



HAL
open science

Technologies immersives enrichies par inductions / régulations physiologiques autonomes et somatosensorielles : bénéfiques pour l'Homme et ses interactions

Yvan Pratviel

► **To cite this version:**

Yvan Pratviel. Technologies immersives enrichies par inductions / régulations physiologiques autonomes et somatosensorielles : bénéfiques pour l'Homme et ses interactions. Automatique. Université de Bordeaux, 2022. Français. NNT : 2022BORD0356 . tel-03957470

HAL Id: tel-03957470

<https://theses.hal.science/tel-03957470>

Submitted on 26 Jan 2023

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

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

THÈSE

Présentée à

L'Université de Bordeaux

École Doctorale des Sciences Physiques et de l'Ingénieur

Pour obtenir le grade de
Docteur

Spécialité : Automatique, Productique, Signal et Image, Ingénierie Cognitive

Soutenue le 8 Décembre 2022

par **YVAN PRATVIEL**

Technologies immersives enrichies par inductions / régulations physiologiques autonomes et somatosensorielles : bénéfices pour l'Homme et ses interactions

Membres du jury :

Laurent Arzac Professeur, Université de Bordeaux	Directeur de thèse
Hadrien Ceyte Maître de conférences (HDR), Aix-Marseille Université	Rapporteur
Jean-Jacques Temprado Professeur, Aix-Marseille Université	Rapporteur
Christophe Bourdin Professeur, Aix-Marseille Université	Examineur
Virginie Postal Le Dorse Professeure, Université de Bordeaux	Examinatrice
Isabelle Siegler Professeure, Université Paris Saclay	Présidente du jury
Marion Trousselard Docteure en médecine (HDR), Institut de Recherche Biomédicale des Armées	Examinatrice
Florian Larrue Docteur, Centre Aquitain des Technologies de l'Information et Électroniques	Invité

Résumé

L'Homme fait naturellement l'expérience d'un soi conscient, localisé à l'intérieur de ses frontières corporelles. Cette conscience de soi corporelle peut être manipulée à l'aide de stimulations multisensorielles, combinant des signaux extéroceptifs et intéroceptifs. En particulier, l'usage d'un avatar en réalité virtuelle (VR) se substituant au corps du participant permet d'induire des illusions corps-entier grâce à l'induction de signaux physiologiques, et d'exploiter des phénomènes cognitifs et moteurs liés à l'identification au corps virtuel.

Les progrès de la réalité virtuelle et des technologies de capture du mouvement permettent aujourd'hui à un utilisateur de contrôler un avatar en temps réel, perçu à la troisième personne. Conscience de soi, cognition et comportement visuomoteur agissent alors de concert, créant de nouvelles interactions pouvant donner naissance à l'incarnation de l'avatar.

L'objectif final de ce travail était de concevoir un cadre expérimental permettant de mesurer et de comprendre les relations entre l'utilisateur et son avatar, et d'étudier leur impact sur ses performances. Les travaux menés s'intéressent à la fois à la mesure des performances et de la conscience de soi corporelle en VR, mais aussi à l'application d'une nouvelle méthode de mesure des adaptations visuomotrices et du sentiment d'incarnation via la complexité des signaux du mouvement humain.

L'activité motrice volontaire est organisée autour du sentiment d'agentivité, qui décrit la conscience d'un corps agissant, et la coordination de systèmes complexes impliquant perception, cognition et mouvement, autour de la conscience d'un soi ancré dans un corps physique. Des études récentes suggèrent qu'il est possible d'obtenir des informations sur les interconnexions entre le cerveau, le corps et l'environnement en s'intéressant aux propriétés non-linéaires du mouvement émergeant des interactions entre ces différents composants. Sur la base de signaux moteurs échantillonnés à haute fréquence, la multifractalité des séries temporelles se révèle être un indicateur pertinent pour évaluer ces interactions.

Dans ce travail nous avons transposé une tâche de temps de réponse visuomoteurs en VR, et conduit une analyse multifractale des mouvements des mains (enregistrés avec les contrôleurs VR) pour caractériser les adaptations fines provoquées par différents espaces visuels d'intervention, ainsi que les différences de contrôle entre les mains dominante et non-dominante. L'analyse multifractale a également été appliquée aux mouvements d'une souris d'ordinateur pour étudier le phénomène d'incarnation d'un outil, littéralement l'incorporation d'un outil dans un système cognitif étendu. Enfin, nous avons étudié l'influence de stimulations multisensorielles sur le sentiment d'incarnation d'un avatar vu à la troisième personne, statique ou mobilisé par le participant.

Les résultats de ces expériences permettent de mieux comprendre le phénomène d'incarnation impliquant la conscience de soi corporelle, et de proposer l'analyse des interactions non-linéaires entre l'utilisateur et son avatar pour rendre compte du phénomène de cognition étendue. En combinant ces phénomènes avec des dispositions individuelles des utilisateurs, nous avons tenté d'éclairer un champ transdisciplinaire, nécessaire à l'approche de systèmes complexes dont les propriétés émergentes sont fondamentales pour appréhender les interactions permanentes entre perception, cognition et action.

Mots clés : Avatars, Multifractalité, Réalité virtuelle, Conscience de soi corporelle, Cognitique, Physiologie

Abstract

Human beings naturally experience a conscious self, located within bodily boundaries. This so-called bodily self-consciousness can be manipulated using multisensory stimulations, combining exteroceptive and interoceptive signals. In particular, the use of an avatar in virtual reality (VR) substituting the participant's body allows to induce full-body illusion, and to exploit cognitive and motor phenomena related to the identification with the virtual body.

Advances in virtual reality and motion capture technologies now allow a user to control an avatar in real time, perceived with a third-person perspective. In this condition, self-awareness, cognition and visuomotor behavior are tightly interwoven, which creates new interactions giving rise to avatar embodiment.

The main aim of this work was to design an experimental framework to measure and understand the interplay between the user and his avatar, and to study how modified interactions can affect performance. Specific characteristics of the VR user's motor behavior, extracted by using complexity science tools applied to hand movement dynamics, provided additional cues on the recent concept in cognitive sciences dealing with radical embodiment.

The rationale is that voluntary motor activity is organized around the sense of agency, which describes the awareness of an acting body, and the coordination of complex systems involving perception, cognition and movement. Recent studies suggest that it is possible to obtain information about the interconnections between the brain, the body and the environment by focusing on the non-linear properties of movement emerging from the interactions between these different components. Based on high frequency sampled motor signals, the multifractality of movement time series appears to be a relevant indicator to evaluate these interactions.

Here, we first transposed a visuomotor task in VR, and conducted a multifractal analysis of hand movements to characterize adaptations caused by different visual fields, and identify specific features in the dominant and the non-dominant hand. Multifractal analysis was also applied to the movements of a computer mouse to study the phenomenon of tool embodiment, literally the incorporation of a tool into an extended cognitive system. Finally, we studied the influence of multisensory stimuli on the embodiment of an avatar seen with a third-person perspective, either static or moving in synch with the user.

Our results provide a better understanding of embodiment together with bodily self-consciousness. In addition, nonlinear multifractality is proposed to unveil the specific architecture of an extended cognitive system linking the user to its avatar. By exploring these phenomena in association with individual abilities of users, we attempted to shed light on a necessary transdisciplinary approach including the

science of complexity to capture emergent properties in a complex system linking perception, cognition and action.

Keywords : Avatars, Multifractality, Virtual reality, Bodily self-consciousness, Cognitics, Physiology

Remerciements

Je remercie tout d'abord Hadrien Ceyte, Jean-Jacques Temprado, Christophe Bourdin, Virginie Postal Le Dorse, Isabelle Siegler et Marion Trousselard pour avoir accepté de faire partie de mon jury et d'évaluer ce travail de thèse.

Ensuite, je remercie bien évidemment le CATIE, pour avoir financé cette thèse CIFRE pendant trois ans, mais surtout les membres de l'équipe Systèmes Centrés sur l'Humain ainsi que du bureau administration / communication, pour leur aide et leur bienveillance, et mon chef Florian pour sa patience et ses conseils. Je remercie aussi les membres de l'équipe PMH_DySCo, Thierry, Léo, et particulièrement Julien pour son accueil à mon arrivée en STAPS.

Ce projet de thèse est né d'une reconversion amorcée à la fin de mes études d'ingénieur, lors desquelles j'ai choisi de m'orienter vers un parcours STAPS. À ce titre, je remercie mes amis de l'IOGS (Hugo, Kosta, Bathilde, Yann...) de m'avoir soutenu dans ce projet et d'être restés proches malgré mon choix de délaisser l'optique pour l'humain. Et bien entendu, merci à mes camarades du master EOPS pour m'avoir accepté dans la famille des STAPS : Alexandre A, Alexandre K, Antoine V, Charlie, Florian, FX, Guillaume, Jean, Maxime, Shinsai, Sébastien, et tous les autres.

Pour citer d'autres personnes déçues de m'avoir vu quitter le monde des mathématiques et de la physique (même si je continue à écrire quelques équations et lignes de code), je remercie mes amis de cette période difficile qu'était la classe préparatoire. En particulier, merci à la troupe de Bayonne, notamment Alfred, Alberto et Edouard, qui m'accordent un respect dont je ne comprendrai jamais l'origine, et Lucas, mon camarade de voyage avec qui j'espère bientôt retourner explorer le monde à vélo.

Je remercie chaleureusement mes amis des Waifus Hunter, sans qui cette thèse aurait probablement débouché sur un travail bien plus abouti, tant ils m'ont fait perdre de temps : Binouin, Gintarun, Crazer, Lepetitsuisse, Glaey, Gartnemo, Chuyo.

J'ai une pensée pour toutes les joueuses et tous les joueurs que j'ai eu la chance d'entraîner lors de mon séjour dans la section basket du Bordeaux Étudiants Club, les SF2-3, les SG4 et les vétérans. En particulier, je souhaite remercier les membres de l'épopée 2021-2022 qui aura presque débouché sur la montée : Rob, Jerem, Louis, Pablo, Martin, Mathias, Nico, Xavier, Thibault, Dan, Erwan, François, Adrien, Gab, Sylvain, Hugo, Rémi, Greg, Oscar. Et bien entendu, merci à Mehdi et Laureline d'avoir repris la gestion de ce groupe fantastique.

Merci à tous mes amis de Dordogne, Mariane, Clément, Nicolas B, Raphaël, Robin, Élise et mon binôme d'élevage de chatons François, ainsi qu'aux "satellites" Tessie et Cyann pour leur présence, leur soutien et les sorties vélo.

Un grand merci à tous les collègues du bureau 024, aux anciens pour avoir montré la voie (Pierre G, Estelle, Nicolas G, Antoine R), et aux nouveaux pour m'avoir appris à rattraper les ballons hauts : Alexis, malgré ta déconcentration de tous les instants, et Pierre B, malgré tes nombreuses tentatives de sabotage. Et en parlant de ces êtres malveillants, j'en profite pour remercier leurs équivalents du côté du bien, Jonah et Mélanie.

Merci aux membres du "nouveau" bureau 024, qu'ils soient docteurs (Théodore, Jean) ou simples doctorants (Gabriel, Hélène, Floriane). Un grand merci à Chrystelle pour m'avoir aidé à organiser la soutenance, et pour nous autoriser à jouer avec Sid.

Je remercie aussi les différents stagiaires qui m'ont aidé, et que j'ai essayé de former du mieux que j'ai pu. Merci à Jessy, pour son travail sur l'intéroception. À Camille, pour avoir traité les données de l'expérience du Fenwick. À Nolan, pour la tâche des moutons. Et enfin à Alix, pour les expériences avec avatar, mais surtout pour tout le reste.

J'adresse aussi un grand merci à toutes les personnes s'étant portées volontaires pour passer les protocoles de cette thèse, sans qui les travaux expérimentaux auraient été beaucoup moins intéressants.

Je souhaiterais remercier tout particulièrement le professeur Véronique Deschodt-Arsac, d'une part pour m'avoir accepté dans le master (puis pour le poste d'ATER), mais surtout pour sa patience, sa compétence, sa bienveillance et sa franchise, ayant toujours une critique constructive pour me permettre de m'améliorer, et ce même après la soutenance de thèse.

Enfin, je remercie Laurent, autant pour son accompagnement que ses qualités humaines, et pour m'avoir fait croire qu'un tel investissement dans l'encadrement d'un doctorant était "normal".

Table des matières

Résumé	2
Abstract.....	4
Remerciements	6
Liste des communications.....	11
Liste des figures.....	13
Liste des tableaux.....	15
Liste des abréviations	16
Préambule	17
Introduction générale	20
Avatars en réalité virtuelle.....	21
Phénomène d'illusion induite en VR : de l'incarnation d'une partie du corps au corps entier	21
Mesure de l'incarnation d'un avatar (<i>embodiment</i>) en réalité virtuelle : rôle de l'intégration multisensorielle	27
Prise de perspective.....	32
Sentiment d'agentivité	35
Auto-identification	36
Phénomènes liés à l'immersion en VR.....	40
Des variables d'étude classiques vers la prise en compte de la complexité.....	47
Méthodes d'analyse de la complexité	49
Origine de la complexité et fractalité	49
Multifractalité.....	57
Méthode de calcul de la multifractalité	62
Méthode d'analyse générale de la multifractalité.....	69
Applications de la multifractalité	71
Problématique et objectifs.....	78
Étude 1 - Validation d'une tâche visuomotrice en réalité virtuelle	83
Objectifs	83
Introduction	83

Matériel et méthodes	85
Résultats.....	90
Discussion.....	97
Conclusion.....	99
Étude 2 – La multifractalité des mouvements des mains comme marqueur d’adaptation.....	101
Objectifs	101
Introduction	101
Matériel et méthodes	103
Résultats.....	105
Discussion.....	108
Conclusion.....	111
Étude 3 – La multifractalité comme marqueur de l’incarnation d’un outil.....	113
Objectifs	113
Introduction	113
Matériel et méthodes	117
Résultats.....	122
Discussion.....	123
Conclusion.....	125
Étude 4 – Les illusions visuo-tactiles et cardio-visuelles en réalité virtuelle provoquent des modifications similaires de la conscience de soi corporelle	127
Objectifs	127
Introduction	127
Matériel et méthodes	130
Résultats.....	137
Discussion.....	145
Conclusion.....	148
Étude 5 – Influence de l’incarnation d’avatar sur les performances visuomotrices .	150
Objectifs	150
Introduction	150
Matériel et méthodes	154

Résultats.....	160
Discussion.....	169
Conclusion.....	171
Discussion générale	173
Conclusion	178
Transfert et valorisation	179
Perspectives	184
Bibliographie.....	186
Annexes	214
Annexe 1 – Simulator Sickness Questionnaire (SSQ).....	215
Annexe 2 – Igroup Presence Questionnaire (IPQ).....	216
Annexe 3 – Empathy Quotient (EQ).....	218
Annexe 4 – Interoceptive Accuracy Scale (IAS).....	221
Annexe 5 – Liens entre IAS et IAcc.....	223
Annexe 6 – Caractéristiques test-retest du RFT en réalité virtuelle.....	225
Annexe 7 – Caractéristiques test-retest de la tâche de rotations mentales en réalité virtuelle.....	226

Liste des communications

Publications

- **Pratviel, Y.**, Deschodt-Arsac, V., Larrue, F., & Arsac, L. M. (2021). Reliability of the Dynavision task in virtual reality to explore visuomotor phenotypes. *Scientific Reports*, 11(1), 1-12.
- **Pratviel, Y.**, Deschodt-Arsac, V., Larrue, F., & Arsac, L. M. (2021). Fast hand movements unveil multifractal roots of adaptation in the visuomotor cognitive system. *Frontiers in Physiology*, 12.
- **Pratviel, Y.**, Deschodt-Arsac, V., Larrue, F., & Arsac, L. M. (2022). Tool Embodiment Is Reflected in Movement Multifractal Nonlinearity. *Fractal and Fractional*, 6(5), 240.
- **Pratviel, Y.**, Bouni, A., Deschodt-Arsac, V., Larrue, F., & Arsac, L. M. (2022). Avatar Embodiment in VR: Are There Individual Susceptibilities to Visuo-Tactile or Cardio-Visual Stimulations? *Frontiers in Virtual Reality*, 123.
- Bouny, P., Arsac, L. M., **Pratviel, Y.**, Boffet, A., Touré Cuq, E., & Deschodt-Arsac, V. (2022). A Single Session of SMR-Neurofeedback Training Improves Selective Attention Emerging from a Dynamic Structuring of Brain–Heart Interplay. *Brain Sciences*, 12(6), 794.

Communications orales

- **Pratviel, Y.**, Deschodt-Arsac, V., Larrue, F., & Arsac, L. M. (2021). Multifractal hand dynamics as a marker of motor control adaptation during a visuomotor virtual reality task in sport students. *Congrès de l'ACAPS, Montpellier, France*.
- Boffet, A., **Pratviel, Y.**, Bouny, P., Deschodt-Arsac, V. (2021). Cardiac indices as markers of the detection of cognitive fatigue during a continuous vigilance task. *Congrès de l'ACAPS, Montpellier, France*.
- **Pratviel, Y.**, Deschodt-Arsac, V., Larrue, F., & Arsac, L. M. (2022). Can bodily self-consciousness affect training in virtual reality when identifying to an avatar? *Congrès de l'ECSS, Séville, Espagne*

- Boffet, A., Arsac, L. M., **Pratviel, Y.**, Deschodt-Arsac, V. (2022). HRV dynamics: from individual profiles to interpersonal coordination in athletes. *Congrès de l'ECSS, Séville, Espagne*

Liste des figures

Figure 1 - Illustration de l'illusion de la main en caoutchouc.....	22
Figure 2 - Induction d'une illusion visuo-tactile	23
Figure 3 - Induction d'une illusion cardio-visuelle.....	24
Figure 4 - Modèle neurocognitif de l'appartenance corporelle.....	26
Figure 5 - Méthodes de mesure de l'auto-localisation.....	31
Figure 6 – Avatars présentés avec différents angles lors d'une tâche d'OBT	33
Figure 7 - Schéma de l'activation des réponses autonomes.....	39
Figure 8 - Principaux systèmes de réalité virtuelle	41
Figure 9 - Illustration du Rod and Frame Test	45
Figure 10 - Dimension fractale de la côte Bretonne	51
Figure 11 - Présentation de trois types de signaux avec leur DSP.....	52
Figure 12 - Détail graphique de la méthode DFA	55
Figure 13 - Exemple de signaux physiologiques fractals	56
Figure 14 - Exemple de structure présentant de la tenségrité	58
Figure 15 - Schémas de distributions de probabilités en loi puissance.....	60
Figure 16 - Illustration d'une cascade multiplicative.	61
Figure 17 – Bruit 1/f dans les cascades multiplicatives.....	62
Figure 18 - Illustration de la méthode Multifractal DFA	64
Figure 19 - Illustration de l'application de la méthode du point focus.....	66
Figure 20 - Application de la méthode FMF-DFA à un signal d'accélération.....	70
Figure 21 - Illustration du concept d'interaction-dominance avec un outil.....	76
Figure 22 - Résumé des objectifs des différentes études.	81
Figure 23 – Illustration de la tâche VMVR.	85
Figure 24 – Mouvements de tête et ellipse à 95%.....	88
Figure 25 – Graphiques de Bland-Altman pour le test et le retest.....	93
Figure 26 – Analyse en composantes principales sur les données de VMVR.....	94
Figure 27 - Cartographie des clusters en fonction des axes de l'ACP.....	96
Figure 28 – Densité spectrale des mouvements de la main	102
Figure 29 – Exemple de signaux de mouvement des mains.....	104
Figure 30 – Temps de réponse (RT) calculés dans chaque condition.....	106
Figure 31 - Spectres de singularité moyens obtenus à partir de FMF-DFA	107
Figure 32 – Multifractalité des mouvements des mains.....	110
Figure 33 - Capture d'écran de la tâche des moutons.....	115
Figure 34 – Propriétés fractales et multifractales des mouvements de la souris	116
Figure 35 - Captures d'écran de différents environnements	118
Figure 36 – Analyse multifractale des mouvements de la souris.....	121
Figure 37 - Multifractalité mesurée par $\Delta H15$ dans chacune des cinq répétitions....	123

