium of the Workgroup Human-Computer Interaction and Usability Engineering of the Austrian Computer Society, USAB 2008, Graz, Austria, November 20-21, 2008. Proceedings 4*. Springer. 2008, p. 63-76.

- [136] Anatole LÉCUYER. « Simulating haptic feedback using vision: A survey of research and applications of pseudo-haptic feedback ». In : *Presence: Teleoperators and Virtual Environments* 18.1 (2009), p. 39-53.
- [137] Anatole LÉCUYER, Sabine COQUILLART, Abderrahmane KHEDDAR, Paul RICHARD et Philippe COIFFET. « Pseudo-haptic feedback: Can isometric input devices simulate force feedback? » In : *Proceedings IEEE Virtual Reality 2000 (Cat. No. 00CB37048)*. IEEE. 2000, p. 83-90.
- [138] Susan J LEDERMAN et Roberta L KLATZKY. « Action for perception: Manual exploratory movements for haptically processing objects and their features ». In : *Hand and Brain*. Elsevier, 1996, p. 431-446.
- [139] Susan J LEDERMAN et Roberta L KLATZKY. « Hand movements: A window into haptic object recognition ». In : *Cognitive psychology* 19.3 (1987), p. 342-368.
- [140] Joonseok LEE, Hanggjun CHO et RI Bob MCKAY. « A rapid screening and testing protocol for keyboard layout speed comparison ». In : *IEEE Transactions on Human-Machine Systems* 45.3 (2015), p. 371-384.
- [141] Kwan Min LEE. « Presence, explicated ». In : *Communication theory* 14.1 (2004), p. 27-50.
- [142] G Michael LEMOLE JR, P Pat BANERJEE, Cristian LUCIANO, Sergey NECKRYSH et Fady T CHARBEL. « Virtual reality in neurosurgical education: part-task ventriculostomy simulation with dynamic visual and haptic feedback ». In : *Neurosurgery* 61.1 (2007), p. 142-149.
- [143] Bigna LENGGENHAGER, Michael MOUTHON et Olaf BLANKE. « Spatial aspects of bodily self-consciousness ». In : *Consciousness and cognition* 18.1 (2009), p. 110-117.
- [144] Bigna LENGGENHAGER, Tej TADI, Thomas METZINGER et Olaf BLANKE. « Video ergo sum: manipulating bodily self-consciousness ». In : *Science* 317.5841 (2007), p. 1096-1099.
- [145] Robert William LINDEMAN. « Bimanual interaction, passive-haptic feedback, 3 D widget representation, and simulated surface constraints for interaction in immersive virtual environments ». Thèse de doct. George Washington University, 1999.
- [146] Nicholas G LIPARI. « Improved 2D Interpolation for Intensity and Position Control in 2D Vibrotactile Meshes ». Thèse de doct. University of Louisiana at Lafayette, 2020.
- [147] Matthew R LONGO et Patrick HAGGARD. « Sense of agency primes manual motor responses ». In : *Perception* 38.1 (2009), p. 69-78.
- [148] Matthew R LONGO, Friederike SCHÜÜR, Marjolein PM KAMMERS, Manos TSAKIRIS et Patrick HAGGARD. « What is embodiment? A psychometric approach ». In : *Cognition* 107.3 (2008), p. 978-998.

- [149] Jean-Luc LUGRIN, Johanna LATT et Marc Erich LATOSCHIK. « Avatar anthropomorphism and illusion of body ownership in VR ». In : *2015 IEEE Virtual Reality (VR)*. IEEE. 2015, p. 229-230.
- [150] Jean-Luc LUGRIN, Maximilian ERTL, Philipp KROP, Richard KLÜPFEL, Sebastian STIERSTORFER, Bianka WEISZ, Maximilian RÜCK, Johann SCHMITT, Nina SCHMIDT et Marc Erich LATOSCHIK. « Any “Body” There? Avatar Visibility Effects in a Virtual Reality Game ». In : *2018 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*. IEEE. 2018, p. 17-24.
- [151] Ke MA et Bernhard HOMMEL. « The role of agency for perceived ownership in the virtual hand illusion ». In : *Consciousness and cognition* 36 (2015), p. 277-288.
- [152] Zhou MA et Pinhas BEN-TZVI. « RML Glove—An Exoskeleton Glove Mechanism With Haptics Feedback ». In : *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 20.2 (2015), p. 641-652.
- [153] James C MAKOUS, Robert M FRIEDMAN et Charles J VIERCK. « A critical band filter in touch ». In : *Journal of Neuroscience* 15.4 (1995), p. 2808-2818.
- [154] Divine MALONEY et Guo FREEMAN. « Falling asleep together: What makes activities in social virtual reality meaningful to users ». In : *Proceedings of the Annual Symposium on Computer-Human Interaction in Play*. 2020, p. 510-521.
- [155] Angelo MARAVITA et Atsushi IRIKI. « Tools for the body (schema) ». In : *Trends in cognitive sciences* 8.2 (2004), p. 79-86.
- [156] Angela MAROTTA, Michele TINAZZI, Clelia CAVEDINI, Massimiliano ZAMPINI et Mirta FIORIO. « Individual differences in the rubber hand illusion are related to sensory suggestibility ». In : *PloS one* 11.12 (2016), e0168489.
- [157] David MARR. *Vision: A computational investigation into the human representation and processing of visual information*. MIT press, 2010.
- [158] Antonella MASELLI et Mel SLATER. « The building blocks of the full body ownership illusion ». In : *Frontiers in human neuroscience* 7 (2013), p. 83.
- [159] Thomas H MASSIE, J Kenneth SALISBURY et al. « The phantom haptic interface: A device for probing virtual objects ». In : *Proceedings of the ASME winter annual meeting, symposium on haptic interfaces for virtual environment and teleoperator systems*. T. 55. 1. Citeseer. 1994, p. 295-300.
- [160] Jared MEDINA et H Branch COSLETT. « From maps to form to space: Touch and the body schema ». In : *Neuropsychologia* 48.3 (2010), p. 645-654.
- [161] Elisa D MEKLER et Kasper HORNBAEK. « A framework for the experience of meaning in human-computer interaction ». In : *Proceedings of the 2019 CHI conference on human factors in computing systems*. 2019, p. 1-15.

- [162] Victor Rodrigo MERCADO, Maud MARCHAL et Anatole LECUYER. « “Haptics On-Demand”: A Survey on Encountered-Type Haptic Displays ». In : *IEEE Transactions on Haptics* 14.3 (2021), p. 449-464.
- [163] Paul MILGRAM et Fumio KISHINO. « A taxonomy of mixed reality visual displays ». In : *IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems* 77.12 (1994), p. 1321-1329.
- [164] Luke E MILLER, Matthew R LONGO et Ayse P SAYGIN. « Tool morphology constrains the effects of tool use on body representations. » In : *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* 40.6 (2014), p. 2143.
- [165] Probal MITRA et Günter NIEMEYER. « Dynamic proxy objects in haptic simulations ». In : *IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics, 2004*. T. 2. IEEE. Singapore, Singapore, 2004, p. 1054-1059.
- [166] James W MOORE. « What is the sense of agency and why does it matter? » In : *Frontiers in psychology* 7 (2016), p. 1272.
- [167] Masahiro MORI. « Bukimi no tani [the uncanny valley] ». In : *Energy* 7 (1970), p. 33-35.
- [168] Masahiro MORI, Karl F MACDORMAN et Norri KAGEKI. « The uncanny valley [from the field] ». In : *IEEE Robotics & Automation Magazine* 19.2 (2012), p. 98-100.
- [169] Craig D MURRAY, Jez Fox et Steve PETTIFER. « Absorption, dissociation, locus of control and presence in virtual reality ». In : *Computers in Human Behavior* 23.3 (2007), p. 1347-1354.
- [170] Stylianos MYSTAKIDIS, Eleni BERKI et Juri-Petri VALTANEN. « Deep and meaningful e-learning with social virtual reality environments in higher education: A systematic literature review ». In : *Applied Sciences* 11.5 (2021), p. 2412.
- [171] Takuji NARUMI, Shinya NISHIZAKA, Takashi KAJINAMI, Tomohiro TANIKAWA et Michitaka HIROSE. « Augmented reality flavors: gustatory display based on edible marker and cross-modal interaction ». In : *Proceedings of the SIGCHI conference on human factors in computing systems*. 2011, p. 93-102.
- [172] Laurence NIGAY et Joëlle COUTAZ. « A generic platform for addressing the multimodal challenge ». In : *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*. 1995, p. 98-105.
- [173] Chontira NIMCHAROEN, Stefanie ZOLLMANN, Jonny COLLINS et Holger REGENBRECHT. « Is that me?—Embodiment and body perception with an augmented reality mirror ». In : *2018 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality Adjunct (ISMAR-Adjunct)*. IEEE. 2018, p. 158-163.
- [174] Don NORMAN. *The design of everyday things: Revised and expanded edition*. Basic books, 2013.

