

Exploration des effets de l'incarnation, de la nature d'avatar et
de ses proportions sur le jugement temporel en réalité
virtuelle

par

BILLAL MEDBOUHI

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

MONTRÉAL, LE 24 MARS 2025

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Billal Medbouhi, 2025



Cette licence [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. David Labbé, directeur de mémoire
Département de génie logiciel et des TI à l'École de technologie supérieure

M. Rachid Aissaoui, président du jury
Département de génie des systèmes à l'École de technologie supérieure

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

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

LE 24 MARS 2025

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

De belles années, pleines de sourires et de défis.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à David Labbé, mon directeur de recherche, pour m'avoir guidé tout au long de cette aventure. Dès mon premier stage, tu m'as offert l'opportunité d'explorer un domaine qui m'était alors inconnu, mais qui m'attirait déjà depuis longtemps : la santé. J'ai découvert non seulement le monde de la recherche, mais aussi une approche passionnante et rigoureuse du travail scientifique. Ces années n'ont pas toujours été linéaires, et ta patience ainsi que ta confiance m'ont beaucoup aidé. Ta confiance m'a poussé à me surpasser et je suis honoré d'avoir publié un article de conférence à tes côtés. Présenter notre projet à l'international, c'est une expérience incroyable que je n'aurais jamais imaginée!

Je remercie le LIO et toute la team Avatar que j'ai intégrée pour ces moments partagés, les discussions enrichissantes et les nombreuses inspirations que j'ai puisées auprès de vous.

Je suis fier d'être un futur diplômé de l'ÉTS et j'espère pouvoir faire rayonner mon alma mater tout au long de mon parcours.

Un immense merci à mes amis et aux participants qui ont grandement contribué à la réalisation de ce projet et bien plus.

Enfin, je tiens à remercier ma famille, qui est un véritable modèle pour moi. Chaque membre, des plus petits aux plus grands, m'inspire énormément, même si je ne le dis pas toujours. Leur soutien, leur aide précieuse et leur confiance en mes capacités ont façonné la personne que je suis aujourd'hui. Je souhaite beaucoup de réussite à mes frères et ma sœur.

L'association entre les études, la recherche, les jobs étudiants et bien d'autres responsabilités a été un véritable challenge. J'en ressors grandi, ravi, et avec un sourire jusqu'aux oreilles.

“Il y a du bien dans chaque situation.”

Exploration des effets de l'incarnation, de la nature d'avatar et de ses proportions sur le jugement temporel en réalité virtuelle

Billal MEDBOUHI

RÉSUMÉ

Le jugement temporel en réalité virtuelle (RV) est un phénomène subjectif influencé par de nombreux facteurs, notamment l'incarnation d'un avatar. Cette étude examine comment la nature de l'avatar (humain vs. Monstre Godzilla) et ses proportions corporelles (proportions humaines vs. proportions Godzilla) influencent le jugement temporel à travers deux phases distinctes : une phase passive d'attente et une phase active de marche. Dix-neuf participants ont été immergés en RV, incarnant quatre avatars combinant ces différentes caractéristiques, tandis que leur niveau d'incarnation et leur perception du temps ont été évalués.

Les résultats montrent que les scores d'incarnation étaient élevés dans toutes les conditions, mais significativement plus élevés pour les avatars humains que pour les avatars Godzilla. Cela suggère que des avatars plus proches de la morphologie réelle des participants renforcent le sentiment d'incarnation. Cependant, le jugement temporel a été différemment affectée selon les proportions de l'avatar. Lors de la phase d'attente, les participants ont davantage sous-estimé le temps lorsqu'ils incarnaient des avatars aux proportions humaines par rapport aux avatars aux proportions Godzilla. Ce résultat indique que des proportions corporelles cohérentes avec le corps réel influence l'expérience temporelle. En revanche, lors de la phase de marche, la sous-estimation du temps était globalement plus marquée, mais les différences entre les avatars étaient moins prononcées. Les résultats indiquent que plus le temps était sous-estimé, plus il était perçu comme s'écoulant rapidement, et moins les participants pensaient au temps pendant l'expérience.

Ces résultats contribuent à une meilleure compréhension de l'impact de l'incarnation en RV sur le jugement temporel. Elle met en avant l'influence des proportions corporelles sur la perception du temps, cette étude suggère que l'utilisation d'avatars aux proportions humaines pourrait moduler l'expérience temporelle des utilisateurs en RV.

Mots-clés : réalité virtuelle, incarnation d'avatar, perception du temps, estimation du temps, jugement temporel

Exploring the effects of embodiment, avatar nature, and proportions on temporal judgment in virtual reality

Billal MEDBOUHI

ABSTRACT

Time perception in virtual reality (VR) is a subjective phenomenon influenced by multiple factors, including the embodiment of avatars. This study examines how avatar nature (human vs. Godzilla-like monster) and bodily proportions (human-like vs. Godzilla-like) affect time perception across two distinct phases: a passive waiting phase and an active walking phase. Nineteen participants were immersed in VR, embodying four avatars combining these different characteristics, while their level of embodiment and perception of time were assessed.

Results show that embodiment scores were generally high across all conditions but significantly higher for human avatars than for Godzilla avatars. This suggests that avatars resembling the participant's actual morphology enhance the sense of embodiment. However, time perception was differentially affected depending on the avatar's proportions. During the waiting phase, participants underestimated time more when embodying avatars with human-like proportions compared to those with Godzilla-like proportions. This finding suggests that bodily proportions consistent with the real body influence temporal experience. In contrast, during the walking phase, time underestimation was generally more pronounced, but differences between avatars were less distinct. The results also indicate that the more participants underestimated time, the faster they perceived it to pass, and the less they thought about time during the experience.

These findings contribute to a better understanding of the impact of VR embodiment on time perception. Highlighting the influence of bodily proportions on temporal perception, this study suggests that using avatars with human-like proportions could help modulate users' time experience in VR.

Keywords: Virtual reality, avatar embodiment, time perception, time estimation, temporal judgment

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE.....	5
1.1 Réalité virtuelle et incarnation.....	5
1.1.1 Immersion et présence en réalité virtuelle	6
1.1.2 Incarnation et ses effets.....	11
1.2 Réalité virtuelle et jugement temporel	14
1.2.1 Jugement temporel hors de la réalité virtuelle	14
1.2.1.1 ...Zeitgebers.....	14
1.2.1.2 ...Attention et émotion sur le jugement temporel.....	15
1.2.2 Jugement temporel en réalité virtuelle.....	17
1.2.2.1 ...Jugement temporel et VR.....	17
1.2.2.2 ...Immersion, attention et émotions.....	19
1.2.2.3 ...Indices temporels et repères.....	20
1.2.2.4 ...Latence et surcharge cognitive et sensorielle.....	22
1.2.3 Jugement temporel et incarnation	22
1.2.3.1 ...Impact de l'incarnation partielle avec uniquement les mains virtuelles.....	23
1.2.3.2 ...Impact des degrés d'incarnation sur le jugement temporel	24
1.2.3.3 ...Impact de différents avatars virtuels	25
CHAPITRE 2 PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS	27
2.1 Objectifs	28
2.2 Hypothèses	28
CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE	31
3.1 Participants	31
3.2 Matériels	32
3.3 Environnements virtuels utilisés dans l'étude	36
3.4 Avatars.....	40
3.5 Protocole expérimental.....	43
3.5.1 Préparation des acquisitions.....	44
3.5.1.1 ...Calibration des caméras Vicon	44
3.5.1.2 ...Calibration de la plateforme de force.....	44
3.5.1.3 ...Consentement et préparation du participant	45
3.5.1.4 ...Pose de marqueurs et calibration de l'avatar	46
3.5.1.5 ...Calibration du système Pegasus.....	46
3.5.1.6 ...Habituation à la marche sur tapis roulant en RV	48
3.5.2 Déroulement des conditions.....	49

3.5.3	Mesures.....	52
3.5.3.1...	Questionnaires.....	52
3.5.3.2...	Mesures quantitatives.....	54
3.6	Analyse statistique.....	55
CHAPITRE 4	RESULTATS	57
4.1	Incarnation.....	57
4.2	Estimation du temps	59
4.3	Perception du temps	61
CHAPITRE 5	DISCUSSION	67
5.1	Incarnation.....	67
5.2	Estimation du temps	69
5.3	Perception du temps	71
5.4	Relation entre l'estimation et perception du temps	74
5.5	Limitations.....	75
CONCLUSION.....		77
ANNEXE I	Questionnaire de renseignements personnels.....	79
BIBLIOGRAPHIE.....		81

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 3.1 Participant équipé en cours d'expérience.....	33
Figure 3.2 Réplique du laboratoire de biomécanique du LIO-CRCHUM.....	36
Figure 3.3 Laboratoire de biomécanique du LIO-CRCHUM.....	37
Figure 3.4 Ville virtuelle sur Unity.....	39
Figure 3.5 Avatar virtuel se déplaçant dans la ville virtuelle avec des véhicules au sol	40
Figure 3.6 A) Avatar Humain avec proportions normales (H-PH), B) Avatar Humain avec proportions Godzilla (H-PG)	42
Figure 3.7 C) Avatar Godzilla avec proportions humaine (G-PH) et D) Avatar Godzilla avec proportions normales (G-PG)	43
Figure 3.8 Schéma de déroulement de la préparation des acquisitions	45
Figure 3.9 Schéma de positionnement des marqueurs.....	44
Figure 3.10 A gauche le participant en mouvement sur Tracker et à droite le participant en mouvement sur Pegasus.....	48
Figure 3.11 Schéma de déroulement des conditions.....	50
Figure 4.1 Scores d'incarnation et de ses composantes, par avatar, évalués sur 7.....	58
Figure 4.2 Scores d'incarnation par ordre chronologique évalués sur 7	58
Figure 4.3 Sous-estimation du temps, par Avatar, pour la phase attente et la phase dynamique.....	59
Figure 4.4 Sous-estimation par ordre chronologique pour la phase d'attente et la phase dynamique.....	60

Figure 4.5 Diagramme conscience temporelle et passage du temps, par avatar, pour la phase attente et la phase dynamique évalués sur 10	63
--	----

Figure 4.6 Diagramme conscience temporelle et passage du temps, selon l'ordre des conditions, pour la phase attente et la phase dynamique évalués sur 10.....	64
---	----

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

RV	Réalité virtuelle
----	-------------------

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 4.1 Conscience temporelle et passage du temps, par avatar, pour la phase attente et la phase dynamique évalués sur 10	63
Tableau 4.2 Conscience temporelle et passage du temps, selon l'ordre des conditions, pour la phase attente et la phase dynamique évalués sur 10	64

INTRODUCTION

La rééducation motrice est une étape cruciale du processus de récupération fonctionnelle dans un contexte de récupération de la motricité et de la coordination suite à un accident vasculaire cérébral par exemple. Cependant, elle est souvent perçue comme répétitive et monotone. Ces répétitions fréquentes et complexes peuvent rendre subjectivement plus longues les séances de rééducation et plus difficiles à supporter. Ainsi elles peuvent entraîner un désengagement compromettant ainsi l'assiduité et la persévérance des patients (Navea et al., 2025). Cette diminution de l'engagement peut ralentir le processus de récupération et peut conduire à une récupération incomplète, affectant la qualité de vie du patient. La réalité virtuelle (RV) offre des environnements immersifs et interactifs, modulable à l'infini. Ainsi on peut s'intéresser à la manière dont le jugement temporel peut être influencé dans un environnement immersif.

La perception du temps est un phénomène subjectif modulé par de nombreux facteurs externes et internes, comme l'attention, la charge cognitive et les émotions (Droit-Volet, 2013). En contexte de réadaptation, la perception d'un temps qui passe plus vite pourrait améliorer la tolérance aux exercices répétitifs et à la sensation de monotonie. En plongeant les utilisateurs dans des environnements immersifs et interactifs, elle modifie les repères sensoriels habituels, détourne l'attention du temps et peut induire des distorsions temporelles (Moinnereau, Oliveira, & Falk, 2023). Plusieurs facteurs sont connus pour influencer la perception du temps en RV, notamment la charge cognitives ou physiques (Schatzschneider, Bruder, & Steinicke, 2016), le niveau d'engagement émotionnel (van der Ham, Klaassen, van Schie, & Cuperus, 2019), des environnements engageants (Landeck et al., 2023) et l'incarnation d'avatars virtuels (Charbonneau et al., 2017; Unruh, Landeck, Oberdörfer, Lugin, & Latoschik, 2021 ; Unruh, Vogel, Landeck, Lugin, & Latoschik, 2023). L'incarnation repose sur plusieurs composantes multisensorielles, comme la synchronisation visuomotrice et visuotactile, et est définie comme le sentiment subjectif de posséder et de contrôler un corps virtuel (Kiltner, Normand, Sanchez-Vives, & Slater, 2012). Des études récentes ont montré que l'apparence de l'avatar peut altérer la perception corporelle et motrice des utilisateurs, influençant leur comportement en RV (Banakou, Groten, & Slater, 2013).

Des études ont montré que l'apparence d'avatars pouvait jouer un rôle clé dans la modulation du jugement temporel. Par exemple, dans l'étude (Charbonneau et al., 2017), des résultats préliminaires ont montré que des participants ayant incarné un avatar de type monstre sous-estimaient le temps passé à effectuer la tâche de marche et de destruction de tanks de 31 %, contre 14 % pour ceux incarnant un avatar humain. Ainsi l'incarnation d'avatars pourrait être un levier pour moduler le jugement temporel. Toutefois, ces résultats restent exploratoires et présentent certaines limites, notamment un faible échantillon ($n=10$) et l'entremêlement de deux facteurs : la nature (humaine ou d'apparence d'un monstre) et les proportions (humaine ou monstre).

Sachant qu'aucune étude n'existe sur ce sujet, il serait donc intéressant maintenant de déterminer indépendamment, dans quelle mesure la nature et les proportions influenceraient la perception du temps. Ainsi, l'objectif de ce projet est d'évaluer plus précisément l'effet de l'incarnation d'avatars sur la perception du temps, en isolant les facteurs liés à la nature et ceux liés aux proportions des avatars, tant dans des conditions d'attente (passives) que pendant des tâches physiques (actives).

Ainsi, nous avons développé un environnement virtuel immersif comportant deux scènes principales : une réplique virtuelle d'un laboratoire de biomécanique et une ville urbaine animée. Ces environnements ont été conçus pour maximiser le sentiment d'incarnation des avatars tout en permettant une évaluation distincte des phases passives et actives.

Dans le laboratoire virtuel, les participants interagissent avec leur avatar en observant leurs mouvements dans un miroir virtuel, renforçant ainsi leur sentiment d'appartenance corporelle grâce à la synchronisation visuelle et motrice. Quant à la ville urbaine, elle constitue un environnement dynamique et engageant dans lequel les participants marchent sur un tapis roulant tout en incarnant leur avatar. En plus de simuler une situation de déplacement réaliste, cet environnement intègre des éléments interactifs tels que des camions à écraser, ce qui ajoute une double tâche.

Ce mémoire est structuré en cinq chapitres. Le premier chapitre présente une revue de la littérature sur la réalité virtuelle, l'incarnation des avatars virtuels et leur influence sur les comportements, la perception de soi et le jugement du temps dans des environnements

immersifs. Le second chapitre expose la problématique, les objectifs et les hypothèses découlant de la revue de la littérature. Le troisième chapitre détaille la méthodologie expérimentale, les outils virtuels, y compris le protocole d'acquisition et le traitement des données, afin de tester les hypothèses. Le quatrième chapitre présente les résultats obtenus, tant quantitatifs que qualitatifs, issus des évaluations des participants. Enfin, le cinquième chapitre propose une discussion des résultats, les compare aux études existantes et aborde les limites et recommandations issues de l'étude.

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTÉRATURE

1.1 Réalité virtuelle et incarnation

La réalité virtuelle (RV) est une technologie immersive qui permet de plonger un utilisateur dans un environnement simulé, créé numériquement, dans lequel il peut interagir en temps réel. Elle offre une large gamme d'applications, allant du divertissement à la psychologie, en passant par la formation et la réadaptation motrice et cognitive (Fischer & Troussier, 2004). Un des atouts majeurs de la RV est la flexibilité qu'elle offre pour moduler ces environnements en fonction des besoins des utilisateurs.

En créant des environnements simulés interactifs, la RV permet aux utilisateurs d'accomplir des tâches variées, comme marcher ou manipuler des objets, dans un espace sécurisé et contrôlé. Par exemple, elle peut simuler des activités quotidiennes dans des environnements complètement contrôlés ou permettre d'interagir avec d'autres personnes virtuelles, tout en minimisant les risques associés au monde réel. De plus, la RV offre la possibilité de reproduire des environnements complexes ou difficilement accessibles, comme des milieux extrêmes (montagnes, profondeurs marines), ou encore de recréer des scénarios pour l'entraînement à des interventions chirurgicales ou des situations d'urgence, sans compromettre la sécurité des participants.

Dans le domaine de la réadaptation motrice, la RV se distingue par sa capacité à simuler des environnements spécifiques et à faciliter des actions telles que le réapprentissage des compétences motrices, l'amélioration de la coordination, ou encore l'exécution de tâches dans un cadre sécurisé (Hernandez et al., 2022; Kim et al., 2020). En outre, la capture de données cinématiques et cinétiques, comme la marche, les mouvements articulaires ou encore le suivi oculaire (eye tracking), permet une évaluation objective et précise des progrès réalisés par les utilisateurs, qu'il s'agisse d'améliorations motrices ou cognitives.

Enfin, la RV favorise également une immersion totale des participants, leur permettant de se sentir présents dans l'environnement simulé, renforçant ainsi l'efficacité de cette technologie dans des domaines comme l'apprentissage, la réadaptation et l'exploration. Elle représente une avancée technologique majeure, offrant des possibilités illimitées pour répondre aux besoins spécifiques des utilisateurs. Elle ouvre ainsi la voie à des interventions plus efficaces et à des évaluations objectives des performances et progrès, tout en réduisant les risques inhérents aux contextes réels (Henderson, Korner-Bitensky, & Levin, 2007 ; Long, Ouyang, & Zhang, 2020).

1.1.1 Immersion et présence en réalité virtuelle

Les concepts d'immersion et de présence sont au cœur de l'expérience utilisateur en VR, bien qu'ils soient souvent confondus.

L'immersion désigne les caractéristiques objectives de la RV qui permettent d'engager les sens de l'utilisateur. Elle inclut des facteurs comme la qualité de l'affichage visuel, le suivi des mouvements et la cohérence des retours sensoriels (visuels, auditifs, et parfois même tactiles). Plus le système est immersif, plus l'environnement virtuel sera réaliste et engageant (Slater, Usoh, & Steed, 1995 ; Slater, Linakis, Usoh, & Kooper, 1996). En d'autres termes, plus l'environnement virtuel est capable de refléter de manière précise et en temps réel les actions de l'utilisateur, plus il est immersif.

La **présence**, quant à elle, est une expérience subjective, décrite comme la sensation d'être réellement présent dans l'environnement virtuel. Ce phénomène dépend non seulement de la qualité et du niveau d'immersion, mais aussi de la manière dont l'utilisateur interagit avec l'environnement virtuel. Une forte immersion accompagnée d'un sentiment de présence permet à l'utilisateur de se concentrer entièrement sur l'interaction avec l'environnement virtuel (Bouvier, 2009), réduisant ainsi les distractions liées à la réalité physique. Ces deux concepts sont interconnectés et jouent un rôle fondamental dans l'efficacité des environnements VR. Une forte synchronisation entre les stimuli visuels, auditifs et proprioceptifs augmente le sentiment de présence (Slater & Wilbur, 1997), tout comme l'utilisation de graphismes de haute qualité et d'une perspective en première personne. À l'inverse, des incohérences spatiotemporelles, des retours sensoriels désynchronisés ou des

limitations techniques, telles qu'un champ de vision réduit ou une latence élevée, peuvent réduire ce sentiment de présence et même causer des cyber-malaises.

L'immersion et la présence sont ainsi interconnectées et jouent un rôle fondamental dans l'efficacité des environnements virtuels. Une immersion optimisée améliore l'engagement, l'apprentissage moteur et l'interaction, tout en offrant une expérience émotionnellement plus marquante. Cependant, une présence trop intense ou prolongée peut engendrer de la fatigue et un détachement temporaire (Kourtesis, 2024). En pratique, un système de RV offrant une haute immersion permet de maximiser la présence, ce qui est essentiel pour générer un fort sentiment d'incarnation et ainsi améliorer l'expérience en RV (Cummings & Bailenson, 2016).

Mais qu'est-ce que l'incarnation ? Après avoir exploré l'importance de l'immersion et de la présence dans les environnements immersifs, un concept étroitement lié émerge : celui de l'incarnation. Alors que la présence se concentre sur la perception psychologique d'être dans un espace virtuel, l'incarnation, elle, va plus loin.

L'incarnation et ses composantes

L'incarnation d'égo-avatar correspond au sentiment subjectif d'appropriation d'un corps virtuel, où l'utilisateur le perçoit comme une extension de son propre corps biologique. Cette notion largement explorée dans les recherches de Kiltani, Groten et Slater (2012), où l'incarnation est décrite comme un phénomène multisensoriel reposant sur la synchronisation des signaux visuels, proprioceptifs et tactiles. Elle permet à l'utilisateur d'intégrer les caractéristiques de l'avatar dans sa propre perception corporelle. Autrement dit, les propriétés du corps virtuel sont perçues comme celles de l'utilisateur lui-même.

L'incarnation se fonde sur trois concepts majeurs (Kiltani et al., 2012) : le sentiment d'égo-localisation où l'utilisateur se perçoit comme étant à l'intérieur de l'avatar, se déplaçant avec celui-ci dans l'espace virtuel. L'agentivité où l'utilisateur a la perception qu'il contrôle directement les mouvements de l'avatar, en alignant ses intentions avec les actions de l'avatar dans l'environnement virtuel. Enfin l'appropriation corporelle où l'utilisateur ressent que le corps virtuel lui appartient, comme s'il s'agissait de son propre corps.

Chacun des concepts joue un rôle clé dans l'expérience immersive et dans la manière dont les utilisateurs perçoivent et interagissent avec leur avatar virtuel. Ensemble, ils contribuent à créer une bonne immersion et à renforcer l'illusion que l'utilisateur est physiquement présent dans l'environnement virtuel. Les recherches ont montré que la congruence entre les mouvements de l'utilisateur et ceux de l'avatar, ainsi que la synchronisation des retours sensoriels, jouent un rôle crucial pour intensifier cette illusion d'incarnation (Kilteni et al., 2012 ; Leonardis, Frisoli, Barsotti, Carrozzino, & Bergamasco, 2014). Ce phénomène repose sur une expérience multisensorielle, où les signaux visuels, proprioceptifs et tactiles sont synchronisés, renforçant l'illusion que le corps virtuel est le sien (Bassolino et al., 2018). Ce sentiment d'incarnation est fondamental pour les expériences immersives, en particulier en réalité virtuelle, où les utilisateurs se déplacent, interagissent et font des actions avec leur avatar virtuel comme s'ils utilisaient leur propre corps (Guy, Normand, Jeunet-Kelway, & Moreau, 2023).