Figure 38 - Monofractalité mesurée avec DFA dans chacune des cinq répétitions...	124
Figure 39 – Vues VR des tâches avec l’avatar.	131
Figure 40 – Tâches de rotations mentales et du Rod and Frame Test	134
Figure 41 - Protocole expérimental de l’étude 4	136
Figure 42 - Temps de réponse moyen lors de la tâche d’OBT	139
Figure 43 - Temps de réponse lors de la tâche OBT	140
Figure 44 - Décélération du battement cardiaque	141
Figure 45 - Analyse en composantes principales sur les données de l’étude 4	143
Figure 46 - Ellipses de confiance à 95% étude 4	144
Figure 47 - Interprétation des résultats HRD	147
Figure 48 – Représentation schématique du contrôle d’un avatar	153
Figure 49 – Captures d’écran de la tâche VMVR à la troisième personne.....	155
Figure 50 - Prétraitement des signaux de mouvement des mains	157
Figure 51 - Protocole expérimental de l’étude 5	159
Figure 52 – Performances lors de la tâche VMVR	161
Figure 53 – Comparaison de l’évolution des temps de réponse.	161
Figure 54 – Corrélations entre les performances à la tâche VMVR	162
Figure 55 - Temps de réponse moyen en fonction des angles de rotation	163
Figure 56 – Résultats du questionnaire d’illusion	164
Figure 57 - Analyse en composante principale.....	166
Figure 58 - Ellipses de confiance à 95% étude 5	167
Figure 59 – Simulateur de conduite en réalité virtuelle	180
Figure 60 – Illustration de la tâche des bateaux.....	181
Figure 61 – Capture d’écran du niveau 17 de la tâche collective (R3B)	182
Figure 62 – Tâches développées et transférées pendant la thèse	183
Figure 63 – Corrélations entre deux essais successifs de précision intéroceptive	224
Figure 64 – Corrélations entre les indicateurs md, mSI et IAS.....	224
Figure 65 – Corrélations entre deux essais du Rod and Frame Test.	225
Figure 66 – Évolution des performances en rotations mentales	226
Figure 67 – Corrélations entre deux essais de la tâche de rotations mentales	227

Liste des tableaux

Tableau 1 - Relations entre la pratique sportive et de jeux vidéos et le cybermalaise ressenti pendant l'expérience	91
Tableau 2 - Temps de réponse obtenus dans les différences conditions, et indicateurs statistiques associés pour caractériser la fiabilité test-retest.....	91
Tableau 3 – Description des clusters en termes de variables qualitatives	95
Tableau 4 - Résultats du post-hoc Tukey pour le degré de multifractalité ΔH_{15}	108
Tableau 5 – Valeurs des tMF pour les mouvements de la souris et de la main	122
Tableau 6 - Questionnaire d'illusion présenté aux participants	133
Tableau 7 - Réponses aux questionnaires après induction des illusions	138
Tableau 8 - Profils individuels des participants à l'expérience	141
Tableau 9 - Résultats des profils individuels	165
Tableau 10 - Valeurs de ΔH_{15} pour les mains dominante et non-dominante	167
Tableau 11 - Valeurs de tMF pour les mains dominante et non-dominante	168

Liste des abréviations

ACP	Analyse en Composantes Principales
CAVE	Cave Automatic Virtual Environment
CHCP	Classification Hiérarchique sur Composantes Principales
DFA	Detrended Fluctuation Analysis
EQ	Empathy Quotient
FMF-DFA	Focus Based Multifractal Detrended Fluctuation Analysis
HEP	Heartbeat Evoked Potential
HMD	Head Mounted Display
IAAFT	Iterated Amplitude Adjusted Fourier Transform
IAS	Interceptive Accuracy Scale
IPQ	iGroup Presence Questionnaire
MIT	Mental Imagery Task
OBT	Own Body Transformation
PPS	Peripersonal Space
PSD	Power Spectral Density
RFT	Rod and Frame Test
SSQ	Simulator Sickness Questionnaire
STAPS	Sciences et techniques des activités physiques et sportives
VR	Virtual Reality

Préambule

Contexte scientifique

En plein cœur de la 4^{ème} révolution industrielle, les technologies immersives sont de plus en plus présentes. Leur démocratisation s'accompagne de nombreuses promesses, en ouvrant la voie à de nouvelles applications dans les domaines du divertissement, de la santé, du social ou encore de l'apprentissage. Parmi ces nouvelles technologies, la réalité virtuelle se démarque par sa capacité à immerger entièrement son utilisateur dans un nouvel environnement. En se détachant des contraintes du monde physique, les stimulations proposées à l'utilisateur ne sont - en théorie - plus limitées que par l'imagination des concepteurs d'environnement virtuels. Pour cette raison particulière, le monde de la recherche s'est rapidement emparé de cette technologie pour induire des stimulations précises dans des environnements contrôlés, ou pour étudier certains phénomènes psycho-physio-neurologiques.

La réalité virtuelle s'est notamment montrée utile pour étudier un concept d'origine philosophique et psychologique s'intéressant à la perception de notre personne : la conscience de soi corporelle. Bien que les définitions puissent varier en fonction des auteurs et des domaines de recherche, ce terme réfère couramment à l'expérience consciente d'un individu de posséder un corps, localisé à un certain point dans l'espace, et de pouvoir agir à travers lui. Cet aspect est crucial dans de nombreuses applications modernes faisant agir un avatar, terme que nous définirons ici comme la représentation de l'utilisateur dans un monde virtuel.

Les avancées conjointes des technologies de réalité virtuelle et de la recherche sur la conscience de soi corporelle offrent de nouvelles opportunités pour étudier et exploiter la relation entre l'utilisateur et son avatar. Que ce soit d'un point de vue neuro-physiologique, en s'intéressant à l'intégration multisensorielle de signaux corporels, ou d'un point de vue psycho-socio-cognitif, via l'apparence donnée au corps virtuel, il existe de nombreuses façons d'aborder la question de l'incarnation d'un avatar. De ce fait, l'étude de ce phénomène nécessite une approche résolument pluridisciplinaire, intégrant à la fois les aspects informatiques et scientifiques liés à la cognition et à la physiologie humaine.

Dans ces travaux de thèse, notre attention se portera tout particulièrement sur l'étude de l'incarnation d'un avatar à l'aide de marqueurs empruntés aux champs de la psychologie, des sciences cognitives et de la physiologie. La finalité de ce travail est d'apporter un éclairage holistique sur le phénomène d'incarnation, la façon de le

quantifier, et son importance dans le domaine particulier de la performance visuomotrice.

L'aspect original de cette thèse est qu'elle vient greffer à ce champ de recherche celui de la complexité des signaux biologiques. Cette piste part du constat établi dans la littérature stipulant que le mouvement humain se caractérise par le fait qu'il ne peut pas être décomposé de façon additive. En d'autres termes, la finalité d'un geste n'est pas la somme de l'activation des composants participant à son exécution : au contraire, le mouvement humain émerge des interactions entre les différents systèmes impliqués. En s'intéressant particulièrement à la nature de ces interactions, et en les quantifiant avec les méthodes adéquates, il devient alors possible de déterminer expérimentalement si les mouvements réalisés par un outil ou un avatar sont intégrés dans un système cognitif étendu, et donc s'ils sont effectivement incarnés par l'utilisateur.

La première partie de ce manuscrit revient en détail sur les deux aspects principaux de ce travail de thèse : les avatars en réalité virtuelle, et les méthodes d'analyse de la complexité. Cette approche innovante de l'étude de l'incarnation d'un avatar a nécessité le développement et la validation de plusieurs outils et méthodes, qui seront présentés dans la seconde partie au travers de quatre études, dont les résultats sont investis pour appréhender un cinquième travail expérimental. Enfin, la troisième partie discutera des résultats principaux, des nouvelles questions qui en découlent ainsi que des différentes perspectives.

Structures d'accueil

Cette thèse CIFRE est née d'une collaboration entre l'unité Systèmes Centrés sur l'Humain (SCH) du Centre Aquitain des Technologies de l'Information et Électroniques (CATIE) et l'équipe Performance Motrice Humaine Dynamique des Systèmes Complexes de Contrôle (PMH_DySCo), du groupe Cognitique du laboratoire de l'Intégration du Matériau au Système (IMS, UMR 5218).

Le CATIE est un centre de transfert technologique agissant dans trois domaines principaux : l'informatique et l'intelligence artificielle, les systèmes cyber physiques, et le facteur humain. Une des missions de l'unité SCH est d'accompagner les PME et start-ups pour la bonne prise en compte des capacités de l'utilisateur (physiologiques, cognitives, motrices, etc.) dans la conception de leurs technologies immersives, notamment dans des situations d'apprentissage. Dans le contexte industriel actuel, il existe un besoin croissant de caractériser l'acceptabilité et la facilité d'utilisation de nouvelles solutions, et de comprendre les caractéristiques individuelles d'un utilisateur qui peuvent influencer l'effet d'une intervention ou d'un outil. Les travaux réalisés dans le cadre de cette thèse ont pour but de permettre au CATIE de proposer

de méthodes d'évaluation psycho-physio-cognitive plus précises et innovantes, pour mieux définir les facteurs humains à prendre en compte dans la conception de systèmes immersifs, et donc d'en améliorer l'acceptabilité et les usages.

Pour atteindre ces objectifs, cette thèse a été effectuée avec l'équipe PMH_DySCo, composée d'enseignants-chercheurs rattachés à la faculté des sciences du sport (UF STAPS). Les travaux de l'équipe s'intéressent aux indices physiologiques et moteurs caractérisant l'état ou le changement d'état d'un individu, en particulier à l'aide d'analyses non-linéaires de signaux biologiques. Dans cette optique, cette thèse doit servir à monter en compétences sur de nouvelles méthodes d'analyses, ainsi qu'à introduire l'usage de la réalité virtuelle pour étudier l'humain en interaction avec son environnement.

Introduction générale

Avatars en réalité virtuelle

Phénomène d'illusion induite en VR : de l'incarnation d'une partie du corps au corps entier

La première partie de ce chapitre introductif s'attachera à définir les notions d'illusion et d'incarnation. Depuis une vingtaine d'années, ces notions sont au cœur de la recherche sur la conscience de soi (et plus précisément la conscience de soi corporelle), notamment en réalité virtuelle. L'objectif final de cette thèse étant d'étudier le comportement d'un utilisateur agissant à travers un avatar, il est primordial de définir les notions abordées.

Dans un premier temps, nous verrons d'où provient le concept d'illusion via l'expérience pionnière de la main en caoutchouc, avant d'aborder les méthodes d'induction de l'illusion à un corps entier. Ensuite, nous introduirons les différents mécanismes avancés dans la littérature comme étant responsables des illusions ressenties par les participants.

Expérience de l'incarnation d'une main en caoutchouc

Les études portant sur les illusions et l'incarnation d'avatars ont pour coutume de citer l'expérience originale de la main en caoutchouc (Botvinick and Cohen, 1998). Dans cette expérience, un utilisateur voit une prothèse en caoutchouc à la place de sa vraie main, cachée (Figure 1). Un expérimentateur vient alors caresser la main de l'utilisateur en même temps que la main en caoutchouc. Lorsque ces stimulations sont synchrones, le participant déclare avoir l'impression que la main en caoutchouc est effectivement sa vraie main. De plus, lorsqu'il est demandé aux participants de montrer la position de leur vraie main, ils la placent en direction de la main en caoutchouc : ce phénomène est appelé *drift proprioceptif*. De façon intéressante, ces effets ne sont observés que lorsque les stimulations sont synchrones : en ajoutant un décalage temporel dans l'action de toucher la main avec le pinceau, ces effets d'attribution et de mauvaise localisation disparaissent. C'est donc bien le conflit multisensoriel créé par des stimulations synchrones congruentes, mais spatialement incongruentes qui génère l'illusion de posséder la main en caoutchouc. Cette auto-attribution de la main en caoutchouc est à la fois le résultat de processus bottom-up (intégration multisensorielle d'informations visuelles et tactiles), mais aussi top-down, liées aux modèles de représentation interne du corps (Tsakiris and Haggard, 2005).



Figure 1 - Illustration de l'illusion de la main en caoutchouc. La main droite de l'utilisateur est cachée, et un expérimentateur vient caresser en parallèle la vraie main ainsi que la prothèse en caoutchouc.

Induction d'une illusion par stimulations multisensorielles visuo-tactile ou cardio-visuelle

En partant des résultats principaux de l'expérience de la main en caoutchouc, démontrant qu'il est possible de générer une erreur d'attribution envers une main prothétique à l'aide de stimulations multisensorielles, de nombreuses études se sont ensuite intéressées à la généralisation de ce paradigme au corps entier. Dans un premier temps, une illusion envers le corps entier d'un participant a été réalisée à l'aide de stimulations visuo-tactiles synchrones (Lenggenhager et al., 2007). Comme dans le paradigme expérimental de la main en caoutchouc, un expérimentateur vient toucher le dos du participant en même temps qu'il voit son propre dos se faire toucher, filmé par une caméra située deux mètres derrière lui et retransmettant le flux vidéo dans un casque de réalité virtuelle (Figure 2). Les résultats obtenus, tant sur l'auto-attribution du corps observé mesuré par questionnaire que sur le drift proprioceptif, correspondent à ceux observés avec la main en caoutchouc. De plus, les réponses autonomes à la suite d'un stimulus dangereux s'approchant du corps sont plus élevées suite à une stimulation synchrone par rapport à une stimulation asynchrone (Ehrsson, 2007).



Figure 2 - Induction d'une illusion visuo-tactile. L'expérimentateur touche avec le contrôleur VR le dos du participant, en même temps que ce dernier voit le dos de l'avatar se faire toucher dans le casque de réalité virtuelle.

Suite à ces premiers résultats, des stimulations multisensorielles synchrones ont pu être réalisées en synchronisant de nouveaux signaux corporels ; parmi eux, les signaux cardiaques se sont montrés efficaces pour stimuler l'illusion, que ce soit sur la main en caoutchouc (Suzuki et al., 2013) ou le corps entier (Aspell et al., 2013). Pour générer l'illusion, l'activité électrique cardiaque d'un participant est mesurée pour détecter l'onde R, qui sera utilisée comme marqueur temporel du battement cardiaque. Cette information est ensuite retranscrite visuellement en faisant clignoter une partie du corps (la main ou le bras dans l'expérience de la main en caoutchouc) ou le corps entier de façon synchrone avec le battement (Figure 3). Comme pour l'illusion visuo-tactile, les effets de l'illusion cardio-visuelle sont couramment observés en comparant les résultats obtenus suite à des stimulations synchrones ou asynchrones. Toutefois, la modalité synchrone la plus efficace n'est pas forcément celle limitant au maximum le délai entre la détection de l'onde R et sa restitution visuelle. En effet, le moment où le battement serait le mieux perçu par le sujet correspondrait plutôt à la fin de la contraction ventriculaire, et donc temporellement après le complexe QRS. Plusieurs études se sont intéressées au moment où le battement cardiaque est le mieux perçu par le sujet, qui se situerait entre 200 ms et 400 ms après l'onde R (Brener et al., 1993; Brener and Kluitse, 1988; Ring and Brener, 1992; Yates et al., 1985). Ces observations ont par la suite été confirmées par l'utilisation d'électroencéphalographie, montrant des potentiels d'action déclenchés par le battement cardiaque (Heartbeat Evoked Potentials, HEP) décalés

temporellement par rapport à l'onde R (Schandry et al., 1986). D'un point de vue neurologique, l'amplitude des HEP a été mise en lien avec la faculté intéroceptive, en comparant notamment des patients dépressifs à des sujets contrôle (Terhaar et al., 2012).

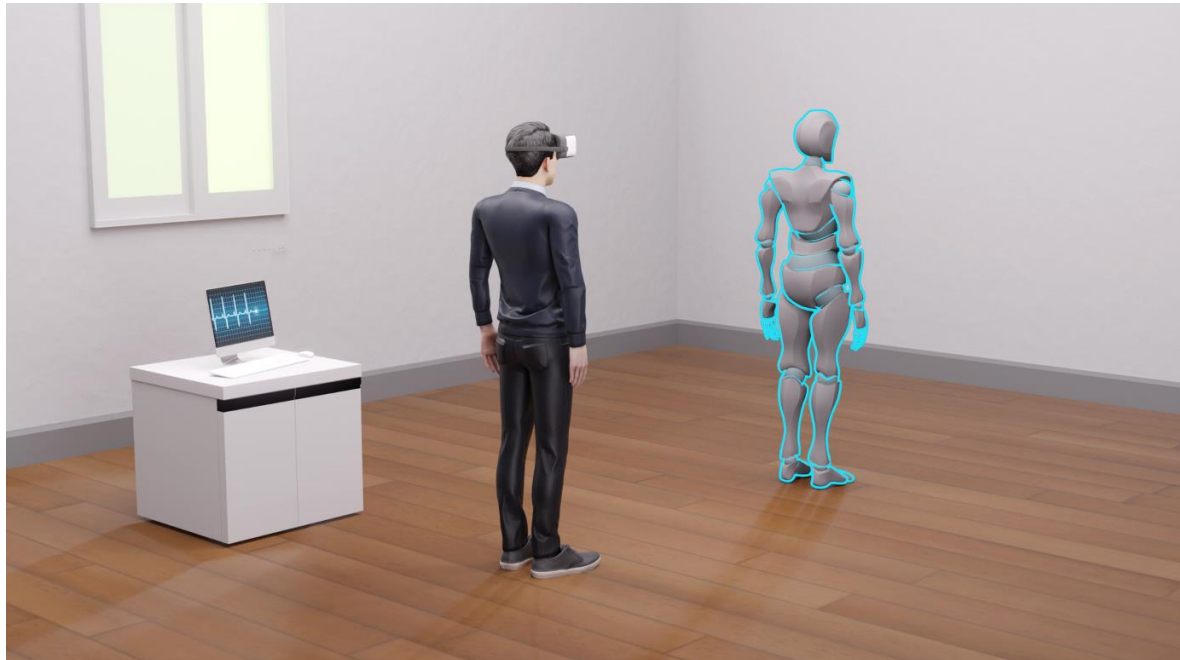


Figure 3 - Induction d'une illusion cardio-visuelle. Le corps de l'avatar clignote de façon synchrone avec le battement cardiaque du participant.

Induction d'une illusion par stimulation visuomotrice

Dans le cadre de l'utilisation de réalité virtuelle pour réaliser des tâches motrices à la troisième personne, les mouvements d'un participant sont capturés en temps réel et retransmis pour animer l'avatar. Dans ce cas, l'illusion se crée par synchronisation visuomotrice : un mouvement est effectué et perçu simultanément. Cette illusion permet de générer très rapidement un sentiment d'appartenance envers le corps de l'avatar, qui disparaît tout aussi vite en situation asynchrone, lorsqu'un délai est artificiellement ajouté entre le mouvement et sa restitution visuelle (Keenaghan et al., 2020).