- [175] Jean-Marie NORMAND, Elias GIANNOPOULOS, Bernhard SPANLANG et Mel SLATER. « Multisensory stimulation can induce an illusion of larger belly size in immersive virtual reality ». In : *PloS one* 6.1 (2011), e16128.
- [176] A O'DOWD et FN NEWELL. « The rubber hand illusion is influenced by self-recognition ». In : *Neuroscience Letters* 720 (2020), p. 134756.
- [177] Ian OAKLEY, Marilyn Rose MCGEE, Stephen BREWSTER et Philip GRAY. « Putting the feel in 'look and feel ' ». In : *Proceedings of the SIGCHI conference on Human Factors in Computing Systems*. ACM. 2000, p. 415-422.
- [178] Claudio PACCHIEROTTI, Stephen SINCLAIR, Massimiliano SOLAZZI, Antonio FRISOLI, Vincent HAYWARD et Domenico PRATTICIZZO. « Wearable haptic systems for the fingertip and the hand: taxonomy, review, and perspectives ». In : *IEEE transactions on haptics* 10.4 (2017), p. 580-600.
- [179] Miguel A PADILLA-CASTAÑEDA, Antonio FRISOLI, Silvia PABON et Massimo BERGAMASCO. « The modulation of ownership and agency in the virtual hand illusion under visuotactile and visuomotor sensory feedback ». In : *Presence: Teleoperators and Virtual Environments* 23.2 (2014), p. 209-225.
- [180] Julie PALLANT. « Survival manual ». In : *A step by step guide to data analysis using SPSS 4* (2011).
- [181] Gunhyuk PARK et Seungmoon CHOI. « Tactile information transmission by 2D stationary phantom sensations ». In : *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. 2018, p. 1-12.
- [182] Jaeyoung PARK, Jaeha KIM, Yonghwan OH et Hong Z TAN. « Rendering moving tactile stroke on the palm using a sparse 2d array ». In : *International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications*. Springer. 2016, p. 47-56.
- [183] Tabitha C PECK, Jessica J GOOD et Katharina SEITZ. « Evidence of Racial Bias Using Immersive Virtual Reality: Analysis of Head and Hand Motions During Shooting Decisions ». In : *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 27.5 (2021), p. 2502-2512.
- [184] Tabitha C PECK et Altan TUTAR. « The impact of a self-avatar, hand collocation, and hand proximity on embodiment and stroop interference ». In : *IEEE transactions on visualization and computer graphics* 26.5 (2020), p. 1964-1971.
- [185] Tabitha C. PECK et Mar GONZALEZ-FRANCO. « Avatar Embodiment. A Standardized Questionnaire ». In : *Frontiers in Virtual Reality* 1 (2021), p. 44.
- [186] Jérôme PERRET et Emmanuel VANDER POORTEN. « Touching Virtual Reality: A Review of Haptic Gloves ». In : *ACTUATOR 2018; 16th International Conference on New Actuators*. VDE. 2018, p. 1-5.

- [187] Valeria Ivanova PETKOVA, Mehrnoush KHOSHNEVIS et H Henrik EHRSSON. « The perspective matters! Multisensory integration in ego-centric reference frames determines full-body ownership ». In : *Frontiers in psychology* 2 (2011), p. 35.
- [188] Thomas PIETRZAK. « On the critical role of the sensorimotor loop on the design of interaction techniques and interactive devices ». Habilitation à diriger des recherches. Université de Lille, juill. 2022.
- [189] Bruno PORRAS GARCIA, Marta FERRER GARCIA, Agata OLSZEWSKA, Lena YILMAZ, Cristina GONZÁLEZ IBAÑEZ, Mireia GRACIA BLANES, Gamze GÜLTEKIN, Eduardo SERRANO TRONCOSO et José GUTIÉRREZ MALDONADO. « Is this my own body? Changing the perceptual and affective body image experience among college students using a new virtual reality embodiment-based technique ». In : *Journal of clinical medicine* 8.7 (2019), p. 925.
- [190] Zhan Fan QUEK, Samuel B SCHORR, Ilana NISKY, Allison M OKAMURA et William R PROVANCHER. « Augmentation of stiffness perception with a 1-degree-of-freedom skin stretch device ». In : *IEEE Transactions on Human-Machine Systems* 44.6 (2014), p. 731-742.
- [191] Natasha RATCLIFFE et Roger NEWPORT. « The effect of visual, spatial and temporal manipulations on embodiment and action ». In : *Frontiers in human neuroscience* 11 (2017), p. 227.
- [192] Liat RAZ, Patrice L WEISS et Miriam REINER. « The virtual hand illusion and body ownership ». In : *International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications*. Springer. Madrid, Spain, 2008, p. 367-372.
- [193] Guénon RENÉ. *L'Homme et son devenir selon le Védânta*. Paris : Brossard, 1925.
- [194] Grégoire RICHARD, Thomas PIETRZAK, Ferran ARGELAGUET, Anatole LÉCUYER et Géry CASIEZ. « Studying the Role of Haptic Feedback on Virtual Embodiment in a Drawing Task ». In : *Frontiers in Virtual Reality* 1 (2021), p. 28.
- [195] Grégoire RICHARD, Thomas PIETRZAK, Ferran ARGELAGUET, Anatole LÉCUYER et Géry CASIEZ. « Within or Between? Comparing Experimental Designs for Virtual Embodiment Studies ». In : *2022 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*. IEEE. 2022, p. 186-195.
- [196] L. RINCON-GONZALEZ, J. P. WARREN, D. M. MELLER et S. HELMS TILLERY. « Haptic Interaction of Touch and Proprioception: Implications for Neuroprosthetics ». In : *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering* 19.5 (2011), p. 490-500.
- [197] ROOTMOTIONS. *FinalIK*. last checked November 5, 2021. 2014.
- [198] Robert ROSENTHAL. *Experimenter effects in behavioral research*. Irvington, 1976.

- [199] Daniel ROTH et Marc Erich LATOSCHIK. « Construction of the Virtual Embodiment Questionnaire (VEQ) ». In : *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 26.12 (2020), p. 3546-3556.
- [200] Daniel ROTH, Jean-Luc LUGRIN, Marc Erich LATOSCHIK et Stephan HUBER. « Alpha IVBO-construction of a scale to measure the illusion of virtual body ownership ». In : *Proceedings of the 2017 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*. 2017, p. 2875-2883.
- [201] Barbara Olasov ROTHBAUM et Larry F HODGES. « The use of virtual reality exposure in the treatment of anxiety disorders ». In : *Behavior Modification* 23.4 (1999), p. 507-525.
- [202] Eva-Lotta SALLNÄS, Kirsten RASSMUS-GRÖHN et Calle SJÖSTRÖM. « Supporting presence in collaborative environments by haptic force feedback ». In : *ACM Transactions on Computer-Human Interaction (TOCHI)* 7.4 (2000), p. 461-476.
- [203] Maria V SANCHEZ-VIVES, Bernhard SPANLANG, Antonio FRISOLI, Massimo BERGAMASCO et Mel SLATER. « Virtual hand illusion induced by visuomotor correlations ». In : *PloS one* 5.4 (2010), e10381.
- [204] Suji SATHIYAMURTHY, Melody LUI, Erin KIM et Oliver SCHNEIDER. « Measuring Haptic Experience: Elaborating the HX model with scale development ». In : *2021 IEEE World Haptics Conference (WHC)*. IEEE. 2021, p. 979-984.
- [205] Laurence SCHACHER, Sourour BENSALD, Selsabil El-Ghezal JEGUIRIM et Dominique ADOLPHE. « Sensory and physiological issues ». In : *Advances in Modern Woven Fabrics Technology*. IntechOpen, 2011.
- [206] Martin SCHREPP, Andreas HINDERKS et Jörg THOMASCHESKI. « Applying the user experience questionnaire (UEQ) in different evaluation scenarios ». In : *Design, User Experience, and Usability. Theories, Methods, and Tools for Designing the User Experience: Third International Conference, DUXU 2014, Held as Part of HCI International 2014, Heraklion, Crete, Greece, June 22-27, 2014, Proceedings, Part I 3*. Springer. 2014, p. 383-392.
- [207] Valentin SCHWIND, Pascal KNIERIM, Lewis CHUANG et Niels HENZE. « " Where's Pinky?" The Effects of a Reduced Number of Fingers in Virtual Reality ». In : *Proceedings of the Annual Symposium on Computer-Human Interaction in Play*. 2017, p. 507-515.
- [208] Valentin SCHWIND, Jan LEUSMANN et Niels HENZE. « Understanding Visual-Haptic Integration of Avatar Hands Using a Fitts' Law Task in Virtual Reality ». In : *Proceedings of Mensch Und Computer 2019*. Association for Computing Machinery, 2019, p. 211-222.

- [209] Valentin SCHWIND, Lorraine LIN, Massimiliano DI LUCA, Sophie JÖRG et James HILLIS. « Touch with foreign hands: The effect of virtual hand appearance on visual-haptic integration ». In : *Proceedings of the 15th ACM Symposium on Applied Perception*. 2018, p. 1-8.
- [210] Hasti SEIFI, Farimah FAZLOLLAHI, Michael OPPERMANN, John Andrew SASTRILLO, Jessica IP, Ashutosh AGRAWAL, Gunhyuk PARK, Katherine J KUCHENBECKER et Karon E MACLEAN. « Haptipedia: Accelerating haptic device discovery to support interaction & engineering design ». In : *Proceedings of the 2019 CHI conference on human factors in computing systems*. 2019, p. 1-12.
- [211] Aurelija SEIRYTE et Elena RUSCONI. « The Empathy Quotient (EQ) predicts perceived strength of bodily illusions and illusion-related sensations of pain ». In : *Personality and Individual Differences* 77 (2015), p. 112-117.
- [212] Virginia L. SENDERS. « The Nominal Scale ». In : *Measurement and statistics: a basic text emphasizing behavioral science applications*. Oxford University Press, 1958, p. 76-101.
- [213] Sotaro SHIMADA, Kensuke FUKUDA et Kazuo HIRAKI. « Rubber hand illusion under delayed visual feedback ». In : *PLoS one* 4.7 (2009), e6185.
- [214] Donghee SHIN. « Empathy and embodied experience in virtual environment: To what extent can virtual reality stimulate empathy and embodied experience? » In : *Computers in Human Behavior* 78 (2018), p. 64-73.
- [215] Mincheol SHIN, Sanguk LEE, Stephen W SONG et Donghun CHUNG. « Enhancement of perceived body ownership in virtual reality-based teleoperation may backfire in the execution of high-risk tasks ». In : *Computers in Human Behavior* 115 (2021), p. 106605.
- [216] Ben SHNEIDERMAN. « Direct manipulation: A step beyond programming languages ». In : *Proceedings of the Joint Conference on Easier and More Productive Use of Computer Systems.(Part-II): Human Interface and the User Interface-Volume 1981*. 1981, p. 143.
- [217] Tania SINGER, Ben SEYMOUR, John O'DOHERTY, Holger KAUBE, Raymond J DOLAN et Chris D FRITH. « Empathy for pain involves the affective but not sensory components of pain ». In : *Science* 303.5661 (2004), p. 1157-1162.
- [218] Richard SKARBEZ, Solene NEYRET, Frederick P BROOKS, Mel SLATER et Mary C WHITTON. « A psychophysical experiment regarding components of the plausibility illusion ». In : *IEEE transactions on visualization and computer graphics* 23.4 (2017), p. 1369-1378.
- [219] Mel SLATER. « Immersion and the illusion of presence in virtual reality ». In : *British journal of psychology* 109.3 (2018), p. 431-433.