Son importance s'étend à des domaines variés comme la psychologie, le divertissement, la réadaptation à la marche ou encore les expériences sociales, qui en font donc un concept fondamental dans l'étude des expériences en réalité virtuelle.

Le sentiment d'égo-localisation fait référence à la sensation que l'utilisateur se situe à l'intérieur de son corps virtuel, comme s'il occupait réellement l'espace de cet avatar. Ce concept est influencé par des stimuli tactiles et vestibulaires, qui peuvent altérer la perception de l'espace occupé par le corps virtuel (Lopez, Halje & Blanke 2008 ; Normand, Giannopoulos, Spanlang, & Slater, 2011).

Des études ont montré que la perspective à la première personne (1PP) renforce considérablement ce sentiment par rapport à la troisième personne (3PP). Les participants qui voient l'environnement à travers les yeux de leur avatar ressentent un lien plus fort avec leur corps virtuel, renforçant l'incarnation et l'illusion d'être à l'origine des mouvements (Kokkinara, Kilteni, Blom & Slater 2016; Slater, Spanlang, Sanchez-Vives & Blanke, 2010). En revanche, la perspective à la troisième personne réduit cette sensation d'appropriation corporelle et d'agence, ainsi que l'illusion de mouvement.

Cette illusion d'incarnation peut s'accompagner d'un phénomène de dérive proprioceptive sans pour autant être compromise. La position perçue du corps réel se déplace progressivement

vers celle du corps virtuel, et inversement, sans qu'aucun déplacement physique réel ne soit observé (Asai, 2015; Fuchs, Riemer, Diers, Flor, & Trojan, 2016).

L'appropriation corporelle désigne le sentiment que le corps virtuel est à l'origine des sensations que l'utilisateur perçoit, créant l'illusion que ce corps virtuel lui appartient et fait partie intégrante de lui. Ce concept a été illustré par l'expérience de la main en caoutchouc (Botvinick & Cohen, 1998), où des stimulations visuotactiles synchronisées induisent l'illusion que la main artificielle est la sienne. De même, en réalité virtuelle, des stimulations visuotactiles ou visuo-proprioceptives renforcent ce sentiment d'appropriation (Dummer, Picot-Annand, A., Neal, T., & Moore, 2009; Tsakiris, Longo & Haggard, 2010).

L'apparence de l'avatar joue également un rôle dans ce processus (Gorisse, 2019; Kilteni et al., 2012). Cependant, de nombreuses études ont montré que des modifications de genre ou d'apparence ne compromettent pas systématiquement cette sensation, suggérant ainsi que le sentiment d'appropriation corporelle peut persister malgré des divergences entre l'apparence physique réelle et virtuelle. Même en incarnant un montre géant (Charbonneau et al., 2017), un enfant (Banakou et al., 2013; Kokkinara et al., 2016), ou un squelette (Kleinbeck et al., 2023), l'utilisateur garde un fort degré d'incarnation.

Les illusions de possession du corps montrent que, sous des conditions multisensorielles adéquates, une personne peut percevoir des parties corporelles artificielles comme siennes, intégrant ainsi le corps virtuel à sa propre perception corporelle. Cette appropriation est renforcée par la synchronisation des signaux sensoriels, comme démontré dans des expériences où des participants ressentaient une illusion d'appropriation d'un bras virtuel après avoir synchronisé des stimulations tactiles réelles avec des mouvements visuels (Kilteni, Maselli, Kording & Slater, 2015).

L'agentivité désigne le sentiment de contrôle que l'utilisateur éprouve sur ses actions, c'est-à-dire la capacité à percevoir que les mouvements et les actions du corps virtuel qu'il incarne sont bien les siens. Lorsque l'utilisateur déplace un avatar virtuel, il doit avoir la sensation d'être à l'origine de ces mouvements. Le concept d'agentivité repose sur la comparaison entre les intentions de l'utilisateur et les résultats observés (Kilteni et al., 2012). Braun et al., 2018 distinguent deux niveaux d'agentivité : le ressenti d'intentionnalité (feeling of agency), qui est

un processus inconscient, et le jugement d'intentionnalité, qui implique une réflexion plus consciente. La synchronisation visuomotrice joue un rôle clé dans l'expérience d'agentivité cruciale, et des délais supérieurs à 150 ms peuvent affaiblir cette sensation (Franck et al., 2001). Par exemple, l'étude de Kokkinara et al. (2016) a montré que des participants pouvaient contrôler la marche d'un avatar simplement par des mouvements de tête, soulignant l'importance du retour moteur dans l'expérience d'agentivité. Toutefois, plusieurs facteurs peuvent perturber ce phénomène, notamment la latence. Un décalage temporel excessif entre une action et sa représentation visuelle, au-delà de 150 ms, peut compromettre le sentiment d'incarnation et entraîner un désalignement perceptuel, affaiblissant ainsi l'agentivité (Franck et al., 2001; Samaraweera, Perdomo Quarles et al., 2015). De plus, une latence élevée ne se limite pas à réduire l'incarnation, elle peut aussi induire du cybermalaise, provoquant des symptômes tels que des nausées et des vertiges en raison de la désynchronisation entre les mouvements réels et perçus. Pour optimiser cette expérience, il est essentiel de minimiser la latence et de garantir une synchronisation précise des signaux sensoriels, en particulier les retours visuo-tactiles et visuo-proprioceptifs. Une congruence sensorielle, comme ressentir un contact au même moment où l'avatar est touché, amplifie l'appropriation corporelle et augmente l'immersion (Dummer et al., 2009; Tsakiris et al., 2010).

L'agentivité est décrite comme la capacité à exercer un contrôle moteur global, englobant l'expérience subjective de l'action, la sensation de contrôle, l'intention, la sélection des mouvements et la volonté consciente (Lopez et al., 2008). Ce sentiment peut être renforcé par des actions motrices comme des mouvements synchronisés de l'avatar et de l'utilisateur, mais aussi par des actions émotionnelles ou physiologiques. Une étude a démontré que les joueurs de jeux vidéo éprouvent un fort sentiment d'agentivité lorsqu'ils prennent des décisions émotionnellement engageantes (Kway & Mitchell, 2018).

Dans l'étude de Kokkinara et al. (2016), les participants, bien que physiquement immobiles à l'exception de mouvements de tête, ont ressenti l'illusion de contrôler la marche d'un avatar, illustrant l'idée que l'agentivité peut persister même sans mouvements corporels actifs.

Pour maximiser le sentiment d'incarnation, il est nécessaire de renforcer chacune de ces trois sous-composantes. L'illusion de la main en caoutchouc, démontrée par (Botvinick & Cohen,

1998), constitue une base solide pour comprendre le phénomène d'incarnation dans un avatar virtuel. Cette étude montre qu'en synchronisant des stimuli visuels et tactiles, une personne peut percevoir une main en caoutchouc comme étant la sienne. À partir de cette découverte, (Asai, 2015) a illustré que des retours visuels et proprioceptifs peuvent créer une dérive proprioceptive, où les participants déplaçaient inconsciemment leur main vers la main en caoutchouc. Cette expérience met en lumière la capacité du cerveau à intégrer des stimuli multisensoriels pour créer une illusion d'appropriation corporelle.

En d'autres termes, les mouvements de l'avatar doivent correspondre le plus possible à ceux de l'utilisateur. L'acceptation du corps virtuel comme faisant partie de notre propre corps crée une illusion de propriété. Cette représentation corporelle virtuelle peut être aussi simple qu'une main, ou aussi complète qu'un avatar représentant tout le corps. L'un des éléments clés de cette incarnation est la synchronisation entre les mouvements réels de l'utilisateur et ceux de l'avatar. Une correspondance fluide et précise renforce l'illusion que l'avatar est une extension du corps de l'utilisateur, générant un fort sentiment d'appropriation corporelle.

1.1.2 Incarnation et ses effets

L'incarnation en réalité virtuelle modifie la perception de soi et peut influencer les participants, notamment leur cognition, leurs émotions et leurs comportements. Elle influence également leur manière d'agir et de se mouvoir, avec des répercussions d'ordre psychologique, émotionnel et comportemental.

L'apparence des avatars en réalité virtuelle peut influencer les comportements sociaux des utilisateurs, même après avoir quitté l'environnement virtuel. (Baylor, 2009) met en évidence que les avatars jouent le rôle de "modèles sociaux", modifiant les croyances, attitudes et comportements des utilisateurs. Cet effet est amplifié par l'effet Proteus, démontré par (Yee, Bailenson & Duchenerault, 2009), où l'apparence de l'avatar modifie les actions des utilisateurs de manière durable, même dans des contextes réels. La taille de l'avatar peut influencer les comportements, notamment en négociation (Yee et al., 2009; Yee & Bailenson, 2007), tandis qu'un avatar plus petit ou moins attrayant peut susciter des attitudes plus réservées (Fox Bailenson & Binney, 2009). Cela révèle que la réalité virtuelle permet d'explorer la plasticité

comportementale des utilisateurs et de moduler leur manière d'interagir avec les autres en fonction de leur avatar virtuel. Dans ce même contexte, Havie et al. (2024) ont observé que l'incarnation en réalité virtuelle d'un avatar "superhéros" a montré des effets positifs chez les participants souffrant de douleurs lombaires chroniques. L'incarnation a temporairement amélioré l'image corporelle, augmentant la perception de force, d'agilité et de confiance dans le mouvement, tout en réduisant les sentiments de vulnérabilité physique.

L'incarnation peut également remodeler la perception émotionnelle et cognitive des utilisateurs. (Seinfeld et al., 2018) ont montré que l'incarnation dans des avatars de victimes de violence a permis de renforcer l'empathie des utilisateurs envers les groupes marginalisés. En effet, les auteurs de violences domestiques, après avoir incarné une victime féminine de violence, amélioraient leur capacité à reconnaître la peur chez les autres.

Des travaux sur l'incarnation ont aussi révélé des effets sur les capacités cognitives. (Banakou, Kishore & Slater, 2018) ont montré que les participants incarnant un avatar d'Albert Einstein, un scientifique âgé, ont non seulement amélioré leurs performances cognitives mais ont aussi réduit leurs préjugés implicites envers les personnes âgées. De plus, (Falconer et al., 2016) ont démontré que l'incarnation dans un avatar thérapeutique pouvait renforcer l'autocompassion chez des patients dépressifs, favorisant une diminution des symptômes de dépression.

L'illusion de possession corporelle est un phénomène central de l'incarnation, où les utilisateurs perçoivent leur avatar virtuel comme une extension de son propre corps. (Kilteni, Bergstrom & Slater, 2013) ont montré que l'illusion de possession persiste même lorsque l'avatar diffère visuellement du corps réel du participant, révélant la flexibilité de l'image corporelle en réalité virtuelle (par exemple, la couleur de peau ou le style vestimentaire). Dans cette même étude, un avatar à la peau foncée et habillé de manière décontractée a conduit à des comportements plus expressifs et variés, notamment pendant une tâche de percussion. Cela démontre la plasticité de l'image corporelle. Cette plasticité est également soulignée dans l'étude de (Vallageas et al., 2024), où l'incarnation dans un avatar avec une jambe virtuellement élargie a modifié la perception du poids corporel sans affecter la stabilité ou la planification motrice. Bien que les participants aient perçu leur jambe agrandie comme plus lourde, cela n'a pas influencé leur équilibre dynamique, montrant ainsi que la réalité virtuelle peut altérer des

perceptions corporelles spécifiques sans affecter les compétences motrices essentielles. Cette plasticité corporelle est également visible dans les travaux de Banakou et al. (2013) et Tajadura-Jiménez, Banakou, Bianchi-Berthouze & Slater, (2017) qui ont montré que l'incarnation dans un avatar d'enfant entraînait une surestimation de la taille des objets, suggérant que la forme et la taille du corps virtuel influencent directement la perception de l'environnement.

Au-delà de ses effets sur la perception et les comportements sociaux, l'incarnation peut modifier les schémas moteurs et influencer directement la démarche des utilisateurs. (Charbonneau et al., 2017) ont montré que l'incarnation dans un avatar monstre entraînait des foulées plus larges et une cadence plus rapide, avec des ajustements inconscients des mouvements pour correspondre à l'apparence de l'avatar. Dans son étude (Willaert et al., 2024) nous montrent que les participants ajustent leur propre démarche pour correspondre à celle de leur avatar, lorsqu'elle en modifie notamment la longueur de pas de leurs avatars virtuels. Ces ajustements moteurs, influencés par l'illusion de possession corporelle, persistent parfois après l'expérience, offrant des perspectives thérapeutiques pour les patients souffrant de troubles moteurs, comme ceux ayant subi un AVC. Pour finir sur cet aspect, dans une autre étude, (Oberdörfer, Birnstiel & Latoschik, 2024) ont observé que l'incarnation dans un avatar portant des talons hauts virtuels entraînait une adaptation des mouvements des genoux et des hanches, même en l'absence de talons réels. Ces ajustements moteurs suggèrent que la réalité virtuelle peut simuler des conditions physiques sans imposer de contraintes réelles.

Enfin pour finir sur les effets de l'incarnation en RV, celle-ci a également des applications cliniques dans la rééducation et la santé mentale. (Keizer, Elburg, Helms & Dijkerman, 2016) ont montré que l'incarnation dans un corps virtuel sain réduisait la surestimation de la taille corporelle chez des patients atteints d'anorexie, améliorant ainsi leur perception corporelle. On retrouve dans la littérature que l'incarnation en réalité virtuelle dans un avatar, tel que Freud, a permis aux participants d'expérimenter un détachement cognitif qui améliore leur humeur et les aide à prendre du recul sur leurs problèmes personnels (Osimo, Pizarro, Spanlang, & Slater, 2015; Slater et al., 2019). L'incarnation en réalité virtuelle constitue ainsi un levier puissant

pour moduler la perception du soi et influencer des aspects clés du comportement humain, qu'il s'agisse d'interactions sociales, d'émotions, de cognition, de motricité et bien d'autres.

1.2 Réalité virtuelle et jugement temporel

Le jugement temporel est un phénomène subjectif influencé par divers facteurs environnementaux, sensoriels et cognitifs. Elle est influencée par des facteurs internes, tels que l'attention et les émotions, ainsi que par des repères externes, comme les indices environnementaux et les rythmes biologiques. En dehors de la RV, elle s'appuie sur ces repères temporels et ces processus attentionnels qui structurent notre expérience du temps. Cependant en RV, ces repères peuvent être altérés, modifiés, voire totalement absents, ce qui peut entraîner des distorsions temporelles.

Cette section explore d'abord les bases du jugement temporel dans le monde réel, en mettant en évidence les facteurs qui influencent notre perception du temps. Ensuite, elle examine comment la RV peut la modifier, notamment à travers l'incarnation d'avatar virtuel.

1.2.1 Jugement temporel hors de la réalité virtuelle

Il est essentiel de comprendre comment le jugement du temps fonctionne en dehors des environnements immersifs. Dans le monde réel, la perception du temps repose sur des repères externes, appelés *zeitgebers*, ainsi que sur des processus cognitifs et émotionnels qui modulent le jugement temporel.

1.2.1.1 Zeitgebers

En dehors des environnements de réalité virtuelle, le jugement temporel repose sur divers facteurs externes et internes, influençant la perception de la durée et la précision des estimations. Dans le monde réel, les *zeitgebers*, ou repères temporels externes, jouent un rôle

central en agissant comme indicateurs du passage du temps. Schatzschneider et al. (2016) montrent que les *zeitgebers* naturels, comme le cycle jour-nuit, les transitions de lumière associées au lever et au coucher du soleil, ainsi que les horloges, permettent de synchroniser l'horloge biologique avec les cycles quotidiens. Ces repères peuvent être divisés en deux catégories : les *zeitgebers* absolus, tels que les heures fixes, qui offrent des points de référence stables, et les *zeitgebers* relatifs, comme le mouvement des ombres au crépuscule, qui influencent la vitesse perçue du temps. En l'absence de ces repères, la perception du temps devient plus subjective et moins précise, comme cela se produit souvent en VR, où les repères naturels sont absents ou modifiés artificiellement.

Dans des environnements réels, les *zeitgebers*, et particulièrement le cycle solaire, contribuent à structurer le rythme circadien humain, permettant aux individus d'estimer le passage du temps sans se fier à une horloge mécanique. Roenneberg et al. (2007) soulignent que ces repères sont essentiels, non seulement pour la perception générale de la durée d'une journée, mais aussi pour les tâches nécessitant des estimations temporelles précises. Le mouvement régulier du soleil, par exemple, fournit un point de référence stable, utilisé inconsciemment par le cerveau pour ajuster l'horloge interne en fonction des activités quotidiennes.

Enfin, dans des environnements réels, la capacité à fournir des estimations temporelles précises est renforcée par la familiarité avec des repères sensoriels et des *zeitgebers* naturels, permettant une synchronisation sensorielle continue avec l'écoulement du temps réel. Block et Zakay (1996) illustrent comment les individus peuvent produire des durées abstraites, comme « produire 8 secondes », avec un haut degré de précision, grâce aux indices stables de leur environnement naturel (sons, ombres, événements continus), qui servent de points de référence fiables pour jauger le passage du temps.

1.2.1.2 Attention et émotion sur le jugement temporel

Hors des environnements RV, le jugement temporel dépend largement de la stabilité des indices sensoriels et de la focalisation attentionnelle, modulée par des facteurs émotionnels et

cognitifs. Bruder et Steinicke (2014) montrent que dans des environnements réels, les repères visuels et auditifs naturels aident les participants à réaliser des estimations temporelles précises, avec une surestimation moyenne de seulement 2,3 %, en raison de la stabilité des repères visuels et de l'absence de surcharge sensorielle. Cette continuité rend la perception temporelle plus fiable dans le monde réel, contrairement aux environnements VR, où les repères peuvent être modifiés ou absents, rendant le jugement temporel plus variable.

La complexité cognitive des tâches joue également un rôle important. Les tâches exigeant une attention soutenue détournent les ressources cognitives vers l'activité en cours, réduisant ainsi la perception subjective du temps (Block & Zakay, 1996). À l'inverse, les activités simples ou peu engageantes favorisent une conscience accrue du passage du temps. Selon le modèle de l'Attentional-Gate Model (AGM) de Block et Zakay (1996), l'attention portée aux éléments temporels prolonge la perception de la durée, particulièrement dans des situations monotones ou ennuyeuses, comme les salles d'attente (Witowska, Schmidt & Wittmann, 2020). L'ennui et le manque de distraction focalisent l'attention sur le passage du temps, ce qui tend à allonger la perception de la durée.

Csikszentmihalyi (1990) décrit un phénomène dans son concept de « flow » : lors d'activités plaisantes et engageantes, les individus deviennent si absorbés qu'ils ne prêtent plus attention au temps, qui semble alors s'écouler plus rapidement. En revanche, les tâches monotones augmentent la perception temporelle car l'absence de stimuli engageants laisse l'attention se concentrer sur chaque instant (Block & Zakay, 1996). Ce phénomène est particulièrement marqué dans des situations d'attente ou de tâches répétitives, comme celles des exercices de réadaptation, où le manque d'intérêt ou la perception de « perte de temps » peut affecter la motivation des individus à poursuivre (Osuna, 1985).

Enfin, le modèle AGM stipule que les états émotionnels ont un effet déterminant sur le jugement temporel. Des situations stressantes, ennuyeuses ou peu engageantes augmentent la « pulsation interne » du cerveau, allongeant ainsi la durée perçue. Dans des contextes de forte émotion ou de surcharge cognitive, l'attention se focalise sur des signaux internes tels que le rythme cardiaque, créant une impression de temps dilaté (Craig, 2009).

Les environnements stressants, comme les foules, exacerbent également les émotions négatives, inconfort et tension, prolongeant ainsi la perception temporelle en activant des mécanismes de défense corporels en réponse à des menaces perçues pour la sécurité (Droit-Volet, 2013; (Todd & Anderson, 2009). La Théorie de la Magnitude (Walsh, 2003) ajoute que le cerveau traite les concepts de durée, d'espace et de quantité via des mécanismes neuronaux similaires. Un environnement dense en stimuli visuels ou auditifs prolongera la perception du temps, car la complexité visuelle ou sonore est traitée comme un marqueur d'extension de la durée (Dormal et al., 2006; Xuan, Zhang, He, & Chen, 2007).

1.2.2 Jugement temporel en réalité virtuelle

L'intégration de la RV peut bouleverser les mécanismes habituels du jugement temporel en modifiant les repères sensoriels et en induisant des états d'immersion et de présence. Cette partie explore les différentes façons dont la RV influence la perception temporelle, notamment à travers l'immersion, les émotions et la charge cognitive.

1.2.2.1 Jugement temporel et VR

La perception du temps regroupe plusieurs dimensions, dont l'estimation temporelle et la perception du passage du temps. L'estimation du temps correspond à la capacité d'évaluer la durée d'un intervalle, alors que la perception du passage du temps concerne la sensation subjective de la rapidité avec laquelle le temps s'écoule (Unruh et al., 2023). Ces deux aspects ne sont pas nécessairement corrélés : un individu peut percevoir un intervalle comme court tout en sachant qu'un temps long s'est écoulé (Unruh et al., 2021).

La réalité virtuelle influence ces deux aspects de manière distincte. Certaines études indiquent que l'incarnation d'un avatar peut accélérer la perception du passage du temps sans modifier l'estimation objective de la durée (Unruh et al., 2023). En revanche, d'autres recherches montrent que la surcharge cognitive et sensorielle en VR peut allonger la durée perçue en

raison d'une attention accrue portée au temps (Lugrin et al., 2019). Ces résultats suggèrent que l'effet de la RV sur la perception temporelle dépend de nombreux facteurs tels que l'immersion, l'engagement cognitif, l'état émotionnel et les indices temporels disponibles dans l'environnement virtuel (Unruh et al., 2021).

Ainsi, il est judicieux d'évaluer ces deux dimensions pour mieux comprendre les effets de la RV sur le jugement temporel.

Les recherches montrent que la réalité virtuelle a un impact nuancé sur la perception du temps. D'une part, les durées abstraites, comme la reproduction de 8 secondes, restent similaires entre la RV et le monde réel, ce qui indique que les mécanismes internes de la perception temporelle, soit le rythme interne et l'attention au temps, sont relativement stables dans un environnement RV (Bogon et al., 2023). En revanche, les événements physiques dynamiques, tels que vider une bouteille, sont perçus comme plus longs en RV, probablement en raison des différences d'animation et de fluidité visuelle, altérant ainsi les attentes temporelles des utilisateurs (Bogon et al., 2023).