Fonctionnement et origines cérébrales des illusions

Les illusions corps entier ont d'abord été étudiées chez des sujets pathologiques, subissant des expériences de hors-corps, ayant l'impression de s'observer depuis un point de vue extérieur (Blanke et al., 2005; Blanke and Mohr, 2005). Des études en neuroimagerie ont permis de mettre en évidence un lien entre les

expériences de hors-corps et une incapacité à intégrer des informations multisensorielles corporelles au niveau de la jonction temporo-pariétale. Une perturbation de cette zone du cerveau par stimulation magnétique transcrânienne a notamment mis en évidence son importance pour le traitement d'informations multisensorielles liées aux objets corporels et non-corporels (Tsakiris et al., 2008). Même si d'autres zones cérébrales ont été identifiées dans le traitement des informations corporelles, comme le gyrus angulaire droit (Blanke et al., 2002), ou l'opercule rolandique bilatéral (Blefari et al., 2017) et l'insula droite (Ronchi et al., 2015) dans le cas des illusions cardio-visuelles, la jonction temporo-pariétale (et notamment la partie droite) est couramment évoquée comme étant le centre de traitement d'informations multisensorielles essentiel à la construction du soi.

Dans la lignée des premières expériences réalisées sur l'illusion corps-entier, de premiers modèles essayant d'expliquer l'origine de la représentation corporelle dans le cerveau sont nés pour tenter d'expliquer ces illusions. Parmi eux, on peut citer celui de Tsakiris (2010), établissant un modèle neurocognitif de l'appartenance corporelle se basant sur un ensemble de comparaisons effectuées par le cerveau Bayésien (Figure 4). Dans ce modèle, les informations visuelles (main en caoutchouc, avatar) et la posture sont comparées à un modèle corporel préétabli. Ce premier processus top-down est indispensable pour passer à l'étape suivante, dans laquelle les informations multisensorielles (par exemple, la vue et le toucher dans le cas de l'illusion visuo-tactile) sont comparées. Si elles sont perçues comme temporellement synchrones, les informations corporelles traitées sont utilisées pour construire un nouveau modèle corporel venant remplacer l'ancien.

Une autre hypothèse expliquant l'induction des illusions utilise la notion d'espace péripersonnel (PPS), une zone entourant le corps dans laquelle agissent des neurones multisensoriels, spécialisés dans le traitement d'informations provenant de sources congruentes (tactiles, visuelles et auditives). Le rôle du PPS est double (Noel et al., 2018) : il sert de zone de protection entre l'organisme et l'environnement, et d'interface entre la perception et l'action dans la manipulation de l'environnement par une partie du corps (Serino, 2019; Serino et al., 2009). Les frontières du PPS sont établies dès la naissance (Orioli et al., 2019), mais ne sont pas figées pour autant. Par exemple, ces frontières peuvent évoluer avec la grossesse (Cardini et al., 2019) et s'étendre avec l'utilisation d'un outil (Farnè and Làdavas, 2000; Làdavas, 2002) ou la marche (Noel et al., 2015a). De façon intéressante, ces frontières sont affectées par les représentations corporelles : lors de l'illusion de la main en caoutchouc, le PPS se déplace pour englober le faux membre après la présentation de stimulations multisensorielles (Lloyd, 2007; Makin et al., 2008). À partir de ce constat est née l'hypothèse selon laquelle l'illusion de la main en caoutchouc pourrait être déclenchée par l'activation de neurones bimodaux (traitant des informations tactiles et visuelles) dans le PPS (Makin et al., 2008). Cependant, cette prévalence de l'activation de

neurones dans le PPS sur l'illusion ne permet pas d'expliquer les illusions corps entier utilisant des avatars présentés à plusieurs mètres de distance. En effet, ceux-ci sont présentés en dehors de l'espace péripersonnel, et ne devraient donc pas générer une activation des neurones multisensoriels.

Une explication possible réside dans la bidirectionnalité de la relation entre la conscience de soi corporelle et le PPS. Les stimulations multisensorielles appliquées sur un avatar peuvent en effet induire un déplacement des frontières du PPS en direction de l'avatar (Noel et al., 2015b).

Pour résumer, l'induction des illusions se fait grâce à deux mécanismes principaux s'influencent l'un l'autre. Le PPS est essentiel à l'intégration de signaux multisensoriels menant au phénomène d'incarnation, et l'illusion corps-entier induit une modification des frontières du PPS (Blanke, 2012; Blanke et al., 2015; Makin et al., 2008; Noel et al., 2015b; Salomon et al., 2017). Ces observations sont supportées par des études en neuroimagerie, démontrant des substrats neuronaux communs entre ces deux concepts (Grivaz et al., 2017a).

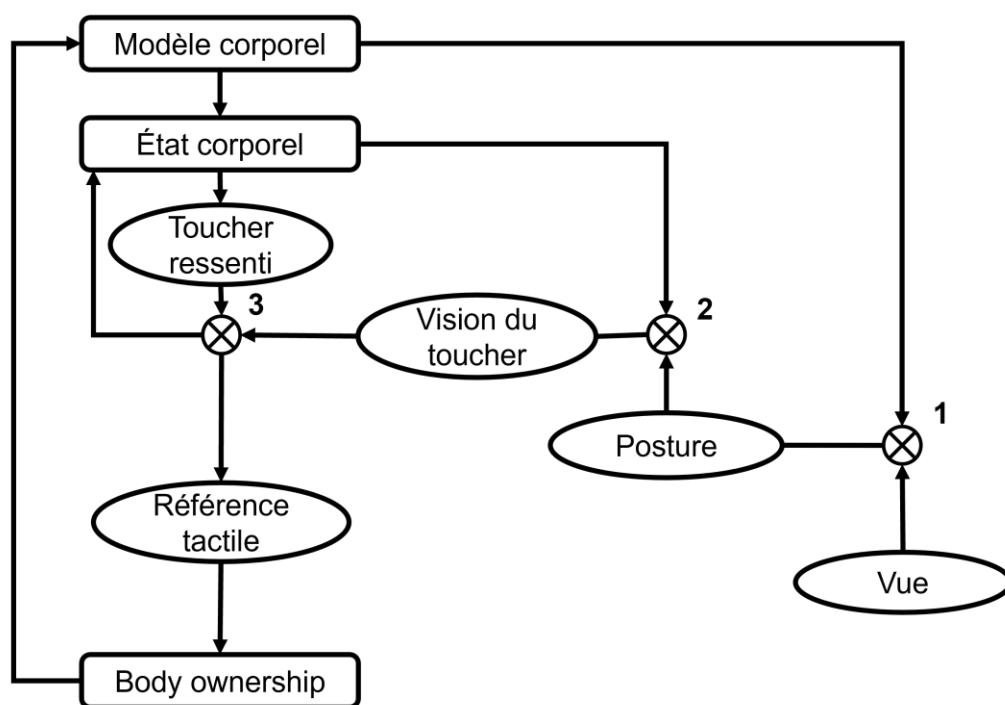


Figure 4 - Modèle neurocognitif de l'appartenance corporelle, adapté de Tsakiris (2010).

Mesure de l'incarnation d'un avatar (*embodiment*) en réalité virtuelle : rôle de l'intégration multisensorielle

La mesure de l'incarnation à un avatar en réalité virtuelle nécessite de d'abord définir ce que l'on entend par incarnation, ou *embodiment* en anglais. Plusieurs auteurs ont proposé des cadres théoriques pour comprendre ce phénomène. Dans son dilemme du cyborg, Franck Biocca (1997) propose une définition de l'incarnation comme la transposition de son « schéma corporel » du corps objectif vers le corps virtuel. Dans ce modèle, le corps objectif représente le corps physique de l'utilisateur qu'il peut observer, et le corps virtuel est sa représentation au sein de l'environnement virtuel. Le schéma corporel est quant à lui une représentation mentale du corps et de son état. Cette vision rejoint d'une certaine façon le modèle neurocognitif de Tsakiris (2010) détaillé plus haut.

Une autre définition est proposée par Kilteni et collaborateurs (2012), spécifique à la réalité virtuelle, poursuivant des travaux antérieurs sur le sentiment d'appartenance à un corps virtuel (Blanke and Metzinger, 2009; de Vignemont, 2011) : « le sentiment d'appartenance à un corps B est le sentiment émergeant lorsque les propriétés du corps B sont traitées comme étant les propriétés de son propre corps biologique » (Kilteni et al., 2012).

Comme indiqué dans la construction des illusions, l'intégration de signaux corporels est essentielle à l'incarnation d'un avatar en réalité virtuelle. Les conflits multisensoriels permettent de tromper le cerveau en transposant sur un corps virtuel le résultat de stimulations provenant d'un corps physique. Mais quelles sont précisément les propriétés spécifiques du corps évoquées dans la définition de l'incarnation ? Pour y répondre, il faut se pencher sur le phénomène faisant que l'Homme a conscience de posséder un corps : la conscience de soi corporelle (*Bodily Self-Consciousness*).

Conscience d'un soi corporelle : un concept décrit par quatre composantes

Le concept de conscience de soi est avant tout un construit philosophique, donc la définition diffère selon les auteurs. Au XVII^{ème} siècle, dans son Discours de la méthode, Descartes propose la conscience de soi comme l'expérience consciente de penser : « je pense donc je suis ». Pour Kant, la conscience de soi naît avec le « Je », l'expérience consciente d'être le sujet de ses actions. Ces réflexions sont reprises par Hegel, pour qui la conscience de l'Homme provient à la fois du fait d'exister de façon physique - de posséder un corps naturel, mais aussi de sa capacité à prendre du recul pour s'observer lui-même en relation avec le reste du monde. Sartre ajoute que la conscience de soi n'est pas uniquement introspective, provenant de l'observation de

son être et du sentiment d'exister au-delà d'un corps physique naturel, mais serait résolument dirigée vers l'extérieur : « être, c'est éclater dans le monde ».

Ces constats philosophiques permettent d'aborder les points importants dans la conscience de posséder un corps : celui-ci serait un objet physique, situé à un point dans l'espace, et par lequel l'Humain perçoit des sensations. Il semble alors nécessaire de considérer ce corps comme étant le nôtre, celui par lequel il est possible d'agir et de percevoir le monde. Les méthodes décrites précédemment permettant de modifier cette conscience de soi corporelle à l'aide d'illusions ont ensuite permis de confronter ces conceptions philosophiques à la neuroimagerie (Blanke, 2012; Serino et al., 2013). En accord avec les réflexions précédentes, la conscience de soi corporelle semble émaner de plusieurs composantes distinctes, trouvant leurs origines dans des aires cérébrales différentes. L'activité de la jonction temporo-pariétale, intégrant les informations multisensorielles, est nécessaire à la localisation du corps dans l'espace et à la prise de perspective visuo-spatiale (Blanke and Arzy, 2005; Bottini et al., 2001; Lopez et al., 2008). Concernant le sentiment d'appartenance au corps, une intégration de type bottom-up ne semble pas être un mécanisme suffisant, les stimulations multisensorielles ne permettant pas d'induire des illusions envers des objets non-corporels (Aspell et al., 2013; Lenggenhager et al., 2007; Tsakiris, 2010; Tsakiris and Haggard, 2005). Cette observation suppose que des processus cognitifs de type top-down sont à l'œuvre pour détecter ce qu'est un objet corporel et construire la conscience de soi corporelle.

Même si le nombre de composantes de la conscience de soi corporelle et leur nature sont encore sujets à débat, quatre composantes principales émergent couramment dans la littérature : l'auto-localisation, la prise de perspective, le sentiment d'agentivité et l'auto-identification. Ces concepts sont associés à des processus de type bottom-up, provenant de l'intégration multisensorielle, et à des processus top-down, générant un sentiment d'appartenance à partir des caractéristiques visuelles de l'avatar (ou de la partie du corps) et de ce qu'elles évoquent.

Chacune des composantes a fait l'objet d'explorations spécifiques, notamment à l'aide de questionnaires. L'étude de ces composantes a mené au développement de différentes méthodes objectives utilisant des tâches spécifiques en réalité virtuelle, reposant sur des mesures physiologiques autonomes et comportementales, que nous utiliserons dans les expériences réalisées dans ce travail de thèse. Dans les parties suivantes, nous décrirons les concepts associés à ces différentes composantes, ainsi que les différentes méthodes de mesure utilisées.

Auto-localisation

L'auto-localisation est un processus cognitif permettant la localisation spatiale du soi. Si la prise de perspective à la première personne et le sentiment d'agentivité sont parfois mis de côté pour décrire et évaluer la conscience de soi corporelle (Dobricki and Rosa, 2013; Maselli, 2015), la notion d'auto-localisation – tout comme celle d'auto-identification – est systématiquement exploitée. Les relations possibles entre ces composantes spécifiques de la conscience de soi corporelle ne sont pas établies, et il semble probable qu'elles soient largement indépendantes (Longo et al., 2008) et que chacune d'elles nécessite une évaluation spécifique.

L'auto-localisation peut être définie comme la sensation d'occuper un certain volume de l'espace à un instant donné (Blanke and Metzinger, 2009). Elle est à distinguer du sentiment de présence en réalité virtuelle décrit dans la suite de cette introduction. La présence renvoie au sentiment de se situer dans un environnement virtuel, alors que l'auto-localisation se réfère à l'expérience subjective de situer son « soi » dans un endroit précis (Weibel and Wissmath, 2011). Même si présence et localisation du soi sont des phénomènes distincts, ils restent toutefois liés et peuvent réciproquement s'influencer (Kiltner et al., 2012).

En réalité virtuelle, le soi existe dans deux endroits distincts : le monde réel, et le monde virtuel. En manipulant certaines informations sensorielles, il semble possible de déplacer la localisation du soi, ou de la distribuer entre les environnements. Cette observation fait écho aux expériences de la main en caoutchouc et à celles sur l'incarnation d'un avatar, dans lesquelles la position perçue de la main ou du corps est modifiée après intégration de signaux multisensoriels synchrones. Une question fondamentale se pose alors : lors d'une immersion en réalité virtuelle, ou lors d'une expérience avec de fausses parties du corps, la localisation du soi est-elle étendue (Noel et al., 2015b), distribuée entre les différentes positions (Furlanetto et al., 2013), ou alternée entre plusieurs positions (Blanke and Metzinger, 2009)? Dans ce manuscrit, nous ne serons pas en mesure de répondre à cette question, mais nous essaierons de comprendre les phénomènes à l'œuvre dans la modification de l'auto-localisation, ainsi que de présenter les différentes méthodes de mesure de cette variable.

Plusieurs expériences en neurologie ont été réalisées pour étudier ces phénomènes de modification de la localisation de soi. Lors d'expériences de sortie du corps, induites chez des participants sains ou vécues par des sujets pathologiques, le « soi » et le corps sont dissociés spatialement (Mandrigin and Thompson, 2015). Le participant a alors l'impression d'observer son environnement et parfois son corps depuis un point de vue extérieur. D'un point de vue neuroanatomique, il est possible de déclencher de telles expériences chez des sujets éveillés en stimulant la jonction temporo-pariétale (Nakul and Lopez, 2017). Comme évoqué précédemment, cette

partie du cerveau est notamment liée aux phénomènes d'intégration multisensorielle et de conscience de soi corporelle. À ce titre, il a été proposé que ces expériences de sortie du corps, induisant une modification de la localisation du « soi », sont associées à une mauvaise intégration des informations visuelles, tactiles, proprioceptives et vestibulaires (Blanke et al., 2004). L'intégration d'informations multisensorielles serait donc un mécanisme primordial de l'auto-localisation, ce qui explique les modifications de position perçue lors d'illusions faisant intervenir des stimulations multisensorielles synchrones, comme lors des stimulations visuo-tactiles et cardio-visuelles induites en réalité virtuelle. Les signaux visuels, tactiles, proprioceptifs et vestibulaires, permettant le positionnement et l'orientation du corps dans l'espace, doivent faire parvenir des informations congruentes pour obtenir une représentation juste de la localisation du soi. Dans le cas de conflits multisensoriels, l'auto-localisation est modifiée, et vient impacter la conscience de soi corporelle.

La méthode d'évaluation de l'auto-localisation nécessite en soi une exploration approfondie. Dans de nombreuses études qui ont induit une illusion corps-entier, l'auto-localisation a été évaluée au moyen d'une tâche motrice, dans laquelle le participant était lentement guidé à reculons par l'expérimentateur, à petits pas, les yeux fermés, quelques mètres en arrière. Il avait ensuite pour consigne de regagner sa position initiale avec des pas normaux, sur la base de son sentiment d'auto-localisation pendant l'expérience. Lorsque la stimulation multisensorielle induisant l'illusion corps-entier était effectuée avec des stimuli synchrones, le drift vers l'avatar était significativement plus élevé qu'après une stimulation asynchrone (Aspell et al., 2013; Lenggenhager et al., 2007). De la même façon qu'avec la main en caoutchouc, cette méthode permet de mesurer un drift proprioceptif. Même si cette méthode a obtenu des résultats intéressants pour mesurer le changement d'auto-localisation à la suite d'une illusion réalisée avec des stimulations multisensorielles synchrones, l'aspect locomoteur inhérent à la mesure peut induire une mise à jour des entrées sensori-motrices et vestibulaires. Lors de la procédure, le fait de déplacer le participant peut alors modifier ce qu'était la localisation perçue du participant suite à l'illusion et perturber la mesure. En effet, il a été démontré que les évaluations perceptives sont modifiées par l'implication de schémas moteurs, qui génèrent un ajustement et une augmentation de la précision perceptive (Aglioti et al., 1995; Wraga and Proffitt, 2000). Pour éviter cet écueil, des tâches basées sur l'imagerie mentale ont été développées pour mesurer l'auto-localisation.

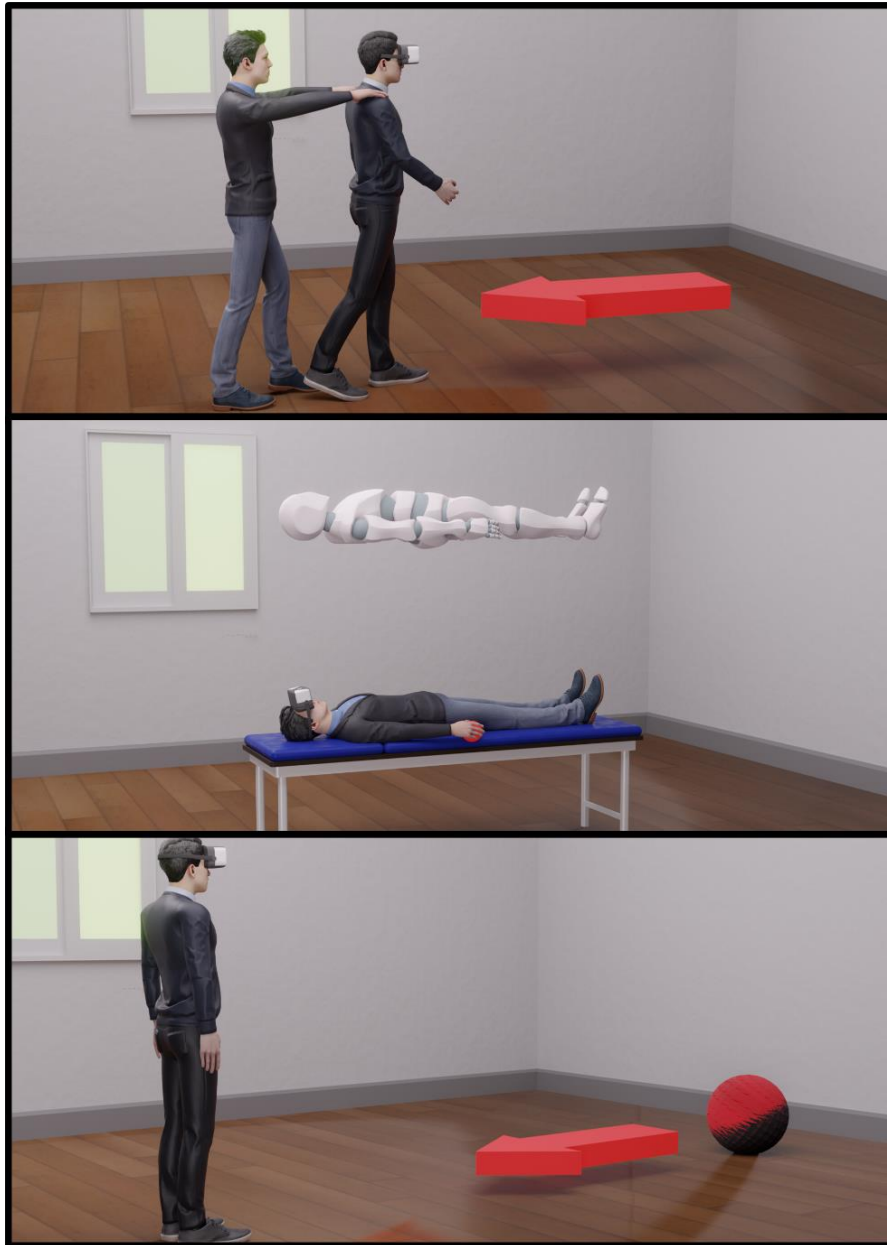


Figure 5 - Méthodes de mesure de l'auto-localisation. En haut : drift proprioceptif, mesuré en déplaçant le participant vers l'arrière puis en lui demandant de retourner à sa position initiale en effectuant des pas normaux. Au milieu : Mental Ball Dropping Task, dans laquelle un participant doit lâcher une balle depuis une position couchée, tout en voyant l'avatar dans le casque de réalité virtuelle. En bas : Mental Imagery Task, dans laquelle le participant doit imaginer la balle rouler dans sa direction jusqu'à ce qu'elle entre en contact avec ses pieds.