- [220] Mel SLATER. « Measuring presence: A response to the Witmer and Singer presence questionnaire ». In : *Presence* 8.5 (1999), p. 560-565.
- [221] Mel SLATER. « Place illusion and plausibility can lead to realistic behaviour in immersive virtual environments ». In : *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 364.1535 (2009), p. 3549-3557.
- [222] Mel SLATER, Vasilis LINAKIS, Martin USOH et Rob KOOPER. « Immersion, presence and performance in virtual environments: An experiment with tri-dimensional chess ». In : *Proceedings of the ACM symposium on virtual reality software and technology*. ACM. 1996, p. 163-172.
- [223] Mel SLATER, Beau LOTTO, Maria Marta ARNOLD et María Victoria SÁNCHEZ-VIVES. « How we experience immersive virtual environments: the concept of presence and its measurement ». In : *Anuario de Psicología, 2009, vol. 40, p. 193-210* (2009).
- [224] Mel SLATER, Daniel PÉREZ MARCOS, Henrik EHRSSON et Maria V SANCHEZ-VIVES. « Inducing illusory ownership of a virtual body ». In : *Frontiers in neuroscience* 3 (2009), p. 29.
- [225] Mel SLATER, Daniel PÉREZ MARCOS, Henrik EHRSSON et Maria V SANCHEZ-VIVES. « Towards a digital body: the virtual arm illusion ». In : *Frontiers in human neuroscience* 2 (2008), p. 6.
- [226] Mel SLATER, Bernhard SPANLANG, Maria V SANCHEZ-VIVES et Olaf BLANKE. « First person experience of body transfer in virtual reality ». In : *PloS one* 5.5 (2010), e10564.
- [227] Agata Marta SOCCINI, Marco GRANGETTO, Tetsunari INAMURA et Sotaro SHIMADA. « Virtual hand illusion: The alien finger motion experiment ». In : *2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*. IEEE. 2019, p. 1165-1166.
- [228] SONY. *DualSense, PlayStation 5 controllers, review*. <https://www.actronika.com/post/dualsense-towards-realistic-haptics-sony-playstation-5-controller-review-actronika>. Online: accessed 27-December-2022.
- [229] Misha SRA, Abhinandan JAIN et Pattie MAES. « Adding proprioceptive feedback to virtual reality experiences using galvanic vestibular stimulation ». In : *Proceedings of the 2019 CHI conference on human factors in computing systems*. 2019, p. 1-14.
- [230] Mandayam A SRINIVASAN. « What is haptics? » In : *Laboratory for Human and Machine Haptics: The Touch Lab, Massachusetts Institute of Technology* (1995), p. 1-11.
- [231] Mandayam A SRINIVASAN et Cagatay BASDOGAN. « Haptics in virtual environments: Taxonomy, research status, and challenges ». In : *Computers & Graphics* 21.4 (1997), p. 393-404.

- [232] Dennis STANKE, Tim DUENTE et Michael ROHS. « TactileWear: A comparison of electro-tactile and vibrotactile feedback on the wrist and ring finger ». In : *Proceedings of the 11th Nordic Conference on Human-Computer Interaction: Shaping Experiences, Shaping Society*. 2020, p. 1-13.
- [233] Barry C STILLMAN. « Making sense of proprioception: the meaning of proprioception, kinaesthesia and related terms ». In : *Physiotherapy* 88.11 (2002), p. 667-676.
- [234] Paul STROHMEIER. « Shaping Material Experiences: Designing Vibrotactile Feedback for Active Perception ». Thèse de doct. University of Copenhagen, Faculty of Science,[Department of Computer Science], 2019.
- [235] Matthis SYNOFZIK, Gottfried VOSGERAU et Albert NEWEN. « Beyond the comparator model: a multifactorial two-step account of agency ». In : *Consciousness and cognition* 17.1 (2008), p. 219-239.
- [236] 3D SYSTEMS. *Touch X Haptic Device*. <https://www.3dsystems.com/haptics-devices/touch-x>. Online: accessed 14-November-2019.
- [237] Hong Z TAN et Alex PENTLAND. « Tactual displays for wearable computing ». In : *Digest of Papers. First International Symposium on Wearable Computers*. IEEE. 1997, p. 84-89.
- [238] Yudai TANAKA, Arata HORIE et Xiang'Anthony' CHEN. « Dualvib: Simulating haptic sensation of dynamic mass by combining pseudo-force and texture feedback ». In : *26th ACM symposium on virtual reality software and technology*. 2020, p. 1-10.
- [239] HiWave TECHNOLOGIES. *HIHX9C005-8 Audio & Haptic Exciter datasheet*. <https://www.thomaspietrzak.com/enseignement/NIHM/doc/vibreur.pdf>. Online: accessed 27-December-2022.
- [240] Katy Tcha TOKEY. « Conception et évaluation de l'expérience utilisateur en environnement virtuel immersif. » Thèse de doct. 2018.
- [241] Manos TSAKIRIS. « My body in the brain: a neurocognitive model of body-ownership ». In : *Neuropsychologia* 48.3 (2010), p. 703-712.
- [242] Manos TSAKIRIS et Patrick HAGGARD. « The rubber hand illusion revisited: visuotactile integration and self-attribution. » In : *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* 31.1 (2005), p. 80.
- [243] Manos TSAKIRIS, Matthew R LONGO et Patrick HAGGARD. « Having a body versus moving your body: neural signatures of agency and body-ownership ». In : *Neuropsychologia* 48.9 (2010), p. 2740-2749.
- [244] Manos TSAKIRIS, Gita PRABHU et Patrick HAGGARD. « Having a body versus moving your body: How agency structures body-ownership ». In : *Consciousness and cognition* 15.2 (2006), p. 423-432.

- [245] Yusuke UJITOKO et Yuki BAN. « Survey of pseudo-haptics: Haptic feedback design and application proposals ». In : *IEEE Transactions on Haptics* 14.4 (2021), p. 699-711.
- [246] Yusuke UJITOKO, Yuki BAN et Koichi HIROTA. « Modulating fine roughness perception of vibrotactile textured surface using pseudo-haptic effect ». In : *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 25.5 (2019), p. 1981-1990.
- [247] Guillaume VAILLAND, Yoren GAFFARY, Louise DEVIGNE, Valérie GOURANTON, Bruno ARNALDI et Marie BABEL. « Vestibular feedback on a virtual reality wheelchair driving simulator: A pilot study ». In : *Proceedings of the 2020 ACM/IEEE International conference on human-robot interaction*. 2020, p. 171-179.
- [248] VALVESOFTWARE. *Valve Index Controllers*. last checked November 5, 2021. 2019.
- [249] Ronald T VERRILLO. « Vibration sensation in humans ». In : *Music Perception* 9.3 (1992), p. 281-302.
- [250] Ronald T VERRILLO. « Vibrotactile sensitivity and the frequency response of the Pacinian corpuscle ». In : *Psychonomic Science* 4.1 (1966), p. 135-136.
- [251] Helene S WALLACH, Marilyn P SAFIR et Roy SAMANA. « Personality variables and presence ». In : *Virtual Reality* 14.1 (2010), p. 3-13.
- [252] Thomas WALTEMATE, Irene SENNA, Felix HÜLSMANN, Marieke ROHDE, Stefan KOPP, Marc ERNST et Mario BOTSCH. « The impact of latency on perceptual judgments and motor performance in closed-loop interaction in virtual reality ». In : *Proceedings of the 22nd ACM conference on virtual reality software and technology*. 2016, p. 27-35.
- [253] Sidney WEINSTEIN. « Intensive and extensive aspects of tactile sensitivity as a function of body part, sex and laterality ». In : *The skin senses* (1968).
- [254] RA WHITE. « The Influence of experimenter motivation, attitudes, and methods of handling subjects on Psi test results ». In : *Handbook of parapsychology* (1977), p. 273-301.
- [255] Bob G WITMER et Michael J SINGER. « Measuring presence in virtual environments: A presence questionnaire ». In : *Presence* 7.3 (1998), p. 225-240.
- [256] Jessica K WITT, Dennis R PROFFITT et William EPSTEIN. « Tool use affects perceived distance, but only when you intend to use it. » In : *Journal of experimental psychology: Human perception and performance* 31.5 (2005), p. 880.
- [257] Jacob O. WOBROCK, Leah FINDLATER, Darren GERGLE et James J. HIGGINS. « The Aligned Rank Transform for Nonparametric Factorial Analyses Using Only Anova Procedures ». In : *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '11. Vancouver, BC, Canada : ACM, 2011, p. 143-146.
- [258] Andrea Stevenson WON, Jeremy BAIENSON, Jimmy LEE et Jaron LANIER. « Homuncular flexibility in virtual reality ». In : *Journal of Computer-Mediated Communication* 20.3 (2015), p. 241-259.