Pour les situations d'attente, la RV ne modifie pas significativement la perception temporelle, bien qu'une petite tendance à allonger l'attente perçue est observée (Lugrin et al., 2019). Cependant, dans des environnements immersifs et engageants, comme les jeux RV, les utilisateurs perdent fréquemment la notion du temps, souvent en raison d'un état de « flow » ou immersion intense (Moinnereau et al., 2023). Comparée aux expériences sur écran, la RV favorise une perception accélérée du temps, avec moins d'ennui et une concentration accrue (Landeck et al., 2023).

L'étude de van der Ham et al. (2019) a comparé la perception temporelle dans une salle de cinéma réelle et sa réplique en RV en faisant visionner aux participants les mêmes clips vidéo. Les résultats ont montré que le contenu émotionnel, plutôt que la RV elle-même, influence la perception du temps. Les vidéos émotionnellement engageantes créant une compression temporelle similaire dans les deux contextes.

Cela indique que la RV ne semble pas influencer directement le jugement du temps. Ce sont les contenus émotionnellement engageants qui provoquent une compression temporelle similaire dans les deux environnements.

1.2.2.2 Immersion, attention et émotions

La RV favorise un état de "flow" dans lequel les utilisateurs perdent la notion du temps, particulièrement lorsque les environnements sont émotionnellement engageants. Ceci peut influencer la perception temporelle en induisant un état dans lequel les utilisateurs deviennent absorbés par l'expérience. Moynereau et al. (2023) expliquent que les expériences de jeu immersives déclenchent un état de concentration intense où les utilisateurs se focalisent sur l'activité, négligeant le passage du temps. Ce phénomène de "compression temporelle" est amplifié par l'arousal (niveau d'excitation émotionnelle) et la valence des stimuli (qualité émotionnelle des contenus). Des stimuli à haute valence et à arousal élevé, comme des activités positives ou engageantes, accélèrent la perception du temps, en RV mais aussi en contexte réel (van der Ham et al., 2019).

Pour illustrer encore ce point, Sackett et al., (2009) nous montre que le phénomène de compression temporelle est souvent observé dans des environnements immersifs qui captent intensément l'attention des utilisateurs. Des expériences RV telles que les simulations de montagnes russes conduisent souvent les participants à percevoir des durées plus courtes qu'elles ne le sont en réalité. Cela est dû à l'immersion sensorielle et visuelle qui détourne l'attention du temps en créant un état d'engagement profond. En revanche, les environnements statiques, comme les tâches simples de recherche de mots, rendent la perception du temps plus lente. Cette distinction souligne que les environnements RV engageants détournent l'attention de la durée réelle, tandis que les environnements statiques provoquent davantage d'ennui, rendant le temps perçu plus long. Alvarez Igarzábal, Hruby, Witowska, Khoshnoud et Wittmann (2021) illustrent cet effet paradoxal dans une expérience de salle d'attente VR, où l'attente semblait plus longue aux participants qu'en réalité. La VR, souvent perçue comme immersive et divertissante, a ici créé un écart avec les attentes, augmentant l'ennui et prolongeant la durée perçue.

Dans une étude sur des patients en chimiothérapie, la RV réduisait la durée perçue du traitement comparativement à des distractions auditives comme la musique (Chirico et al., 2016). La RV fonctionne ainsi comme un distracteur, capturant l'attention des patients et atténuant la perception du temps associé à des traitements souvent longs et inconfortables.

En revanche, Sadeghi, Daziano, Yoon et Anderson (2023) soulignent que dans des environnements RV socialement denses, comme une simulation de métro bondé, la perception temporelle s'allonge sous l'effet du stress et de l'inconfort. La densité de la foule en RV augmente l'inconfort des participants et les émotions négatives, ce qui prolonge la perception de la durée du trajet.

L'étude de Sadeghi et al. (2023) montre que la perception temporelle en RV est influencée par les réactions physiologiques au stress, comme l'augmentation de la fréquence cardiaque. Craig (2009) suggère que cette accélération cardiaque, en tant qu'indicateur d'éveil physiologique, pourrait prolonger la perception du temps en accélérant le "pacemaker" interne.

Les effets émotionnels varient selon le contexte de l'expérience. La régulation du confort et de l'engagement émotionnel joue donc un rôle clé dans l'expérience temporelle en VR.

La perception du temps en RV dépend de l'engagement émotionnel et de l'intensité de l'expérience : des stimuli immersifs induisent une compression temporelle, tandis que des environnements statiques ou stressants allongent la durée perçue. Ces effets montrent l'importance des états physiologiques et des attentes des utilisateurs dans l'expérience temporelle en VR.

1.2.2.3 Indices temporels et repères

En réalité virtuelle (VR), l'absence d'indices temporels naturels, tels que la lumière du jour ou les horloges, perturbe la perception du temps en créant un « vide temporel » où les utilisateurs, privés de repères externes, se concentrent davantage sur le passage du temps, ce qui en allonge

la perception (Lugrin et al., 2019; (Alvarez Igarzábal et al., 2021)). Les environnements statiques amplifient cet effet, car les utilisateurs manquent de distractions qui réduiraient leur conscience du temps.

Les chercheurs ont également exploré les effets des *zeitgebers* virtuels, ou « donneurs de temps » artificiels. L'étude de Schatzschneider et al. a montré que la manipulation de la vitesse du soleil virtuel modifie directement la perception temporelle : un soleil qui se déplace plus rapidement induit une compression temporelle, créant une impression d'accélération du temps, alors qu'un soleil ralenti ou fixe allonge la perception temporelle en instaurant une inertie visuelle qui ralentit le passage ressenti du temps. Ces manipulations, en créant des repères visuels artificiels, permettent une modulation de la perception temporelle (Schatzschneider et al.).

Landeck et al. (2023) démontrent que l'environnement en RV peut aussi induire une compression temporelle, comme un tunnel virtuel à haute vitesse. Cettevection, une illusion sensorielle de mouvement intense, est accentuée par la densité visuelle élevée, ce qui détourne l'attention des participants du temps pour les focaliser sur l'expérience sensorielle. Plus la densité et la vitesse sont élevées, plus le passage du temps est ressenti comme rapide, conformément à la Théorie de la Magnitude, qui lie traitement du temps et de l'espace par des mécanismes neuronaux communs (Landeck et al., 2023; Schatzschneider et al., 2016).

Les effets de la charge cognitive et de la surcharge sensorielle en RV sont également étudiés. Schatzschneider et al. montrent que des tâches cognitives intensives diminuent l'effet des *zeitgebers* externes en concentrant l'attention des participants sur la tâche elle-même, où la perception du temps est raccourcie. Lorsque les *zeitgebers* sont manipulés en même temps qu'une tâche cognitive, la distorsion temporelle est exacerbée. (Schatzschneider et al., 2016)

Ainsi, la RV peut non seulement allonger ou compresser la perception du temps selon le niveau de distraction, de densité visuelle, et de repères temporels, mais elle peut également servir d'outil pour manipuler ces perceptions de manière contrôlée. **Ces *zeitgebers* VR, distincts des indices naturels, permettent une modulation de l'expérience temporelle en VR.**

1.2.2.4 Latence et surcharge cognitive et sensorielle

Les environnements RV sollicitent fortement les ressources cognitives et sensorielles, ce qui peut introduire des distorsions temporelles perceptibles. En effet, Bruder et Steinicke (2014) soulignent que la RV entraîne souvent une surestimation des durées. Cette surestimation est liée à la surcharge cognitive que les utilisateurs doivent gérer pour traiter la complexité visuelle et stabiliser leur perception dans le casque RV. Allison et al. (2001) montrent également que même une légère latence dans le suivi des mouvements peut perturber la perception temporelle. Ces décalages subtils entre l'action de l'utilisateur et le retour visuel créent une désynchronisation des perceptions naturelles, allongeant ainsi la durée perçue.

De plus, l'impact des *zeitgebers* virtuels, comme les changements de lumière ou de position du soleil simulé, peut être atténué par la charge cognitive élevée en RV. Schatzschneider et al. expliquent que, lors de tâches cognitives intenses, les utilisateurs tendent à sous-estimer la durée écoulée car leur attention est captée par la tâche, réduisant ainsi leur réceptivité aux repères temporels artificiels. En somme, la RV peut induire des expériences temporelles variables : elle peut accélérer le temps perçu dans des environnements dynamiques, mais aussi le ralentir dans des contextes qui sollicitent intensément les capacités cognitives et sensorielles.

1.2.3 Jugement temporel et incarnation

L'incarnation en VR, c'est-à-dire l'expérience de ressentir un avatar virtuel comme une extension de soi, joue un rôle dans le jugement temporel. La recherche montre que la présence d'un avatar, qu'il soit complet ou partiel, influence la manière dont les utilisateurs se comportent, mais aussi la manière dont ils perçoivent le temps, en modifiant leur niveau d'immersion et en créant un ancrage physique dans l'environnement virtuel. Ce sentiment d'incarnation peut soit accélérer le jugement temporel, soit prolonger la perception du temps.

Cette partie explore comment différents degrés d'incarnation et types d'avatars influencent la perception du temps en RV.

1.2.3.1 Impact de l'incarnation partielle avec uniquement les mains virtuelles

La représentation partielle du corps à travers l'affichage des mains virtuelles peut déjà influencer de manière significative la perception du temps en VR. Dans l'étude de Landeck et al. (2023) réalisée dans un tunnel virtuel, les participants qui voyaient leurs mains en mouvement percevaient le temps comme s'écoulant plus vite, particulièrement dans les sessions où la vitesse et la densité visuelle étaient élevées. Cette présence des mains virtuelles crée une forme d'incarnation qui accentue la sensation de mouvement ou "vection", ce qui contribue à une expérience plus immersive et à une compression temporelle perceptible. La vection, en reliant les mouvements des mains à l'environnement visuel, favorise l'engagement et détourne l'attention du suivi temporel, ce qui entraîne une perception du temps plus courte.

Dans une autre étude menée par Unruh et al. (2023) avec une tâche d'allumer et d'éteindre des lumières en VR, les participants percevaient également le passage du temps comme plus rapide lorsqu'ils voyaient leurs mains virtuelles. Cette connexion visuelle entre l'environnement et l'utilisateur permet une synchronisation visuomotrice minimale, suffisante pour renforcer l'engagement et diminuer la conscience du temps écoulé. En revanche, dans des conditions sans avatar, comme dans l'étude de Lugrin et al. (2019) dans un contexte de salle d'attente, les participants percevaient l'attente comme plus longue, illustrant comment l'absence de repères corporels augmente la focalisation sur le passage du temps. La simple présence de mains virtuelles peut avoir un impact sur le jugement temporel.

1.2.3.2 Impact des degrés d'incarnation sur le jugement temporel

La perception temporelle est également modulée en fonction du degré d'incarnation, allant de l'absence d'avatar jusqu'à une incarnation corporelle complète. Plus le niveau d'incarnation augmente, plus la perception du temps devient fluide et rapide, car une plus grande connexion au corps virtuel réduit la conscience du passage du temps. Dans l'étude de Unruh et al. (2023) sur l'allumage et l'extinction des lumières, les résultats montrent que la perception temporelle devient plus rapide avec un avatar corporel complet même s'il n'est pas entièrement animé comparativement à une simple représentation des mains. Un avatar complet offre une cohérence visuomotrice accrue, augmentant l'engagement sensorimoteur et créant un sentiment d'appartenance corporelle qui diminue la conscience du temps.

En l'absence totale d'avatar, comme dans l'étude de Lugin et al. (2019), les participants dans la salle d'attente perçoivent le temps comme plus long. Cette absence d'incarnation crée un vide sensoriel qui amplifie la conscience temporelle, particulièrement dans des contextes statiques où il manque des repères corporels. Ce degré d'incarnation, en plus d'accroître l'engagement, s'avère agréable pour les utilisateurs, ce qui, selon van der Ham et al. (2019), accentue l'effet de compression temporelle. Ainsi, l'agréable ressenti à travers une incarnation plus complète, souvent associé à un état de flow, influence positivement la perception temporelle.

L'étude de Landau et al., montre que les participants incarnés dans le corps virtuel d'un enfant (en vidéos stéréoscopiques à 180°) surestimaient la durée de l'expérience en réalité virtuelle comparativement à ceux incarnés dans un corps adulte. Ce résultat est cohérent avec les différences chronologiques dans les estimations de temps, où la perception du temps est souvent plus longue chez les enfants. L'article soutient donc l'idée que l'incarnation dans un corps d'enfant influence la perception temporelle. Cependant il serait intéressant de vivre cette expérience immersive en réalité virtuelle tout en étant incarné dans le corps d'un enfant. Une telle perspective pourrait permettre d'explorer de manière plus approfondie les effets de l'incarnation, en se concentrant sur l'effet de l'avatar lui-même sur le jugement temporel, et

de mieux comprendre comment notre représentation corporelle pourrait influencer cet aspect temporel.

1.2.3.3 Impact de différents avatars virtuels

La présence d'avatars virtuels en réalité virtuelle a un impact sur le jugement temporel. Plus l'incarnation est forte, plus l'influence sur la perception temporelle est marquée. D'après l'étude de Charbonneau et al. (2017), l'incarnation d'avatars différents, notamment humains et non-humains, semble engendrer des effets distincts sur la perception du temps. Les participants ont incarné successivement un avatar humain aux proportions réalistes et un avatar de type Godzilla, chacun offrant une animation complète et synchronisée en temps réel intensifiant le sentiment d'immersion, de présence et d'engagement. Le point fort qu'apporte cette étude est que l'ensemble du corps est représenté et est animé par les utilisateurs. Cette animation permet une synchronisation visuomotrice élevée, créant un engagement accru et facilitant une exploration active de l'environnement virtuel. Cette animation complète du corps virtuel facilite une synchronisation visuomotrice, qui améliore l'immersion et renforce le sentiment de présence corporelle dans l'environnement virtuel. La représentation complète et active de l'avatar favorise ainsi une exploration plus dynamique de l'espace, intensifiant l'expérience sensorielle et minimisant d'avantage la conscience du passage du temps. Le score d'incarnation de ces avatars entièrement représentés et animés est très élevé et d'ailleurs similaire pour l'avatar humain et Godzilla 5.7 sur 7.

Les résultats révèlent des différences notables dans la perception temporelle entre les deux types d'avatars : les participants incarnant l'avatar Godzilla ont perçu le temps comme passant plus rapidement que ceux incarnant l'avatar humain. Plus précisément, les utilisateurs incarnant Godzilla ont sous-estimé le temps passé à effectuer la tâche de marche et de destruction de tanks de 31 %, comparativement à 14 % pour ceux ayant incarné l'avatar humain. Ces écarts semblent indiquer que l'avatar lui-même pourrait être un facteur sur le jugement temporel. Il est important de noter que contrairement à l'avatar humain, Godzilla présente des caractéristiques physiques distinctes, telles que des jambes plus courtes et massives, des bras plus courts, un cou et un tronc plus long et plus volumineux, qui exigent

d'ailleurs des ajustements moteurs de la part des utilisateurs pour correspondre aux caractéristiques perçues de cet avatar.

Ces derniers résultats ouvrent des perspectives de recherche intéressantes pour examiner plus en détail les caractéristiques propres aux avatars virtuels. L'exploration des effets spécifiques de la nature de l'avatar (humain vs non-humain) et des proportions physiques (réalistes vs exagérées) sur le jugement temporel pourrait enrichir la compréhension de l'impact de l'incarnation virtuelle sur le jugement temporel.

Des recherches futures pourraient approfondir ces pistes, en s'intéressant particulièrement aux effets de la nature et des proportions de l'avatar sur l'attention, l'immersion et la perception temporelle dans des contextes variés.

CHAPITRE 2

PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS

Il est désormais établi que la réalité virtuelle peut affecter la perception du temps, notamment en modifiant la manière dont les utilisateurs perçoivent la durée des tâches ou des périodes d'attente. Des études récentes suggèrent que l'incarnation, pourrait également jouer un rôle clé dans ces distorsions temporelles. Cependant, ces résultats restent encore préliminaires et nécessitent des recherches supplémentaires pour comprendre davantage les mécanismes en jeu. Dans l'étude de Charbonneau et al. 2017, bien que la perception du temps n'ait pas été l'objet central de l'étude, les auteurs ont observé des différences dans l'estimation subjective de la durée de l'activité entre les conditions expérimentales. Cependant, ces écarts n'étaient pas statistiquement significatifs, probablement en raison du faible nombre de participants dans cette étude préliminaire et du fait que les avatars utilisés différaient à la fois par leur nature (humain vs Godzilla) et par leurs proportions corporelles (proportions humaines vs proportions non humaines). Par conséquent, ces deux facteurs n'ont pas été isolés, ce qui limite l'interprétation des résultats quant à l'influence spécifique de la nature et/ou des proportions de l'avatar sur le jugement temporel.

Dans ce contexte, deux questions principales émergent :

1. L'incarnation d'un avatar virtuel modifie-t-elle la perception du temps en RV ?
2. Quels facteurs spécifiques liés à l'avatar influencent cette modification : la nature de l'avatar, ses proportions, ou une combinaison des deux ?

Ces interrogations structurent la problématique de cette recherche, qui vise à clarifier les effets de l'incarnation et des caractéristiques des avatars sur le jugement temporel.

2.1 Objectifs

L'objectif principal de cette étude est de comprendre comment l'incarnation d'avatars virtuels influence la perception du temps en RV. Plus spécifiquement, cette recherche cherche à :

1. Confirmer si l'incarnation d'un avatar, modifie la perception temporelle.
2. Identifier les effets spécifiques de la nature de l'avatar (humain ou Godzilla) et de ses proportions corporelles (humaines ou Godzilla), ou combinés, sur ces distorsions temporelles.
3. Étudier ces effets dans deux contextes distincts :
 - Passif : une situation d'attente où les participants ne réalisent aucune tâche spécifique.
 - Actif : une situation où les participants effectuent une tâche physique immersive.

Ces objectifs permettront de mieux comprendre comment ces facteurs influencent le jugement temporel aussi bien lors d'une situation de marche en réalité virtuelle que dans une situation d'attente en RV. La marche a ici été choisie car elle constitue un mouvement continu, relativement automatique et faiblement chargé cognitivement. En explorant comment l'incarnation d'avatars modifie le jugement temporel, cette étude permettra d'apporter une nouvelle compréhension, de comment réduire la perception du temps passé en RV. Les applications seraient multiples, notamment en réadaptation, en éducation pour l'apprentissage ou lors de thérapies pour la santé mentale. Réduire le temps perçu est particulièrement pertinent en réadaptation, où les exercices sont souvent longs, répétitifs et complexes.

2.2 Hypothèses

L'incarnation d'avatars d'apparence non humaine entraînera une sous-estimation plus marquée du temps perçu en réalité virtuelle par rapport à l'incarnation d'avatars d'apparence humaine, avec un passage du temps perçu comme plus rapide (H1).

L'incarnation d'avatars de proportions humaines ou non, n'aura pas d'effet sur l'estimation du temps perçu en réalité virtuelle ni sur le passage du temps perçu (H2)

CHAPITRE 3

MÉTHODOLOGIE

Cette section présente les détails méthodologiques de l'étude, incluant les participants, le matériel utilisé et le déroulement du protocole expérimental. L'objectif est d'évaluer l'impact de l'incarnation d'avatars en réalité virtuelle sur la perception du temps, en manipulant à la fois la nature et les proportions des avatars dans des contextes d'attente et d'activité physique. Pour vérifier les hypothèses posées, des environnements virtuels spécifiques ont été créés, et un ensemble de dispositifs et de logiciels ont été utilisés pour assurer une synchronisation précise des mouvements des participants avec ceux de leur avatar virtuel. Les sections suivantes décrivent en détail les critères de sélection des participants, les systèmes de capture de mouvement et de réalité virtuelle, les environnements développés pour l'expérience, ainsi que les questionnaires utilisés pour recueillir des données subjectives et objectives. Ces éléments permettent de comprendre le cadre expérimental mis en place pour cette étude, dont l'objectif final est d'améliorer la rééducation motrice grâce à la réalité virtuelle.

3.1 Participants

Pour cette étude, 20 participants (11 hommes et 9 femmes) en bonne santé ont été recrutés. La moyenne d'âge est 24 ± 2.8 ans. Il convient toutefois de noter qu'un participant a été exclu en raison d'un dysfonctionnement du matériel, réduisant ainsi le nombre total de participants à 19. Toutes les données collectées ont été anonymisées pour garantir la confidentialité des participants.

Les participants ont signé un formulaire de consentement conforme aux procédures approuvées par les comités d'éthique du CRCHUM et de l'ÉTS CE23.262. Chaque participant a reçu une compensation de 20\$ pour leur participation. Ils ont également complété un formulaire de critères d'éligibilité pour valider leur participation à l'étude.

Les critères spécifiques d'inclusion et d'exclusion étaient les suivants :

Critères d'inclusion

- Être capable de marcher sur un tapis roulant pour une période de maximum 7 minutes en continu, à plusieurs reprises, et ce, sans inconfort.
- Être âgé entre 18 à 40 ans.

Critères d'exclusion

- Souffrir d'une condition susceptible de modifier la démarche.
- Souffrir d'une condition susceptible d'affecter le sens de l'équilibre.
- Ressentir une douleur, un inconfort au niveau d'un membre inférieur.
- Grossesse connue en cours.
- Souffrir de cinétose lors de la pratique de jeux vidéo (nausées, vertiges, étourdissement).

3.2 Matériels

Tapis Roulant

Un tapis roulant à double courroie, capable de capter les forces de réaction au sol dans les trois axes (vertical, antéropostérieur et médio-latéral), produit par Advance Mechanical Technology Inc. (AMTI), a été employé. Ce dispositif permet de mesurer en temps réel les paramètres cinétiques de la marche, tels que les forces de réaction au sol et les moments de force.

Par précaution de sécurité et pour prévenir tout risque de chute, les participants étaient sécurisés par un harnais durant toute la durée des conditions étudiées (Figure 1).