Parmi ces tâches, on peut citer celle du lâcher de balle (Mental Ball Dropping Task), lors duquel un participant en position allongé voit son corps à la troisième personne et doit lâcher une balle tenue dans sa main. Après cela, il lui est demandé d'appuyer sur un bouton au moment où il pense que la balle a atteint le sol. Une stimulation visuo-tactile synchrone réalisée sur le participant permet de modifier sa

localisation perçue, comme le montre l'évolution des temps de réponse lors de la tâche d'imagerie mentale. Un participant allongé et regardant vers le bas répondra plus rapidement, s'identifiant à un corps plus proche du sol. Les participants allongés en regardant en l'air répondront plus lentement, imaginant la balle tomber depuis un corps situé plus loin du sol (Ionta et al., 2011; Lenggenhager et al., 2009). Cette tâche d'imagerie mentale a été adaptée plus récemment pour la position debout, en faisant apparaître une balle se déplaçant sur le sol en direction du participant, à vitesse constante. Après plusieurs secondes, l'écran s'éteint, et le participant doit déterminer, en imaginant la balle rouler vers lui, à quel moment elle entrera en contact avec son corps. Les résultats obtenus expérimentalement avec cette méthode montrent que, suite à une stimulation visuo-tactile, les participants ont des temps de réponse courts, suggérant une auto-localisation perçue décalée vers l'avant – en direction de l'avatar (Nakul et al., 2020). Bien que récente, cette méthode nous semble être la plus pertinente pour mesurer le sentiment d'auto-localisation, et sera utilisée dans la suite de ce manuscrit.

Prise de perspective

La prise de perspective est la capacité à adopter le point de vue de l'avatar, un phénomène étroitement lié à la notion d'incarnation. Deux formes de prise de perspective visuelle ont été mises en évidence (Kessler et Rutherford, 2010). La plus simple consiste pour l'utilisateur à déterminer si un objet est visible ou non, et implique le cortex pariétal. La seconde invite à localiser un objet à gauche ou à droite d'un observateur ; ce processus est incarné, car il nécessite de se projeter dans l'observateur pour adopter son point de vue. La zone cérébrale identifiée pour ce processus est encore une fois la jonction temporo-pariétale, dont une activation est observée lors de tâches de rotation mentale de son propre corps (Arzy et al., 2006; Blanke and Arzy, 2005).

La prise de perspective peut être évaluée par une tâche développée récemment et projetée sur un écran, la tâche d'*Own Body Transformation* (OBT, Heydrich et al., 2021). Dans cette tâche informatisée, un avatar apparaît avec une main éclairée en jaune. Le participant doit identifier sans erreur et le plus rapidement possible quelle main est illuminée (droite ou gauche). Son temps de réponse à partir de l'instant où l'avatar s'affiche est enregistré, par exemple grâce aux gâchettes présentes sur les contrôleurs (manettes) du dispositif VR (HTV Vive). L'avatar est présenté suivant différentes positions angulaires face au participant. Les auteurs montrent qu'une illusion corps-entier induite par une stimulation cardio-visuelle synchrone améliore le phénomène de prise de perspective de l'avatar par le participant, ce qui se traduit par des temps de réponse plus courts, en particulier lorsque l'avatar est présenté à

180°. De la même manière que l'auto-localisation, la prise de perspective est influencée par les signaux vestibulaires. Dans une expérience sur écran, présentant un avatar orienté selon différents angles (0°, 45°, 90°, 135° et 180°, dans les sens horaire et antihoraire), il a été montré que les temps de réponse nécessaires pour déterminer si la main de l'avatar s'allumait à gauche ou à droite augmentaient avec l'angle de rotation mentale à effectuer (van Elk and Blanke, 2014). Conformément à une expérience précédente sur les rotations mentales sans avatars (Shepard et Metzler, 1971), les temps de réponse augmentaient avec l'angle de rotation.

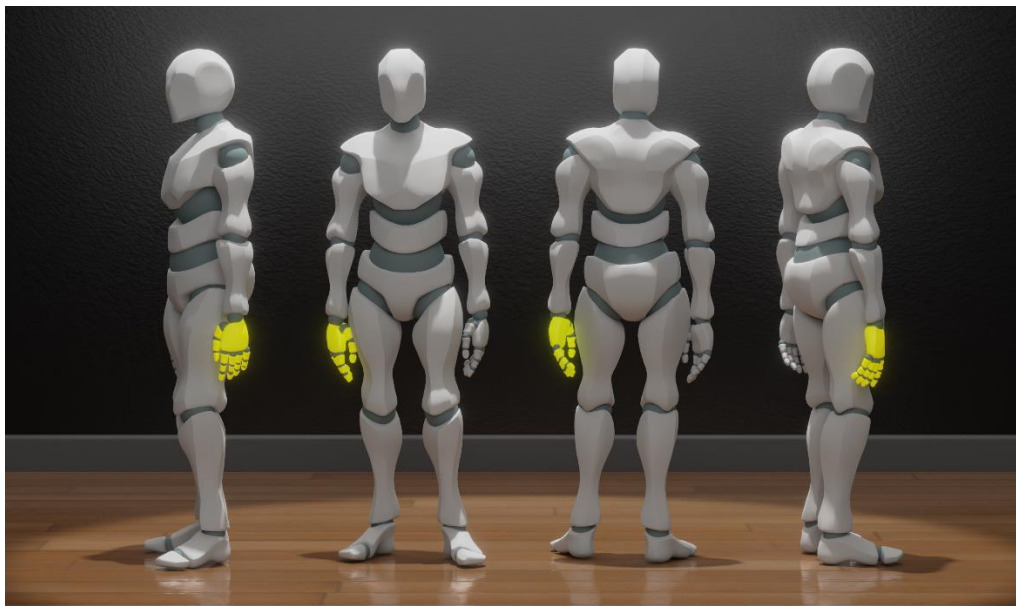


Figure 6 – Avatars présentés avec différents angles lors d'une tâche d'Own Body Transformation (de gauche à droite : -120°, 180°, 0° et 60°)

Les signaux vestibulaires peuvent, comme pour l'auto-localisation, largement influencer les phénomènes de prise de perspective. Ces signaux vestibulaires sont d'autant plus utilisés lorsque la tâche consiste à effectuer des rotations égocentrées – en orientant le monde par rapport à soi ou son avatar – plutôt qu'objet-centrées. En effet, en plus des différences entre les deux formes de prise de perspectives évoquées précédemment, le fait d'effectuer une rotation mentale d'un corps plutôt que d'un objet aurait aussi un impact sur les performances de l'utilisateur. Cet effet est bien décrit dans l'étude de Deroualle et collaborateurs (2015). Dans cette expérience, les participants devaient prendre la perspective d'un avatar orienté à un certain angle (0°, 60°, 120°, 180°) pour déterminer s'il devait passer une balle à un autre avatar situé à sa gauche ou à sa droite. Comme pour les expériences de rotation d'avatar hors VR, ou les tâches de rotation mentale d'objets, le temps de réponse augmente avec l'angle de rotation à effectuer. L'originalité de cette étude provient du fait que les participants subissaient en plus une stimulation vestibulaire, en effectuant la tâche sur une chaise

motorisée tournant soit dans le sens de la rotation mentale à effectuer, soit dans le sens contraire. Il a été montré qu'il existe un effet d'interaction entre le temps de réponse et la congruence des directions de rotation de la chaise et de rotation mentale lorsqu'il s'agit d'orienter des avatars, mais pas lorsqu'il s'agit d'orienter des objets. Les signaux vestibulaires seraient donc nécessaires à une prise de perspective égocentrée. Il a aussi été montré que des stimulations galvaniques vestibulaires influencent les temps de réponse lors de rotations mentales dans un plan égocentré, mais pas dans le plan d'un objet (Lenggenhager et al., 2008), ce qui fait écho à des résultats antérieurs sur l'effet des signaux vestibulaires sur les rotations mentales égocentrées (Mast and Meissner, 2004; Rodionov et al., 2004).

Grâce au phénomène d'incarnation d'un avatar, les stimuli qui se produisent dans la VR devraient être traités dans un espace centré sur le corps, et non comme se produisant sur un corps étranger considéré comme un simple outil permettant d'interagir dans la scène virtuelle. Clairement, l'avatar incarné doit être distingué de l'avatar utilisé comme un simple outil, un point fondamental abordé plus loin sous l'angle du comportement multifractal. En plus de l'auto-localisation, la prise de perspective peut être forcée dans une application de réalité virtuelle en utilisant par exemple des objets tangibles reproduits dans l'environnement virtuel, ou encore un retour haptique (Haar et al., 2021). Dans ce cas aussi, le processus sous-jacent est l'intégration d'entrées multisensorielles congruentes. L'absence d'un tel phénomène de retour d'information a d'ailleurs été citée comme l'une des principales raisons de la différence entre les mouvements dans l'environnement réel et virtuel, notamment en ce qui concerne les temps de saisie et d'atteinte de cibles (Arlati et al., 2021; Just et al., 2016). Entre autres facteurs venant influencer la prise de perspective, les indices gravitationnels visuels contribuent eux aussi à la direction de la prise de perspective à la première personne, tout comme ils influencent l'auto-localisation (Pfeiffer et al., 2016, 2013).

Certains auteurs ont montré que l'intéroception serait potentiellement liée à la prise de perspective, et en particulier à ses aspects émotionnels via le phénomène d'empathie (Baiano et al., 2021). Cette observation est d'autant plus importante lorsque l'on s'intéresse à une prise de perspective « incarnée » faisant intervenir un avatar ou un agent.

Enfin, il est important de noter que, dans le cas de l'utilisation d'un avatar vu depuis un point de vue extérieur, il serait plus juste de parler de prise de perspective à la « troisième personne » plutôt qu'à la « première personne ». Cet aspect sera développé dans l'étude 5 de ce travail de thèse.

Sentiment d'agentivité

Le sentiment d'agentivité (*sense of agency*) peut être décrit comme le « contrôle moteur global, y compris l'expérience subjective d'agir, le contrôle, l'intention, la sélection motrice et l'expérience consciente de la volonté » (Blanke and Metzinger, 2009). En d'autres termes, le sentiment d'agentivité provient de la cohérence entre une action souhaitée par l'utilisateur, et son résultat dans l'environnement virtuel via le corps qu'il incarne. Ce mécanisme est similaire à celui construisant l'illusion visuomotrice, permettant d'attribuer le corps virtuel au participant par la synchronisation d'une commande motrice et de son résultat perçu par la vision et la proprioception. Le sentiment d'agentivité se mesure principalement par questionnaire, en demandant au participant s'il ressent qu'il contrôle le corps virtuel. Une synchronisation visuomotrice permet d'induire un sentiment d'agentivité chez le participant lorsqu'il contrôle des mains à la première personne (Braun et al., 2014) ou un avatar (Debarba et al., 2015; Keenaghan et al., 2020).

Il a été montré que le sentiment d'agentivité peut se construire autrement que par la synchronisation de mouvements souhaités et effectués : l'intention d'effectuer un mouvement et le sentiment qu'il *pourrait* être réalisé par le corps contrôlé peuvent constituer des conditions suffisantes. Par exemple, dans une expérience dans laquelle des participants sont assis sur une chaise et voient un corps se lever dans l'environnement virtuel et commencer à marcher, le fait de voir le corps à la première personne suffit à induire un sentiment d'agentivité (Kokkinara et al., 2016). De même, quand des participants voient un corps (incarné à la première personne et observé dans un miroir) parler en bougeant les lèvres, ils s'attribuent l'origine des sons prononcés, comme s'ils en étaient les auteurs (Banakou and Slater, 2014). Enfin, imaginer un mouvement de main, puis observer son exécution (sans en être explicitement l'auteur) suffit à améliorer le sentiment d'agentivité (Nagamine et al., 2016).

Pour expliquer le fait que le sentiment d'agentivité puisse se produire en l'absence de mouvement, une définition à deux composants de ce concept a été proposée : la sensation d'agentivité et le jugement de l'agentivité (Jeunet et al., 2018). La sensation d'agentivité précède l'action, et correspond au fait de se sentir capable d'effectuer une action. Le jugement résulte de la comparaison entre le mouvement souhaité et le mouvement effectué, et se construit donc pendant et après l'exécution motrice. Dans le cas d'avatars ou de membres immobiles, la mesure portera plutôt sur la sensation d'agentivité, alors qu'on quantifie le jugement de cette agentivité lors de vrais mouvements effectués. Le jugement d'agentivité repose sur trois principes, qui sont des conditions générales pour l'attribution de la causalité (Wegner and Wheatley, 1999) :

- **Priorité** : l'intention d'effectuer un geste doit précéder immédiatement l'action.

- **Cohérence** : le ressenti sensoriel doit correspondre au ressenti attendu.
- **Exclusivité** : la volonté d'exécuter le mouvement doit être la seule cause de ce dernier.

Le sentiment d'agentivité, lié à la perception d'agir (ou d'avoir la capacité d'agir) à travers un corps virtuel est une propriété fondamentale de la conscience de soi corporelle, d'autant plus lorsqu'un participant incarne un avatar dont les mouvements sont synchronisés avec les siens. Ce sentiment de contrôler un corps ne doit pas être confondu avec la sensation de le posséder. En effet, le sentiment d'agentivité et l'auto-identification ont été identifiés comme des composantes distinctes de la conscience de soi corporelle (Braun et al., 2014; Tsakiris et al., 2007).

Auto-identification

Lorsqu'il s'agit d'avatars, l'identification et l'incarnation sont des propriétés qui peuvent parfois être confondues. Mesurer ces concepts, ainsi que - plus fondamentalement - leur donner une définition claire et définir leurs limites est loin d'être trivial, et couvre les domaines des neurosciences, de la physiologie, de la psychologie et des sciences cognitives. Comme décrit précédemment, la notion d'incarnation fait référence au processus utilisé pour permuter le corps de l'utilisateur avec celui de l'avatar (Spanlang et al., 2014), à la localisation de soi dans l'espace (Lopez et al., 2008), ou encore à un concept combinant propriété, localisation et sentiment d'agentivité (Longo et al., 2008). Dans l'ensemble, l'incarnation est aujourd'hui considérée comme un concept à multiples facettes, et a fait l'objet d'une attention particulière dans la manière dont elle peut être mesurée à l'aide de questionnaires (Gonzalez-Franco and Peck, 2018; Peck and Gonzalez-Franco, 2021). D'autre part, l'identification peut être liée au concept particulier d'auto-identification dans le paradigme de la conscience de soi corporelle, et représente « l'expérience de posséder un corps » (Blanke, 2012) ou « le processus d'identification d'une représentation comme étant soi-même » (Gonzalez-Franco et al., 2020). L'identification est un concept plus particulièrement utilisé pour décrire l'incarnation dans le cas d'avatars affichés sur des écrans, sur lesquels on n'a pas forcément de contrôle, et a fait l'objet d'une attention particulière lors de l'étude de l'effet Proteus, qui suggère que les utilisateurs ont tendance à adapter leurs comportements pour copier ceux de leur avatar (Praetorius and Görlich, 2020). Récemment, une distinction a été faite au niveau métacognitif entre les concepts d'identification et d'incarnation (Sah et al., 2021). En considérant la fluidité cognitive - la difficulté subjective perçue lors de l'exécution d'une tâche cognitive, l'identification et l'incarnation ont été

décrites comme des expériences subjectives émergeant du traitement des indices liés à l'identité et du contrôle des mouvements de l'avatar, respectivement.

Effet Proteus – influence de caractéristiques psycho-sociales

L'effet Proteus a été montré dans de nombreuses expériences, en essayant d'attribuer à un participant les caractéristiques de l'avatar qu'il incarne dans l'environnement virtuel. Par exemple, incarner un avatar représentant Lénine permet d'augmenter la présence et l'engagement du participant dans une scène virtuelle de la révolution russe (Slater et al., 2018) ; incarner Einstein permet une amélioration des performances lors d'une tâche cognitive (tour de Londres) et réduit les biais envers les personnes âgées (Banakou et al., 2018) ; incarner Freud permet d'améliorer l'humeur de patients parlant de leurs problèmes à eux-mêmes face à un miroir (Osimo et al., 2015). Au-delà de caractéristiques personnelles, les caractéristiques spécifiques d'un groupe d'individu peuvent aussi être copiées. L'incarnation du corps d'un enfant de 4 ans modifie l'estimation de la taille d'objets dans l'environnement virtuel (Banakou et al., 2013), et incarner un avatar de couleur noir réduit les biais raciaux chez des participants de couleur blanche (Banakou et al., 2016; Maister et al., 2015; Peck et al., 2013). Cet effet génère aussi des différences au niveau comportemental ; en incarnant un avatar de la même couleur qu'un agent présenté dans l'environnement virtuel, le participant a tendance à plus imiter le mouvement de son vis-à-vis que lorsqu'il appartient à une ethnie différente (Hasler et al., 2017).

Quelle fidélité visuelle de l'avatar (anthropomorphisme, réalisme, véracité) ?

Les premières applications montrant un avatar perçu à la troisième personne en réalité virtuelle utilisaient une caméra pour filmer le corps du participant et le retransmettre dans le casque de réalité virtuelle (Aspell et al., 2013; Ehrsson, 2007; Lenggenhager et al., 2007; Salamin et al., 2010). Très tôt, la question de la fidélité visuelle de l'avatar a été posée : est-il nécessaire que le corps présenté soit parfaitement similaire à celui du participant pour générer le phénomène d'incarnation ? En 2007, Lenggenhager et collaborateurs montraient déjà des différences en termes de drift proprioceptif entre des stimulations visuo-tactiles synchrones et asynchrones réalisées sur le corps filmé, un mannequin et un objet rectangulaire. Comme prévu par le modèle neurocognitif de l'appartenance corporel (Tsakiris, 2010), les participants ne peuvent pas s'identifier à l'objet, et il n'y a donc pas de différences en termes de drift proprioceptif. Cependant, les auteurs ont montré un drift proprioceptif existant à la fois avec le corps filmé et avec le mannequin, ce dernier permettant d'obtenir des différences encore plus marquées entre les

stimulations synchrones et asynchrones. Cet effet est probablement lié à l'illusion se créant en observant le corps filmé, qui ne peut pas être complètement supprimée par la stimulation asynchrone. Avec un mannequin immobile, l'absence de synchronisation motrice permet de mieux contrôler les conditions expérimentales et d'obtenir des différences plus marquées entre les stimulations synchrones et asynchrones.