- [259] Cheng XU, Ali ISRAR, Ivan POUPYREV, Olivier BAU et Chris HARRISON. « Tactile display for the visually impaired using TeslaTouch ». In : *CHI'11 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*. 2011, p. 317-322.
- [260] Shanwen YANG, Tianrui LI, Xun GONG, Bo PENG et Jie HU. « A review on crowd simulation and modeling ». In : *Graphical Models* 111 (2020), p. 101081.
- [261] Koji YATANI et Khai Nhut TRUONG. « SemFeel: a user interface with semantic tactile feedback for mobile touch-screen devices ». In : *Proceedings of the 22nd annual ACM symposium on User interface software and technology*. 2009, p. 111-120.
- [262] Nick YEE et Jeremy N BAIENSON. « The difference between being and seeing: The relative contribution of self-perception and priming to behavioral changes via digital self-representation ». In : *Media Psychology* 12.2 (2009), p. 195-209.
- [263] Nick YEE, Jeremy N BAIENSON et Nicolas DUCHENEAUT. « The Proteus effect: Implications of transformed digital self-representation on online and offline behavior ». In : *Communication Research* 36.2 (2009), p. 285-312.
- [264] Shigeo YOSHIDA, Yuqian SUN et Hideaki KUZUOKA. « PoCoPo: Handheld Pin-Based Shape Display for Haptic Rendering in Virtual Reality ». In : *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '20. Honolulu, HI, USA : Association for Computing Machinery, 2020, p. 1-13.
- [265] Lorijn ZAADNOORDIJK, Tarek R BESOLD et Sabine HUNNIUS. « A match does not make a sense: on the sufficiency of the comparator model for explaining the sense of agency ». In : *Neuroscience of consciousness* 2019.1 (2019), niz006.
- [266] André ZENNER et Antonio KRÜGER. « Drag: on: A virtual reality controller providing haptic feedback based on drag and weight shift ». In : *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. 2019, p. 1-12.
- [267] André ZENNER et Antonio KRÜGER. « Estimating detection thresholds for desktop-scale hand redirection in virtual reality ». In : *2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*. IEEE. 2019, p. 47-55.

ANNEXE A

QUESTIONNAIRES POST-EXPÉRIENCE - DIFFÉRENCES INDIVIDUELLES

Nous présentons ici les 5 questionnaires utilisés après l'expérience présentée dans le Chapitre 3, à savoir le VRSQ, le PANAS-X, le QCAE, le IPC, et le SSS. Nous retranscrivons aussi les textes qui accompagnaient les questionnaires, traduits en français.

Le premier questionnaire, le VRSQ, cherche à évaluer la propension à être malade suite à une expérience immersive. Il demande d'évaluer la sévérité de plusieurs symptômes caractéristiques du phénomène. Le VRSQ était accompagné d'une courte introduction :

« La prochaine section porte sur l'évaluation des symptômes qui peuvent survenir lors d'expériences immersives en réalité virtuelle. Vous devrez évaluer la sévérité de chaque symptôme qui vous sera présenté en fonction des sensations ressenties durant l'expérience. »

	None	Slight	Moderate	Severe
General discomfort				
Fatigue				
Eyestrain				
Difficulty focusing				
Headache				
Fullness of head				
Blurred vision				
Dizzy (eyes closed)				
Vertigo				

TABLE A.1 – Questionnaire *Virtual Reality Sickness Questionnaire*, évaluant la propension à être malade lors d'expériences immersives.

Le questionnaire PANAS-X est constitué de 60 adjectifs, évalués en 4 possibilités telles que rapportées dans la table. Les instructions accompagnant le PANAS-X sont les suivantes :

« Ce questionnaire est constitué d'un ensemble d'adjectifs ou de courtes phrases qui décrivent un large spectre d'émotions et de sentiments. Lisez chacune des propositions et indiquez en-dessous de chacune votre réponse. Veuillez indiquer dans quelle mesure vous avez ressenti l'émotion décrite par l'adjectif ou la proposition au cours des 3 derniers jours. La majorité des questions nécessite une réponse. Néanmoins, pour certaines propositions plus délicates, vous aurez la possibilité de ne pas répondre. Les questions obligatoires sont marqués d'une astérisque rouge, et les questions non obligatoires ont une option de réponse *Sans réponse*. »

	Very slightly or not at all	A little	Moderately	Quite a bit	Extremely
Cheerful					
Disgusted					
Attentive					
Bashful					
Sluggish					
Daring					
Surprised					
Strong					
Scornful					
Relaxed					
Irritable					
Delighted					
Inspired					
Fearless					
Disgusted with self					
Sad					
Calm					
Afraid					
Tired					
Amazed					
Shaky					

	Very slightly or not at all	A little	Moderately	Quite a bit	Extremely
Happy					
Timid					
Alone					
Alert					
Upset					
Angry					
Bold					
Blue					
Shy					
Active					
Guilty					
Joyful					
Nervous					
Lonely					
Sleepy					
Excited					
Hostile					
Proud					
Jittery					
Lively					
Ashamed					
At ease					
Scared					
Drowsy					
Angry at self					
Enthusiastic					
Downhearted					
Sheepish					
Distressed					

	Very slightly or not at all	A little	Moderately	Quite a bit	Extremely
Blameworthy					
Determined					
Frightened					
Astonished					
Interested					
Loathing					
Confident					
Energetic					
Concentrating					
Dissatisfied with self					

TABLE A.2 – Questionnaire *Virtual Reality Sickness Questionnaire*, évaluant la propension à être malade lors d’expériences immersives.

Le questionnaire QCAE était constitué d’un ensemble de propositions portant sur les capacités empathiques d’une personne. Pour chacune des propositions, il est demandé d’évaluer l’accord avec la proposition en se basant sur une échelle de Likert à 4 point – Parfaitement d’accord - Assez d’accord - Pas vraiment d’accord - Pas du tout d’accord. Les instructions précédant le QCAE sont les suivantes :

« Les personnes éprouvent des sentiments différents selon les situations. Dans ce qui suit, plusieurs traits de caractère vous seront présentés qui pourront plus ou moins vous correspondre. Lisez chacune de ces caractéristiques et indiquez à quel point vous êtes en accord ou en désaccord avec la proposition en cochant la case correspondante. »

- I sometimes find it difficult to see things from the “other guy’s” point of view.
- I am usually objective when I watch a film or play, and I don’t often get completely caught up in it.
- I try to look at everybody’s side of a disagreement before I make a decision.
- I sometimes try to understand my friends better by imagining how things look from their perspective.
- When I am upset at someone, I usually try to “put myself in his shoes” for a while.
- Before criticizing somebody, I try to imagine how I would feel if I was in their place.
- I often get emotionally involved with my friends’ problems.

I am inclined to get nervous when others around me seem to be nervous.
People I am with have a strong influence on my mood.
It affects me very much when one of my friends seems upset.
I often get deeply involved with the feelings of a character in a film, play, or novel.
I get very upset when I see someone cry.
I am happy when I am with a cheerful group and sad when the others are glum.
It worries me when others are worrying and panicky.
I can easily tell if someone else wants to enter a conversation.
I can pick up quickly if someone says one thing but means another.
It is hard for me to see why some things upset people so much.
I find it easy to put myself in somebody else's shoes.
I am good at predicting how someone will feel.
I am quick to spot when someone in a group is feeling awkward or uncomfortable.
Other people tell me I am good at understanding how they are feeling and what they are thinking.
I can easily tell if someone else is interested or bored with what I am saying.
My friends tell me about their problems because they say I am very understanding.
I realize when I am being a bother even if the other party does not say it explicitly.
I find it easy to figure out what the other party wants to talk about.
I can tell if someone is concealing their real emotions.
I can predict well what another person is going to do.
Overall, I can evaluate correctly another person's point of view, even if I do not agree with it.
I always try to take others' feelings into account before doing anything.
Before doing anything, I try to take into account for the way my friends are going to react.

TABLE A.3 – Questionnaire of Cognitive and Affective Empathy, évaluant les capacités d'empathie affective et cognitive.

Le questionnaire IPC (*Internality, Powerful others, and Chance Scale*) mesure le degré de contrôle qu'un individu juge avoir sur les événements de sa vie, à savoir si ceux-ci résultent de ses propres actions et de facteurs externes. Le questionnaire IPC est constitué de 24 questions, évaluées par des échelles de Likert à 6 points, sans réponse neutre. Les instructions qui accompagnaient le questionnaire IPC sont les suivantes :

« Les personnes éprouvent des sentiments différents selon les situations. Dans ce qui suit, plusieurs traits de caractère vous seront présentés qui pourront plus ou moins vous correspondre. Lisez chacune de ces caractéristiques et indiquez à quel point vous êtes en accord ou en désaccord avec la proposition en cochant la case correspondante. »

Whether or not I get to be a leader depends mostly on my ability.
To a great extent my life is controlled by accidental happenings.
I feel like what happens in my life is mostly determined by powerful people.
Whether or not I get into a car accident depends mostly on how good a driver I am.
When I make plans, I am almost certain to make them work.
Often there is no chance of protecting my personal interests from bad luck happenings.
When I get what I want, it's usually because I'm lucky.
Although I might have good ability, I will not be given leadership responsibility without appealing to those in positions of power.
How many friends I have depends on how nice a person I am.
I have often found that what is going to happen will happen.
My life is chiefly controlled by powerful others.
Whether or not I get into a car accident is mostly a matter of luck.
People like myself have very little chance of protecting our personal interests when they conflict with those of strong pressure groups.
It's not always wise for me to plan too far ahead because many things turn out to be a matter of good or bad fortune.
Getting what I want requires pelasing those people above me.
Whether or not I get to be a leader depends on whether I'm lucky enough to be in the right place at the right time.
I can pretty much determine what will happen in my life.
I am usually able to protect my personal interests.
Whether or not I get into a car accident depends mostly on the other driver.
When I get what I want, it's usually because I worked hard for it.
In order to have my plans work, I make sure that they fit in with the desires of people who have power over me.
My life is determined by my own actions.
It's a chiefly matter of fate whether or not I have a few friends or many friends.