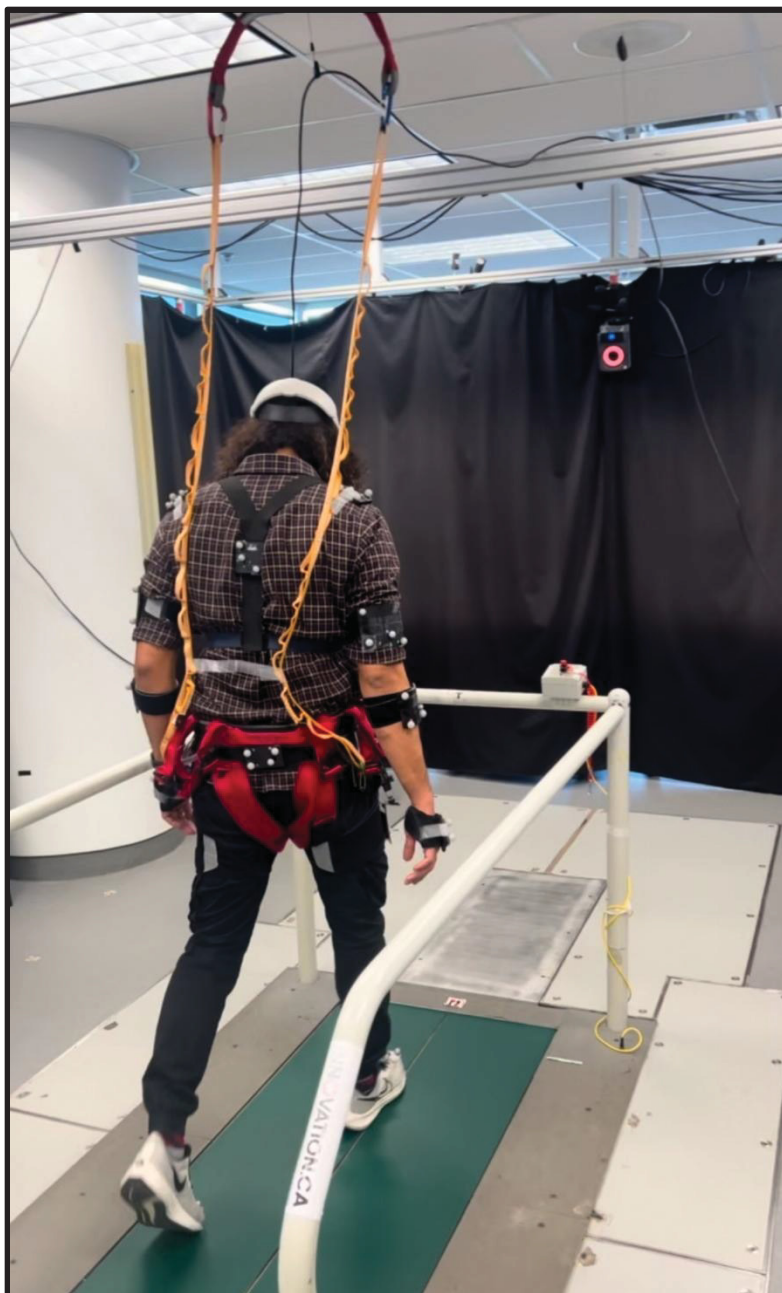


Figure 3.1 Participant équipé en cours d'expérience

Système de Capture de Mouvement

Pour mesurer les paramètres cinématiques, un système de caméras optoélectroniques a été utilisé. Le système de capture de mouvement VICON suit les mouvements des participants à l'aide de 12 caméras optoélectroniques (Vicon T20-S).

Ce système permet une acquisition des mouvements cinématiques, avec une haute fréquence d'échantillonnage (200 Hz) à l'aide de marqueurs réfléchissants. Les caméras sont positionnées en cercle autour du tapis roulant pour maximiser la couverture d'acquisition. En effet, on retrouve sur des rails en hauteur : une caméra devant, une derrière, quatre à droite et trois à gauche. Sur des trépieds au sol : deux caméras à l'avant (une à droite et une à gauche) et une sur le côté gauche.

Des corps rigides composés de trois ou quatre marqueurs sont fixés sur les segments corporels des participants. Le nombre de marqueurs (trois ou quatre) est utilisé comme repère mnémotechnique pour distinguer les segments du côté droit ou gauche, ce qui facilite le travail par la suite pour le reciblage. On les retrouve sur les mains, les avant-bras, les bras, la tête, le haut et le bas du dos, les pieds et au niveau des orteils (Figure 3.9). Ces corps rigides sont attachés aux membres des participants à l'aide de bandes velcro.

Casque de Réalité Virtuelle

Le casque de réalité virtuelle Meta Quest 3 a été utilisé pour immerger l'utilisateur à la première personne dans différents environnements virtuels.

Logiciels Utilisés

Lors de l'expérience, plusieurs logiciels spécialisés ont été utilisés pour l'affichage des environnements virtuels, la modélisation des avatars, ainsi que la capture et le traitement des données cinématiques et cinétiques des participants.

1. Développement et affichage de l'environnement virtuel : Unity

L'environnement virtuel dans lequel les participants étaient immergés a été développé à l'aide du moteur de jeu multiplateforme Unity (version 2022.3.26f1). Unity est largement utilisé pour la création d'environnements 3D interactifs et immersifs. Dans cette étude, Unity a permis non seulement l'affichage de l'environnement virtuel, mais aussi le contrôle dynamique des avatars, permettant ainsi une interaction en temps réel entre les participants et leur avatar.

2. Modélisation des Avatars : Make Human et Blender

La création des avatars utilisés dans l'étude a été réalisée à l'aide de deux logiciels complémentaires : Make Human et Blender. Ces outils ont permis de générer des avatars correspondant aux différentes conditions de l'expérience.

Make Human est un logiciel open source conçu pour créer des modèles humains 3D personnalisés en fonction de données anthropométriques. Ce logiciel a servi pour générer les caractéristiques morphologiques des avatars, adaptées aux dimensions humaines des participants et aux dimensions modifiées pour les besoins de l'expérience (Figures 3.6 et 3.7). De plus, la couleur de la peau, la couleur des yeux, la couleur des cheveux et la coiffure ont été personnalisées pour ressembler aux participants.

Blender 4.0 est un autre logiciel open source utilisé cette fois ci pour la création des avatars Godzilla. Il a été utilisé pour générer les deux versions de cet avatar. C'est-à-dire une version avec des dimensions standards correspondant à la taille originale de Godzilla, et une seconde version adaptée aux proportions humaines, personnalisée en fonction des caractéristiques physiques de chaque participant (Figure 3.7). Ces deux avatars ont été soigneusement modifiés et modélisés afin de répondre aux besoins spécifiques de l'expérience, notamment en ajustant leur structure squelettique pour qu'ils puissent reproduire le plus fidèlement les mouvements réels capturés directement sur le participant grâce au système de capture de mouvement.=

3. Système de Capture de Mouvement et Reciblage des Données Cinématiques : Vicon Tracker et Pegasus

Les données cinématiques obtenues à l'aide du système Vicon ont été reciblées sur les avatars virtuels grâce au logiciel Pegasus de Vicon. Ce reciblage est essentiel pour appliquer les mouvements capturés aux squelettes des avatars (voir section 3.3.1.5 Calibration du système Pegasus), garantissant une animation réaliste et synchronisée. On combine les capacités de Vicon Tracker pour la capture de mouvement et celles de Pegasus pour le reciblage des données.

3.3 Environnements virtuels utilisés dans l'étude

Pour cette étude, deux environnements virtuels (EVs) distincts ont été développés dans lesquels seront immergés les participants à travers le casque pendant l'expérience VR.

Environnement virtuel du laboratoire de biomécanique de LIO-CRCHUM

Le premier environnement virtuel est une reproduction du laboratoire de biomécanique du LIO-CRCHUM (Figure 2).



Figure 3.2 Réplique du laboratoire de biomécanique du LIO-CRCHUM



Figure 3.3 Laboratoire de biomécanique du LIO-CRCHUM

Cet environnement incluant tous les éléments présents dans le laboratoire réel (Figure 3), tels que les fenêtres, les bureaux, l'éclairage, ainsi que le tapis roulant virtuel, dont les dimensions sont ajustées pour correspondre parfaitement à celles du tapis réel.

Un grand miroir a été ajouté à cet environnement virtuel, jouant un rôle clé dans les "scènes d'incarnation" pour permettre aux participants de voir leur corps virtuel.

Environnement Virtuel Urbain

Le deuxième environnement virtuel simule une ville urbaine avec de part et d'autre des gratte-ciels bordant une large route principale rectiligne (Figure 4). Dans cet environnement virtuel, les participants, qui marchent physiquement sur un tapis roulant, incarnent un avatar à l'apparence géante, mesurant 49 fois leur taille réelle et dominant ainsi une partie de la ville.

La ville est organisée sous forme de blocs de bâtiments, recréant une sorte de petits quartiers, avec des pâtés d'immeubles. Au centre de cet environnement se trouve la route principale : un boulevard à deux voies de chaque côté, séparé par un terre-plein central.

Les rues virtuelles ont la même largeur que le tapis roulant sur lequel les participants marchent, et la ville défile à la même vitesse que le tapis, créant l'illusion d'une marche continue à travers la ville. Pour assurer la sécurité et maintenir l'immersion, un rectangle vert au sol délimite les bords du tapis roulant en VR (Figure 5). Ce repère visuel permet aux participants de rester centrés sur le tapis pendant l'expérience, sans avoir à se soucier des limites physiques réelles. En effet, marcher en dehors du tapis réel pourrait les surprendre, les déstabiliser ou entraîner une chute, car les bords du tapis sont fixes contrairement aux courroies qui sont en mouvement. Le rectangle virtuel rend ces limites visibles et intuitives, évitant ainsi des interruptions visuelles ou des mouvements brusques qui pourraient briser l'illusion immersive. De plus, cela élimine le besoin de toucher ou de s'appuyer sur des barres physiques pour se repérer,

Au cours de la marche, des camions apparaissent de manière pseudo-aléatoire sur la route, et les participants doivent les écraser. Chaque écrasement déclenche une explosion visuelle, et le véhicule disparaît, fournissant un feedback visuel. Les camions ont été positionnés selon une séquence prédéfinie sur l'une des quatre voies (extrémité gauche, extrémité droite, centre gauche, centre droit), garantissant ainsi la répétabilité des apparitions.

Des miroirs apparaissent alternativement à droite et à gauche, à intervalle régulier tous les 5 ou 6 blocs, permettant aux participants de s'observer pendant la marche, renforçant ainsi leur sentiment d'incarnation.

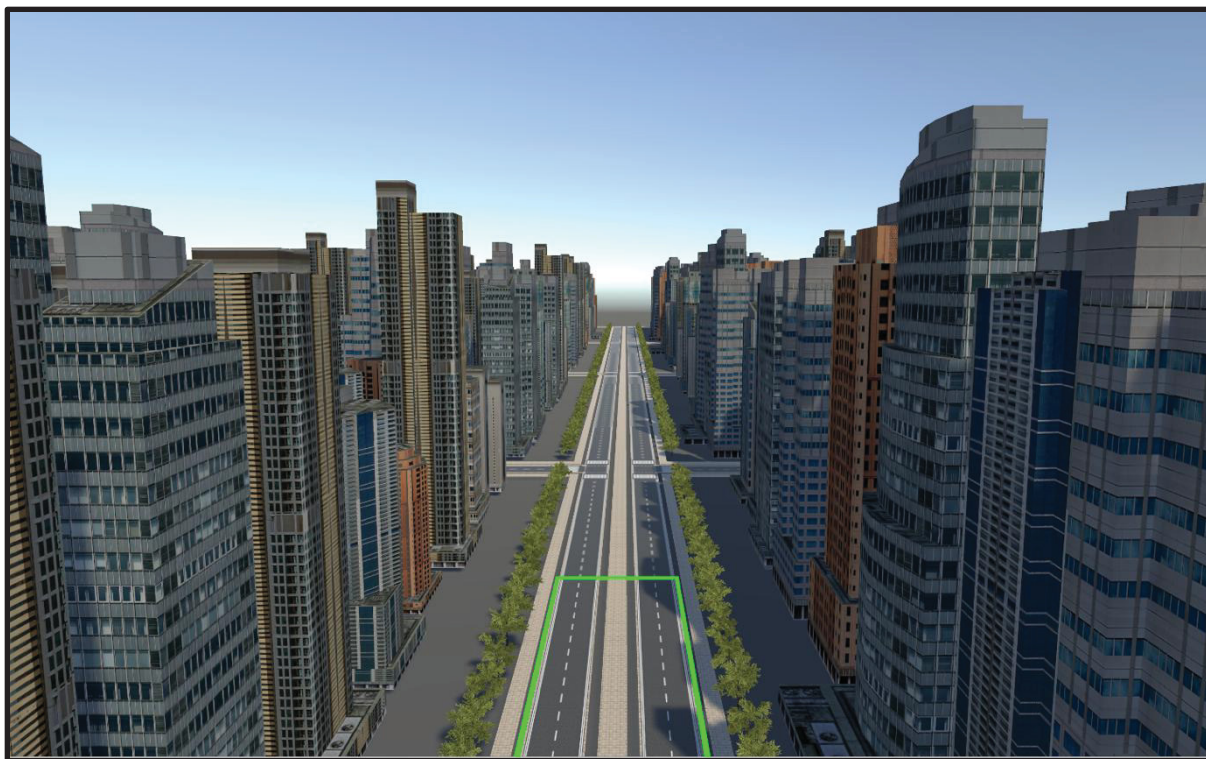


Figure 3.4 Ville virtuelle sur Unity



Figure 3.5 Avatar virtuel se déplaçant dans la ville virtuelle avec des véhicules au sol

3.4 Avatars

Voici un aperçu des quatre avatars créés :

Avatar Humain avec proportions humaines (H-PH) (Figure 6 A) :

Cet avatar représente un humain avec des proportions anatomiquement correctes, fidèles aux dimensions mesurées sur les participants. Ces proportions incluent la longueur du fémur, du tibia, de l'avant-bras, de l'humérus, la longueur totale du cou, la distance entre le haut et le bas

du dos, ainsi que la taille totale. Il a été généré sur MakeHuman pour chaque participant avant leur arrivée.

Avatar Humain avec proportions Godzilla (H-PG) (Figure 6 B) :

Cet avatar correspond à un humain avec des proportions similaires à celles de Godzilla. Les ajustements incluent un tronc allongé de 25 % en moyenne par rapport à celui du participant, des membres supérieurs raccourcis de 23 %, et des membres inférieurs raccourcis de 16 %. Ces modifications ont été appliquées et vérifiées en ajustant directement les segments corporels pour être le plus exact possible et conserver la taille totale des participants.

Avatar Godzilla avec proportions humaines (G-PH) (Figure 7 C) :

Cet avatar représente Godzilla avec des proportions anatomiquement adaptées aux dimensions humaines. Les mêmes segments corporels que ceux de l'Avatar Humain Standard ont été mesurés et ajustés, notamment le fémur, le tibia, l'avant-bras, l'humérus, la longueur du cou et les segments du dos.

Avatar Godzilla avec proportions Godzilla (G-PG) (Figure 7 D) :

Cet avatar, représentant Godzilla, a été téléchargé sur TurboSquid, comme dans l'étude de Charbonneau et al. (2017). Ses proportions sont celles définies par le modèle d'origine, avec des membres relativement courts, un tronc massif et un long cou. Plus précisément, le haut du corps représente 58 % de la hauteur totale de l'avatar, le bas du corps en constitue 42 %, avec un tibia correspondant à 24,5 % et un fémur à 17,7 %. L'échelle globale de l'avatar a été adaptée pour correspondre à celle du participant en utilisant Blender.

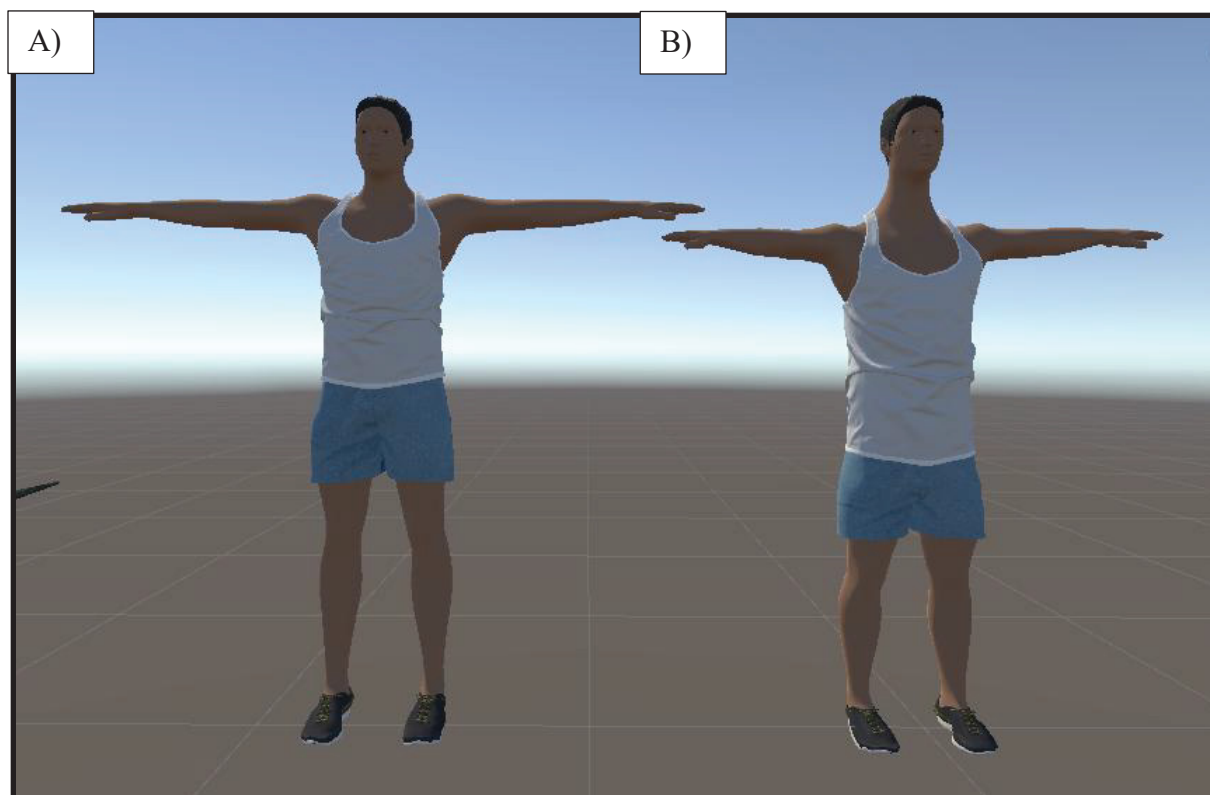


Figure 3.6 A) Avatar Humain avec proportions humaines (H-PH), B) Avatar Humain avec proportions Godzilla (H-PG)

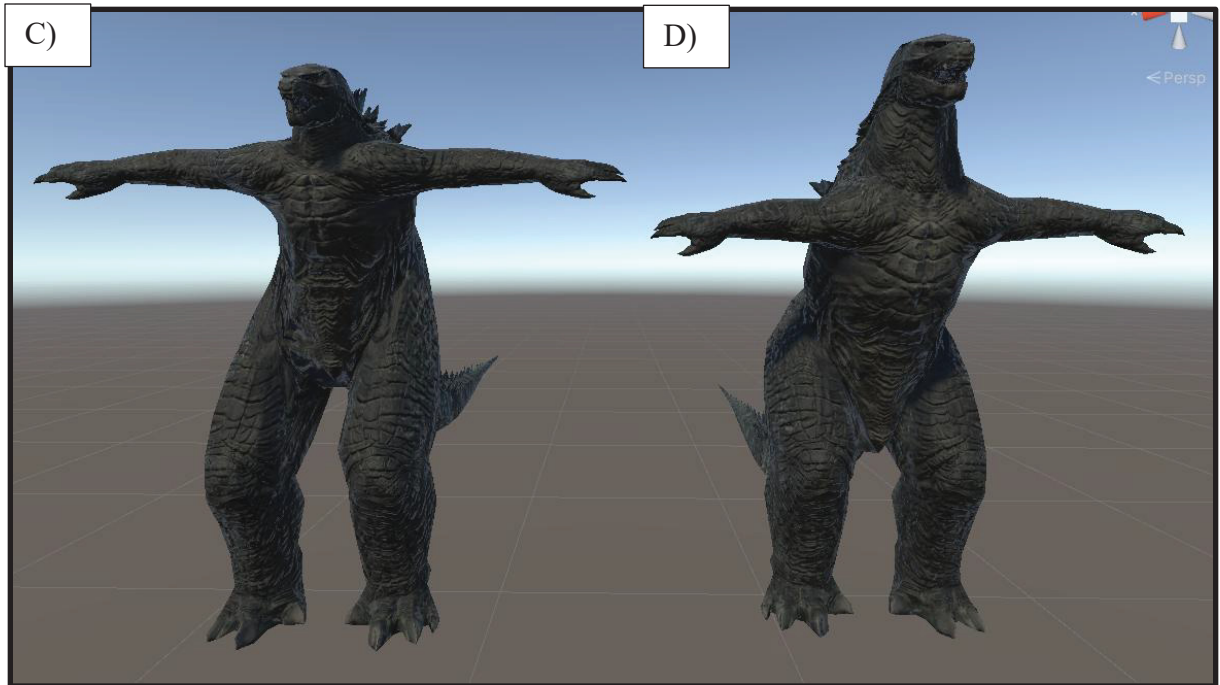


Figure 3.7 C) Avatar Godzilla avec proportions humaine (G-PH) et D) Avatar Godzilla avec proportions Godzilla (G-PG)

3.5 Protocole expérimental

L'expérience comporte quatre conditions correspondant aux 4 avatars étudiés, présentées dans un ordre pseudo-aléatoire pour s'assurer que tous les ordres possibles soient représentés équitablement entre les participants. Chaque condition se déroule en trois phases : une phase d'incarnation, où les participants explorent les mouvements de leur avatar dans un laboratoire virtuel ; une phase d'attente, où ils observent leur reflet dans une ville virtuelle; et une phase dynamique, où ils marchent sur un tapis roulant en réalisant une tâche interactive. Pendant l'expérience, des pauses sont prévues entre les conditions, et les participants répondent à des questions sur le jugement temporel et l'incarnation.

3.5.1 Préparation des acquisitions

La préparation des acquisitions comprend la calibration des caméras Vicon, la calibration des plateformes de force, l'obtention du consentement écrit du participant, le remplissage d'un questionnaire, la fixation des capteurs et de l'équipement sur le participant, ainsi que la calibration des avatars (Figure 3.8).

3.5.1.1 Calibration des caméras Vicon

La calibration des douze caméras infrarouges du système Vicon s'effectue en trois étapes. La première consiste à identifier et supprimer les marqueurs fantômes qui pourraient être dus à des reflets, des capteurs posés au sol ou sur un bureau. Le logiciel utilisé, Tracker ou Nexus, masque temporairement les caméras afin d'éviter toute interprétation erronée des réflexions détectées. La deuxième étape concerne la détection de la position des caméras dans l'espace. Une baguette équipée de quatre marqueurs LED, dont les distances sont connues par le logiciel, est utilisée pour balayer la zone en réalisant des mouvements en forme de « 8 ». Une fois les caméras localisées, leur disposition est affichée dans le logiciel, bien qu'aucune origine pour les axes x, y et z ne soit encore définie. La troisième étape consiste à configurer cette origine en posant la baguette au sol au centre du tapis. Une précision maximale doit être respectée, avec une erreur si possible inférieure à 0,3 mm, afin de garantir une bonne précision. Cette calibration peut être effectuée aussi bien sur le logiciel Tracker que Nexus, car les fichiers générés sont interchangeables.