Observer la présence d'une illusion corps-entier avec un mannequin a ouvert la voie à l'utilisation d'avatars dans les environnements virtuels. Les avatars présentent l'avantage de ne pas nécessiter de filmer le sujet, ils peuvent être immobiles ou suivre les mouvements du participant - ce qui nécessite la capture du mouvement et sa restitution en temps réel dans la scène VR, et leur apparence est entièrement personnalisable. Cette apparence peut être modifiée pour étudier des différences comportementales liées à l'effet Proteus, comme évoqué dans le paragraphe précédent. Cependant, l'impact de la représentation visuelle de l'avatar sur la conscience de soi corporelle ne doit pas être négligé. En particulier, le genre ainsi que les proportions de l'avatar doivent être choisis en accord avec les applications souhaitées. Par exemple, représenter un avatar plus grand que l'utilisateur a pour effet de réduire l'auto-perception négative (Freeman et al., 2014) et d'augmenter la confiance en soi (Yee and Bailenson, 2007). Modifier la corpulence de l'avatar permet d'adresser des problèmes de surpoids (Gutiérrez-Maldonado et al., 2016; Rubo and Gamer, 2019; Scarpina et al., 2019) ou d'anorexie (Keizer et al., 2016; Porrás-García et al., 2020; Serino et al., 2019). De façon générale, il a été montré que les problèmes d'image corporelle peuvent être traités à l'aide d'illusions corps entier (Turbyne et al., 2021). De même, modifier le genre de l'avatar peut avoir de nombreux impacts, principalement liés à l'effet Proteus. Représenter un avatar féminin ou masculin a une influence sur les performances lors de tâches de calcul (Chang et al., 2019; Lee et al., 2014; Ratan and Sah, 2015), la distance interpersonnelle (Rivu et al., 2021), la mémoire de travail (Peck et al., 2018) ou encore le degré d'auto-identification avec des mains (Schwind et al., 2017).

Au-delà des considérations de proportions, de couleur de peau et de genre, l'utilisation d'avatars, en opposition à la vidéo, fait intervenir la notion de fidélité visuelle, ou degré de réalisme. La fidélité visuelle d'un avatar se qualifie généralement selon trois critères (Garau et al., 2003; Mansour et al., 2006) : l'anthropomorphisme (non-humanoïde / humanoïde), le réalisme (stylisé / photoréaliste) et la véracité (différent de l'utilisateur / identique à l'utilisateur). Même s'il peut sembler naturel d'essayer de représenter l'utilisateur de la façon la plus réaliste possible dans l'environnement virtuel, cette approche est limitée par le concept de « vallée dérangeante », selon lequel plus un avatar ressemble à un humain, plus ses imperfections apparaissent et créent un malaise (Mori et al., 2012). Dans certains cas, un haut degré de réalisme dans la représentation de l'avatar permet d'améliorer

l'expérience utilisateur et le sentiment d'appartenance (Gorisse et al., 2019) ; dans d'autres expériences, contrôler des avatars humanoïdes en comparaison avec des robots n'influe pas le degré d'acceptance (Lugrin et al., 2015) ni le sentiment d'agentivité (Latoschik et al., 2017).

Dans les expériences menées au cours de cette thèse faisant intervenir des avatars, nous avons choisi d'utiliser des représentations humanoïdes stylisées, de genre neutre et avec une taille similaire à celle du participant. Ces choix ont été effectués dans le but d'éviter d'introduire de potentiels biais liés aux stéréotypes de genre et aux modifications d'image corporelle liées à des proportions différentes.

Méthodes de mesure de l'auto-identification

L'auto-identification, comme les autres composantes de la conscience de soi corporelle, est couramment évaluée à l'aide de questionnaires, et notamment avec une question très simple : « J'avais l'impression que le corps virtuel était mon corps » (Aspell et al., 2013; Lenggenhager et al., 2007; Nakul et al., 2020). Depuis les premières expériences étudiant l'induction d'une illusion corps-entier, l'auto-identification a aussi été évaluée par le biais des réactions neuro-viscérales déclenchées par un événement menaçant (Ehrsson, 2007).

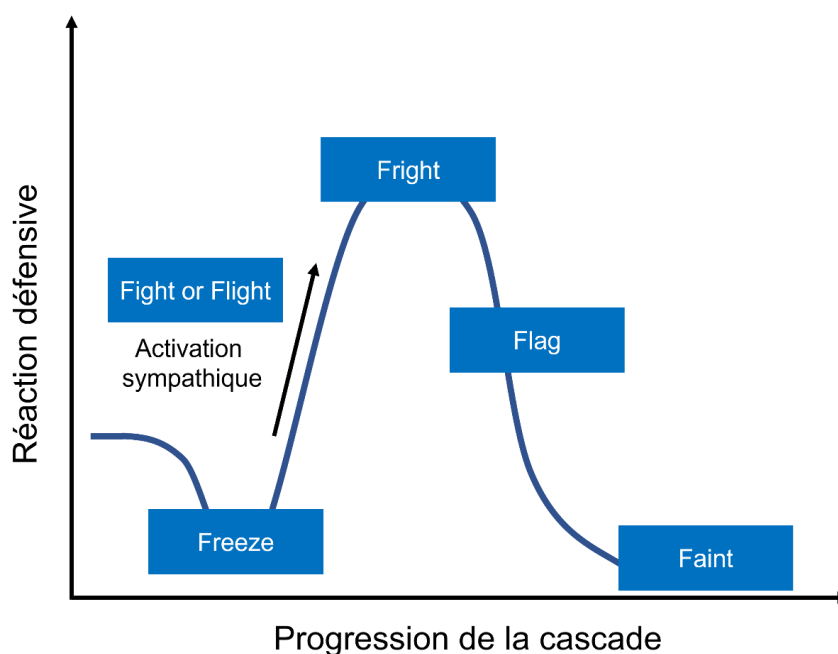


Figure 7 - Schéma de l'activation des réponses autonomes. La présentation d'un stimulus menaçant provoque une phase de *freeze*, permettant au participant d'évaluer la situation et de choisir entre une réponse de type *fight or flight*.

Les stimuli menaçants activent un circuit neuronal déclenché par le noyau basolatéral de l'amygdale ; à partir de cette structure, d'autres zones du cerveau sont activées et produisent une série de comportements réflexes, automatiques et somatiques qui facilitent le traitement de l'information menaçante et préparent le corps à se défendre. Une fois l'événement menaçant codé visuellement, deux étapes opèrent successivement : le *freeze*, une immobilisation nécessaire pour traiter efficacement les informations relatives à l'événement ; le *fight or flight*, une réponse autonome choisie pendant la période de *freeze* (Figure 7). La mesure de la décélération de la fréquence cardiaque (HRD) pendant la période de gel permet donc d'estimer la force de la réponse évoquée par le stimulus menaçant (Bradley et al., 2001). La HRD a déjà été utilisée dans la VR comme un marqueur d'auto-identification avec un avatar (Pomes and Slater, 2013; Slater et al., 2010). Comme attendu, les auteurs ont montré une augmentation significative de l'intervalle R-R (diminution de la fréquence cardiaque correspondant au *freeze*) suite à la présentation d'un stimulus menaçant.

Phénomènes liés à l'immersion en VR

Avant de mettre en place les expérimentations utilisant des avatars en environnement immersif, il est primordial de s'intéresser à la fois au paradigme spécifique de la réalité virtuelle, et notamment aux effets – à la fois psychologiques et physiologiques – qu'elle induit sur l'utilisateur. De plus, dans le but d'associer certains comportements à des phénotypes individuels, certains traits spécifiques des utilisateurs associés à l'incarnation d'un avatar seront décrits. Les systèmes de réalité virtuelle peuvent être séparés en deux grandes familles : les casques (Head Mounted Display, HMD) et les environnements projetés de type CAVE (Cave Automatic Virtual Environment). Pour ces deux systèmes, l'immersion de l'utilisateur se crée par la présentation d'un environnement se déplaçant de façon cohérente avec ses mouvements de tête, et grâce à la stéréoscopie. Le principal avantage du CAVE est qu'il ne nécessite pas de casque, uniquement des lunettes dont les mouvements sont suivis pour recalculer l'environnement à projeter. De ce fait, l'utilisateur voit son corps, ses mains, peut naturellement utiliser des objets physiques et collaborer avec d'autres participants. Cependant, ces systèmes sont très onéreux, nécessitent beaucoup d'espace et sont difficilement transportables. Les HMD, quant à eux, sont aujourd'hui disponibles pour des prix très abordables, et leur démocratisation auprès du grand public a accéléré les avancées technologiques, à la fois sur les plans logiciels et matériels.



Figure 8 - Principaux systèmes de réalité virtuelle. Gauche : CAVE du laboratoire M2S à Rennes. Droite : HMD utilisé pour les expérimentations présentées (HTC Vive Pro).

Les stimulations visuelles que nous souhaitons imposer dans ce travail de thèse ainsi que les tâches qu'il est nécessaire de développer s'accommodant parfaitement d'un système HMD, nous utiliserons exclusivement ce système, et plus particulièrement un HTC Vive Pro (HTC America, Inc. Seattle, WA, USA).

Il est nécessaire de mentionner les différents concepts abordés dans la littérature pour étudier le comportement d'un utilisateur en réalité virtuelle. En particulier, un certain nombre de dispositions individuelles peuvent influencer son expérience.

Immersion et sentiment de présence

Les termes « présence » et « immersion » sont souvent confondus, mais présentent pourtant des différences substantielles. Le sentiment d'immersion est l'expérience sensorielle subjective offerte par le système de réalité virtuelle, et peut se définir comme « le degré d'engagement de l'ensemble des canaux sensoriels par la simulation virtuelle » (Kim and Biocca, 2018). L'immersion est donc un paramètre dépendant de la technologie utilisée ; quel que soit l'utilisateur, l'immersion générée par un casque en carton utilisant un smartphone sera donc nécessairement moins importante que celle d'un casque haut de gamme offrant une grande fidélité sensorielle (meilleur son, champ de vue plus large, résolution plus importante...). D'un autre côté, la présence correspond à l'illusion d'être à l'intérieur du monde virtuel. Cette illusion dépend de la façon dont l'utilisateur du casque de réalité

virtuelle va traiter les informations perceptuelles présentées par le système, et provient du fait que les stimulations sensorielles offertes par l'environnement virtuel génèrent des réponses autonomes de l'utilisateur précédant le traitement cognitif de ces informations (Slater, 2018). Pour résumer, l'immersion correspond à une évaluation objective de la capacité d'un système à reproduire un environnement sensoriel réaliste, alors que le sentiment de présence relève de l'expérience subjective de l'utilisateur de se situer dans cet environnement. La distinction entre ces deux termes n'est parfois pas entretenue dans la littérature, où l'on parlera fréquemment d'immersion « perceptuelle » ou « psychologique ».

Le sentiment de présence a pu être mis en lien avec plusieurs variables couramment étudiées en réalité virtuelle. Par exemple, il est négativement corrélé avec l'apparition du cybermalaise (De Leo et al., 2014; Weech et al., 2019). De plus, les femmes sont généralement moins susceptibles de présenter des scores de présence élevés (Felnhofer et al., 2012), ce qui pourrait toutefois s'expliquer par le fait qu'elles jouent généralement moins aux jeux-vidéos que les hommes. Le sentiment de présence serait aussi associé à de meilleures performances lors de tâches cognitives (Maneuvrier et al., 2020) et motrices (Kreimeier et al., 2019), et des liens ont été établis avec la conscience de soi corporelle (Herbelin et al., 2016).

Le sentiment de présence se développe à partir de la construction d'un modèle mental spatio-fonctionnel de l'environnement virtuel (Biocca and Levy, 1995). Il est difficile de l'évaluer à partir d'une unique question posée à l'utilisateur, par exemple « à quel point vous êtes-vous senti présent dans l'environnement virtuel ? ». En plus de ce sentiment de présence générale, des analyses factorielles ont montré que le sentiment de présence peut être découpé en trois dimensions supplémentaires (Schubert et al., 2001) :

- **Engagement** : le sentiment d'être captivé par le monde virtuel et de ne plus faire attention à l'environnement réel.
- **Réalisme** : la fidélité offerte par les stimulations sensorielles du monde virtuel.
- **Présence spatiale** : avoir l'impression de se trouver physiquement dans l'environnement virtuel.

Un score obtenu par un questionnaire (Igroup Presence Questionnaire ou IPQ, Annexe 2, Schubert et al., 2001) sera utilisé dans les expériences décrites dans ce manuscrit comme principale mesure du sentiment de présence.

Conflit visuo-vestibulaire et cybermalaise

Le délai d'affichage est un problème inhérent au domaine de l'informatique. Comme chaque image présentée nécessite un temps de calcul, les informations visuelles présentées sont inévitablement saccadées. Au-delà d'un certain nombre d'images par seconde, le délai entre deux affichages est imperceptible pour l'œil humain. Cependant, si la fréquence de rafraîchissement est trop faible, le délai d'affichage est perçu par l'utilisateur. Ce problème apparaît particulièrement lors de l'utilisation de systèmes de réalité virtuelle : actuellement, la plupart des casques proposent une fréquence de rafraîchissement de 90 images par seconde, ce qui induit un délai de 11 ms entre deux images. Comme l'affichage d'images dépend de la position de la tête de l'utilisateur, ce délai induit un conflit entre ses différents systèmes sensoriels : la vue, le vestibulaire et le proprioceptif (Stanney et al., 2002). Cette incohérence entre les afférences sensorimotrices crée un cybermalaise en partie similaire au mal des transports. Ce phénomène, identifié très tôt dans le cadre de simulateurs aéronautiques, est quantifié depuis 1993 à l'aide du Simulator Sickness Questionnaire (SSQ, Annexe 1, Kennedy et al., 1993), et mesure le malaise induit par l'environnement chez l'utilisateur selon trois facteurs : la nausée (mal de ventre, vomissements), la désorientation (vertiges, perte d'équilibre) et les problèmes oculaires (fatigue oculaire, vision trouble, maux de tête). Ce questionnaire est encore majoritairement utilisé aujourd'hui, malgré les évolutions technologiques apportées aux systèmes immersifs ces trente dernières années. Les systèmes actuels et ceux de demain étant bien plus performants que ceux disponibles à l'époque de la création des premières échelles, l'usage du SSQ pour évaluer les applications contemporaines est sujet à débat (Elsenbast, 2022; Kim et al., 2018; Sevinc and Berkman, 2020). Cependant, le SSQ est encore très ancré dans le domaine de la recherche en réalité virtuelle, et c'est pourquoi nous avons choisi de l'utiliser pour estimer le malaise généré par les environnements virtuels utilisés lors des différents protocoles expérimentaux, à des fins de comparaison par rapport aux valeurs obtenues dans la littérature.

De façon générale, il est estimé qu'entre 25 et 50% des utilisateurs de réalité virtuelle ressentent du cybermalaise (McIntire et al., 2012), même s'il est important de discuter ce pourcentage. En effet, cette proportion dépend en grande partie du type de population : par exemple, les femmes sont plus sensibles au cybermalaise que les hommes (Munafo et al., 2017; Stanney et al., 2020), ce qui peut toutefois être dû à un problème de vergence lié à la distance inter-pupillaire. La plupart des casques de réalité virtuelle modernes proposant un ajustement de cette valeur, cette disparité pourrait se réduire. De plus, toutes les applications de réalité virtuelle ne génèrent pas un cybermalaise équivalent ; ce dernier dépend largement du flux optique, le mouvement apparent des objets et décors de la scène virtuelle. Le cybermalaise mesuré est dépendant de la vitesse et de l'accélération du flux optique, et les seuils

d'apparition dépendent largement des participants (Kim and Park, 2020; Terenzi and Zaal, 2020).

Style perceptif

Le sentiment de présence, expérience consciente de se trouver dans l'environnement virtuel, est dépendant à la fois de l'immersion, et donc des informations sensorielles mises à disposition de l'utilisateur, mais aussi de l'interprétation qu'il fait de ces signaux. La façon dont un utilisateur va traiter ces signaux, de façon automatique ou réfléchie, dépend de nombreux facteurs individuels. Parmi eux, on peut notamment évoquer le style perceptif, la façon dont un utilisateur pondère les entrées sensorielles visuelles, vestibulaires et somesthésiques pour orienter son environnement par rapport à la verticale gravitaire.

Pour évaluer ce style perceptif, le Rod and Frame Test (RFT) est couramment utilisé. Ce test consiste à présenter à l'utilisateur une baguette dans un cadre incliné, dans un environnement complètement sombre, et de lui demander de la replacer à la verticale gravitaire (Witkin et al., 1962; Witkin and Asch, 1948). En l'absence d'indications visuelles quant à l'orientation de la verticale, le participant doit majoritairement utiliser les informations vestibulaires à sa disposition. L'inclinaison du cadre entourant la baguette sert de perturbateur visuel ; plus le participant fait confiance aux informations visuelles pour orienter son environnement, plus il aura tendance à orienter la baguette dans la direction suggérée par le cadre. L'orientation finale de la baguette, correspondant à l'orientation perçue de la verticale gravitaire par le participant, donne donc une indication sur la façon dont il pondère les informations visuelles, vestibulaires et somesthésiques pour orienter l'espace autour de lui. L'indépendance au champ visuel a notamment été liée à une meilleure mémoire de travail, en particulier grâce à la faculté à inhiber les informations non pertinentes (Pithers, 2002). En outre, les participants dépendants visuels sont plus susceptibles de se laisser influencer par des conflits visuels, ayant une capacité d'inhibition moins importante (Kennedy, 1975). En réalité virtuelle, le conflit visuo-vestibulaire inhérent à la technologie peut induire une repondération des entrées multisensorielles, modifiant la part d'utilisation des systèmes visuels et vestibulaires pour orienter l'espace, et peut donc impacter l'expérience de l'utilisateur, notamment concernant le sentiment de présence. Il a par exemple été montré que la dépendance au champ visuel est liée au sentiment de présence d'objets (Hecht and Reiner, 2007). Il est important de faire la différence entre la dépendance visuelle au champ statique, telle que mesurée avec le Rod and Frame Test, et celle au champ visuel dynamique, mesurable par exemple avec le Rod and Disk Test (Dichgans et al., 1972; Guerraz et

al., 1998), une tâche dans laquelle le cadre est remplacé par un ensemble de points blancs effectuant un mouvement de roulis autour du regard du participant.

Pour étudier le style perceptif de l'utilisateur, nous utiliserons le Rod and Frame test, en nous inspirant de la disposition utilisée dans des expériences récentes en réalité virtuelle (Fantin et al., 2022; Maneuvrier et al., 2020).