TABLE A.4 – Internality, Powerful others, and Chance Scale, évaluant le locus de contrôle.

Le questionnaire SSS (*Sensory Suggestibility Scale*) mesure la propension d'un individu à être receptif ou influencé par la suggestion dans sa perception sensorielle. Les instructions qui accompagnaient le questionnaire SSS sont les suivantes :

« Pour cette partie, veuillez appeler un expérimentateur pour la suite des instructions. Après cela, veuillez répondre avec la réponse qui s'approche le plus du niveau des sensations ressenties pour chaque exercice. »

Cette métrique est constitué d'un ensemble de dix exercices à réaliser avec un expérimentateur suivi d'un questionnaire associant chaque exercice à une ou deux questions. Pour chaque question, les participants pouvaient choisir parmi 5 réponses : Pas de sensation - Sensation légère - Sensation moyenne - Sensation forte - Sensation très forte. Nous rendons ci-dessous une version traduite du script utilisé pour les passations.

Script expérimentateur

Le but des exercices qui vont suivre est de tester votre sensibilité à différents types de stimuli sensoriels, comme le toucher, le goût et l'ouïe. Vous allez ainsi prendre part à 10 exercices simples simulant différentes modalités sensorielles, et vous devrez ensuite évaluer la force de la sensation que vous ressentez.

Pour certains de ces exercices, il est possible que vous ne soyez pas certain si la sensation était réelle ou si vous l'avez imaginée. Le cas échéant, n'y accordez pas trop d'importance car ceci est tout à fait normal. Nous ne sommes pas toujours conscient des stimuli que nous percevons. Dans les exercices qui suivent, certains stimuli peuvent faire émerger des phénomènes comme des sensations persistantes (càd une perception qui persiste après que le stimulus ait pris fin), ou de synesthésie (càd l'association de deux sens). Ces sensation peuvent être très subtiles. Il convient de souligner que ce test n'évalue pas votre performance, et que vous n'avez pas besoin de vous forcer à ressentir ces sensations ; au contraire, nous sommes purement intéressés par ce que vous ressentez réellement.

Comme les sensations provoquées peuvent varier en intensité d'un individu à un autre, nous vous fournirons un questionnaire numérique au travers duquel vous rapporterez l'intensité de vos sensations après chaque exercice. Ce questionnaire est basé sur une échelle allant de 0 à 4 ; 0 correspondant à aucune sensation, 1 sensation faible, 2 sensation moyenne ou modérée, 3 sensation forte, et 4 très forte sensation.

Avant chaque exercice, vous serez informé de son nom, des instructions exactes pour le réaliser, et des sensations auxquelles vous devrez faire attention. Plusieurs exercices étant composés de deux parties, vous devrez donc parfois faire attention à deux formes de sensations différentes. Les exercices avec deux sensations différentes vous seront clairement indiqués. Nous vous de plus ferons la démonstration de chaque exercice pour que cela soit clair pour vous.

Enfin, nous vous demandons de fermer les yeux durant les exercices, afin de mieux vous concentrer sur les sensations ressenties. Avez-vous des questions ? Sinon, nous allons commencer.

Bruits de l'océan

Durant l'exercice qui va suivre, vous devrez essayer d'entendre le bruit que vous pouvez entendre lorsque vous amenez un coquillage à votre oreille.

Je vais tout d'abord vous faire une démonstration de l'exercice.

Je bouche mon oreille gauche avec mon index, afin de l'isoler des bruits extérieurs. Je ferme ensuite ma main droite et couvre mon oreille droite. Lorsque vous vous concentrez sur les sons qui arrivent dans votre oreille droite, vous pourrez peut-être les entendre comme des bruits de vagues.

Nous allons désormais commencer l'exercice.

Bouchez votre oreille gauche avec votre index. Couvrez votre oreille droite avec votre main à moitié fermée. Fermez les yeux et concentrez vous pour voir si vous entendez des bruits de vagues (10 secondes).

Veillez évaluer vos sensations en répondant à l'item correspondant sur le questionnaire.

Provocation d'un goût sucré et d'un goût salé

Cet exercice comprend deux parties.

Les différentes catégories de saveur, comme le salé, le sucré, l'acide ou l'amer, sont ressentis à partir de différentes parties de la langue. Par exemple, la sensation du salé est perçue majoritairement et de façon plus intense sur les bords extérieurs, tandis que le bout de la langue réagit plus fortement aux goûts sucrés. La sensation de goût peut souvent être déclenchée en touchant les parties mentionnées de la langue, et parfois, une légère pression de la langue contre les dents peut provoquer la sensation de goût. Dans cet exercice, nous allons essayer de provoquer une sensation de salé, puis une sensation de sucré.

Avant que nous commençons l'exercice, vous devez avaler plusieurs fois votre salive de neutraliser tout goût qui pourrait encore être présent.

Cette fois, nous allons commencer l'exercice tout de suite.

Veillez fermer les yeux, puis frottez les bords extérieurs de votre langue contre vos dents. Concentrez-vous pour voir si vous ressentez un goût salé. (10 secondes)

Veillez évaluer vos sensations en répondant à l'item correspondant sur le questionnaire.

Veillez avaler votre salive à nouveau plusieurs fois. Maintenant fermez encore les yeux et frottez le bout de votre langue contre vos dents de devant. Concentrez-vous pour voir si vous ressentez un goût sucré. (10 secondes)

Veillez évaluer vos sensations en répondant à l'item correspondant sur le questionnaire.

Picotement dans la main

La circulation sanguine de la main augmente significativement lorsque l'on secoue sa main vigoureusement. Cela peut mener à une sensation de picotement lorsque la main est au repos le long du corps ensuite.

Je vais tout d'abord vous faire une démonstration de l'exercice.

Je ferme mes yeux et secoue ma main énergiquement 5 fois environ. Je la laisse ensuite pendre le long de mon corps et je me concentre pour voir si je ressens une sensation de picotement dans ma main droite.

Nous allons désormais commencer l'exercice.

Veillez fermer les yeux. Secouez énergiquement votre main droite 5 fois environ. Laissez la ensuite pendre le long de votre corps, et concentrez-vous pour voir si vous ressentez une sensation de picotement dans votre main, et si c'est le cas, l'intensité de la sensation. (10 secondes)

Veillez évaluer votre sensation en répondant à l'item correspondant sur le questionnaire.

Perception du pouls

Vous devez savoir que le pouls est présent et perceptible dans tout le corps humain, et que l'on peut parfois le ressentir assez fortement lorsque l'on fait du sport par exemple. Dans cet exercice, nous allons essayer de ressentir notre propre pouls avec le bout de nos doigts. Tout d'abord, prenez votre pouls avec l'index et le majeur de la main droite au niveau de votre tempe, qui est un endroit où il est aisé de le percevoir. Essayez de le prendre maintenant. Hochez la tête lorsque vous l'avez trouvé. Demandez-moi si vous avez besoin d'aide pour le trouver.

Je vais tout d'abord vous faire une démonstration de l'exercice.

Je frotte tout d'abord les bout de mes doigts (index et majeur) avec un coton imbibé d'alcool, ce qui va sensibiliser les récepteurs sous la peau. Pour avoir une idée de mon pouls, je le prends avec l'index et le majeur sur ma tempe droite. A présent, j'enlève mes doigts, puis je

me concentre pour voir si je peux ressentir les pulsations dans le bout de mes doigts (index et majeur), et si je le peux, à quel point la sensation est forte.

Nous allons désormais commencer l'exercice.

Frottez le bout de vos deux doigts avec le coton imbibé d'alcool. Prenez votre pouls sur votre tempe droite et fermez les yeux. Concentrez-vous complètement sur les pulsations de votre pouls. (10 secondes)

Enlevez maintenant vos doigts de votre tempe et concentrez-vous pour voir si vous ressentez des pulsations dans le bout de votre index et de votre majeur, et si c'est le cas, à quel point la sensation est forte. (10 secondes)

Veillez évaluer votre sensation en répondant à l'item correspondant sur le questionnaire.

Perception acoustique du pouls

Dans cet exercice, nous allons essayer de percevoir le pouls que nous ressentons à notre temps de façon acoustique (sonore). Ceci peut être un exemple d'effet persistant de synesthésie, c'est à dire d'une stimulation tactile perçue simultanément comme un son. Veuillez prendre votre pouls au niveau de votre tempe droite comme précédemment avant que je vous montre l'exercice. Hochez la tête lorsque vous l'avez trouvé.

Je vais tout d'abord vous faire une démonstration de l'exercice.

Tout d'abord, je prends mon pouls avec mon index et mon majeur au niveau de ma tempe droite. J'essaye ensuite de percevoir mon pouls le plus clairement possible et de compter les pulsations. Ensuite, j'enlève mes doigts de ma tempe, et me bouche l'oreille droite avec l'index gauche pour ne pas avoir de bruits qui pourraient surimposer à la perception acoustique. Je me concentre enfin afin d'entendre les pulsations.

Nous allons désormais commencer l'exercice. Trouvez votre pouls sur votre tempe droite avec votre index et votre majeur. Une fois trouvé, fermez les yeux. Essayez de ressentir les pulsations aussi clairement que possible, puis comptez-les. Variez que vous appliquez sur votre tempe afin d'avoir une idée précise de la force de votre pouls. A présent, bouchez votre oreille droite avec votre index gauche, et concentrez-vous pour voir si vous pouvez entendre les pulsations. (10 secondes)

Veillez évaluer votre sensation acoustique en répondant à l'item correspondant sur le questionnaire.