3.5.1.2 Vérification de la plateforme de force

Une vérification spécifique est réalisée pour la plateforme de force intégrée au tapis roulant. Une première calibration à zéro permet d'établir une référence de mesure. Ensuite, un poids muni d'un marqueur est placé sur le tapis afin de vérifier la réaction au sol dans Nexus. La direction de la force et la valeur de 75 N sont contrôlées afin de s'assurer du bon fonctionnement du système.

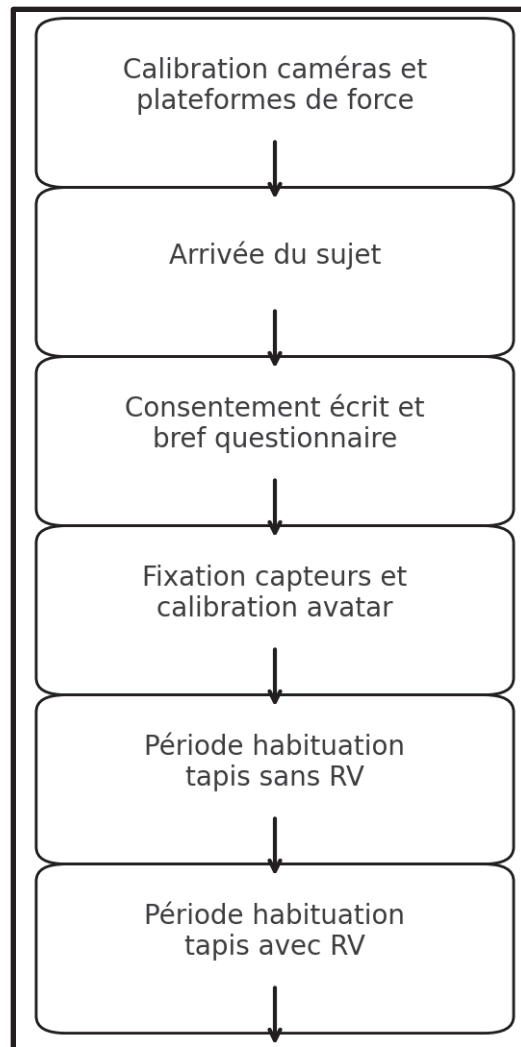


Figure 3.8 Schéma de déroulement de la préparation des acquisitions

3.5.1.3 Consentement et préparation du participant

Avant toute acquisition, le participant est accueilli et un temps est consacré à l'explication détaillée du déroulement de l'expérience. Cette étape permet aux participants de poser des questions et de s'assurer qu'ils comprennent chaque étape du protocole. Ensuite, un questionnaire est rempli afin de vérifier que les critères d'inclusion et d'exclusion sont respectés (voir annexe 1). Une fois cette validation effectuée, les participants prennent connaissance du formulaire d'information et de consentement, qu'ils doivent lire et signer.

3.5.1.4 Pose de marqueurs et calibration de l'avatar

Les plaques munies de marqueurs réfléchissants sont fixées à l'aide de bandes velcro sur des points spécifiques du corps (figure 9). Deux marqueurs individuels sont positionnés sur les talons et un harnais de sécurité est installé sur le participant. Cette étape dure environ dix minutes.

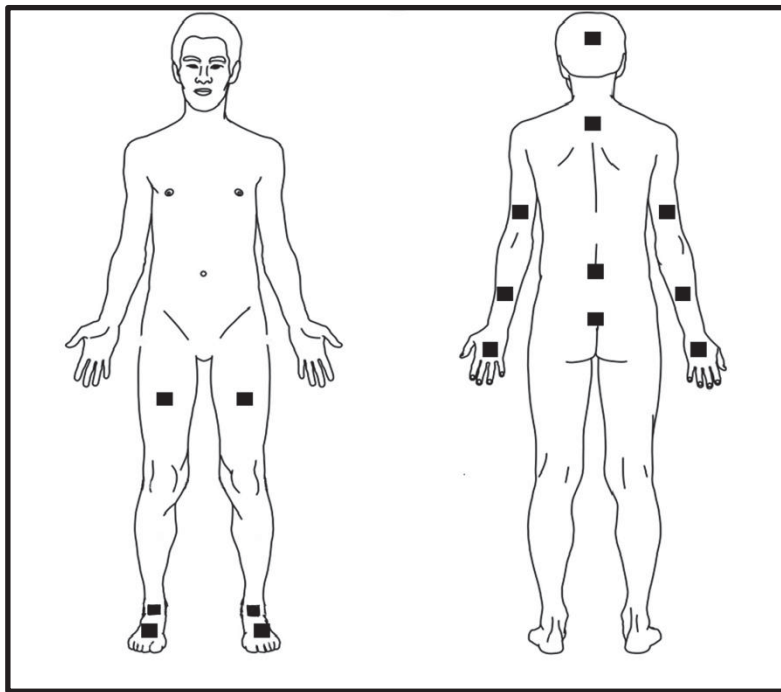


Figure 3.9 Schéma de positionnement des marqueurs

3.5.1.5 Calibration du système Pegasus

La calibration du système Pegasus assure un reciblage des données cinématiques et une animation des avatars virtuels. Le reciblage applique des transformations 3D, telles que des rotations et translations, pour faire correspondre les mouvements captés sur le corps réel à ceux de l'avatar virtuel. Le logiciel utilise des techniques de cinématique inverse.

Le participant adopte une posture en "T" (T-pose) pendant environ dix secondes, avec les pieds ajustés à l'aide d'un petit bloc en bois qui permet d'aligner les pieds vers l'avant et parallèles pour faciliter le reciblage des pieds avec ceux de l'avatar virtuel par la suite. Cette posture permet d'avoir les données cinématiques de tous les marqueurs présents sur le participant. Ces données sont également enregistrées dans Tracker pour ajuster les futurs avatars selon les spécificités du participant. Les données cinématiques de la T-pose captées dans Tracker sont ensuite importées dans Pegasus, superposé sur un avatar virtuel au format FBX. Un format FBX (Filmbox) est un format de fichier utilisé pour des modèles 3D, des animations et des données de capture de mouvement, permettant de manipuler des avatars virtuels. Chaque corps rigide est associé à un os spécifique de l'avatar virtuel, conformément à un modèle prédéfini. L'alignement du modèle FBX avec la T-pose s'effectue grâce aux outils de translation et de rotation, en utilisant comme références les marqueurs des pieds et de la colonne vertébrale. Manuellement, les segments de la T-pose du participant sont superposés aux segments du modèle FBX de l'avatar virtuel. L'extrême précision n'est pas nécessaire car l'objectif étant principalement de recréer le mouvement. L'alignement est donc ajusté visuellement à l'aide des outils de translation et de rotation dans Pegasus, ce qui implique une possible variabilité. Pour limiter cette variabilité, l'ajustement visuel s'appuie sur des repères anatomiques clés comme les marqueurs des pieds, de la colonne vertébrale et des épaules afin de garantir un positionnement globalement cohérent du squelette virtuel avec le squelette réel. L'ajustement est effectué directement dans Pegasus, en superposant la T-pose captée sur squelette de l'avatar, à partir de l'interface graphique 3D. On vérifie que les jambes, bras et tronc de l'avatar sont alignés avec ceux du participant et que la posture virtuelle reproduit fidèlement celle du corps réel. Lors des tests en temps réel, si certaines articulations montrent des incohérences l'alignement est ajusté à nouveau jusqu'à obtenir un suivi cohérent du mouvement.

L'animation en temps réel peut être testée pour s'assurer du bon fonctionnement. Le participant effectue une série de mouvements, notamment des rotations des bras et des jambes, afin de vérifier que les segments de l'avatar suivent correctement les os assignés (Figure 10).

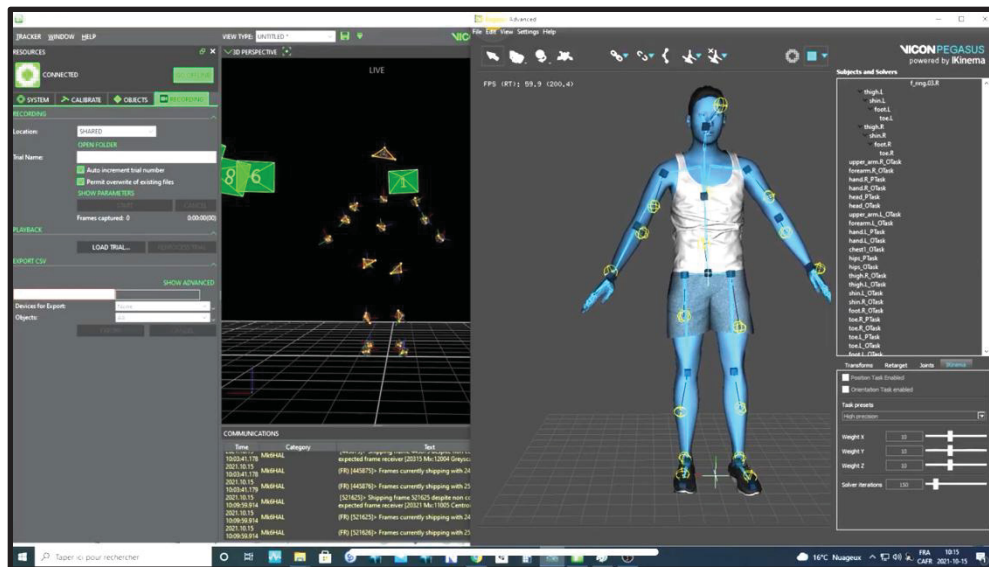


Figure 3.10 A gauche le participant en mouvement sur Tracker et à droite le participant en mouvement sur Pegasus

3.5.1.6 Habitude à la marche sur tapis roulant en RV

Avant de débiter les conditions expérimentales, les participants passent par une période d'échauffement et d'habitude à la marche sur tapis roulant. Une première phase de deux à trois minutes leur permet de marcher sans casque de réalité virtuelle afin de s'adapter au tapis et de déterminer une vitesse de marche confortable. Cette vitesse est ajustée progressivement par palier de 0,1 m/s, en commençant à 1 m/s, jusqu'à ce que le participant indique qu'il se sent à l'aise.

Une seconde phase d'habitude de cinq minutes s'effectue cette fois avec le casque de réalité virtuelle. Cette étape permet aux participants de s'adapter à la marche dans un environnement virtuel, où seules leurs chaussures sont visibles afin d'éviter tout biais lié à l'incarnation d'un avatar. Enfin, les participants peuvent interagir avec l'environnement virtuel en écrasant une dizaine de véhicules dans la ville virtuelle pendant deux minutes. Cette activité vise à renforcer leur familiarisation avec l'environnement et à réduire l'effet de nouveauté avant le début des conditions expérimentales.

3.5.2 Déroulement des conditions

L'expérience est structurée autour de quatre conditions, chacune correspondant à l'incarnation d'un avatar distinct : un avatar humain, un avatar de monstre Godzilla, et deux avatars aux proportions morphologiquement modifiées. Le déroulement de chaque condition est identique et se déroule selon les étapes suivantes (Figure 11).

Scène d'incarnation

Le participant débute l'expérience dans une réplique virtuelle du laboratoire de biomécanique du CRCHUM. Il est immergé dans cet environnement à l'aide du Meta Quest 3 et incarne à la première personne l'un des avatars de l'étude. Cette scène, appelée "Scène d'Incarnation", vise à induire le sentiment d'incarnation. Pour cela, le participant est invité, pendant trois minutes, à effectuer librement, sans instructions spécifiques, des mouvements des bras et des jambes, tout en observant leurs synchronisations dans un miroir virtuel. Cette phase permet de créer le sentiment d'incarnation en favorisant la synchronisation visuomotrice, ainsi que la cohérence visuomotrice et proprioceptive, ce qui amène le participant à percevoir l'avatar comme une extension de son propre corps.

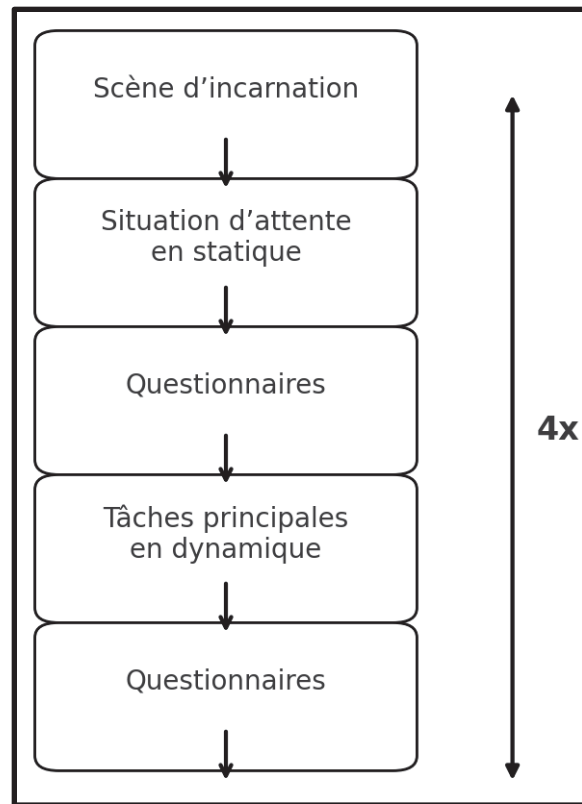


Figure 3.11 Schéma de déroulement des conditions

Situation d'attente

Le participant est ensuite transporté instantanément, sans transition visuelle, dans un environnement urbain virtuel représentant une ville. Il est informé qu'une phase de calibration du système est en cours avant de commencer à marcher. En réalité, cette instruction vise à instaurer une période d'attente recherchée pour l'expérience, sans que le participant ne sache que cette phase a pour but d'évaluer son jugement temporel dans un contexte d'attente passive. Durant cette période, le participant demeure debout, sans marcher, et se voit dans un miroir virtuel en face de lui, en première personne. L'avatar suit en temps réel chacun de ses mouvements. Il peut observer son reflet, bouger, regarder autour de lui la ville virtuelle, et prendre conscience de son apparence. Incarnant toujours l'avatar qui lui a été assigné, il adopte l'allure d'un géant dans cette ville.

À la fin de la phase d'attente de 5 minutes, le participant, toujours équipé du casque de RV, répond oralement à un questionnaire qui s'affiche dans l'environnement virtuel sur le jugement temporel et le sentiment de présence (voir section 3.3.3.1 Questionnaires). L'objectif de cette étape est d'évaluer l'effet de l'incarnation dans un contexte passif sur la perception temporelle, en plaçant le participant dans une situation d'attente sans directive explicite.

Tâches principales en dynamique

Le miroir virtuel disparaît, marquant la fin de la période d'attente. Le participant est informé que le tapis roulant va commencer à se déplacer et qu'il va marcher dans la ville. La vitesse de marche est celle qui a été déterminée comme confortable lors de la phase de préparation.

Dans un premier temps, le participant marche pendant une minute, avant que des véhicules apparaissent aléatoirement sur la route. Le participant doit alors les écraser en marchant dessus, ce qui génère une explosion en guise de retour visuel. Il n'y a aucun impact si le participant ne les écrase pas.

La tâche dure six minutes et trente secondes. À la fin de cette période, le participant est informé que le tapis va ralentir progressivement avant de s'arrêter complètement. Une fois l'arrêt complet, les mêmes questions que précédemment s'affichent dans l'environnement virtuel, et le participant doit y répondre oralement.

Le casque de RV est ensuite retiré, et deux autres questionnaires sont donnés au participant : le questionnaire d'incarnation à remplir sur ordinateur et un questionnaire sur le cybermalaise à compléter sur papier, qui vise à évaluer toute sensation de malaise ou d'inconfort ressentie au cours de l'expérience (voir section 3.3.3.1 Questionnaires).

Des pauses de 6 à 7 minutes (sans casque de réalité virtuelle) sont effectuées à la fin de chaque condition afin de réduire la fatigue et de maintenir la concentration des participants avant de débiter la condition suivante.

Le choix des durées pour les phases d'attente de 5 minutes et dynamique de 6 minutes 30 s'inspire du protocole utilisé dans l'étude de Charbonneau et al. (2017), qui proposait une durée de 13 minutes pour les tâches dynamiques. Un équilibre a été recherché : les durées choisies

devaient être suffisamment longues pour permettre une perception temporelle significative, mais aussi assez courtes pour ne pas allonger excessivement l'expérience, ce qui aurait pu altérer le jugement temporel.

3.5.3 Mesures

3.5.3.1 Questionnaires

Dans le cadre de cette étude, plusieurs questionnaires sont donnés aux participants à différents moments de l'expérience pour évaluer divers aspects de leur jugement temporel et de leur expérience immersive. Voici une description des questionnaires utilisés :

Estimation du temps

Les participants étaient invités, via une interface en réalité virtuelle, à estimer oralement la durée de leur expérience à deux reprises : après le temps d'attente et après les tâches dynamiques. La question posée adaptée de Unruh et al. (2023) est : *"Intuitivement (sans trop réfléchir), combien de temps pensez-vous avoir passé (en minutes et en secondes) ?"*

Perception du temps

De même pour évaluer leur perception du temps, deux questions ont été posées aux participants à deux reprises (après le temps d'attente et après les tâches dynamiques) via une interface en réalité virtuelle. Sachant que les mouvements des doigts ne sont pas suivis, afin d'éviter l'utilisation de contrôleurs et de réduire le risque de briser l'incarnation, les participants répondent oralement en choisissant un chiffre sur une échelle de Likert de 0 à 10.

La première question portait sur la conscience temporelle : *"À quelle fréquence avez-vous pensé au temps ?"*. Les réponses étaient recueillies sur une échelle de Likert allant de 0 à 10, où 0 signifiait *"Pas du tout"* et 10 *"Extrêmement souvent"*.

La seconde question visait à évaluer le passage du temps : *"À quelle vitesse le temps s'est-il écoulé pour vous ?"*. Là encore, les participants répondaient sur une échelle de Likert de 0 à 10, où 0 correspondait à *"Extrêmement lent"* et 10 à *"Extrêmement rapide"*.

Présence

La perception de la présence dans l'environnement virtuel était évaluée via une interface en réalité virtuelle sur une échelle de Likert allant de 0 à 10, où 0 signifiait *"Pas du tout présent"* et 10 *"Extrêmement présent"* :

"Dans quelle mesure vous sentez-vous présent dans l'environnement virtuel, comme si vous y étiez vraiment ?".

Cette question est posée après le temps d'attente et après les tâches dynamiques.

Cybermalaise

Pour mesurer le cybermalaise, le *Simulator Sickness Questionnaire* (SSQ) de Kennedy et al. (1993) est administré sur papier à la fin de chaque condition. Ce format est choisi afin de réduire la fatigue visuelle des participants, car ils doivent évaluer 16 symptômes liés à l'expérience immersive. Cet outil standardisé permet d'évaluer les éventuels effets négatifs de l'expérience immersive sur le confort des participants. (Voir annexe 1)

Incarnation

L'incarnation de l'avatar virtuel a été évaluée à l'aide d'un questionnaire sur ordinateur développé par Gonzalez-Franco et Peck (2021). Ce format est choisi afin de réduire la fatigue visuelle des participants, compte tenu des 16 questions auxquelles ils doivent répondre. Ce questionnaire vise à mesurer divers aspects de l'incarnation, offrant ainsi des données sur l'intégration cognitive et sensorielle du participant avec son avatar virtuel, tel que l'apparence, le sentiment d'appartenance, le contrôle moteur et les illusions multisensorielles. L'apparence reflète la perception visuelle de l'apparence du corps virtuel et son adéquation avec le corps réel. Le sentiment d'appartenance mesure la réactivité du corps virtuel aux mouvements et actions du participant. Le contrôle moteur représente le sentiment que le corps virtuel appartient au participant comme s'il s'agissait de son propre corps. Enfin les illusions

multisensorielles capturent l'intégration des expériences sensorielles (visuelles, tactiles, proprioceptives) avec le corps virtuel dans l'environnement immersif.

Le questionnaire comporte 16 questions réparties en quatre groupes correspondant à l'apparence (Appearance), le sentiment d'appartenance (Ownership), le contrôle moteur (Response), et les illusions multisensorielles (Multisensory). Les scores ont été calculés ainsi :

- Apparence : $(R1 + R2 + R3 + R4 + R5 + R6 + R9 + R16) / 8$
- Contrôle moteur : $(R4 + R6 + R7 + R8 + R9 + R15) / 6$
- Illusions multisensorielles : $(R3 + R12 + R13 + R14 + R15 + R16) / 6$
- Sentiment d'appartenance : $(R5 + R10 + R11 + R12 + R13 + R14) / 6$

Le score final d'incarnation est obtenu en faisant la moyenne des quatre scores ci-dessus. Toutes les questions du questionnaire original ont été conservées pour cette étude.

3.5.3.2 Mesures quantitatives

Les mesures quantitatives de l'étude incluaient plusieurs types de données.

Données cinématiques

Les données cinématiques ont été collectées à l'aide de marqueurs de capture de mouvement placés sur les participants et enregistrées via le système Vicon. Ces marqueurs ont permis d'enregistrer les positions de tous les marqueurs au cours de l'expérience. Bien que ces données aient été collectées et nécessaire pour moduler l'avatar, elles n'ont pas été analysées dans ce mémoire mais pourraient être utilisés pour recréer tous les mouvements du participant et étudier par exemple les longueurs de pas, la cadence etc.

Interaction avec les véhicules

Enfin, le moment où les participants écrasaient les véhicules virtuels a également été enregistré. Ces données n'ont pas été analysées dans ce mémoire.

3.6 Analyse statistique

Les données ont été collectées, regroupées et analysées afin de répondre au mieux aux objectifs de recherche de l'étude, liés à l'incarnation et au jugement temporel des participants.

Les données collectées ont d'abord été regroupées par avatar afin d'examiner l'effet des avatars. Ensuite, elles ont été organisées dans l'ordre chronologique des conditions expérimentales, car le jugement temporel pourrait être fortement influencée par le temps écoulé depuis le début de l'expérience en RV. Ainsi, on peut évaluer l'impact de la durée d'exposition à la réalité virtuelle.

Pour les scores d'incarnation, une analyse de variance à mesures répétées (ANOVA) a d'abord été réalisée pour examiner l'effet de la nature et des proportions des avatars. Cependant, l'examen des résidus de cette analyse à l'aide du test de Shapiro-Wilk a révélé qu'ils ne suivaient pas une distribution normale. Les modèles linéaires mixtes (LMM), bien que paramétriques, sont souvent plus robustes aux violations de la normalité des résidus (Schielzeth et al., 2020). Ainsi un modèle linéaire mixte (LMM) a été utilisé, avec la nature et les proportions de l'avatar comme effets fixes, et le participant comme effet aléatoire.