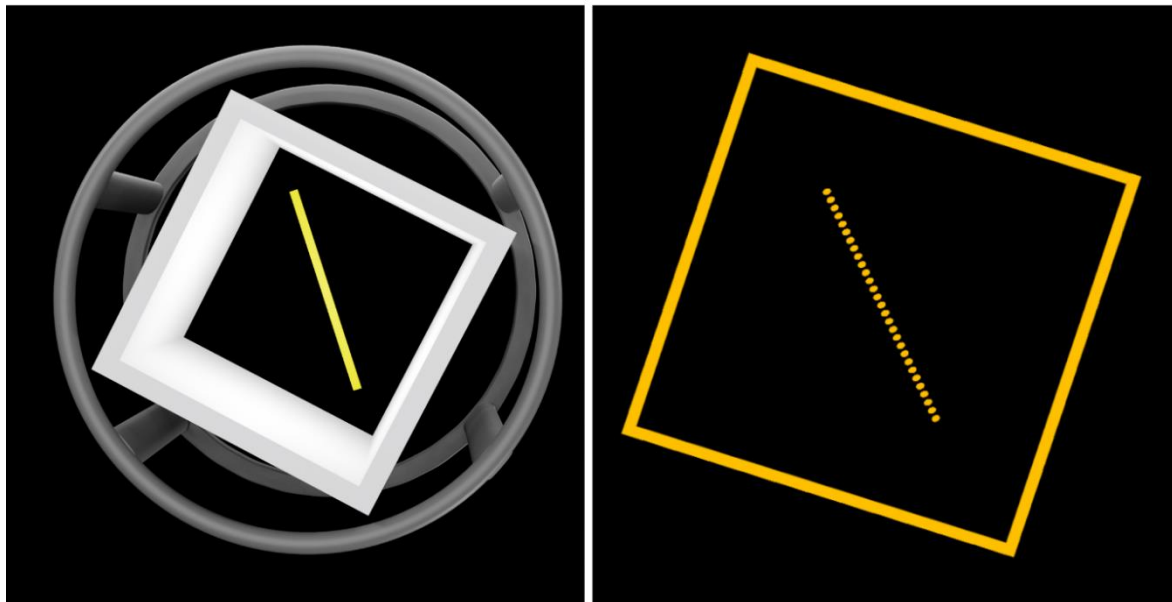


Figure 9 - Illustration du Rod and Frame Test. À gauche : dispositif réel, dans lequel l'utilisateur fait tourner la baguette manuellement. À droite : tâche en réalité virtuelle, utilisée dans les études présentées par la suite, avec une baguette en pointillés pour éviter au participant de trouver la verticale gravitaire en s'aidant de l'alignement des pixels.

Intéroception

Dans le cadre des recherches en réalité virtuelle, notamment portant sur l'interprétation par un participant des informations sensorielles qui lui sont présentées, il est intéressant de mesurer l'intéroception. Cette variable, représentant l'attention que porte un individu aux signaux provenant de son corps, entre en concurrence avec l'extéroception dans le traitement des informations (Pennebaker and Lightner, 1980). En effet, le cerveau disposerait d'une attention limitée envers les différentes afférences sensorielles, et doit choisir quel poids accorder à chacune d'entre elles. Par exemple, une personne présentant un haut degré d'intéroception donnera la priorité aux signaux de ce type dans le traitement de l'information par rapport aux signaux extéroceptifs. Une démonstration des différents poids accordés aux entrées sensorielles est réalisée avec des exercices physiques. Partant du postulat qu'un joueur de sports collectifs ressent moins fortement la douleur d'une blessure

lorsqu'il est concentré sur le match, il est supposé que l'attention donnée aux signaux extéroceptifs (suivi visuel des autres joueurs et de la balle, communication, gestes) diminue la part d'intéroception (douleur ressentie, fatigue, rythme cardiaque, respiration) dans le traitement de l'information. Des expériences conduites sur des joggeurs ont montré que des sujets courent plus vite et ressentent moins la fatigue sur un parcours de cross-country (signaux visuels complexes, sons naturels) que sur un parcours en intérieur (peu de signaux extéroceptifs intéressants). Enfin, des coureurs exposés à des enregistrements de respiration reportent un état de fatigue plus élevé après une course que des sujets exposés à des sons de contrôle (Pennebaker and Lightner, 1980). Ces expériences plaident pour une influence des signaux intéroceptifs et extéroceptifs - et principalement de la balance entre ces types d'afférences - dans la perception de l'effort.

L'usage de la réalité virtuelle fait potentiellement intervenir une repondération des entrées multisensorielles liées aux afférences visuelles, vestibulaires et proprioceptives présentées au participant. Mesurer la faculté intéroceptive d'un participant, et donc sa capacité à plus ou moins prêter attention à ses signaux corporels internes plus qu'aux stimulations présentées dans l'environnement virtuel, pourrait donc aider à caractériser les modifications psycho-physio-comportementales d'un individu en réalité virtuelle.

La capacité intéroceptive est un modèle tridimensionnel (Garfinkel et al., 2015; Garfinkel and Critchley, 2013), faisant la distinction entre la précision, la sensibilité et la conscience intéroceptive.

- **Précision** : performance objective obtenue à un test de perception du battement cardiaque.
- **Sensibilité** : tendance dispositionnelle auto perçue du degré auquel on pense être attentif à ses sensations internes corporelles.
- **Conscience** : conscience métacognitive de la précision intéroceptive. En d'autres termes, la relation entre la mesure objective de la précision intéroceptive et la conscience de cette performance.

La **précision intéroceptive** est couramment évaluée avec une tâche de perception du battement cardiaque (Heartbeat Counting Task, Schandry, 1981). Lors de cette tâche, un participant doit compter le nombre de battements cardiaques qu'il pense percevoir pendant une certaine durée. Bien que cette tâche soit largement utilisée, elle comporte de nombreux biais, notamment liés à la pression sanguine (Murphy et al., 2019) ou à des connaissances générales du participant sur son rythme cardiaque au repos (Brener and Ring, 2016; Desmedt et al., 2018). Récemment, une amélioration de la tâche permettant de supprimer certains de ces biais et dont les performances ont été liées à l'activité cérébrale suivant des battements cardiaques a été développée (Fittipaldi et al., 2020).

La **sensibilité intéroceptive** peut se mesurer à l'aide de questionnaires, dont l'Interoceptive Accuracy Scale (IAS, Annexe 4, Murphy et al., 2019), qui procède à une évaluation générale de la capacité d'un individu à prêter attention à de nombreux signaux internes. Alors que la tâche de comptage de battement cardiaque évalue l'intéroception uniquement via la capacité d'un individu à percevoir son battement cardiaque, le score de l'IAS dépend d'une évaluation plus globale de la capacité à percevoir ses signaux internes.

Comme pour le style perceptif, la repondération d'entrées multisensorielles opérée par l'immersion en réalité virtuelle peut potentiellement modifier la faculté intéroceptive d'un individu. De même, l'intéroception peut elle aussi moduler la façon dont un participant va interpréter les signaux qui lui seront présentés dans l'environnement virtuel.

L'intéroception a notamment été mise en lien avec la mindfulness (Verdonk et al., 2021), la prise de décision (Werner et al., 2009) ou encore les réponses au stress cognitif et émotionnel (Kindermann and Werner, 2014) et la modulation de réponses autonomes lors de la visualisation d'images (Herbert et al., 2010). Enfin, l'intéroception est un prédicteur de la malléabilité de la représentation de soi (Suzuki et al., 2013; Tsakiris et al., 2011), un point qui sera détaillé dans la suite du manuscrit concernant la visualisation d'avatars en réalité virtuelle.

Des variables d'étude classiques vers la prise en compte de la complexité

Dans cette première partie, nous avons défini le concept d'avatars, les différentes façons d'induire une illusion corps-entier à l'aide de stimulations multisensorielles, ainsi que les façons de mesurer l'incarnation par l'évolution des composantes de la conscience de soi corporelle. Nous avons aussi décrit les principales prédispositions et aptitudes des utilisateurs susceptibles d'influencer le phénomène d'incarnation ainsi que le comportement cognitivo-moteur en réalité virtuelle.

En nous basant sur les résultats obtenus dans la littérature quant à l'induction d'illusions corps-entier, nous essaierons d'éclairer les liens entre les aptitudes psychocognitives des utilisateurs, leurs caractéristiques socio-démographiques, les composantes de la conscience de soi corporelle et les performances dans des tâches coordonnant perception, cognition et motricité volontaire. À travers cinq études expérimentales, nous allons explorer s'il existe une prédisposition individuelle aux stimulations visuo-tactiles plutôt que cardio-visuelles associée à une pondération particulière entre les différentes entrées sensorielles (intéroceptives ou extéroceptives par exemple. Nous aborderons la notion de progressivité de l'illusion, en observant si le type ou le nombre de stimulations est déterminant pour la réussite de l'incarnation d'un avatar en VR. Enfin, nous appliquerons les méthodes récentes de mesure des

composantes de la conscience de soi corporelle à un avatar mobile, et déterminerons s'il existe une interaction entre l'incarnation et les performances lors d'une tâche visuomotrice effectuée à travers le corps de l'avatar.

Dans le cas particulier des avatars mobiles, l'étude de la relation entre l'utilisateur et son avatar pourrait bénéficier de l'analyse du mouvement. Certaines théories récentes proposent d'utiliser la complexité des mouvements résultant des interactions entre un utilisateur et un outil comme marqueur du phénomène d'incarnation. Les systèmes cognitifs peuvent être perçus comme des structures dynamiques, complexes et auto-organisées. Le concept d'incarnation radicale (*radical embodiment*) propose d'étudier l'incorporation d'un outil - ou dans notre cas d'un avatar - dans un système cognitif étendu en observant la structure du signal de mouvement résultat de ces interactions (Schettler et al., 2019). La prochaine partie de l'introduction, s'intéressant aux méthodes d'analyse de la complexité du mouvement humain, apportera un éclairage sur cette intuition.

Méthodes d'analyse de la complexité

La deuxième partie de cette introduction a pour but de décrire les méthodes issues de la théorie des systèmes complexes qui viennent éclairer le phénomène d'incarnation.

Origine de la complexité et fractalité

Complexité des systèmes physiologiques

La complexité est un terme utilisé pour définir le comportement de systèmes dont la valeur de sortie ne peut pas être facilement prédite à partir des fluctuations des valeurs d'entrée et d'une fonction de transfert. Par de nombreux aspects, le corps humain est un système complexe. Par exemple, l'action de marcher, si courante et apprise soit-elle, requiert la coordination de multiples éléments : les muscles des membres inférieurs, le balancement des bras, le réflexe myotatique, les informations provenant des systèmes visuels, vestibulaires et proprioceptifs... Tous ces éléments doivent agir de concert et interagir par le biais de nombreux schémas moteurs et boucles de rétroaction pour maintenir une activité cohérente. D'un point de vue purement mécanique, l'action de marcher pourrait s'effectuer à l'aide de la simple activation des quadriceps, ischio-jambiers et du triceps sural, à la manière d'un automate. Cependant, un fonctionnement aussi simpliste ne permettrait pas à l'organisme de s'adapter aux changements d'allure, aux modifications du terrain, à la fatigue ou aux autres variations d'états internes. À la manière de la redondance dans les systèmes mécaniques, les systèmes physiologiques présentent de la dégénérescence : plusieurs éléments partagent des fonctions similaires afin d'augmenter la fiabilité du système global (Delignières and Marmelat, 2013; Seifert et al., 2014; Tononi et al., 1999). Cette notion de dégénérescence - ou redondance - est centrale dans l'exécution du mouvement, ou pour maintenir l'homéostasie dans le cas des systèmes neurophysiologiques. Toutefois, la multitude d'éléments impliqués dans l'exécution d'une même fonction rend d'autant plus difficile l'action de prédire la valeur de sortie d'un système. Ce constat a donné naissance à la notion d'*Interaction-Dominance*, une théorie selon laquelle les propriétés d'un système physiologiques sont le résultat des interactions entre les différents éléments qui le composent (Marmelat and Delignières, 2012; Van Orden et al., 2003; Wijnants, M.L., 2014). Sémantiquement, le mot complexité est défini dans le Larousse comme le « caractère de ce qui est complexe, qui comporte des éléments divers qu'il est difficile de démêler ». Plutôt que de tenter de démêler les interactions entre les différents éléments constituant un système, les sciences de la complexité considèrent ce système comme un tout, et

prennent le parti de déterminer ses caractéristiques à partir des liens entre ses composants et des propriétés émergeant de ces interactions.

La complexité du mouvement humain est couramment rattachée à la notion de bonne santé ; en effet, il a été montré que certaines pathologies, ainsi que le vieillissement, sont couramment associées à une perte de complexité dans les systèmes biologiques (Hausdorff et al., 1997; Lipsitz and Goldberger, 1992; Rey-Robert et al., 2011; Sleimen-Malkoun et al., 2014), ce qui s'observe notamment dans l'étude de la marche ou de tâches de coordination.

Du fait de la dégénérescence des systèmes complexes, et de la nature non-linéaire des interactions entre les différents composants, les séries temporelles étudiées comme variables de sortie ne peuvent pas être uniquement décrites par des indicateurs temporels classiques comme la moyenne ou l'écart-type. Pour rendre compte du fonctionnement d'un système complexe, les indicateurs issus de la complexité se sont intéressés au degré de régularité et de prédictibilité sur plusieurs échelles de temps (Costa et al., 2002). À l'origine utilisée en thermodynamique et en physique statistique, la notion d'entropie a pu être appliquée à des signaux biologiques pour évaluer la quantité d'information contenue et créée par un système complexe, lui permettant de s'adapter aux contraintes qui lui sont imposées (Costa et al., 2005, 2002; Richman and Moorman, 2000). L'entropie étant une mesure du désordre, elle permet de détecter la présence de motifs se répétant dans le signal, marqueur d'interactions entre les composants d'un système. Cette autosimilarité statistique sur plusieurs échelles fait écho aux fractales, formes mathématiques définies par Benoît Mandelbrot comme une « forme dont les parties sont similaires à l'ensemble » (B. Mandelbrot dans Feder, 2013, traduction).

Fractales naturelles et mesure d'autosimilarité

Les formes fractales sont omniprésentes dans la nature. Dans le domaine végétal, on peut observer des fractales structurelles dans les fleurs du chou romanesco, les feuilles des fougères ou les ramifications des arbres : des structures similaires sont répétées à des échelles spatiales de plus en plus petites. Cette particularité fait qu'il est difficile de mesurer précisément ces différents objets : en fonction de l'échelle considérée ou de la précision de l'appareil de mesure, les résultats obtenus seront différents. Un exemple de ce problème de mesure peut être explicité par la mesure des côtes de la Bretagne. En 2022, la longueur des côtes du Finistère est passée de 1250 km à 2263 km. Pourtant, malgré les revendications territoriales, son territoire ne s'est pas étendu et le Mont-Saint-Michel n'a pas été annexé ; l'IGN et le Shom, organismes responsables de la mesure des côtes, ont simplement utilisé des outils présentant une résolution spatiale plus élevée. En effet, plus l'outil de mesure

est petit, plus il est possible de suivre précisément l'évolution des côtes, et plus la mesure totale de la distance augmente. En partant de mesures réalisées avec de doubles décimètres sur des cartes de France jusqu'à la limite théorique de la mesure des contours des atomes formant le littoral, la distance des côtes évolue avec la résolution spatiale de l'appareil de mesure. De façon intéressante, en reportant la longueur de côte obtenue par rapport à l'unité de mesure choisie, on obtient une droite sur une échelle log-log, dont la pente est la dimension fractale, notée D . Cette valeur est comprise entre 1 et 2, et permet de quantifier la rugosité des objets mesurés. Pour la côte des Landes, quasiment rectiligne, la longueur varie peu avec l'outil de mesure ($D = 1,02$). La côte occidentale de la Grande-Bretagne, plus rugueuse, présente un $D = 1,25$. L'ouest de la Bretagne, où se situe le Finistère, présente quant à elle une structure fractale avec un $D = 1,40$.



Figure 10 - Dimension fractale de la côte Bretonne. Plus l'échelle de l'outil de mesure est faible, plus la distance mesurée augmente.

Loi puissance dans les signaux complexes

De la même manière que pour les fractales spatiales observées dans la nature, certains signaux physiologiques présentent des autosimilarités, associées non pas à

leur structure géométrique, mais aux échelles temporelles. Dans les séries temporelles qui présentent ce phénomène d'échelle, la puissance spectrale peut alors s'écrire sous la forme d'une loi puissance :

$$P(f) \sim f^{-\beta}$$

En passant au logarithme, on retrouve la relation affine déjà évoquée dans le calcul de la dimension fractale des littoraux :

$$\log(P(f)) \sim -\beta \times \log(f)$$

De façon générale, la pente β de cette relation, comprise entre 0 et 2, peut être utilisée pour caractériser la nature des signaux observés. Dans le cas d'un bruit blanc, parfaitement aléatoire, la puissance ne dépend pas de la fréquence. Ces signaux caractérisés par $\beta = 0$ sont appelés bruits fractionnaires Gaussiens (*fractional Gaussian noise*, fGn). À l'opposé du spectre, on retrouve les mouvements fractionnaires Browniens (*fractional Brownian motion*, fBm), représentant des signaux persistants, pour $\beta = 2$. Entre ces deux extrêmes, on retrouve le cas particulier des bruits roses, appelés ainsi par la similitude entre la distribution de la puissance en fonction de la fréquence rappelant le spectre électromagnétique de la couleur rose. Un bruit rose parfait est caractérisé par une pente $\beta = 1$, et donc par une puissance évoluant comme suit : $P(f) \sim 1/f$.

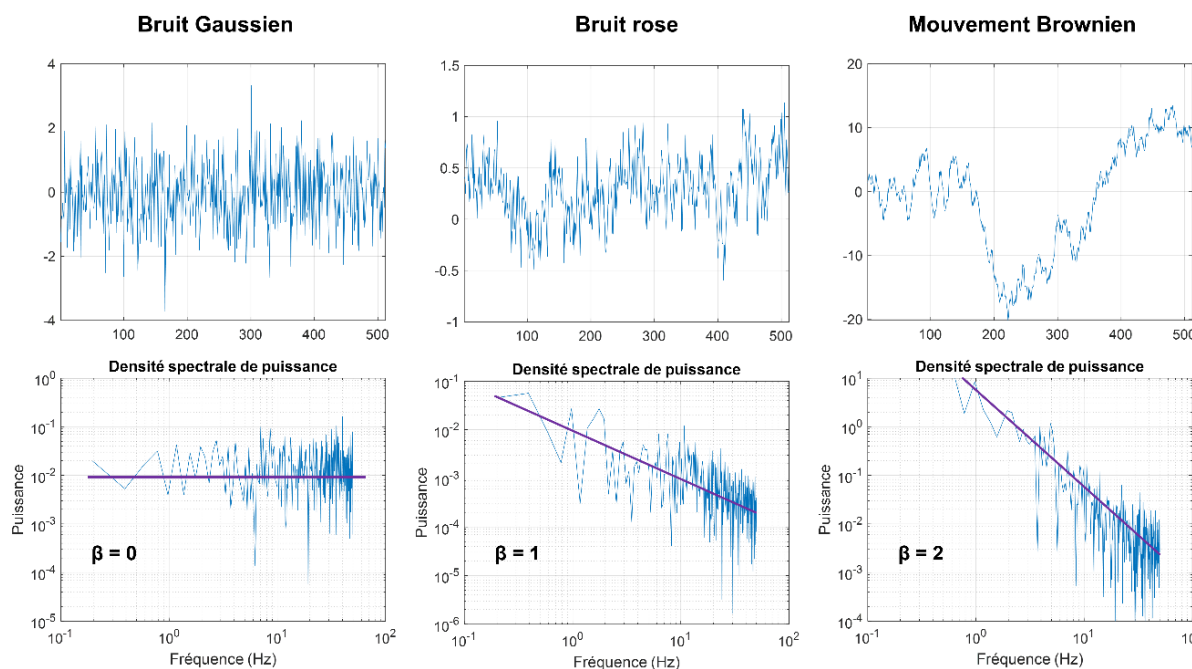


Figure 11 - Présentation de trois types de signaux (en haut) accompagnée de leur densité spectrale de puissance (en bas). Le bruit Gaussien est un phénomène aléatoire, le mouvement brownien est persistant, et le bruit rose se trouve à l'interface entre les deux (bruit $1/f$). L'exposant β de la pente est utilisé comme marqueur de complexité.