Sensations de chaleur et de picotement dans la main

Cet exercice comprend deux parties.

Dans la première partie, vous essayerez de ressentir une sensation de chaleur dans votre main droite. Pour cela, vous devez avoir les mains chaudes. Si vous avez les mains froides, frottez-vous les mains et réchauffez-les. Afin de faciliter la perception de la chaleur, nous avons besoin d'un morceau d'isolant. Comme vous le savez peut-être, cet isolant est utilisé pour isoler dans des constructions. Comme la perception de la chaleur peut être accompagné d'une sensation de picotement, nous verrons si nous pouvons ressentir cette sensation de picotement dans la seconde partie de l'exercice.

Je vais tout d'abord vous faire une démonstration de l'exercice.

Je pose un morceau d'isolant devant moi et pose ensuite ma main à plat dessus. Je me concentre pour voir si je ressens une sensation de chaleur dans ma main droite. Après un court moment, je me concentre pour voir si je peux ressentir une sensation de picotement en plus de la sensation de chaleur.

Nous allons désormais commencer l'exercice.

Posez le morceau d'isolant devant vous et posez votre main droite à plat dessus. Fermez maintenant vos yeux et concentrez-vous pour voir si vous ressentez une sensation de chaleur dans votre main droite. (10 secondes)

Concentrez-vous maintenant pour voir si vous pouvez ressentir une sensation de picotement dans votre main droite en plus de la sensation de chaleur. (10 secondes)

Veillez évaluer vos sensations en répondant aux items correspondants sur le questionnaire.

Sensation de froid et d'engourdissement dans la main

Dans cet exercice, nous vous demandons à nouveau de vous concentrer sur deux sensations différentes. Ces deux sensations sont une sensation de froid et une sensation d'engourdissement dans la main.

Comme vous le savez probablement, les dentistes utilisent des bombes de froid pour refroidir et anesthésier partiellement une zone de la bouche. Comme certaines parties du corps sont connectées par un réseau nerveux très dense, nous voulons voir à quel point une sensation de froid et d'engourdissement sur l'avant-bras peut se ressentir dans la main.

Je vais tout d'abord vous faire une démonstration de l'exercice.

Je dénude mon bras droit jusqu'au coude et le maintient devant mon corps. Je touche l'intérieur de l'avant-bras avec un morceau de métal froid. J'enlève le morceau de métal et me concentre sur la sensation de froid dans la zone de contact et sur la façon dont la sensation de froid et d'engourdissement irradie jusqu'à ma main.

Nous allons désormais commencer l'exercice.

Veillez dénuder votre bras droit jusqu'au coude et le maintenir devant vous. Prenez le morceau de métal avec l'autre main et apposez-le à l'intérieur de votre avant-bras. Fermez les yeux. Enlevez le morceau de métal et concentrez-vous maintenant sur la sensation de froid sur l'avant-bras et si vous pouvez ressentir une sensation de froid et d'engourdissement irradiant dans votre main. (10 secondes)

Veillez évaluer votre sensation en répondant à l'item correspondant sur le questionnaire.

Perception du contour des doigts et d'une couleur bleuâtre

Cet exercice comprend deux parties.

Dans la première partie, nous essayons de percevoir les contours de nos doigts les yeux fermés, ce qui est un exemple d'effet persistant. Pour la deuxième partie, il est important de savoir que la moindre pression sur le globe oculaire provoque une sensation de couleur. Comme nous ne sommes que rarement conscient de cette sensation, peu de personnes savent que cette sensation est bleuâtre. Dans la seconde partie de l'exercice, vous allez essayer de provoquer cette sensation de couleur bleuâtre en appuyant légèrement avec vos doigts sur vos yeux fermés.

Je vais tout d'abord vous faire une démonstration de l'exercice.

J'étends mon bras droit devant moi, et observe avec attention le contour de mes doigts. Je me couvre maintenant l'oeil gauche avec ma main gauche et approche ma main droite de mon oeil droit, en gardant ma vision fixée sur mes doigts. Je ferme ensuite les yeux et me concentre pour voir si je peux toujours voir le contour de mes doigts.

Ensuite, j'appuie légèrement avec mes doigts sur mon globe oculaire droite (en gardant l'oeil fermé), et me concentre pour voir si je peux voir une couleur bleuâtre.

Avant de réaliser l'exercice vous-même, mettez ce bandeau pendant quelques instants. Cela va sensibiliser vos yeux pour les exercices. Je vous dirai quand l'enlever. (15 secondes)

Nous allons désormais commencer l'exercice.

Etendez votre bras droit devant vous et observez avec attention le contour des doigts de votre main. Couvrez votre oeil gauche avec la main gauche. Fixez votre main droite à hauteur de votre oeil, et ramenez-la peu à peu jusque devant votre oeil droit. Fermez ensuite les yeux. Concentrez-vous pour voir si vous pouvez toujours voir le contour de vos doigts. (10 seconds)

Gardez les yeux fermés et appuyez légèrement sur votre globe oculaire droite avec le bout de vos doigts. Concentrez-vous ensuite pour voir si vous pouvez voir une couleur bleuâtre. (10 secondes)

Veillez évaluer votre sensation en répondant à l'item correspondant sur le questionnaire.

Perception de chaleur sur le visage

Pour l'exercice suivant, nous allons essayer de percevoir la chaleur projetée par une lampe de poche sur le visage. Comme vous le savez peut-être, les ampoules émettent un peu de chaleur en plus de la lumière (sauf dans le cas de LED), et cette chaleur peut être ressentie sur certaines parties sensibles de la peau.

Je vais tout d'abord vous faire une démonstration de l'exercice.

Je prends cette lampe de poche et l'allume. Ensuite, je l'approche à une dizaine de centimètres de ma joue. Je me concentre toute mon attention sur la perception de la chaleur sur ma joue.

Nous allons désormais commencer l'exercice.

Veillez prendre et allumer la lampe de poche. Approchez-la de votre joue, à environ 10 centimètres. Fermez les yeux et concentrez-vous pour voir si vous pouvez ressentir une sensation de chaleur sur votre joue. (10 secondes)

Veillez évaluer votre sensation en répondant à l'item correspondant sur le questionnaire.

Perception de la chaleur sur le visage

Ce dernier exercice concerne la perception de la chaleur qui peut résulter de la projection d'une lampe de poche sur le visage. Comme vous le savez certainement, les ampoules électriques n'émettent pas seulement de la lumière, mais aussi une petite quantité de chaleur, qui peut être ressentie sur les zones sensibles de la peau.

Je vais d'abord vous montrer l'exercice

Je prends la lampe de poche et je l'allume. Je l'approche ensuite de ma joue, à une distance d'environ 5 cm. Je concentre toute mon attention sur la perception de la chaleur sur ma joue.

Nous allons désormais commencer l'exercice.

Prenez la lampe de poche et allumez-la. Approchez la lampe de poche de votre joue, à une distance d'environ 5 cm. Fermez les yeux et concentrez-vous pour voir si vous ressentez une sensation de chaleur sur votre joue. (10 secondes)

Veillez évaluer votre sensation en répondant à l'item correspondant sur le questionnaire.

Fin du script

ROLE OF HAPTIC FEEDBACK FOR EMBODIED INTERACTIONS IN VIRTUAL REALITY

In this thesis, entitled « **Role of haptic feedback for embodied interactions in virtual reality** », we present our work investigating the influence of *haptic feedback*, that one may understand as the sense of touch, during interactions in virtual reality (VR), and the links that exist between haptic and *embodiment*, that describes how user perceive and own their virtual representation, the *avatar*. Our work was carried out within the Avatar Challenge, led by 6 Inria project-teams, with the objective of designing better embodied avatars, with increased interactive possibilities. During the Avatar Challenge, a number of works dealing with the notions of avatars, user experience and interaction have been carried out [66, 67, 77, 78], and the works we present here follow on from them, adding especially the notion of multisensoriality.

Virtual reality & personal motivations

The growth that VR is undergoing, in terms of either popular enthusiasm and investments, actualizes a vision that originally came from science fiction. One might think, for example, of William Gibson's *Neuromancer*, Stephenson's *Snow Crash* or *The Virtual Samurai*, or more recently, of *Ready Player One*. Some imagined VR as the opportunity to improve the human through the machine, as is the case in *Ghost in the shell*, by Masamune Shirow. These works, the particularities of their respective universes set aside, saw in VR the potential to transcend human, often by abolishing the limits of the biological body and expanding the boundaries of human's immediate environment. But, while it was not until the industrial revolution that these works of fiction based on machine-based technologies emerged, the narratives they bring into play

were already scattered throughout the mythological narratives of different civilisations throughout history. The story of Icarus, widely spread in our cultures which inherit from Greco-Latin mythology, the Hindu *Avatâra*, which will give rise to the notion of avatar, or even the various myths evoking the metamorphoses of Loki, in Norse mythology, show that mankind has always conceptualised a certain trans-formation, going beyond the form attributed to them at birth.

From a personal point of view, we have always been fascinated by mythology and literary fiction, by everything these works contained that was truly fantastic, but a fascination tinged with a childhood disappointment : the world around us seemed to exclude the imaginary world and its limitless possibilities. It was through the works we mentioned above, among others, that we discovered the concept of VR. This discovery would become a passion, and consequently, our object of study. In our eyes, and although not limited to this, VR is an extremely powerful tool, a medium for studying humans, their cognitive, perceptual and behavioural abilities. As mentioned above, virtual reality allows us to break free from reality on several levels : it allows us to **create new ways of interacting with the virtual environment** (it is possible to control objects by telekinesis in VR for example), and it also allows us to **operate in a virtual environment through a body that is not our biological body**, a body that we call *avatar*.