Pour l'estimation de temps, des ANOVA à mesures répétées à deux facteurs ont été réalisées pour examiner les effets des facteurs principaux (nature d'avatar et proportions), durant les phases d'attente et dynamique. La normalité des résidus a été évaluée à l'aide du test de Shapiro-Wilk. Des tests post-hoc ont été effectués à l'aide de tests t appariés avec une correction de Bonferroni pour les effets principaux significatifs.

Pour la perception du temps, des modèles linéaires mixtes (LMM) ont été utilisés pour les mêmes raisons que celles justifiant leur application à l'analyse des scores d'incarnation. Une ANOVA à mesures répétées à deux facteurs a d'abord été réalisée afin d'examiner les effets principaux de la nature et des proportions de l'avatar mais l'évaluation des résidus via le test de Shapiro-Wilk a montré qu'ils ne suivaient pas une distribution normale. Compte tenu de la robustesse des LMM face aux violations de normalité des résidus (Schielzeth et al., 2020), un

modèle linéaire mixte a été préféré avec la nature et les proportions de l'avatar comme effets fixes, et le participant comme effet aléatoire.

Une analyse qualitative, ainsi que des calculs de moyennes et d'écart-types, ont été réalisés en complément des analyses statistiques. Cette approche a été utilisée pour investiguer les tendances en raison de la variabilité des données, qui aurait nécessité un nombre de participants beaucoup plus élevé pour une analyse avec une bonne puissance.

CHAPITRE 4

RESULTATS

4.1 Incarnation

Dans cette étude, les scores d'incarnation étaient élevés dans toutes les conditions, avec des moyennes comprises entre 4,48 et 5,06 (Figure 12). Cependant, l'incarnation était significativement plus élevée lorsque les participants incarnaient un avatar de nature humaine. En effet, le modèle linéaire mixte (LMM) a montré que la nature de l'avatar avait un effet significatif sur l'incarnation ($F(1, 54,072) = 18,586, p < 0,001$), avec des scores plus élevés pour les avatars humains. Les analyses post-hoc ont révélé des scores significativement plus élevés ($\Delta = -0,52, p = 0,0158$) pour l'avatar Humain avec proportions Godzilla H-PG (moyenne = 5,00 ; écart-type = 1,30) par rapport à l'avatar Godzilla avec proportions Godzilla G-PG (moyenne = 4,48 ; écart-type = 1,20). De plus, une différence significative ($\Delta = -0,52, p = 0,0208$) a été observée entre l'avatar Humain avec proportions humaines H-PH (moyenne = 5,06 ; écart-type = 1,20) et l'avatar Godzilla avec proportions humaines G-PH (moyenne = 4,54 ; écart-type = 1,30).

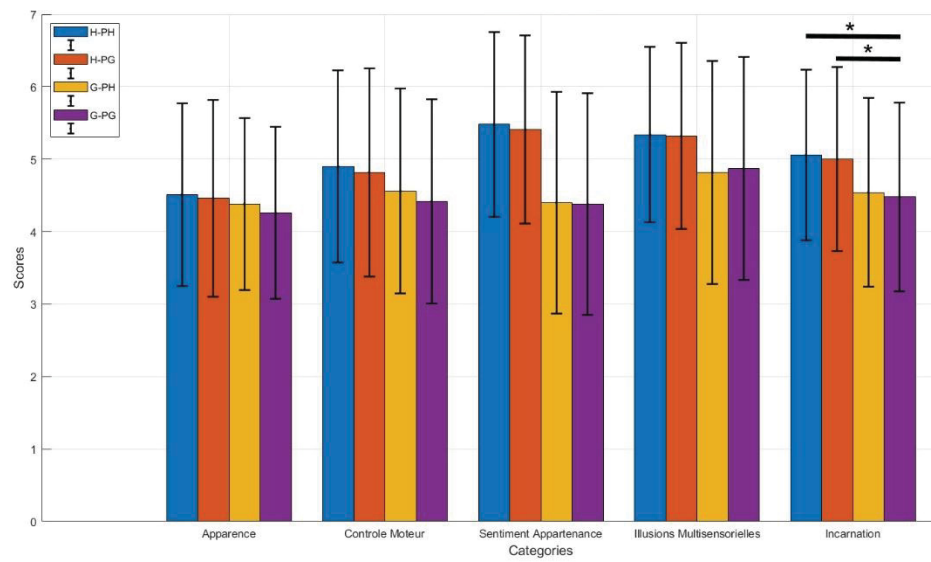


Figure 4.1 Scores d'incarnation et de ses composantes, par avatar, évalués sur 7

Les scores moyens obtenus, présentés dans l’ordre chronologique des conditions de la première à la quatrième, montrent des valeurs élevées sans tendance claire vers une augmentation ou une diminution de l’incarnation 4,53, 4,68, 4,61 et 4,87 (Figure 13).

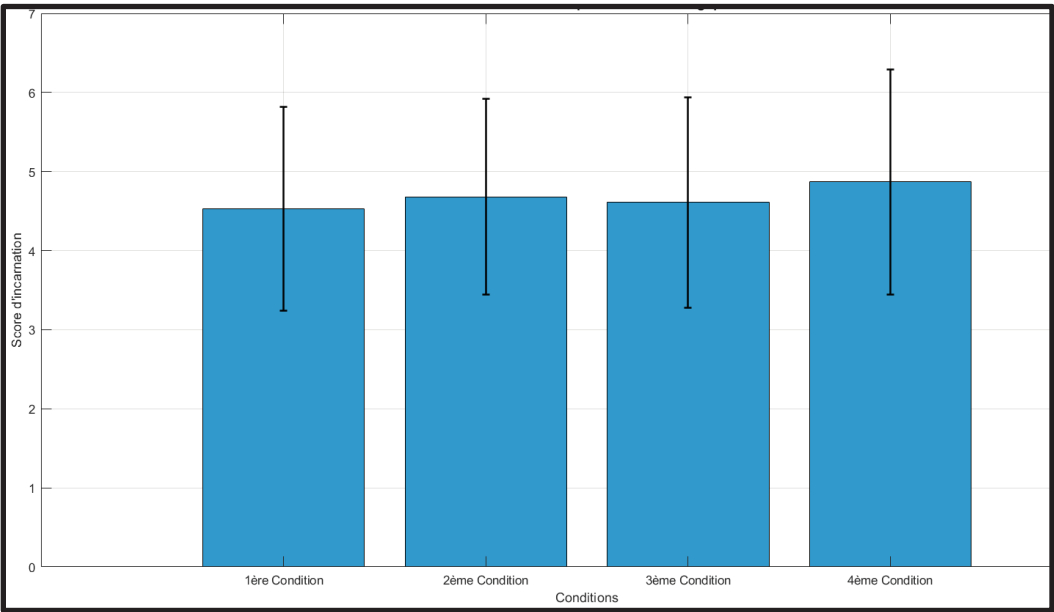


Figure 4.2 Scores d'incarnation par ordre chronologique évalués sur 7

4.2 Estimation du temps

Estimation du temps par avatar

L'analyse a révélé un effet principal significatif des proportions de l'avatar sur l'estimation du temps pendant la phase d'attente ($F(1,18) = 4,68$, $p = 0,044$, $\eta^2 = 0,017$). Plus précisément, les participants utilisant des avatars aux proportions humaines ont présenté une sous-estimation du temps plus importante ($M = 12.8 \pm 39$ (%)) (Figure 14) par rapport à ceux utilisant des avatars aux proportions similaires à celles de Godzilla ($M = 3.2 \% \pm 35$ (%)). $\eta^2 = 0,017$ indique un effet faible, expliquant 1,7 % de la variance, mais qui est statistiquement significatif, ce qui suggère un effet réel mais moindre. En revanche, l'effet principal du type d'avatar n'était pas significatif ($F(1,18) = 0,72$, $p = 0,838$) et l'interaction entre le type d'avatar et les proportions de l'avatar n'était pas non plus significative ($F(1,18) = 0,11$, $p = 0,739$). Les comparaisons post-hoc entre paires de conditions n'ont pas révélé de différences statistiquement significatives.

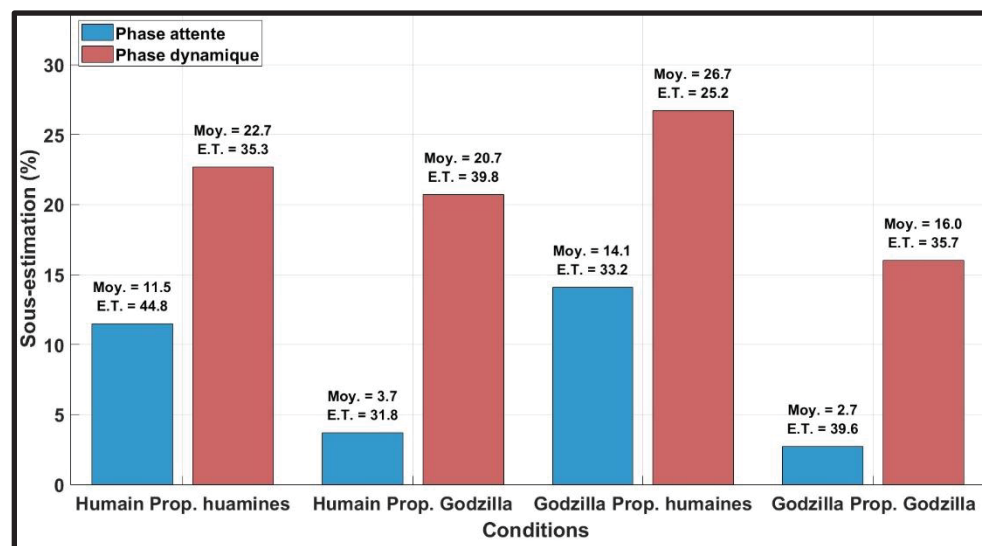


Figure 4.3 Sous-estimation du temps, par Avatar, pour la phase attente et la phase dynamique

Pour l'estimation du temps pendant la phase dynamique, aucun effet significatif n'a été observé concernant le type d'avatar ($F(1,18) = 0,01$, $p = 0,926$), les proportions de l'avatar ($F(1,18) = 1,93$, $p = 0,182$) ou leur interaction ($F(1,18) = 1,33$, $p = 0,256$).

Sous-estimation du temps selon l'ordre des conditions.

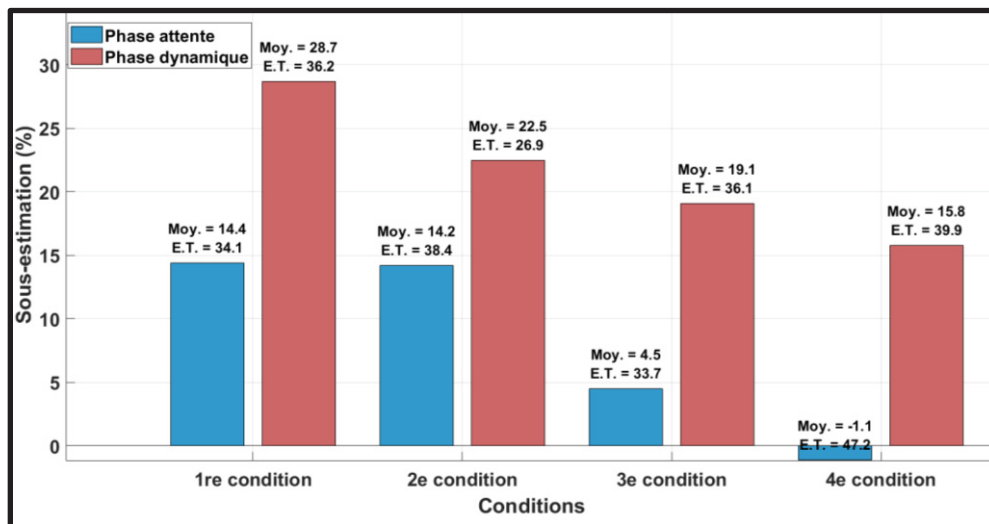


Figure 4.4 Sous-estimation par ordre chronologique pour la phase d'attente et la phase dynamique

Au fil des conditions expérimentales, on observe une diminution progressive de la sous-estimation du temps, particulièrement marquée en phase d'attente, où l'on passe d'une sous-estimation de 14,4 % lors de la première condition à une légère surestimation de 1,1 % lors de la quatrième condition (Figure 15).

En phase dynamique, une diminution est également présente, mais plus progressive avec des sous-estimations qui restent toujours supérieures à celles observées en phase d'attente. On part d'une sous-estimation marquée de 28,7 % en première condition pour atteindre 15,8 % en quatrième condition.

4.3 Perception du temps

Pour la perception du temps, on rappelle que deux aspects ont été évalués après la phase d'attente de 5 minutes et après la phase dynamique de 6 minutes et 30 secondes :

1. Conscience temporelle : "*À quelle fréquence avez-vous pensé au temps ?*", avec une échelle de Likert de 0 ("*Pas du tout*") à 10 ("*Extrêmement souvent*").
2. Perception du passage du temps : "*À quelle vitesse le temps s'est-il écoulé pour vous ?*", avec une échelle de Likert de 0 ("*Extrêmement lent*") à 10 ("*Extrêmement rapide*").

Pour la conscience temporelle en phase d'attente (Tableau 1)(Figure 16), le LMM a révélé un effet significatif de la proportion de l'avatar ($F(1, 54) = 5.29, p = 0.0254$), indiquant une influence des proportions humaines sur la perception du temps. Plus précisément, les participants utilisant des avatars aux proportions humaines ont moins pensé au temps. En revanche, l'effet principal de la nature de l'avatar n'était pas significatif ($F(1, 54) = 0.93, p = 0.3385$). L'interaction entre la nature et la proportion de l'avatar n'était pas significatif non plus ($F(1, 54) = 2.75, p = 0.1030$).

Les analyses post-hoc avec Tukey HSD ont été réalisées mais aucune comparaison par paire n'a révélé de différence statistiquement significative entre les conditions ($p > 0.05$).

Les contrastes montrent que les différences les plus marquées concernent l'opposition entre l'avatar Godzilla avec proportions humaines G-PH par rapport à l'avatar Godzilla avec proportions Godzilla G-PG ($\Delta = 1.32, SE = 0.572, t(54) = 2.299, p = 0.1108$), mais cette différence ne dépasse pas le seuil de significativité. Aucune autre comparaison n'a révélé d'effet notable.

Pour le passage du temps en phase d'attente, le LMM a révélé un effet significatif de la proportion de l'avatar ($F(1, 54) = 11.38, p = 0.0014$), indiquant que les avatars ayant une proportion humaine influencent significativement la perception du temps. Plus précisément, les participants utilisant des avatars aux proportions humaines ont perçu le temps comme passant plus rapidement. En revanche, l'effet principal de la nature de l'avatar n'était pas

significatif ($F(1, 54) = 0.054, p = 0.8169$). L'interaction entre la nature et la proportion de l'avatar n'était pas significative ($F(1, 54) = 1.96, p = 0.1678$).

Des tests post-hoc avec correction de Tukey HSD ont été menés afin de comparer toutes les paires de conditions tout en contrôlant l'erreur de type I associée aux comparaisons multiples. Ces analyses ont révélé plusieurs différences significatives. Notamment, les participants ont présenté des scores significativement plus élevés dans la condition avec l'avatar Godzilla avec proportions humaines G-PH par rapport à l'avatar Godzilla avec proportions Godzilla G-PG ($\Delta = -1.53, SE = 0.452, t(54) = -3.37, p = 0.0073$). De même, la condition avec l'avatar Humain avec proportions Godzilla H-PG a généré des valeurs significativement plus faibles que avec l'avatar Godzilla avec proportions humaines G-PH ($\Delta = -1.63, SE = 0.452, t(54) = -3.61, p = 0.0037$). En revanche, aucune autre comparaison n'a révélé d'effet statistiquement significatif. Pour la conscience temporelle en phase dynamique, le LMM n'a révélé aucun effet significatif de la proportion ($F(1, 54) = 2.64, p = 0.1103$), de la nature ($F(1, 54) = 0.146, p = 0.7039$) ou de l'interaction des deux ($F(1, 54) = 0.292, p = 0.5912$).

Étant donné l'absence d'effet significatif, les comparaisons post-hoc avec Tukey HSD n'ont pas été effectuées, car elles ne seraient pas interprétables. Ces résultats suggèrent que ni la nature ni la proportion de l'avatar n'ont influencé conscience temporelle en phase dynamique.

Pour le passage du temps en phase dynamique, le LMM a révélé un effet significatif de la nature de l'avatar ($F(1, 54) = 4.05, p = 0.0493$) ainsi que de sa proportion ($F(1, 54) = 6.18, p = 0.0161$). L'interaction entre la nature et la proportion de l'avatar est proche du seuil de significativité ($F(1, 54) = 3.39, p = 0.0711$), suggérant une possible influence conjointe des deux facteurs, bien qu'elle ne soit pas statistiquement confirmée.

Pour les analyses post-hoc avec Tukey HSD, aucune des comparaisons par paires n'a révélé de différence statistiquement significative après correction de Tukey ($p > 0.05$).

Les contrastes les plus marqués sont observés entre la condition avec l'avatar Godzilla avec proportions Godzilla G-PG et l'avatar Godzilla avec proportions humaines G-PH ($\Delta = -1.11, SE = 0.445, t(54) = -2.49, p = 0.0737$), mais cette différence reste au-dessus du seuil de

significativité. De même, la différence entre l'avatar Godzilla avec proportions Godzilla G-PG et l'avatar Humain avec proportions Godzilla H-PG $\Delta = -0.89$, $SE = 0.445$, $t(54) = -2.01$, $p = 0.1964$) est non significative.

Tableau 4.1 Conscience temporelle et passage du temps, par avatar, pour la phase attente et la phase dynamique évalués sur 10

Phase	Évaluation temporelle	Mesures	<i>H-PH</i>	<i>H-PG</i>	<i>G-PH</i>	<i>G-PG</i>
Attente	Conscience temporelle	Moy.	3,3	3,2	2,5	3,8
		E.T.	3	2,9	2,4	2,8
	Passage du temps	Moy.	5,5	4,9 **	6,5 **	5 **
		E.T.	2,4	2,5	2,4	2
Dynamique	Conscience temporelle	Moy.	2,9	3,4	2,7	3,6
		E.T.	2,8	2,9	2,2	3
	Passage du temps	Moy.	6,6	6,7	6,9	5,8
		E.T.	2,1	2,2	2,1	2

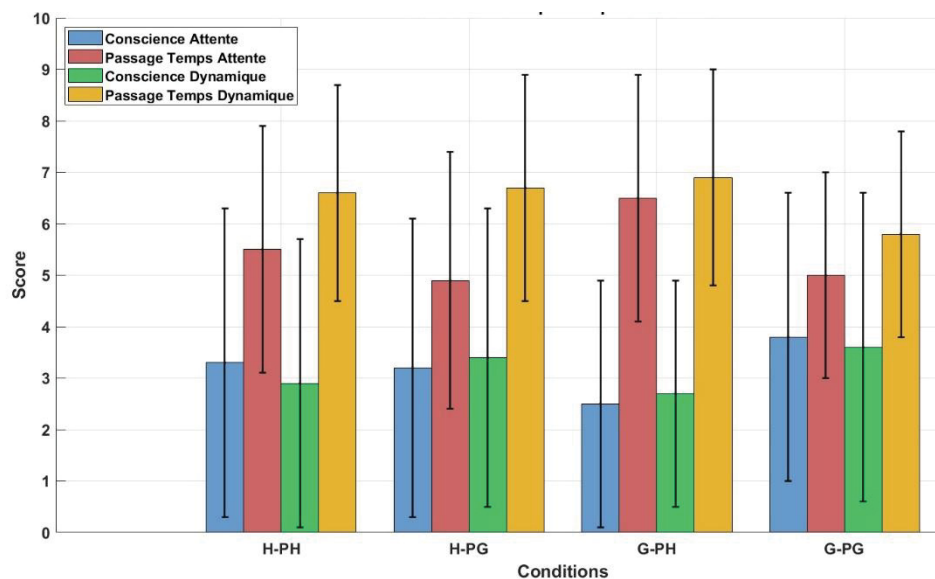


Figure 4.5 Diagramme conscience temporelle et passage du temps, par avatar, pour la phase attente et la phase dynamique évalués sur 10

Tableau 4.2 Conscience temporelle et passage du temps, selon l’ordre des conditions, pour la phase attente et la phase dynamique évalués sur 10

Phase	Évaluation temporelle	Mesures	1re condition	2e condition	3e condition	4e condition
Attente	Conscience temporelle	Moy.	3,16	2,95	3,34	3,32
		E.T.	2,2	2,2	2,7	2,9
	Passage du temps	Moy.	5,58	5,63	5,37	5,37
		E.T.	1,9	2,3	2,4	2,4
Dynamique	Conscience temporelle	Moy.	2,63	3,00	4,05	3,05
		E.T.	2,1	2,7	2,8	2,6
	Passage du temps	Moy.	6,63	6,42	6,05	6,89
		E.T.	1,6	1,8	2,2	2,2

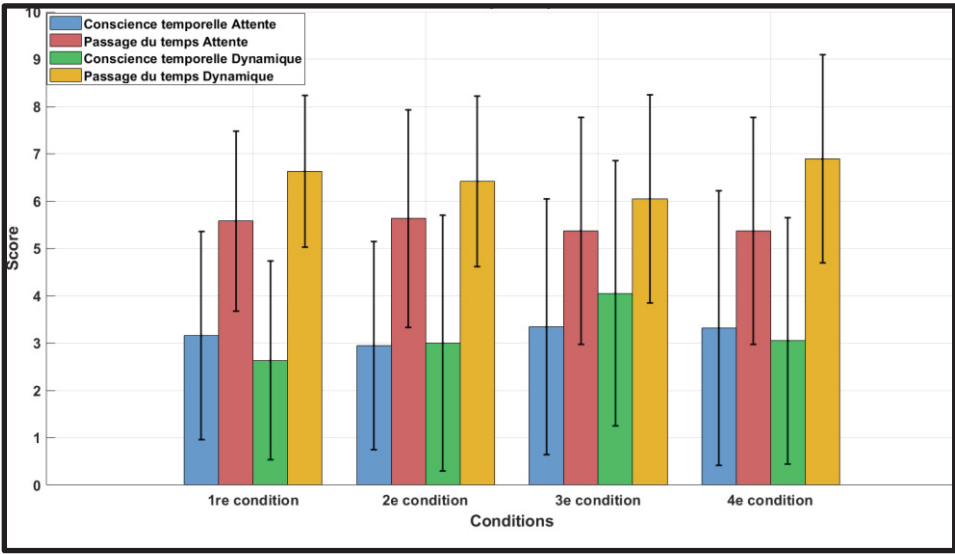


Figure 4.6 Diagramme conscience temporelle et passage du temps, selon l’ordre des conditions, pour la phase attente et la phase dynamique évalués sur 10

En phase d’attente, la conscience temporelle reste relativement stable au fil des conditions (Tableau 2) (Figure 17), avec des valeurs moyennes oscillant entre 2,95 et 3,34 sur une échelle de 10, suggérant que l’attention portée au temps ne change que très légèrement d’une condition à l’autre. De même, le passage du temps est perçu de manière très homogène (entre 5,37 et 5,63), sans tendance marquée.