Ce type de signal dit en « $1/f$ » est caractéristique des phénomènes d'échelle observés dans certains signaux physiologiques humains. Chez des personnes jeunes et en bonne santé, les intervalles de temps entre deux foulées dans le cadre de la marche à pied présentent une structure de bruit en $1/f$ (Costa et al., 2003; Hausdorff et al., 1997), tout comme les intervalles de temps entre deux battements cardiaques (Kobayashi and Musha, 1982; Pilgram and Kaplan, 1999) ou entre deux mouvements successifs d'un doigt frappant une table à un rythme régulier (Yoshinaga et al., 2000). Ces analyses utilisant la densité spectrale de puissance pour étudier la structure du signal sont aujourd'hui peu utilisées, et remplacées par des méthodes conçues spécialement pour observer les phénomènes d'échelle présents dans les signaux biologiques.

Deux théories expliquant les bruits $1/f$

Même si la présence de bruit en $1/f$ dans le mouvement humain et les systèmes cognitifs est largement reconnue, l'origine de cette autosimilarité statistique fait encore débat dans la communauté scientifique (Torre and Wagenmakers, 2009). Une première approche consiste à considérer les bruits $1/f$ comme présents partout dans le mouvement et la cognition humaine, leur étude ne devant donc nécessairement pas être liée à un système particulier. Cette approche se place entièrement dans le cadre de l'interaction-dominance, considérant que les séries temporelles issues de tâches motrices ou cognitives reflètent les interactions entre tous les systèmes impliqués. À ce titre, il convient alors d'étudier le système dans son ensemble, sans chercher à expliquer les corrélations long-terme par la présence d'un sous-système spécifique générant un timing particulier : « le bruit $1/f$ est trop répandu pour être idiosyncratique » (Kello et al., 2007, traduction).

Une autre approche consiste à expliquer la présence de fluctuations en $1/f$ par des mécanismes spécifiques à chacune des actions à effectuer. Par exemple, dans le cadre de la marche, la présence d'un générateur central de motifs - regroupant différents centres neuronaux - a été proposée comme étant responsable des variations fractales (Collins and Richmond, 1994; Hausdorff et al., 1995). Ces générateurs centraux de motifs (*Central Pattern Generators*) représenteraient une source « locale » de complexité, dont l'origine dépend du modèle utilisé pour expliquer la génération de bruit $1/f$ dans différentes tâches (tapping, traçage de cercle, oscillations de bras...).

Ces deux approches, bien que conceptuellement différentes, ne se contredisent pas forcément l'une l'autre, et ont toutes deux prouvé leur utilité pour étudier la complexité du mouvement humain et de la cognition (Diniz et al., 2011; Torre and Wagenmakers, 2009). L'approche mécanistique de la complexité a été majoritairement appliquée aux tâches avec un timing basé sur des événements (comme le tapping) ou à des tâches surprises (comme la marche). Dans la suite de nos travaux, les analyses

de complexité effectuées se concentreront majoritairement sur des séries de mouvement enregistrées lors de tâches visuomotrices et cognitives. Ces séries ne présentant pas de caractéristique cyclique fortement marquée et la construction d'un modèle n'étant pas l'objectif principal du présent travail, nous situons nos analyses dans le cadre de l'interaction-dominance.

Méthode d'analyse de la monofractalité : DFA

La méthode *Detrended Fluctuations Analysis* (DFA), introduite par Peng et collaborateurs (1995) pour observer les corrélations long terme à l'intérieur des fluctuations du battement d'un cœur sain, permet de mettre en évidence des processus à mémoire longue et des phénomènes d'échelle. Par son efficacité et sa simplicité d'utilisation – la méthode peut être codée dans un simple tableur (Arsac and Deschodt-Arsac, 2018), elle est massivement utilisée pour évaluer le caractère fractal d'un signal biologique. L'objectif de cette méthode est d'exprimer les fluctuations d'un signal en fonction de l'échelle temporelle s d'observation et de l'exprimer sous la forme d'une loi puissance : $F(s) \sim s^\alpha$. L'exposant d'échelle α est la valeur utilisée comme mesure de la fractalité du signal.

À partir d'un signal initial x de taille L , l'algorithme DFA est composé des étapes suivantes :

- 1) La somme cumulative $y(i)$ du signal est créée en additionnant chacune des valeurs en lui soustrayant la moyenne du signal :

$$y(i) = \sum_{k=1}^i [x_k - \langle x \rangle], i = 1, \dots, L \quad (1)$$

- 2) La série $y(i)$ est ensuite découpée en $N_s = L/s$ boîtes de taille s ne se recoupant pas. Les différentes échelles s sont choisies de telle sorte à ce qu'elles soient espacées de façon équidistante sur une échelle logarithmique. Pour chaque boîte ν , une tendance linéaire locale y_ν est calculée avec la méthode de moindres carrés.
- 3) La variance $F^2(\nu, s)$ des séries auxquelles la tendance a été retirée est ensuite calculée pour chaque boîte ν et échelle s :

$$F^2(\nu, s) = \frac{1}{N_s} \int_{i=1}^s \{y[(\nu - 1)s + i] - y_\nu(i)\}^2 \quad (2)$$

- 4) La fonction de fluctuation $F(s)$ est ensuite calculée comme la racine de la moyenne des variances pour l'ensemble des boîtes v :

$$F(s) = \sqrt{\frac{1}{N_s} \int_{v=1}^{N_s} F^2(v, s)} \quad (3)$$

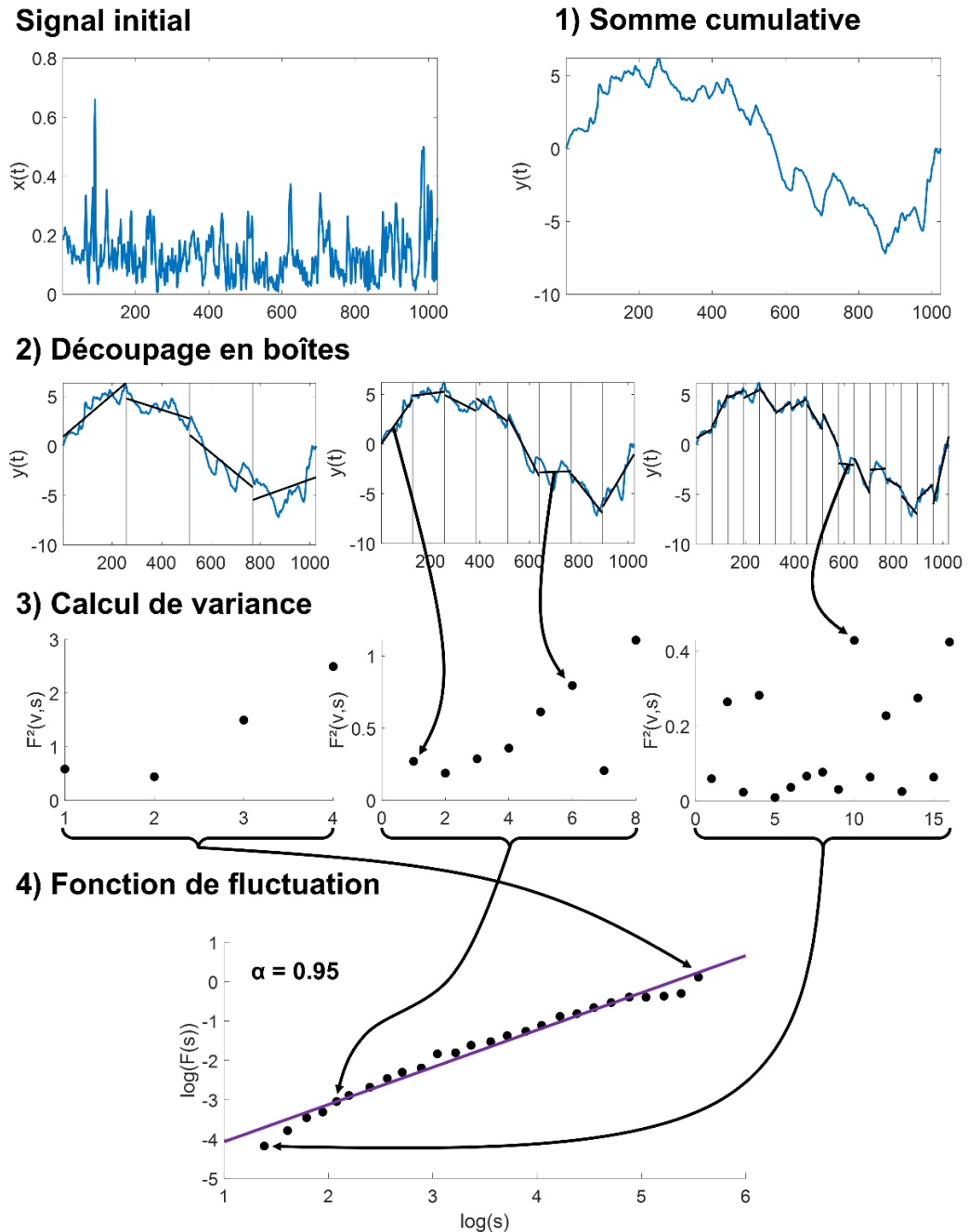


Figure 12 - Détail graphique de la méthode DFA appliquée à un signal de déplacement d'une souris d'ordinateur lors d'une tâche cognitive sur écran

Si le signal observé présente effectivement des caractéristiques fractales, une loi puissance est observée dans la fonction de fluctuation : $F(s) \sim s^\alpha$. En passant à une échelle logarithmique, la relation devient $\log(F(s)) \sim \alpha \times \log(s)$, et fait alors apparaître une droite de coefficient directeur α . Cette valeur peut être mise en relation avec l'exposant spectral β utilisé pour la densité spectrale de puissance via l'équation $\alpha = (\beta + 1)/2$. De cette façon, le bruit blanc aléatoire se situe autour de $\alpha = 0.5$, les signaux persistants présentent une signature fractale en $\alpha = 1.5$ et les signaux correspondant à un bruit rose en $1/f$ se situent autour d'un α proche de 1.

La méthode DFA a été appliquée à de nombreux signaux physiologiques. Par exemple, la fractalité de la marche permet de mettre en évidence une perte de complexité dans le cas de maladies neurodégénératives (Bartsch et al., 2007; Hausdorff, 2009; Warlop et al., 2016) et de prédire le risque de chute chez des personnes âgées (Lamoth et al., 2011). Côté cœur, la fractalité de la variabilité du battement cardiaque permet de détecter la présence d'apnées du sommeil (Penzel et al., 2003) ou encore de déterminer les chances de survie suite à un arrêt cardiaque (Ho et al., 1997).

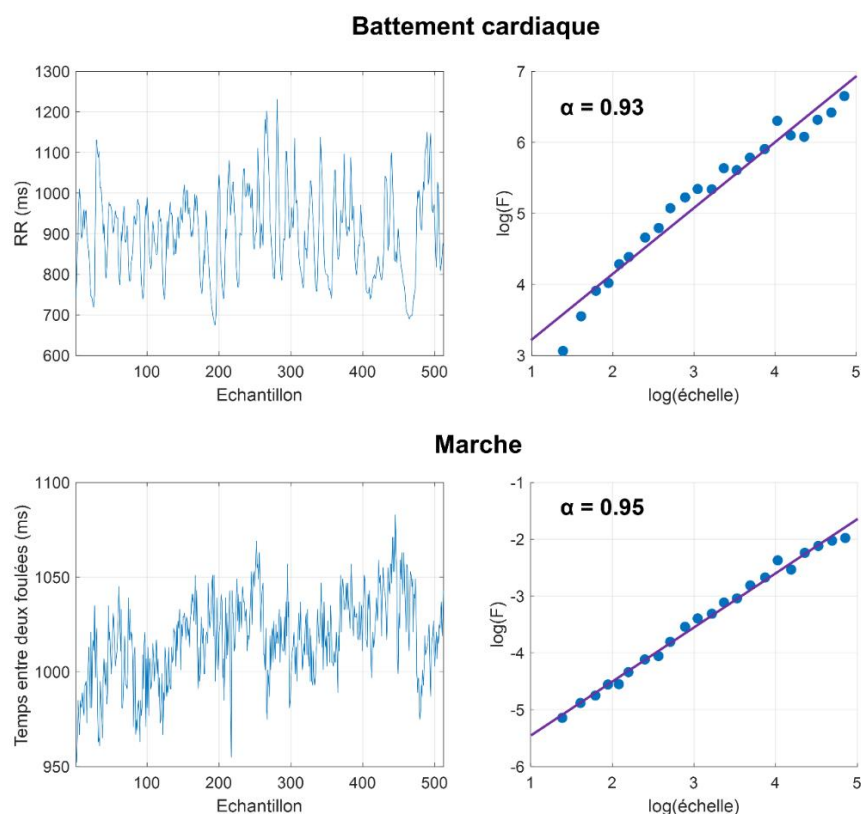


Figure 13 - Exemple de signaux physiologiques présentant des caractéristiques fractales. En haut : signal correspondant à l'intervalle de temps entre deux battements cardiaques (intervalles R-R). En bas : signal correspondant à l'intervalle de temps entre deux foulées lors de la marche à pied.

Multifractalité

Origines de la multifractalité

Dans la littérature, la fractalité a beaucoup été utilisée pour marquer les différences entre un système interaction-dominant en opposition aux systèmes composant-dominant. Cependant, la fractalité telle que calculée par la densité spectrale de puissance ou la méthode DFA a certaines limites. L'exposant fractal peut varier au cours de la tâche à exécuter, sans que ces modifications ne soient prises en compte. La présence de bruit rose comme marqueur d'interactivité dans un système n'est potentiellement pas suffisante ; la signature fréquentielle provenant de mesures finies est statistiquement indiscernable de la somme de processus autorégressifs sur différentes échelles de temps (Granger and Joyeux, 1980; Torre et al., 2007). Pour analyser de façon plus fine la structure statistique de séries temporelles, une méthode a été proposée (Delignieres and Marmelat, 2012; Delignières and Marmelat, 2013) : la multifractalité (Ivanov et al., 1999). Les méthodes multifractales permettent de décrire l'invariance d'échelle dans les séries temporelles à l'aide d'un spectre d'exposants d'échelle plutôt qu'avec une valeur moyenne unique. La relation entre les variations locales d'exposants d'échelle et les interactions entre différentes échelles temporelles est un marqueur de la présence de phénomènes multiplicatifs dans les séries temporelles analysées. En d'autres termes, la multifractalité est un outil mathématique permettant d'estimer à quel point des séries temporelles montrent des variations non-linéaires au cours du temps. Par opposition, la (mono)fractalité ne permet que de quantifier la non-linéarité d'un signal dans son ensemble.

Des séries d'événements aux mouvements densément échantillonnés

Dans de nombreux domaines, il est courant d'étudier la non-linéarité de séries temporelles en observant des séries d'événements. Ces événements peuvent provenir de processus physiologiques autonomes (battement cardiaque, posture, ...), psychologiques (prononciations de mots, réponses à des questionnaires, ...), ou encore de mouvements volontaires (marche à pied, finger tapping, traçage de cercles...). Les séries temporelles analysées sont alors composées des intervalles temporels entre deux éléments particuliers. La plupart des signaux biologiques montrent de la non-linéarité ; explorer les séries temporelles d'écarts entre deux événements produits par l'Homme n'est pas la seule façon d'observer le caractère non-linéaire des interactions entre les composants d'un système complexe. Si les intervalles de temps entre deux événements successifs relèvent des interactions entre différents systèmes agissant sur plusieurs échelles spatiales et temporelles, l'analyse d'un

mouvement continu résultant des interactions entre ces mêmes composants devrait potentiellement aussi montrer des propriétés non-linéaires. Ces analyses de signaux densément échantillonnés ont été effectuées sur des valeurs angulaires de la position du regard à 500 Hz (Stephen and Mirman, 2010), sur les mouvements des mains d'un artisan manipulant un marteau (Nonaka and Bril, 2014) ou d'enfants triant des cartes à 60Hz (Anastas et al., 2014), ou encore avec les mouvements de la main tenant une souris à 256 Hz (Dotov et al., 2017). Toutes ces séries temporelles présentent des caractéristiques non-linéaires, et sont étudiées par le spectre de la multifractalité. En échantillonnant un mouvement à haute fréquence, l'attention se porte sur des échelles temporelles très courtes. Dans le cadre de l'étude d'un mouvement, observer des phénomènes d'échelle en s'intéressant à des fréquences aussi élevées suppose la présence d'interactions non-linéaires entre des composants à la fois cognitifs, liés à la complétion de la tâche et la planification motrice, et mécaniques, liés aux mouvements squelettiques et musculaires. De ce constat est né le concept de tenségrité multifractale (Kelty-Stephen, 2018; Mangalam et al., 2020a, 2020a).



Figure 14 - Exemple de structure présentant de la tenségrité. La structure est stabilisée par les forces de tension et de compression qui se répartissent et s'équilibrent.

La tenségrité peut être définie comme la faculté d'une structure à se stabiliser par l'équilibre des différentes forces appliquées par chacun des composants sur les autres. Les tensions et compressions appliquées sur chacun des éléments, localisés dans différentes structures imbriquées, génèrent des structures fractales ; la tenségrité

permet au système dans son ensemble d'absorber les faibles perturbations locales, et de convertir les perturbations plus importantes en nouvelles stratégies permettant de conserver la stabilité du système (Ingber, 2006). Ces interactions entre perturbations locales et stabilité globale peuvent être mises en évidence dans une tâche de Fitts, consistant à toucher alternativement deux cibles séparées d'une certaine distance avec le plus de précision et de rapidité possible. Il a été observé d'une part que des contraintes globales modifient la dynamique du mouvement des mains (Wijnants et al., 2012), et d'autre part que les interactions non-linéaires présentes dans les mouvements de la tête pendant cette tâche interagissent avec celles de la main dans le but d'améliorer la précision du geste (Bell et al., 2019).

En résumé, les propriétés non-linéaires d'un système peuvent s'observer en étudiant des séries temporelles densément échantillonnées, dans lesquelles les échelles temporelles de courte durée reflètent les interactions non-linéaires présentes dans le système global.

Les cascades multiplicatives dans les séries temporelles

Les interactions non-linéaires entre les composants supposent la présence de phénomènes multiplicatifs. À l'opposé de certains systèmes mécaniques linéaires, dont la fonction de transfert est la somme des propriétés des différents composants du système, les propriétés du signal de sortie d'un système biologique ne sont pas additivement décomposables. Cette particularité peut s'observer dans la dispersion des valeurs de sortie suite à une même commande : dans le cas où les différentes erreurs s'additionnent, sans interactions entre les différentes échelles, on obtient une distribution gaussienne. Les différentes sources d'erreurs sont indépendantes, ce qui est l'opposé de l'interactivité (Holden et al., 2009). Au contraire, lorsque les différentes sources d'erreurs interagissent entre elles, on obtient une distribution de forme log-normale en sortie, démontrant la présence de phénomènes multiplicatifs entre les différentes échelles, qui se reflète par la présence de bruit rose (Stephen and Mirman, 2010; Van Orden et al., 2005, 2003).

Cependant, il est important de noter que la présence de bruit rose, même si elle reflète la présence d'interactions non-linéaires, n'est pas une preuve suffisante des interactions entre différentes échelles temporelles. En effet, il est possible que les interactions se produisent entre différents groupes de composants agissant à certaines échelles temporelles, indépendamment de ce qu'il se produit dans les autres échelles temporelles (Figure 15, panneau de gauche).

Utiliser une loi puissance ne permet pas d'établir la distinction entre des phénomènes d'interactions entre différents composants cloisonnés, et des interactions

la cascade peut s'illustrer comme un nouvel élément intégré dans le flux d'eau, dont les modifications légères vont être absorbées par le flux environnant, et les modifications plus importantes vont venir remodeler la répartition finale des flux. La métaphore de la cascade est utilisée pour expliquer les phénomènes d'interactions entre différentes échelles présentes dans les interactions au sein des systèmes biologiques. L'objectif des méthodes multifractales est de « remonter la cascade », pour étudier les interactions non-linéaires se produisant entre les différents éléments impliqués dans la construction du signal de sortie.