In this manuscript, we refer to the definition of VR proposed by Arnaldi *et al.* [12] : « Virtual Reality is a technical and scientific area making use of computer science and behavioral interfaces in order to simulate the behavior of 3D entities in a virtual world that interact in real time among themselves and with the user in pseudo-natural immersion through sensory-motor channels »[Translation][12]. VR systems are intrinsically interactive : within a VR system, users will receive outputs from the system through their senses, and generate inputs, through their actions, which the immediate interface with the virtual environment will be the avatar. Interactions in VR are therefore a real-time, two-way exchange between the immersed user and the virtual environment (VE), mediated through the user's avatar. During an interaction, users will go through a number of psycho-physiological states, including emotions, perception and behaviour. All of these states, and their evolution over time, are referred to as user experience (UX) [240]. The user experience is often influenced by various factors, such as usability, the relevance of the information presented, the speed of response of the system, the level of multisensory integration, etc.

User experience & embodiment

Even though the early days of VR initially saw a growing interest in innovation in terms of technology and performance, and research initially focused heavily on the technical aspects of immersive technologies, the democratisation of VR headsets and hardware, and the availabi-

lity of development tools accessible to all, allowed for some systematic studies of VR, and for VR-related fields of study to broaden. Today, one of the key objectives of immersive technologies is to offer users meaningful experiences [87, 154, 170]. Their feeling within the VE, their experience, then becomes a main issue for the researchers. This feeling is characterised by the notion of user experience. In the manuscript, we adopt the definition of user experience proposed by Schrepp et al. [2014] applying as "a set of distinct quality criteria that include classical usability criteria, such as efficiency, controllability or learnability, and non-goal oriented or hedonic quality criteria, such as stimulation, pleasure of use, novelty, emotions or aesthetics". There are a large number of user experience models, which have been proposed mainly over the last three decades, but we will only go into detail about the main ones. We can mention *immersion*, *presence*, *incarnation* or engagement as examples.

When interacting with a VE, the outputs generated by the system will be processed by the user's senses, which in return, makes the user believe they are actually *present* in the virtual environment. This illusion of *being there* [106] in the VE is referred to as **presence**. As illustrated by Slater [219, 222], feeling present in a VE is a perceptual illusion, not a cognitive one, that results from sufficient stimulation of the perceptual system for it to judge, before cognition, that the sensory stimulation could be real. Realism within a VE can be enhanced through technical and technological specifications of the system : higher resolution for headsets, more degrees of freedom for avatars, spatialized audio feedback, and so on. This aspect of VEs is referred to as **immersion**. As such, presence is a perceptual response to immersion [220].

With the mass usage of head-mounted devices (HMDs) for VR systems, as the vision of the biological body is blocked when worn, the relationship between a user and their biological body has become more tenuous, while the perception of the avatar, through first-person point of view, has become more predominant. This leads to attributing the sensations felt during the experience as coming from the avatar and not from the biological body. The relationship between the biological body and the avatar has thus become a crucial aspect for user experience in immersive settings with HMDs. This relationship is called **virtual embodiment**. The process of embodiment, in which a person will appropriate and consider a foreign body as their own, has been initially studied in cognitive science, particularly within the framework of embodied cognition, which emphasises the role of sensorimotor loops in the development of cognition [74]. Historically, embodiment towards a foreign body was demonstrated in a now paradigmatic experiment, the *Rubber Hand Illusion* (RHI) [30]. In this experiment, was shown the possibility of inducing an error in the perception of a limb (a hand in the initial experiment) of the participants and a feeling of possession towards a substitute. Botvinick & Cohen achieved this result by using tactile stimulation on a dummy limb, correlated with synchronous stimulation of the same nature on the participants' real hand, the sight of which was blocked. This experiment provided a first paradigm in the understanding of body patterns, embodiment and body awareness and multisensory integration. Since then, many studies further examined the factors that enable,

influence, or degrade the sense of embodiment in VEs [78, 94, 126, 252]. Virtual embodiment can emerge through congruent *multisensory integration* [131, 203], and can be influenced by the appearance of avatars [10, 18, 95], among other factors (see the contribution of Fribourg addressing the factors of influence of virtual embodiment [76]). Multisensoriality thus is a crucial aspect when designing immersive experience in VR. Current HMDs propose head-tracking through 6 degrees of freedom (DoF), audio feedback, visual feedback, and now, controllers also integrate some kind of haptic feedback, through vibrations, that is still lacking compared to the visuomotor integration currently available.

Haptics

As mentioned, immersive technologies today rely primarily on the simulation of sight and hearing. While it is still complicated to design solutions to simulate taste or smell, a lot of VR research is now focusing on integrating the sense of touch. Haptics is a primary sense in interactions : many of them are based on the contact between our fingers or hands and the environment. Haptics thus covers different modalities, encompassing both tactile and cutaneous information - at the level of contact between the skin and the object - and kinaesthetic information - at the level of the joints to perceive pressure, effort, and movement. The different modalities of haptic feedback are based on human perception, encompassing cognitive, motor, mechanical and sensory subsystems. Studying the physiological aspect of haptics is called human haptics. The majority of haptic interactions, for humans, through manipulation and touch, are based on the hand, and, and as such, hands comprise the most of cutaneous mechanoreceptors within the whole body (approximately 40%), along with the lips. When the human body is represented with proportions based on the size of each part in the motor cortex, the resulting representation shows an hypertrophy of the hands and the lips, and makes up for quite an intriguing human-like creature : the Penfield Homunculus. It is possible to classify the sensory information perceived by the brain during contact between the hand and an object into two categories. The first category will contain the *tactile information*, which will derive from the responses of the mechanoreceptors of the skin (cutaneous information) and describe the perception of contact with the object. The second category will contain the kinesthetic information. These correspond to the sensitivity of the movement of the limbs and the sensitivity of the forces associated with it [105]. Proprioception, which is also of interest to us, refers to sensory information about the overall state of the human body, including cutaneous and kinesthetic information. It can also be understood as the deep perception of the position of our body and limbs.

When it comes to haptics in immersive virtual environments (IVEs), the dichotomy between tactile and kinesthetic information is made between tactile feedback and force feedback. There are several approaches to implement haptic feedback, whether tactile or force feedback, in

IVES, that are usually categorized as either *active*, *passive*, and *pseudo-haptics*. **Active haptics** refers to haptic devices that render and generate stimuli computed through algorithms, stimuli to be transmitted to users through the device, whether by electronic, mechanical or other means. Controllers that come with consumer grade HMDs propose vibrations as a kind of vibrotactile feedback, and as such, are an example of widespread active haptic devices, though the feedback remains limited. There are many propositions of haptics devices, and describing all of existing solutions is beyond the scope of our work. We refer to more extensive reviews of active haptic technologies by Culbertson [55], Perret *et al.* [186] and Pacchierotti *et al.* [178], and more broadly, to the Haptipedia database [210]. **Passive haptics** refers to the set of techniques that provide haptic feedback using the inherent physical properties of physical objects, such as their shape, surface texture, etc. This type of solution has the advantage of being technologically non-invasive : there is no need for a computer-controlled device. Recent work now seeks to reconcile the passive haptic approach with that of active haptics, with real robotic objects that can adapt to the environment and to the user's interactions [32]. These haptic devices are based on the encounter between the user and the physical environment (*encounter-type haptic feedback*). This work opens up new perspectives, potentially allowing users' everyday environments to be adapted to IVEs incorporating adaptable and varied haptic feedback. We refer to the review of Mercado *et al.* [162] for more details on encounter-type haptic devices. **Pseudo-haptics** refers to the set of techniques that create the illusion of haptic sensations in IVE, without the use of physical haptic devices [136]. Often, pseudo-haptic feedback relies on the malleability of human perception. This can be done by using visual, audio or vibrotactile stimuli that are synchronised with the user's interactions with the IVE. Implementing a pseudo-haptic feedback requires an already present sensory feedback, which is later manipulated by exaggerating or adding other conflicting sensory information. This type of feedback can therefore be integrated in parallel with an implementation of any passive or active haptic feedback, such as a passive feedback coupled with pseudo-haptic feedback [16]. Pseudo-haptic feedback is particular : it is based on the predominance of visual information at the expense of other information, such as proprioception. Haptic perception is, *in fine*, a synthesis and interpretation by our brain of all the signals it receives and all the actions we perform (or want to perform) [86]. As such, there exists a some lag, some difference between the signals generated by an haptic device, and the user's resulting perception. The resulting illusions exist for both proprioceptive and vibrotactile information. With vibrotactile information, it becomes possible to create the illusion of moving and *spatialized vibrations*. There are three main illusions for eliciting such an effect : the saltation effect [237], apparent dynamic tactile patterns [116], and the *funneling* [6, 22] effect. The funneling effect is an illusion in which several vibrations from different vibrators are perceived as a single vibration whose position lies between the vibrators.

User experience is a crucial aspect of interaction design, and particularly haptic interaction design [110]. Improving the technical and technological properties of IVEs improves immersion, and thus should enhance user experience. But in reality, pushing the realism of one or some of

the features of the IVR without improving the others can be detrimental to user experience. This is illustrated in particular, for the visual aspect, with the phenomenon of the valley of the strange [167], where going too far in visual realism affects the perception of human users looking at the highly realistic face. This notion has been studied in the context of haptic interaction by Berger *et al.* [25], who proposes an extension with the *valley of the uncanny* of touch. In their work, they argue that the feedback experienced during haptic interaction must be consistent with other sensory feedback (visual, auditory) for it to enhance the user's experience.

Scope & research axes

In this work, we are interested in haptic feedback and its integration into IVEs. In particular, we want to study the influence of haptic feedback on virtual embodiment.