En phase dynamique, la conscience temporelle augmente progressivement de la 1ère à la 3e condition (de 2,63 à 4,05), indiquant que les participants ont progressivement porté davantage d'attention au temps pendant l'activité, puis redescend légèrement à la 4e condition (3,05). En parallèle, le passage du temps suit une légère baisse entre la 1ère et la 3e condition (de 6,63 à 6,05), puis remonte à la 4e condition (6,89), suggérant que le temps a été perçu comme passant plus rapidement en fin d'expérimentation.

CHAPITRE 5

DISCUSSION

L'objectif principal de cette étude est d'examiner comment l'incarnation d'avatars virtuels en réalité virtuelle influence le jugement temporel. Plus précisément, elle cherche à déterminer si l'incarnation d'un avatar modifie le jugement temporel, explorer le rôle de sa nature, qu'il soit humain ou non-humain, et de ses proportions corporelles, qu'elles soient humaines ou non, dans ces distorsions temporelles. Enfin, cette recherche vise à comparer ces effets en réalité virtuelle dans une situation passive d'attente à une situation dynamique. L'objectif principal de cette étude est d'examiner comment l'incarnation d'avatars virtuels influence le jugement temporel. Cette recherche vise à confirmer si l'incarnation d'un avatar modifie; le rôle de la nature de l'avatar et de ses proportions corporelles dans ces distorsions temporelles; enfin Comparer ces effets dans des situations passives et dynamiques.

Afin de tester ces effets, deux hypothèses ont été formulées. La première postule que l'incarnation d'avatars d'apparence non humaine entraînera une sous-estimation plus marquée du temps perçu en réalité virtuelle par rapport à l'incarnation d'avatars d'apparence humaine, avec un passage du temps perçu comme plus rapide (H1). La seconde suppose que l'incarnation d'avatars, qu'ils aient des proportions humaines ou non, n'aura pas d'effet sur l'estimation du temps perçu ni sur le passage du temps perçu en réalité virtuelle(H2).

5.1 Incarnation

Les scores d'incarnation étaient modérément élevés indépendamment des caractéristiques de l'avatar, variant entre 4,48 et 5,06. Cette observation s'aligne avec les recherches antérieures, qui ont démontré qu'il est possible d'induire un sentiment d'incarnation avec des avatars qui diffèrent fortement de l'apparence physique de l'utilisateur avec des changements de proportions (Kiltene, Normand, et al., 2012; Normand et al., 2011; Vallageas et al., 2024) ou d'apparences (Banakou et al., 2013; Charbonneau et al., 2017; Kleinbeck et al., 2023; Kokkinara et al., 2016). Dans notre étude, pour tous les avatars, l'ensemble du corps virtuel est

représenté et animé en temps réel par les mouvements du participant. Cette stabilité élevée témoigne de la robustesse du phénomène d'incarnation, qui persiste tant qu'une synchronisation visuomotrice adéquate est maintenue. Cela illustre la flexibilité du cerveau humain en RV à intégrer des stimuli sensoriels variés pour générer une appropriation corporelle.

Toutefois, les résultats révèlent que ces scores sont significativement ($p < 0,001$) plus élevés pour les avatars de nature humaine que les avatars de nature Godzilla, ce qui met en évidence le rôle de la ressemblance avec le corps réel dans le renforcement du sentiment d'incarnation. Ceci soutient l'idée que les avatars ressemblant davantage à l'utilisateur ont tendance à susciter des sentiments d'incarnation plus forts (Waltemate et al., 2018).

La raison pourrait être dû au fait que l'avatar de type Godzilla nécessitait un ajustement temporel des participants pour s'habituer à la position des pieds disproportionnés. En raison de leur taille, l'instant où le talon de l'avatar touche le sol ne coïncide pas exactement avec celui du pied réel touchant le sol réel, entraînant une désynchronisation visuotactile. Cette discordance est connue pour diminuer le sentiment d'incarnation. Ainsi, l'ajustement temporel requis pour les avatars de type Godzilla, notamment à cause de la disproportion des pieds et de la posture, pourrait expliquer une incarnation légèrement plus faible. Cette hypothèse est soutenue par des études sur la perturbation perceptive induite par des avatars non humanoïdes.

Le sentiment d'appartenance plus faible avec l'avatar de type Godzilla, ce qui pourrait s'expliquer par l'adaptation nécessaire pour intégrer ses proportions inhabituelles, notamment la taille disproportionnée des pieds par rapport aux pieds humain et la posture différente. Ces caractéristiques pourraient perturber la synchronisation visuomotrice, rendant les mouvements moins intuitifs. La synchronisation visuotactile aurait pu être altérée si les stimuli tactiles ne correspondaient pas exactement aux attentes du participant, diminuant ainsi l'illusion d'incarnation. Par exemple, si le bout du pied de l'avatar Godzilla touche le sol virtuel alors que le pied réel du participant ne touche pas physiquement le sol, cette discordance sensorielle pourrait perturber l'intégration corporelle et ainsi affaiblir le sentiment d'incarnation.

L'analyse chronologique des conditions n'a révélé aucun effet notable sur le sentiment d'incarnation, comme en témoignent les scores stables au fil des expérimentations, entre 4,53 et 4,87. Les participants se sont sentis tout aussi bien incarnés de la première à la quatrième condition donc il n'y a pas eu effet de diminution dû à la durée de l'expérimentation.

5.2 Estimation du temps

L'étude met en évidence des sous-estimations du temps en phase d'attente, avec une moyenne de 8 % pour l'ensemble des conditions. Ce résultat est cohérent et légèrement supérieur à celui rapporté par Unruh et al. (2021), qui ont observé une sous-estimation de 6,7 % dans une situation d'attente avec un haut degré d'incarnation. Un effet significatif des proportions des avatars sur l'estimation du temps a été mis en évidence ($F(1,18) = 4,68, p = 0,044, \eta^2 = 0,017$). Plus précisément, les avatars aux proportions humaines, comme l'avatar Godzilla avec proportions humaine (14,13 %) et l'avatar Humain avec proportions humaines (11,48 %), ont généré une sous-estimation plus marquée, que ceux aux proportions Godzilla : l'avatar Humain avec proportions Godzilla (3,68 %) et l'avatar Godzilla avec proportions Godzilla (2,72 %). Les proportions ont un effet significatif sur l'estimation du temps pendant la phase d'attente ($F(1,18) = 4,68, p = 0,044, \eta^2 = 0,017$).

En phase dynamique, la sous-estimation du temps est plus marquée, atteignant 21,5 % en moyenne. Ce résultat est en accord avec Charbonneau et al. (2017), qui ont trouvé une sous-estimation similaire de 22,5 % dans des tâches dynamiques. Les sous-estimations sont globalement plus marquées en phase dynamique que pendant l'attente, ce qui reflète l'engagement accru lié à la tâche dynamique. Cependant, les différences entre les conditions d'avatars entre elles, sont plus faibles, suggérant que l'impact des caractéristiques de l'avatar pourrait être atténué par la charge cognitive et motrice de la tâche.

Contrairement à la phase d'attente, aucune différence statistiquement significative liée à la nature ou aux proportions des avatars n'a été relevée. Cependant, une analyse qualitative montre des tendances cohérentes avec la phase d'attente. Les avatars aux proportions humaines ont conduit à des sous-estimations légèrement plus élevées (l'avatar Godzilla avec proportions

humaine : 26,66 % ; l'avatar Humain avec proportions humaines : 22,74 %). Tandis que les avatars aux proportions Godzilla ont entraîné des sous-estimations moindres (l'avatar Humain avec proportions Godzilla : 20,71 % ; l'avatar Godzilla avec proportions Godzilla : 15,99 %).

Les résultats de notre étude diffèrent de Charbonneau et al. (2017). Dans leur étude, ils ont rapporté des différences marquées entre les avatars, avec une sous-estimation plus importante pour l'avatar Godzilla avec proportions Godzilla (31 %) par rapport à l'avatar Humain avec proportions humaines (14 %). Ils ont étudié seulement deux avatars l'avatar Godzilla avec proportions Godzilla et l'avatar Humain avec proportions humaines sans différencier les facteurs de nature et de proportions. À l'inverse, on trouve que l'avatar Humain avec proportions humaines (22,74 %) induisait une plus grande sous-estimation du temps en phase dynamique par rapport à l'avatar Godzilla avec proportions Godzilla (15,99 %).

Ces résultats, en phase d'attente comme en phase dynamique, suggèrent que des proportions humaines, plus naturelles, favorisent une plus grande sous-estimation du temps en RV que des proportions Godzilla. Ce qui nous laisse penser que des proportions qui correspondent à celle du participant quel que soit la nature de cet avatar permettraient une meilleure immersion, en renforçant la cohérence perceptuelle. À l'inverse, les avatars aux proportions Godzilla pourraient nécessiter un effort d'adaptation. Certains participants ont révélé cette adaptation avec des proportions qui ne leur correspondent pas comme demandant plus d'efforts cognitifs. Les proportions Godzilla, en raison de leurs dimensions atypiques, pourraient entraîner des mouvements moins fluides et une intégration corporelle moins immédiate, diminuant ainsi l'immersion, comme le confirment les retours de certains participants. Plusieurs d'entre eux ont d'ailleurs indiqué avoir eu besoin d'un certain temps pour s'adapter à ces proportions inhabituelles.

L'absence d'effet significatif des proportions en phase dynamique, peut être due à la charge cognitive et motrice de la tâche, qui atténue l'influence des caractéristiques visuelles de l'avatar. Lorsque les participants sont engagés dans une tâche active, l'attention portée pourrait homogénéiser les effets entre les différentes conditions d'avatars.

Nos résultats suggèrent une interprétation différente de celle de Charbonneau et al. (2017). Dans leur étude, l'avatar Godzilla aux proportions Godzilla était associé à une sous-estimation du temps plus marquée que l'avatar humain aux proportions humaines, ce qui contrastait avec nos observations. Une explication possible est que Charbonneau et al. ont étudié uniquement deux avatars (l'avatar Godzilla avec proportions humaine et l'avatar Humain avec proportions humaines), sans différencier les effets des proportions et de la nature des avatars. En considérant séparément ces deux facteurs. Le fait que notre étude ait inclus quatre avatars plutôt que deux comme Charbonneau, variant à la fois en nature et en proportions, a probablement accentué les différences perceptuelles entre ces caractéristiques de proportions, peut-être pas remarqué avant.

Cependant, il est intéressant de noter que la plus forte sous-estimation du temps a été observée avec des avatars de nature Godzilla mais aux proportions humaines, tandis que la plus faible sous-estimation a été enregistrée avec des avatars Godzilla aux proportions Godzilla. Cela suggère que notre hypothèse initiale qui est que l'incarnation d'avatars d'apparence non humaine entraînera une sous-estimation plus marquée du temps perçu en réalité virtuelle par rapport à l'incarnation d'avatars d'apparence humaine, avec un passage du temps perçu comme plus rapide (H1) n'est donc que partiellement remise en question.

Cependant notre deuxième hypothèse que l'incarnation d'avatars de proportions humaines ou non, n'aura pas d'effet sur l'estimation du temps perçu en réalité virtuelle ni sur le passage du temps perçu (H2) est pour l'instant rejeté pour l'estimation temporel.

5.3 Perception du temps

Bien que les travaux d'Unruh et al. (2021, 2023) n'aient pas observé de sous-estimation significative, ils ont montré que la présence d'un avatar ou un degré élevé d'incarnation peut modifier la perception du passage du temps. Dans notre étude, bien que les variations soient faibles d'une condition à l'autre d'avatars et accompagnées de grands écarts-types, elles ont relevé certains effets.

En phase d'attente, les scores de conscience temporelle les plus élevés ont été observés avec l'avatar Godzilla avec proportions Godzilla (3,8), suivi par l'avatar Humain avec proportions humaines et l'avatar Humain avec proportions Godzilla (3,3 et 3,2) et l'avatar Godzilla avec proportions humaine (2,5). L'analyse statistique a révélé un effet significatif de la proportion de l'avatar sur la conscience temporelle ($p = 0.0254$).

Par ailleurs, le passage du temps en phase d'attente a été perçu comme plus rapide avec l'avatar Godzilla avec proportions humaine (6,5), suivi de l'avatar Humain avec proportions humaines (5,5), l'avatar Godzilla avec proportions Godzilla et l'avatar Humain avec proportions Godzilla (5,0 et 4,9). L'analyse statistique a révélé aussi un effet principal significatif de la proportion de l'avatar sur la perception du passage du temps ($p = 0.0014$). De plus, des tests t appariés révèlent des différences significatives, indiquant que le passage du temps a été perçu comme plus rapide avec l'avatar Godzilla avec proportions humaine qu'avec l'avatar Humain avec proportions Godzilla ($p = 0.0037$) et l'avatar Godzilla avec proportions Godzilla ($p = 0.0073$).

À titre de comparaison, l'étude d'Unruh et al. (2021) rapportait un passage du temps en attente évalué à 5,5, une valeur exactement identique à la moyenne des quatre conditions dans notre étude. De son côté, la conscience temporelle moyenne en attente dans leur étude (4,1) était légèrement plus élevée que celle observée dans notre étude (3,2).

En phase dynamique, les scores de conscience temporelle sont globalement plus faibles mais suivent une tendance similaire. L'avatar Godzilla avec proportions Godzilla (3,6) et l'avatar Humain avec proportions Godzilla (3,4) présentent des scores légèrement plus élevés que l'avatar Humain avec proportions humaines (2,9) et l'avatar Godzilla avec proportions humaine (2,7). Cela pourrait indiquer que les proportions monstrueuses augmentent légèrement l'attention portée au temps.

Pour le passage du temps en phase dynamique, les différences entre les avatars sont plus réduites. Le passage du temps est perçu comme légèrement plus rapide pour l'avatar Godzilla avec proportions humaine (6,9), suivi de l'avatar Humain avec proportions Godzilla (6,7) et l'avatar Humain avec proportions humaines (6,6), tandis que l'avatar Godzilla avec proportions Godzilla a le score le plus bas (5,8), suggérant que le temps a été ressenti comme

passant plus lentement avec cet avatar. L'analyse statistique a révélé un effet principal significatif de la proportion ($p = 0.0161$) et de la nature ($p = 0.0493$) de l'avatar sur la perception du passage du temps en phase dynamique.

Enfin, les résultats de notre étude montrent une perception du passage du temps en phase dynamique évaluée à 6,5 en moyenne, soit une valeur légèrement supérieure à celle rapportée par Unruh et al. (2023), où le temps était perçu comme passant plus lentement, avec une évaluation moyenne de 5,3.

Les résultats sur la perception du temps ne confirment pas pleinement notre première hypothèse (H1). En effet, si l'avatar Godzilla aux proportions humaines (l'avatar Godzilla avec proportions humaine) est bien celui pour lequel le passage du temps a été perçu comme le plus rapide en phase d'attente comme et en phase dynamique et pour lequel les participants ont le moins pensé au temps. Cependant, ces résultats sont suivis de près par l'avatar Humain avec proportions humaines et l'avatar Humain avec proportions Godzilla, des avatars d'apparence humaine, ce qui va à l'encontre d'une distinction nette entre avatars humains et non-humains. De plus, l'avatar Godzilla aux proportions Godzilla est celui pour lequel le passage du temps a été perçu comme le plus lent en phase dynamique et pour lequel les participants ont le plus pensé au temps en phase d'attente comme et en phase dynamique. Les résultats ne soutiennent donc pas l'idée que l'apparence non humaine entraîne systématiquement une plus grande sous-estimation du temps par rapport à l'incarnation d'avatars d'apparence humaine, avec un passage du temps perçu comme plus rapide (H1).

Nos résultats réfutent notre deuxième hypothèse (H2) stipulant que l'incarnation d'avatars de proportions humaines ou non, n'aura pas d'effet sur l'estimation du temps perçu en réalité virtuelle ni sur le passage du temps perçu. En effet, l'analyse statistique a révélé un effet significatif des proportions de l'avatar sur la perception du passage du temps en phase d'attente et en phase dynamique, ainsi sur la conscience temporelle en phase dynamique. En d'autres mots, les avatars aux proportions humaines ont été associés à une perception du temps plus rapide par rapport aux avatars aux proportions.

5.4 Relation entre l'estimation et perception du temps

L'analyse des résultats révèle une relation inverse cohérente entre les scores de conscience temporelle et de passage du temps. Lorsque le score de passage du temps augmente, la conscience temporelle diminue, et inversement. En effet, lorsque les participants rapportent un passage du temps plus rapide, ils manifestent une conscience temporelle plus faible, ce qui suggère que l'attention portée au temps diminue lorsque le temps semble passer rapidement. Par exemple, cette tendance est marquée pour l'avatar Godzilla avec proportions humaine, qui est associé à la fois au passage du temps le plus rapide et au score de conscience temporelle le plus bas en phase d'attente et en dynamique. À l'inverse, l'avatar Godzilla avec proportions Godzilla, qui est associé au passage du temps le plus lent, présente la conscience temporelle la plus élevée.

On retrouve une relation logique également entre l'estimation du temps et la perception du temps (conscience temporelle et passage du temps). Globalement, plus le passage du temps est perçu comme rapide, la conscience temporelle diminue, et plus l'estimation du temps tend à être sous-estimée. En d'autres termes, si les participants ont l'impression que le temps passe plus vite, ils pensent moins au temps, ils ont tendance à juger la durée écoulée comme étant plus courte. On retrouve ces mêmes nuances pour tous les avatars étudiés.

On retrouve les mêmes tendances entre la phase d'attente et la phase dynamique. En phase dynamique, les participants ont sous-estimé davantage le temps, tout en y pensant moins et en le percevant comme passant plus rapidement. De manière générale, la conscience temporelle est plus faible en phase dynamique qu'en phase d'attente, accompagnée d'un passage du temps ressenti comme plus rapide et une plus grande sous-estimation.

Cette relation entre l'estimation et la perception temporelle met en évidence que plus le temps est sous-estimé, plus il semble s'écouler rapidement. Une divergence apparaît en comparaison avec les résultats de Ke et al. (2024) sur le jugement temporel en RV dans un environnement de salle de sport. Alors que notre étude met en évidence qu'un passage du temps perçu comme plus rapide s'accompagne d'une sous-estimation de la durée et d'une moindre attention portée au temps, leur étude montre au contraire qu'un passage du temps plus rapide conduit à une

surestimation de la durée. Ce contraste semble paradoxal avec cette nouvelle étude. Il se pourrait que dans leur étude, l'accélération des mouvements des avatars environnants fournissent des indices temporels visuels qui influencent le jugement temporel et pourrait servir de référence temporelle externe, incitant les participants à croire que plus de temps s'est écoulé.

5.5 Limitations

Cette étude présente certaines limitations qui méritent d'être prises en compte pour une meilleure interprétation des résultats.

Une première limite concerne la distinction entre les avatars de nature Godzilla. Leur nature étant déjà atypique, il est possible que les différences de proportions aient été perçues de manière moins marquée par les participants. Contrairement aux avatars humains, dont la nature et les proportions sont familières et immédiatement reconnaissables, les avatars de type Godzilla constituent en eux-mêmes un visuel éloigné du corps humain. Ainsi, l'impact des variations de proportions pourrait avoir été atténué.

Une deuxième limitation repose sur la subjectivité du jugement temporel. La perception du temps étant influencée par de nombreux facteurs individuels et contextuels, des éléments extérieurs comme la fatigue, le stress ou encore le niveau d'attention des participants peuvent avoir modifié leurs évaluations du jugement temporel. Il faut noter que l'expérience comporte 4 conditions et pour chacune deux phases (attente et dynamique). La durée de l'expérience dure environ 2 heures et 30 minutes. Cependant, afin d'atténuer les effets liés à l'ordre des conditions, nous avons adopté un ordre pseudo-randomisé. Il est possible que ces effets n'aient pas été totalement éliminés. L'exposition répétée aux différentes conditions pourrait avoir influencé différemment les participants. Une certaine charge cognitive et physique aurait pu se faire sentir chez les participants, bien que des pauses sont faites. Il se pourrait également qu'après plusieurs conditions, des participants anticipent les questions posées. Toutefois, à aucun

moment ils n'ont été informés que l'étude portait sur le jugement temporel, limitant ainsi les biais liés à cette anticipation.

Pour de futures recherches, il serait pertinent de comparer des avatars de natures différentes tout en conservant les proportions humaines des participants. Cela permettrait d'isoler plus précisément l'effet de la nature de l'avatar sur le jugement temporel, tout en réduisant le temps des expériences.

CONCLUSION

Cette étude visait à examiner l'influence de l'incarnation d'avatars virtuels sur le jugement temporel en réalité virtuelle. Plus précisément, elle cherchait à déterminer comment la nature de l'avatar (humain ou non-humain) et ses proportions corporelles (humaines ou non-humaines) modifient l'estimation et la perception du temps dans des situations d'attente et dynamique.

Les résultats ont montré que l'incarnation était globalement élevée dans toutes les conditions, mais plus marquée avec des avatars de nature humaine. Concernant le jugement temporel, l'étude a mis en évidence une sous-estimation plus importante du temps perçu avec des avatars aux proportions humaines, en phase d'attente comme en phase dynamique. En parallèle, la perception du passage du temps variait moins en fonction des avatars : tout de même, un avatar Godzilla aux proportions humaines entraînait une perception plus rapide du temps, tandis qu'un avatar Godzilla aux proportions standard était associé à une perception plus lente. Notre relation entre estimation et perception du temps est la suivante : plus le temps semble s'écouler rapidement, plus il est sous-estimé, et moins les participants y portent attention.

En explorant ainsi comment l'incarnation d'avatars modifie le jugement temporel, cette étude souligne l'impact des caractéristiques corporelles des avatars sur l'estimation et la perception du temps. Ces résultats ouvrent des perspectives d'application, notamment en réadaptation, où la modification de la perception temporelle pourrait rendre les exercices moins éprouvants, mais aussi dans d'autres tâches comme l'éducation ou les environnements de travail immersifs ou encore la thérapie.

Des recherches futures pourraient affiner ces conclusions en élargissant l'échantillon de participants. Également comparer des avatars de natures différentes tout en conservant des proportions humaines pour mieux cerner leur impact afin d'isoler plus précisément l'effet de la nature de l'avatar sur le jugement temporel. De plus, l'exploration d'autres caractéristiques de l'avatar, permettrait d'approfondir la compréhension des mécanismes influençant le jugement temporel. Enfin, la prise en compte de la charge cognitive des participants et peut

être l'évaluer offrirait une nouvelle dimension à l'analyse de la perception du temps en réalité virtuelle.