As we mentioned, virtual embodiment is a phenomenon that results from the congruence of the sensations felt by a user : when what one sees matches what one feels, then the feeling of embodiment towards the avatar can emerge. Although there are objective signs of a user's sense of embodiment – such as galvanic skin response, or reactions to threats – embodiment is entirely subjective, and is very often assessed by means of questionnaires. As with the feeling of all sensory information, there is considerable inter-individual variability in the subjective perception of embodiment. Any research hypothesis must be validated experimentally, through controlled experiments. When dealing with user experience, or more broadly with human factors, there are a number of choices that researchers must make during the process of designing a controlled experiment. Among these choices, the type of experimental protocol is crucial : a study can be carried out according to a within-subjects or between-subjects protocol. Each protocol has its own advantages and disadvantages. In a within-subjects protocol, each experimental condition is repeated for all participants, which can lead to learning effects for example, whereas in a between-subjects protocol, each participant is assigned to a group, and will only be exposed to an experimental condition associated with that group, which can introduce biases related to inter-individual differences. Thus, in order to set up a between-subjects protocol, it is necessary to ensure that we can create homogeneous groups with regard to the variable we wish to study. We wanted, in the first instance, to look at the methodological practices for studying embodiment. The study of embodiment in ILE is at the intersection of several research fields, and these different disciplines have their own paradigms and methodologies. Thus, our first research question concerns the methodological practices for studying virtual embodiment.

Q1 : How to correctly set up experimental protocols to study virtual embodiment ?

With these methodological considerations in mind, we then turn our attention more directly to the sense of embodiment and its relationship to multisensory integration. Whilst there is a wide range of studies and data that demonstrate the necessity of multisensory integration for the emergence of embodiment, with regards to haptic feedback, its integration in VR can take many forms and there is as yet no comparison of which of the different haptic modalities will most enhance embodiment. Our second research question therefore focuses on the different haptic modalities.

Q2 : What forms of haptic feedback would bring forth the highest sense of embodiment in IVR ?

Finally, when one looks at VR interactions today, it becomes apparent that VR experiences available to the general public are mainly carried out through controllers. These controllers incorporate little haptic feedback, in the form of vibrations. Controllers have the advantage of being inexpensive and not specialized for a particular interaction, as may be the case in haptic solutions proposed in research projects or state-of-the-art commercial products. Our final research problem is thus concerned with proposing haptic solutions that can enrich the user experience while being as versatile in their context of use as current VR controllers, and from this problem stems our final research question.

Q3 : How to provide richer haptic feedback in VR for interactions based on controllers ?

Those three research axes are detailed in the following subsections.

Experimental methodology for virtual embodiment

The first axis tackles methodological issues. Studying user experience within IVEs is a cross-disciplinary field, which brings together different domains (computer graphics, human-computer interaction, behavioural and cognitive psychology, etc.), each of which has its own paradigms and investigative approaches. Users of immersive systems perceive EVIs differently from one individual to another [34, 62], and will possibly immerse themselves at different intensities, and therefore embody the avatar to varying degrees. Indeed, it can be noted, empirically, that when immersive experiments on embodiment are conducted, some participants will easily believe in the illusion, while others remain very sceptical. This may seem obvious at first glance, but begs for subsequent questions : for an experiment studying virtual embodiment, that measures embodiment through a questionnaire, participants thus will feel embodied to varying degrees, notwithstanding the experimental conditions of the experiment. If the study is conducted

following **within-subjects design**, participants are subjected to several experimental conditions, and for each condition, will repeat the embodiment questionnaire. These questionnaires are quite explicit as to what the experiment is investigating, and can lead to an experimental bias, the experimenter bias [198]. This bias occurs when participants can infer the research questions being investigated in the experiment they are taking part in, and modify their behaviour according to what they think is expected of them. It might then be argued that embodiment studies would be better off conducted using a **between-subjects design**. However, with such design, participants are separated into arbitrary groups, groups whose homogeneity in terms of embodiment the experimenters cannot be sure of. Thus, any observable results from such an experiment will be mixed with the noise of inter-individual differences - were the experimental conditions different, or was it the groups formed? In theory, if the groups are large enough and created by drawing randomly from the target population, then there is statistically little chance of observing differences between them.

To address these questions, we evaluate in chapter 3 the influence of experimental design and sample size in a virtual embodiment experiment with a single independent variable with two levels. We first report an experiment with 92 participants, in which participants were asked to perform a visuomotor task adapted from previous studies [31, 131, 158]. The experimental design included a within-subjects variable with two levels, synchronous and asynchronous visuomotor integration. The task and design were chosen so that a significant difference could be observed between the two levels, with lower embodiment scores for the asynchronous condition, as previously demonstrated [31, 131, 158]. We then assessed the influence of the number of participants and the type of experimental design on the effect size and the ability to find the expected significant difference between conditions. We used a Monte Carlo method on different subsets of the collected data to simulate a number of participants ranging from 10 to 92 in the within-subjects design and from 12 to 46 per group in the between-subjects design. Taken as a whole, our results lead us to question current methodological practices. We failed to replicate for both type of design what is a commonly accepted field truth. We were also able to highlight the crucial nature of sample sizes and effect sizes in the ability to detect effects in virtual embodiment experiments.

As future work, we also further describe a methodology to address issues related to individual differences in VR. In the experiment that was conducted, we included several post-experimental questionnaire, besides the embodiment questionnaire that was used, that assessed several metrics that have been correlated with embodiment. The objective was to gather data correlated with embodiment that would allow us to create a questionnaire, based on those metrics, that would be able to predict embodiment in individuals. This new questionnaire would serve as a tool to enable researchers studying virtual embodiment to anticipate, or at least overcome, the biases introduced by interpersonal differences when designing a between-subjects protocol.

This questionnaire should be able to anticipate whether a group arbitrarily formed in a between-subjects protocol is homogeneous or not.

Modalities of haptic feedback and embodiment

With our second axis of research, we aim at comparing different haptic modalities and their influence of embodiment. Multisensory integration in IVEs plays a crucial role in bringing forth virtual embodiment. Historically, in the RHI, the factor that enabled ownership of the rubber hand are the synchronous visuotactile stimulations on both the real hand and the fake one. The original study, and subsequent replications [121, 203] also showed that asynchronous stimulation, or insufficient resemblance between the fake limb and participants' hand could prevent embodiment from emerging. As such, coherent haptic stimulation, coupled with visual feedback from HMDs, has been shown to be a sufficient condition to elicit embodiment in immersive experiences [79, 134, 192]. Yet, haptic feedback can cover different perceptual cues, such as tactile or vibrotactile information, and force feedback, and there has been little interest to compare different haptic cues in relation to virtual embodiment.

In chapter 4, we explore the effect of different kinds of haptic feedback on the sense of embodiment in IVEs. We want to see if there is a kind of haptic feedback that is more suited to the designed task in terms of embodiment and performance. We especially stress on the *ecological* aspect of each kind of feedback, in the context of the task and the participants' expectations. A controlled experiment, with similar interactions as the study by [36], was designed in which participants had to complete a painting task. There were two haptic based conditions, one with force feedback, and one with vibrotactile feedback, and a control condition with no haptic feedback. We suggest that force-feedback matched reality more closely and was a more ecological kind of feedback, while vibrotactile feedback could be considered more symbolic. Embodiment was assessed through a questionnaire, while the participants' We hypothesized that haptic feedback would increase embodiment, and that the more ecological feedback would increase embodiment more than the symbolic feedback, thus that force feedback would provide higher embodiment than vibrotactile feedback. Results show that embodiment is related to the form of haptic feedback, as force feedback brings about a significantly higher overall sense of embodiment compared to no haptic feedback.

VR controller with spatialized vibrotactile feedback

Finally, in the last axis of research, we explore new means of integrating haptic feedback for controller-based interactions in VR. Today, when considering haptic feedback in immersive contexts for the general public, two possibilities emerge : to obtain state-of-the-art haptic

peripherals, still in the development phase and adding a significant cost, such as Dexmo citemegu2016dexmo, or to make do with the haptic feedback provided in the controllers accompanying HMDs. For such controllers, the haptic feedback is exclusively vibrotactile. The latest generation of consumer-grade controllers, such as the Valve Index [248] incorporate high precision resonant linear actuators (LRAs), which can refine the vibrotactile feedback but remain relatively basic. In addition, the feedback is unique, vibrating the entire controller chassis. Yet, it is possible to enrich the vibrotactile feedback included in controllers with equivalent design, by leveraging knowledge in perceptual illusions. With multiple actuators, it becomes possible to spatialize vibrations in real time during interactions with the VE, with effect such as the *funneling* effect, described earlier.

In chapter 5, we propose a design for a VR controller that renders spatialized vibrotactile feedback on the surface of the frame. We present a 3D printed modular frame that can integrate up to 5 actuators with each module, and propose a layout with ten actuators located on sensitive parts of the hand. The spatialized vibrations were based on the *funneling* effect, extended in two dimensions over the surface of the frame. We present the model the vibrations were based on, inspired from previous work [115, 146]. We present three controlled experiments that aimed at evaluating and validating the design of the controller and the model for spatialized vibrations. In the first and second experiments, we focused on perception, and the ability of users to locate and follow spatialized vibrations rendered through the prototype. In the first experiment, vibrations were rendered all over the frame, in a temporally static manner (vibrations were punctual and would not move over time). Participants were tasked with feeling then locating the different vibrations. In the second experiment, the emphasis was put on dynamic patterns of vibrations. Users were expected to follow vibrating patterns, and were tasked to discriminate among 12 vibration patterns, such as cercles, lines, and spirals. Finally, in the last experiment, we wanted to assess the benefits of spatialized feedback over haptic experience, and compared our prototype to a consumer grade VR controller. In this experiment, participants had to interact with objects in an IVE under three conditions : the prototype with spatialized vibrations, the prototype with no spatialization, and a Valve Index controller. Taken together, our results show that the design of such a prototype is able to create spatialized vibrations that users can follow and make sense of, and that such a feedback is useful for the experience within IVEs.