ANNEXE I

Questionnaire de renseignements personnels

Questionnaire de renseignements personnels

Quantification de l'effet de l'incarnation d'avatars

Code recherche : _____

Responsable des acquisitions : _____

Lieu : _____

Date : _____ Heure : _____

Ce questionnaire de renseignements a pour but d'aider l'équipe de recherche à mieux évaluer l'ensemble des participants à l'étude. Il permettra de recueillir des informations de type anthropologique et d'évaluer si les critères d'inclusion et d'exclusion sont respectés.

N'hésitez pas à demander de l'aide si des questions vous semblent ambiguës ou si vous préférez ne pas répondre.

Renseignements généraux		
Taille : _____	Poids : _____	Âge : _____
Sexe	<input type="checkbox"/> Homme	<input type="checkbox"/> Femme
Souffrez-vous d'une condition susceptible d'affecter votre démarche ?	<input type="checkbox"/> OUI	<input type="checkbox"/> NON
Souffrez-vous d'une condition susceptible d'affecter votre sens de l'équilibre ?	<input type="checkbox"/> OUI	<input type="checkbox"/> NON
Présence de douleur ou inconfort au niveau des membres inférieurs ?	<input type="checkbox"/> OUI	<input type="checkbox"/> NON
Souffrez-vous de cinétose (nausées, étourdissement) lors de la pratique de jeux vidéos ?	<input type="checkbox"/> OUI	<input type="checkbox"/> NON
Avez-vous déjà marché sur un tapis roulant ?	<input type="checkbox"/> OUI	<input type="checkbox"/> NON
Si oui, vous considérez-vous comme une personne habituée à la marche sur un tapis roulant ?	<input type="checkbox"/> OUI	<input type="checkbox"/> NON
Grossesse en cours ?	<input type="checkbox"/> OUI	<input type="checkbox"/> NON

BIBLIOGRAPHIE

- Allison, T., Puce, A., McCarthy, G., Allison, T., Puce, A., & McCarthy, G. (2000). Social perception from visual cues : Role of the STS region. *Trends in Cognitive Sciences*, 4(7), 267-278. [https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(00\)01501-1](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(00)01501-1)
- Alvarez Igarzábal, F., Hruby, H., Witowska, J., Khoshnoud, S., & Wittmann, M. (2021). What happens while waiting in virtual reality? A comparison between a virtual and a real waiting situation concerning boredom, self-regulation, and the experience of time. *Technology, Mind, and Behavior*, 2(2). <https://doi.org/10.1037/tmb0000038>
- Asai, T. (2015). Illusory body-ownership entails automatic compensative movement : For the unified representation between body and action. *Experimental Brain Research*, 233(3), 777-785. <https://doi.org/10.1007/s00221-014-4153-0>
- Banakou, D., Groten, R., & Slater, M. (2013). Illusory ownership of a virtual child body causes overestimation of object sizes and implicit attitude changes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(31), 12846-12851. <https://doi.org/10.1073/pnas.1306779110>
- Banakou, D., Kishore, S., & Slater, M. (2018). Virtually Being Einstein Results in an Improvement in Cognitive Task Performance and a Decrease in Age Bias. *Frontiers in Psychology*, 9. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.00917>
- Bassolino, M., Franza, M., Bello Ruiz, J., Pinardi, M., Schmidlin, T., Stephan, M. a., Solcà, M., Serino, A., & Blanke, O. (2018). Non-invasive brain stimulation of motor cortex induces embodiment when integrated with virtual reality feedback. *European Journal of Neuroscience*, 47(7), 790-799. <https://doi.org/10.1111/ejn.13871>
- Baylor, A. L. (2009). Promoting motivation with virtual agents and avatars : Role of visual presence and appearance. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1535), 3559-3565. <https://doi.org/10.1098/rstb.2009.0148>
- BlockZakay1996.pdf*. (s. d.). Consulté 25 février 2025, à l'adresse <https://www.montana.edu/rblock/documents/papers/BlockZakay1996.pdf>
- Botvinick, M., & Cohen, J. (1998). Rubber hands 'feel' touch that eyes see. *Nature*, 391(6669), 756-756. <https://doi.org/10.1038/35784>

- Bouvier, P. (2009). *La présence en réalité virtuelle, une approche centrée utilisateur* [Phdthesis, Université Paris-Est]. <https://theses.hal.science/tel-00581550>
- Braun, N., Debener, S., Spychala, N., Bongartz, E., Sörös, P., Müller, H. H. O., & Philippsen, A. (2018). The Senses of Agency and Ownership : A Review. *Frontiers in Psychology*, 9. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.00535>
- Charbonneau, P., Dallaire-Cote, M., Cote, S. S.-P., Labbe, D. R., Mezghani, N., Shahnewaz, S., Arafat, I., Irfan, T., Samaraweera, G., & Quarles, J. (2017). Gaitzilla : Exploring the effect of embodying a giant monster on lower limb kinematics and time perception. *2017 International Conference on Virtual Rehabilitation (ICVR)*, 1-8. <https://doi.org/10.1109/ICVR.2017.8007535>
- Chirico, A., Lucidi, F., De Laurentiis, M., Milanese, C., Napoli, A., & Giordano, A. (2016). Virtual Reality in Health System : Beyond Entertainment. A Mini-Review on the Efficacy of VR During Cancer Treatment. *Journal of Cellular Physiology*, 231(2), 275-287. <https://doi.org/10.1002/jcp.25117>
- Craig, A. D. (Bud). (2009). Emotional moments across time : A possible neural basis for time perception in the anterior insula. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1525), 1933-1942. <https://doi.org/10.1098/rstb.2009.0008>
- Csikszentmihalyi, M. (2000). *FLOW: The Psychology of Optimal Experience*.
- Cummings, J. J., & Bailenson, J. N. (2016). How Immersive Is Enough? A Meta-Analysis of the Effect of Immersive Technology on User Presence. *Media Psychology*, 19(2), 272-309. <https://doi.org/10.1080/15213269.2015.1015740>
- Dormal, V., Seron, X., & Pesenti, M. (2006). Numerosity-duration interference : A Stroop experiment. *Acta Psychologica*, 121(2), 109-124. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2005.06.003>
- Droit-Volet, S. (2013). Time perception, emotions and mood disorders. *Journal of Physiology-Paris*, 107(4), 255-264. <https://doi.org/10.1016/j.jphysparis.2013.03.005>
- Dummer, T., Picot-Annand, A., Neal, T., & Moore, C. (2009). Movement and the Rubber Hand Illusion. *Perception*, 38(2), 271-280. <https://doi.org/10.1068/p5921>
- Falconer, C. J., Rovira, A., King, J. A., Gilbert, P., Antley, A., Fearon, P., Ralph, N., Slater, M., & Brewin, C. R. (2016). Embodying self-compassion within virtual reality and its effects on patients with depression. *BJPsych Open*, 2(1), 74-80. <https://doi.org/10.1192/bjpo.bp.115.002147>

- Fischer, X., & Troussier, N. (2004). La Réalité Virtuelle pour une conception centrée sur l'utilisateur. *Mechanics & Industry*, 5(2), 147-159. <https://doi.org/10.1051/meca:2004015>
- Fox, J., Bailenson, J., & Binney, J. (2009). Virtual Experiences, Physical Behaviors : The Effect of Presence on Imitation of an Eating Avatar. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 18(4), 294-303. <https://doi.org/10.1162/pres.18.4.294>
- Franck, N., Farrer, C., Georgieff, N., Marie-Cardine, M., Daléry, J., d'Amato, T., & Jeannerod, M. (2001). Defective Recognition of One's Own Actions in Patients With Schizophrenia. *American Journal of Psychiatry*, 158(3), 454-459. <https://doi.org/10.1176/appi.ajp.158.3.454>
- Fuchs, X., Riemer, M., Diers, M., Flor, H., & Trojan, J. (2016). Perceptual drifts of real and artificial limbs in the rubber hand illusion. *Scientific Reports*, 6(1), 24362. <https://doi.org/10.1038/srep24362>
- Gorisse, G. (2019). *Impact du point de vue et de la fidélité des avatars sur les sentiments de présence et d'incarnation en environnement virtuel immersif*. [Phdthesis, Ecole nationale supérieure d'arts et métiers - ENSAM]. <https://pastel.hal.science/tel-02145747>
- Guy, M., Normand, J.-M., Jeunet-Kelway, C., & Moreau, G. (2023). The sense of embodiment in Virtual Reality and its assessment methods. *Frontiers in Virtual Reality*, 4. <https://doi.org/10.3389/frvir.2023.1141683>
- Harvie, D. S., Kelly, J., Kluver, J., Deen, M., Spitzer, E., & Coppieters, M. W. (2024). A randomized controlled pilot study examining immediate effects of embodying a virtual reality superhero in people with chronic low back pain. *Disability and Rehabilitation: Assistive Technology*, 19(3), 851-858. <https://doi.org/10.1080/17483107.2022.2129846>
- Henderson, A., Korner-Bitensky, N., & Levin, M. (2007). Virtual Reality in Stroke Rehabilitation : A Systematic Review of its Effectiveness for Upper Limb Motor Recovery. *Topics in Stroke Rehabilitation*, 14(2), 52-61. <https://doi.org/10.1310/tsr1402-52>

- Hernandez, A., Buby, L., Archambault, P. S., Higgins, J., Levin, M. F., & Kairy, D. (2022). Virtual Reality–Based Rehabilitation as a Feasible and Engaging Tool for the Management of Chronic Poststroke Upper-Extremity Function Recovery : Randomized Controlled Trial. *JMIR Serious Games*, 10(3), e37506. <https://doi.org/10.2196/37506>
- Ke, B., Wang, T.-Y., Yuizono, T., & Kanai, H. (2024). Workout at a virtual gym : Surrounding avatar’s motion speed and exercise intensity effect on the user’s time perception. *PLOS ONE*, 19(12), e0311860. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0311860>
- Keizer, A., Elburg, A. van, Helms, R., & Dijkerman, H. C. (2016). A Virtual Reality Full Body Illusion Improves Body Image Disturbance in Anorexia Nervosa. *PLOS ONE*, 11(10), e0163921. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0163921>
- Kennedy, R. S., Lane, N. E., Berbaum, K. S., & Lilienthal, M. G. (1993). Simulator Sickness Questionnaire : An Enhanced Method for Quantifying Simulator Sickness. *The International Journal of Aviation Psychology*, 3(3), 203-220. https://doi.org/10.1207/s15327108ijap0303_3
- Kiltner, K., Bergstrom, I., & Slater, M. (2013). Drumming in immersive virtual reality : The body shapes the way we play. *2013 IEEE Virtual Reality (VR)*, 1-1. <https://doi.org/10.1109/VR.2013.6549442>
- Kiltner, K., Groten, R., & Slater, M. (2012). The Sense of Embodiment in Virtual Reality. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 21(4), 373-387. https://doi.org/10.1162/PRES_a_00124
- Kiltner, K., Maselli, A., Kording, K. P., & Slater, M. (2015). Over my fake body : Body ownership illusions for studying the multisensory basis of own-body perception. *Frontiers in Human Neuroscience*, 9. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2015.00141>
- Kiltner, K., Normand, J.-M., Sanchez-Vives, M. V., & Slater, M. (2012). Extending Body Space in Immersive Virtual Reality : A Very Long Arm Illusion. *PLOS ONE*, 7(7), e40867. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0040867>
- Kim, W.-S., Cho, S., Ku, J., Kim, Y., Lee, K., Hwang, H.-J., & Paik, N.-J. (2020). Clinical Application of Virtual Reality for Upper Limb Motor Rehabilitation in Stroke : Review of Technologies and Clinical Evidence. *Journal of Clinical Medicine*, 9(10), Article 10. <https://doi.org/10.3390/jcm9103369>

- Kleinbeck, C., Schieber, H., Kreimeier, J., Martin-Gomez, A., Unberath, M., & Roth, D. (2023). Injured Avatars : The Impact of Embodied Anatomies and Virtual Injuries on Well-Being and Performance. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 29(11), 4503-4513. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2023.3320224>
- Kokkinara, E., Kilteni, K., Blom, K. J., & Slater, M. (2016). First Person Perspective of Seated Participants Over a Walking Virtual Body Leads to Illusory Agency Over the Walking. *Scientific Reports*, 6(1), 28879. <https://doi.org/10.1038/srep28879>
- Kourtesis, P. (2024). *The Extended Mind & Body in Extended Realities : A Scoping Review of XR Applications and Risks in the Metaverse*. <https://doi.org/10.20944/preprints202409.0857.v2>
- Kway, L., & Mitchell, A. (2018). Emotional agency in storygames. *Proceedings of the 13th International Conference on the Foundations of Digital Games*, 1-10. <https://doi.org/10.1145/3235765.3235777>
- Landeck, M., Alvarez Igarzábal, F., Unruh, F., Habenicht, H., Khoshnoud, S., Wittmann, M., Lugin, J.-L., & Latoschik, M. E. (2023). Journey through a virtual tunnel : Simulated motion and its effects on the experience of time. *Frontiers in Virtual Reality*, 3, 1059971. <https://doi.org/10.3389/frvir.2022.1059971>
- Leonardis, D., Frisoli, A., Barsotti, M., Carrozzino, M., & Bergamasco, M. (2014). Multisensory Feedback Can Enhance Embodiment Within an Enriched Virtual Walking Scenario. *Presence*, 23(3), 253-266. *Presence*. https://doi.org/10.1162/PRES_a_00190
- Long, Y., Ouyang, R., & Zhang, J. (2020). Effects of virtual reality training on occupational performance and self-efficacy of patients with stroke : A randomized controlled trial. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 17(1), 150. <https://doi.org/10.1186/s12984-020-00783-2>
- Lopez, C., Halje, P., & Blanke, O. (2008). Body ownership and embodiment : Vestibular and multisensory mechanisms. *Neurophysiologie Clinique/Clinical Neurophysiology*, 38(3), 149-161. <https://doi.org/10.1016/j.neucli.2007.12.006>
- Lugin, J.-L., Unruh, F., Landeck, M., Lamour, Y., Latoschik, M. E., Vogeley, K., & Wittmann, M. (2019). Experiencing Waiting Time in Virtual Reality. *25th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, 1-2. <https://doi.org/10.1145/3359996.3364807>

- Moinnereau, M.-A., Oliveira, A. A., & Falk, T. H. (2023). Quantifying time perception during virtual reality gameplay using a multimodal biosensor-instrumented headset: A feasibility study. *Frontiers in Neuroergonomics*, 4, 1189179. <https://doi.org/10.3389/fnrgo.2023.1189179>
- Navea, R. F., Talde, V. M., Armintia, F. L., Cruz, S. M. D., Medina, G., & Decena, A. (2025). Gamified Shoulder Rehabilitation for Mild Stroke Patients Using Virtual Reality. *International Journal of Technology*, 16(1), 146. <https://doi.org/10.14716/ijtech.v16i1.7365>
- Normand, J.-M., Giannopoulos, E., Spanlang, B., & Slater, M. (2011). Multisensory Stimulation Can Induce an Illusion of Larger Belly Size in Immersive Virtual Reality. *PLOS ONE*, 6(1), e16128. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0016128>
- Oberdörfer, S., Birnstiel, S., & Latoschik, M. E. (2024). Proteus effect or bodily affordance? The influence of virtual high-heels on gait behavior. *Virtual Reality*, 28(2), 81. <https://doi.org/10.1007/s10055-024-00966-5>
- Osimo, S. A., Pizarro, R., Spanlang, B., & Slater, M. (2015). Conversations between self and self as Sigmund Freud—A virtual body ownership paradigm for self counselling. *Scientific Reports*, 5(1), 13899. <https://doi.org/10.1038/srep13899>
- Osuna, E. E. (1985). The psychological cost of waiting. *Journal of Mathematical Psychology*, 29(1), 82-105. [https://doi.org/10.1016/0022-2496\(85\)90020-3](https://doi.org/10.1016/0022-2496(85)90020-3)
- Peck, T. C., & Gonzalez-Franco, M. (2021). Avatar Embodiment. A Standardized Questionnaire. *Frontiers in Virtual Reality*, 1, 575943. <https://doi.org/10.3389/frvir.2020.575943>
- Roenneberg, T., Kuehnle, T., Juda, M., Kantermann, T., Allebrandt, K., Gordijn, M., & Mellow, M. (2007). Epidemiology of the human circadian clock. *Sleep Medicine Reviews*, 11(6), 429-438. <https://doi.org/10.1016/j.smr.2007.07.005>
- Sadeghi, S., Daziano, R., Yoon, S.-Y., & Anderson, A. K. (2023). Affective experience in a virtual crowd regulates perceived travel time. *Virtual Reality*, 27(2), 1051-1061. <https://doi.org/10.1007/s10055-022-00713-8>
- Samaraweera, G., Perdomo, A., & Quarles, J. (2015). Applying latency to half of a self-avatar's body to change real walking patterns. *2015 IEEE Virtual Reality (VR)*, 89-96. <https://doi.org/10.1109/VR.2015.7223329>

- Schatzschneider, C., Bruder, G., & Steinicke, F. (2016). Who turned the clock? Effects of Manipulated Zeitgebers, Cognitive Load and Immersion on Time Estimation. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 22(4), 1387-1395. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2016.2518137>
- Schielzeth, H., Dingemanse, N. J., Nakagawa, S., Westneat, D. F., Allegate, H., Teplitsky, C., Réale, D., Dochtermann, N. A., Garamszegi, L. Z., & Araya-Ajoy, Y. G. (2020). Robustness of linear mixed-effects models to violations of distributional assumptions. *Methods in Ecology and Evolution*, 11(9), 1141-1152. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13434>
- Seinfeld, S., Arroyo-Palacios, J., Iruretagoyena, G., Hortensius, R., Zapata, L. E., Borland, D., de Gelder, B., Slater, M., & Sanchez-Vives, M. V. (2018). Offenders become the victim in virtual reality : Impact of changing perspective in domestic violence. *Scientific Reports*, 8(1), 2692. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-19987-7>
- Slater, M., Linakis, V., Usoh, M., & Kooper, R. (1996). Immersion, presence and performance in virtual environments : An experiment with tri-dimensional chess. *Proceedings of the ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, 163-172. <https://doi.org/10.1145/3304181.3304216>
- Slater, M., Neyret, S., Johnston, T., Iruretagoyena, G., Crespo, M. Á. D. L. C., Alabèrnia-Segura, M., Spanlang, B., & Feixas, G. (2019). An experimental study of a virtual reality counselling paradigm using embodied self-dialogue. *Scientific Reports*, 9(1), 10903. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-46877-3>
- Slater, M., Spanlang, B., Sanchez-Vives, M. V., & Blanke, O. (2010). First Person Experience of Body Transfer in Virtual Reality. *PLOS ONE*, 5(5), e10564. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0010564>
- Slater, M., Usoh, M., & Steed, A. (1995). Taking steps : The influence of a walking technique on presence in virtual reality. *ACM Trans. Comput.-Hum. Interact.*, 2(3), 201-219. <https://doi.org/10.1145/210079.210084>
- Slater, M., & Wilbur, S. (1997). A Framework for Immersive Virtual Environments (FIVE) : Speculations on the Role of Presence in Virtual Environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 6(6), 603-616. <https://doi.org/10.1162/pres.1997.6.6.603>

- Tajadura-Jiménez, A., Banakou, D., Bianchi-Berthouze, N., & Slater, M. (2017). Embodiment in a Child-Like Talking Virtual Body Influences Object Size Perception, Self-Identification, and Subsequent Real Speaking. *Scientific Reports*, 7(1), 9637. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-09497-3>
- Todd, R. M., & Anderson, A. K. (2009). Six degrees of separation : The amygdala regulates social behavior and perception. *Nature Neuroscience*, 12(10), 1217-1218. <https://doi.org/10.1038/nn1009-1217>
- Tsakiris, M., Longo, M. R., & Haggard, P. (2010). Having a body versus moving your body : Neural signatures of agency and body-ownership. *Neuropsychologia*, 48(9), 2740-2749. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2010.05.021>
- Unruh, F., Landeck, M., Oberdörfer, S., Lugin, J.-L., & Latoschik, M. E. (2021). The Influence of Avatar Embodiment on Time Perception—Towards VR for Time-Based Therapy. *Frontiers in Virtual Reality*, 2, 658509. <https://doi.org/10.3389/frvir.2021.658509>
- Unruh, F., Vogel, D., Landeck, M., Lugin, J.-L., & Latoschik, M. E. (2023). Body and Time : Virtual Embodiment and its Effect on Time Perception. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 29(5), 2626-2636. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2023.3247040>
- Vallageas, V., Aissaoui, R., Willaert, I., & Labbé, D. R. (2024). Embodying a self-avatar with a larger leg : Its impacts on motor control and dynamic stability. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 30(5), 2066-2076. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2024.3372084>
- van der Ham, I. J. M., Klaassen, F., van Schie, K., & Cuperus, A. (2019). Elapsed time estimates in virtual reality and the physical world : The role of arousal and emotional valence. *Computers in Human Behavior*, 94, 77-81. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2019.01.005>
- Walsh, V. (2003). A theory of magnitude : Common cortical metrics of time, space and quantity. *Trends in Cognitive Sciences*, 7(11), 483-488. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2003.09.002>

- Waltemate, T., Gall, D., Roth, D., Botsch, M., & Latoschik, M. E. (2018). The Impact of Avatar Personalization and Immersion on Virtual Body Ownership, Presence, and Emotional Response. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 24(4), 1643-1652. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2018.2794629>
- Willaert, I., Aissaoui, R., Vallageas, V., Nadeau, S., Duclos, C., & Labbe, D. R. (2024). Detection threshold of distorted self-avatar step length during gait and the effects on the sense of embodiment. *Frontiers in Virtual Reality*, 5. <https://doi.org/10.3389/frvir.2024.1339296>
- Witowska, J., Schmidt, S., & Wittmann, M. (2020). What happens while waiting? How self-regulation affects boredom and subjective time during a real waiting situation. *Acta Psychologica*, 205, 103061. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2020.103061>
- Xuan, B., Zhang, D., He, S., & Chen, X. (2007). Larger stimuli are judged to last longer. *Journal of Vision*, 7(10), 2. <https://doi.org/10.1167/7.10.2>
- Yee, N., & Bailenson, J. (2007). The Proteus Effect: The Effect of Transformed Self-Representation on Behavior. *Human Communication Research*, 33(3), 271-290. <https://doi.org/10.1111/j.1468-2958.2007.00299.x>
- Yee, N., Bailenson, J. N., & Ducheneaut, N. (2009). The Proteus Effect: Implications of Transformed Digital Self-Representation on Online and Offline Behavior. *Communication Research*, 36(2), 285-312. <https://doi.org/10.1177/0093650208330254>