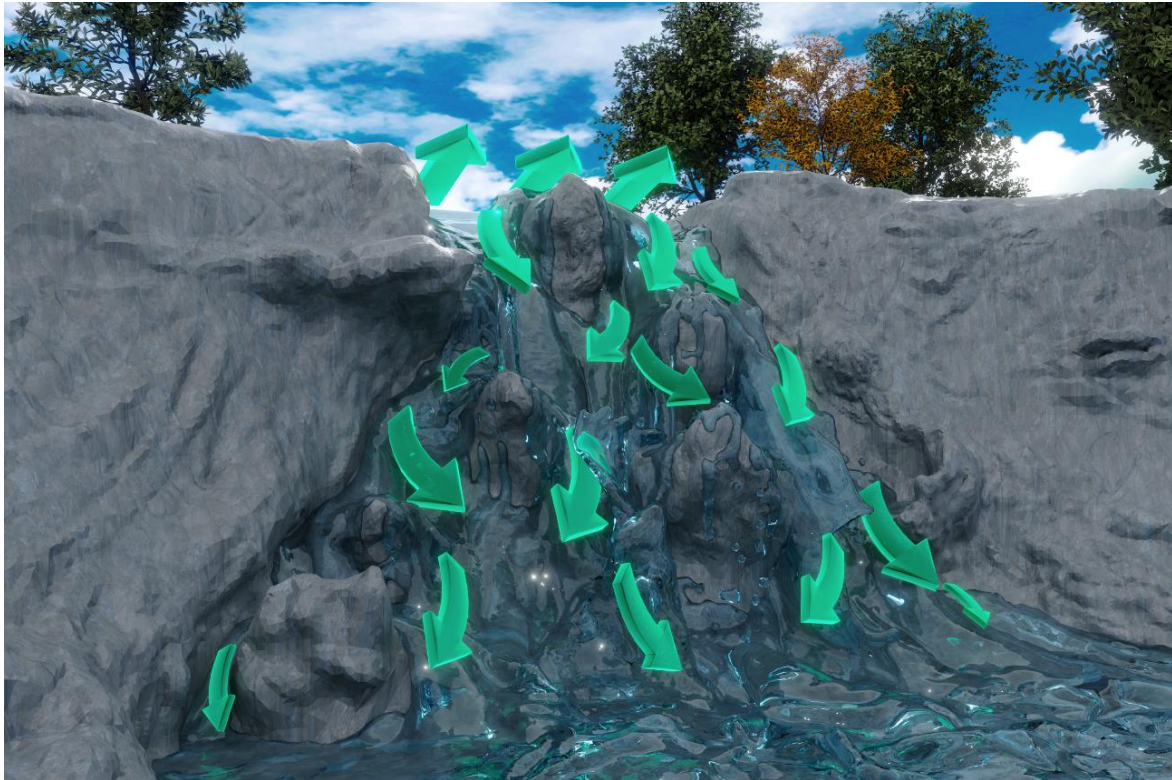


Figure 16 - Illustration d'une cascade multiplicative.

Multifractalité dans les signaux biologiques et de mouvement

Les signaux biologiques, qu'ils soient observés dans les fluctuations de systèmes physiologiques (cœur, posture, marche) ou dans le mouvement (mouvements des mains, d'un outil, du corps entier), sont le résultat des interactions entre de très nombreux composants impliqués dans le maintien de l'homéostasie ou la réalisation d'une tâche. Ces interactions non-linéaires, observées par les méthodes fractales et multifractales, peuvent être vues comme des marqueurs d'adaptabilité et d'adaptation. D'autre part, étant donné que la multifractalité représente les interactions entre les différentes échelles d'un système, elle peut être utilisée pour analyser les interactions entre l'humain et son environnement, et notamment la fluidité de ces interactions et l'incorporation de nouveaux éléments dans un système

cognitif étendu (par exemple, l'incarnation d'un outil, ou *tool embodiment*). Ces points particuliers sont développés dans la suite du manuscrit, et exploités dans le cadre de l'incarnation d'un outil ou d'un avatar corps entier suite à une illusion corps-entier induite par stimulations cardio-visuelles, visuo-tactiles ou visuomotrices.

La multifractalité a été mise en évidence dans de nombreux signaux physiologiques, que ce soit la variabilité du rythme cardiaque (Castiglioni et al., 2018; Ivanov et al., 1999), les oscillations posturales (Kelty-Stephen, 2018; Shimizu et al., 2002), le rythme de la marche (Delignières et al., 2016; Dutta et al., 2013) ou encore la coordination sensorimotrice (Torre et al., 2019).

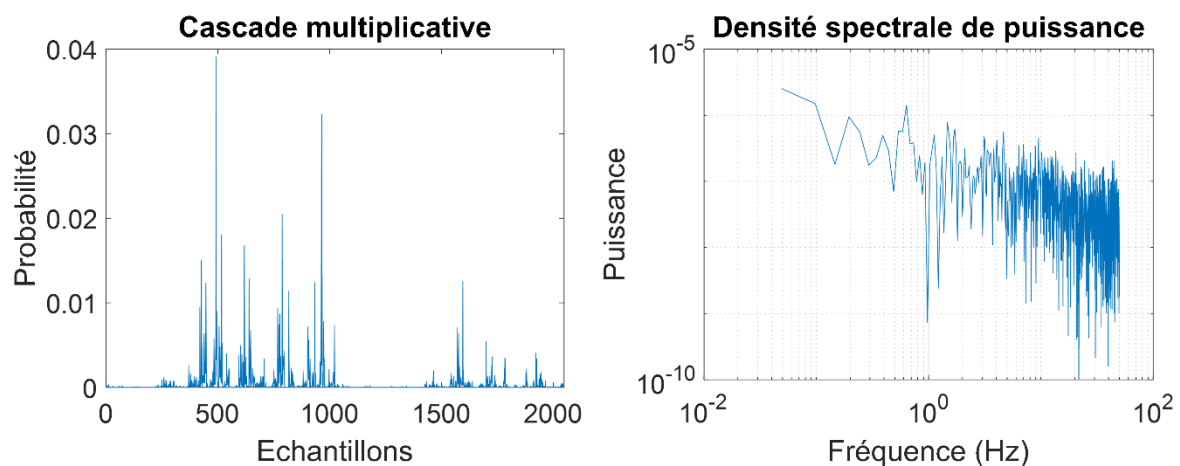


Figure 17 – Bruit $1/f$ dans les cascades multiplicatives. À gauche : signal simulé de cascade multiplicative (cascade binomiale). À droite : densité spectrale de puissance du signal, montrant une loi puissance.

Méthode de calcul de la multifractalité

Les méthodes multifractales ont pour but, par rapport aux méthodes dites « monofractales », de mettre en évidence l'évolution des exposants d'échelle au cours du temps dans un signal, et de montrer si des interactions non-linéaires sont présentes entre les différentes échelles temporelles d'un système. Il existe plusieurs méthodes couramment utilisées pour quantifier le degré de multifractalité d'un signal biologique, comme la méthode de Chhabra-Jensen (1989) permettant d'obtenir une mesure directe du spectre de singularité en quantifiant les hétérogénéités présentes dans le signal à différentes échelles. Dans les travaux de cette thèse, les analyses de séries temporelles sont réalisées avec une généralisation multifractale de la méthode DFA.

Multifractal DFA

La méthode *Multifractal-DFA* (MF-DFA, Kantelhardt et al., 2002) est une généralisation multifractale de la méthode *Detrended Fluctuation Analysis* (DFA) décrite dans la section « Méthodes d'analyse de la fractalité ».

À partir de l'équation 3, l'objectif de cette méthode est de calculer des fonctions de fluctuation pour plusieurs moments statistiques q .

$$F_q(s) = \left\{ \frac{1}{N_s} \int_{\nu}^{N_s} [F^2(\nu, s)]^{\frac{q}{2}} \right\}^{\frac{1}{q}} \text{ pour } q \neq 0 \quad (4)$$

Le cas $q = 2$ est similaire à l'équation 3, et représente la fonction de fluctuation utilisée pour calculer l'exposant monofractal. Dans le cas $q = 0$, une approximation logarithmique doit être effectuée pour estimer $F_0(s)$:

$$F_q(s) = \exp \left\{ \frac{1}{N_s} \int_{\nu}^{N_s} \ln[F^2(\nu, s)] \right\} \text{ pour } q = 0 \quad (5)$$

Le moment statistique q est ici utilisé pour donner plus d'importance aux segments ν de large variance $F^2(\nu, s)$ pour les q positifs, et aux segments de faible variance pour les q négatifs. La variance correspondant à l'écart par rapport à l'approximation linéaire effectuée dans chacune des boîtes, la valeur de q permet donc de porter l'attention soit sur les variations de petite amplitude, soit sur les grandes variations dans le signal.

Pour reprendre la métaphore de la cascade, les fluctuations observées par les valeurs élevées de q permettraient d'observer l'influence de perturbations situées en amont de la cascade, tandis que les valeurs de q négatives mettent l'accent sur l'hétérogénéité créée par l'ensemble des perturbations, notamment celles situées en aval de la cascade. Observer des valeurs de $F_q(s)$ variant avec l'exposant q est un marqueur des interactions non-linéaires se produisant à différentes échelles. Par opposition, les signaux purement monofractals montrent des fonctions de fluctuations indépendantes de q .

Une fois les fonctions de fluctuation calculées, elles sont représentées logarithmiquement en fonction des échelles s , pour chaque valeur de q .

$$F_q(s) \propto s^{h(q)} \quad (6)$$

$h(q)$ représente l'exposant de la droite tracée dans le tracé log-log de $F_q(s)$.

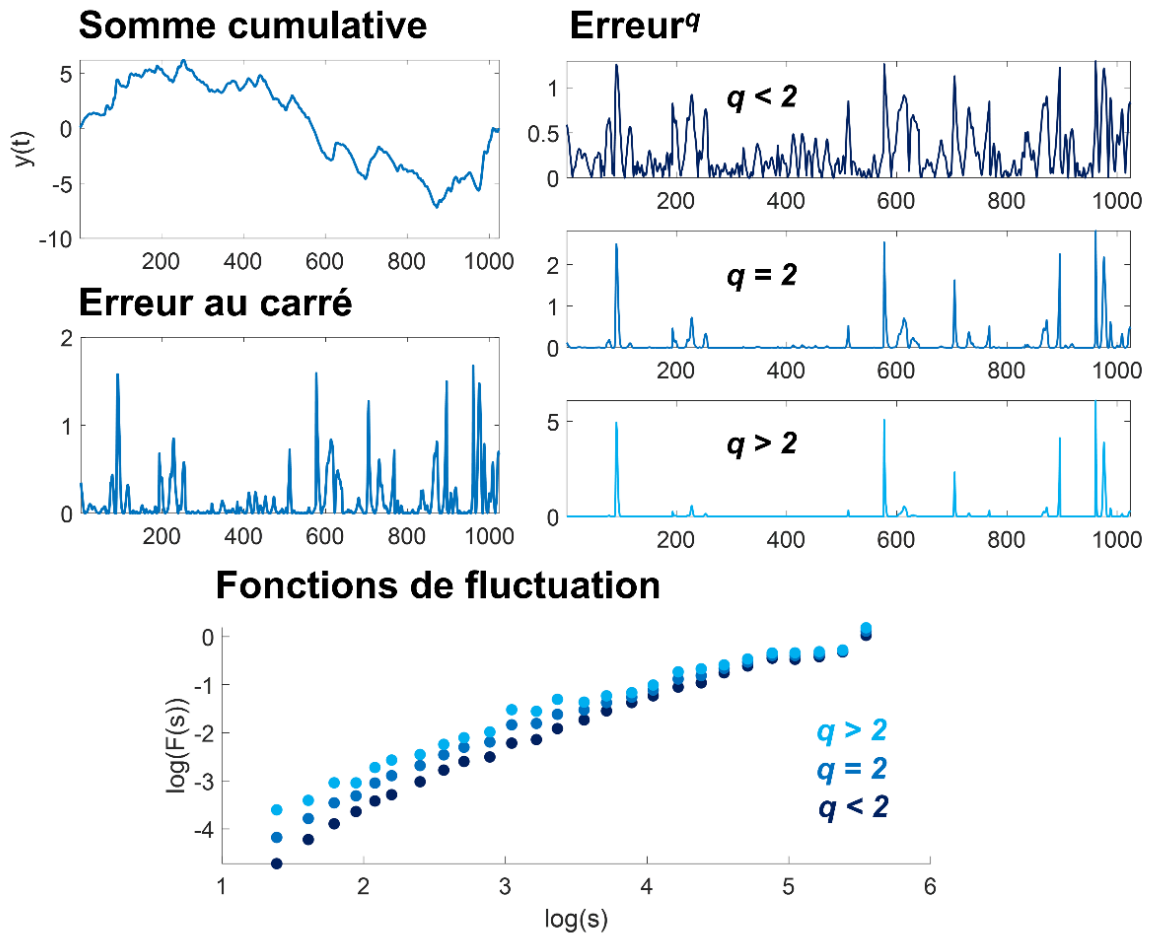


Figure 18 - Illustration de la méthode Multifractal DFA. Les différences fonctions de fluctuation sont obtenues en appliquant un exposant q au signal d'erreur, correspondant à la différence entre le signal initial et l'approximation linéaire dans chaque boîte. Les exposants q inférieurs à 2 mettent l'accent sur les variations de petites amplitudes, et les exposants supérieurs à 2 sur les grandes variations. Le coefficient directeur de la fonction de fluctuation pour à $q = 2$ correspond à l'exposant monofractal.

Application de la méthode du point focus

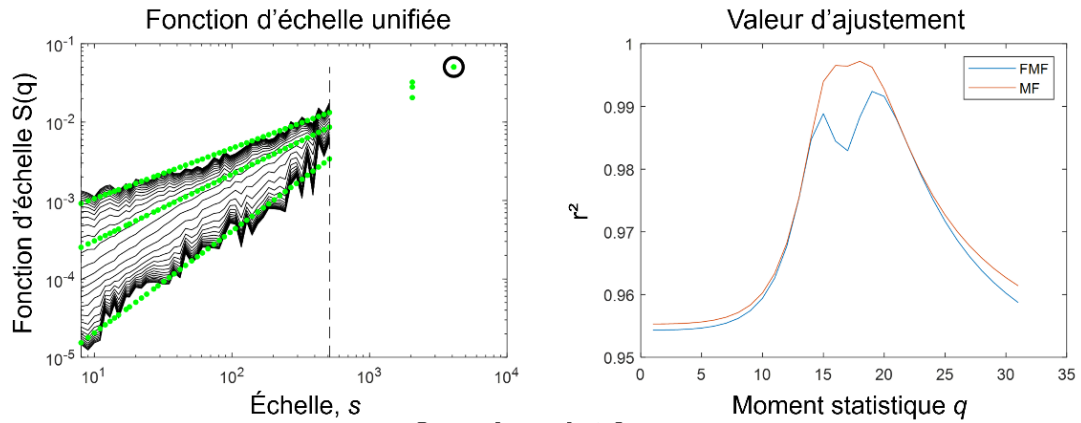
Il est intéressant de noter dans l'équation 4 que, lorsque l'échelle s considérée est égale à la longueur L du signal, toutes les fonctions de fluctuation $F_q(s)$ convergent vers un point unique.

$$F_q(L) = \left\{ \frac{1}{N_L} \int_{v=1}^{N_L} [F^2(v, L)]^{\frac{q}{2}} \right\}^{\frac{1}{q}} = \left\{ [F^2(v, L)]^{\frac{q}{2}} \right\}^{\frac{1}{q}} = F(v, L) \quad (7)$$

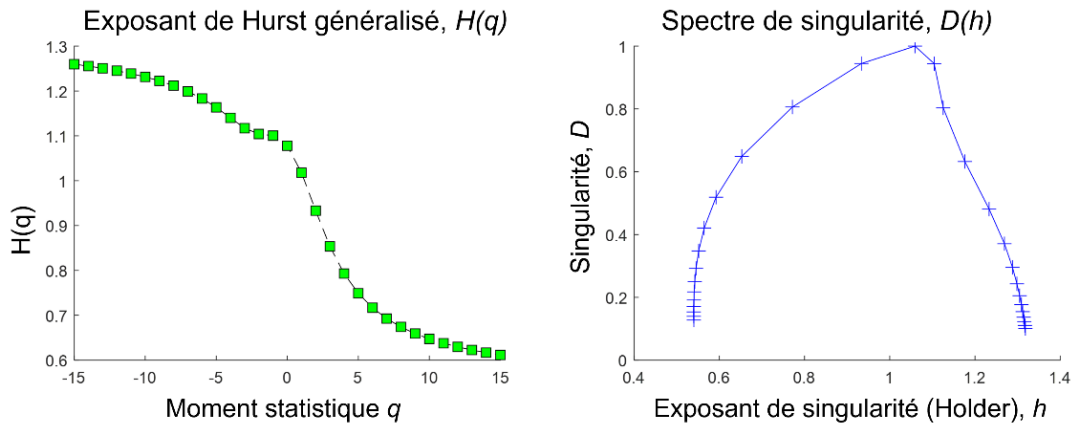
Cette observation peut être utilisée pour ajouter un « point focus » dans l'analyse (Mukli et al., 2015). Le point focus, purement théorique, mais commun pour toutes les valeurs de q , est utilisé pour forcer une géométrie « en éventail », pour éviter d'obtenir des spectres de singularité « corrompus ». En effet, il est important pour l'analyse multifractale que l'exposant de Hurst généralisé $h(q)$ décroisse de façon monotone avec l'exposant q . Des erreurs d'estimation dans le calcul de $h(q)$ peuvent briser la décroissance monotone, ce qui a pour effet de biaiser la mesure multifractale (Figure 19, panneau central). Dans la suite du manuscrit, cette méthode sera appelée FMF-DFA (*Focus-based MultiFractal Detrended Fluctuation Analysis*) par référence au nom que lui ont donné les auteurs.

Dans les analyses basées sur DFA, chaque exposant alpha calculé pour les différentes valeurs de q dans l'analyse multifractale est obtenu par une approximation linéaire log-log utilisant la méthode des moindres carrés. La valeur de r^2 obtenue indique si l'approximation est raisonnable, ou si l'hypothèse de linéarité doit être rejetée. Avec la méthode FMF-DFA, en venant contraindre les exposants d'échelle calculés pour chaque moment statistique q afin de les faire converger vers le point focus et conserver la décroissance monotone, le coefficient r^2 de chaque approximation linéaire est impacté à la baisse, le point focus étant situé à distance de l'ensemble des autres points ajustés par une droite. Dans la méthode de Chhabra-Jensen, une grande attention est portée à la valeur de chaque r^2 , un seuil étant utilisé pour décréter à partir de quelle valeur de q – négatif et positif- l'approximation linéaire doit être rejetée. L'intervalle $[-q ; q]$ ainsi déterminé est à la base du calcul de l'indice multifractal.

Dans l'approche que nous utilisons, le r^2 , bien qu'impacté à la baisse par l'utilisation du point focus, est moins problématique. En effet, l'objectif de l'utilisation du point focus est d'obtenir une estimation fiable de $h(q)$ en assurant l'hypothèse de décroissance monotone, et non pas d'effectuer des analyses monofractales isolées pour chacune des valeurs de q . Il est toutefois intéressant de noter qu'avec les données enregistrées et analysées au cours de ce travail de thèse, nous avons trouvé un effet de la méthode du point focus sur l'estimation de l'exposant monofractal $h(2)$, estimé à partir d'une seule approximation linéaire intégrant ou non le point focus pour l'échelle temporelle L .



Sans le point focus



Avec le point focus

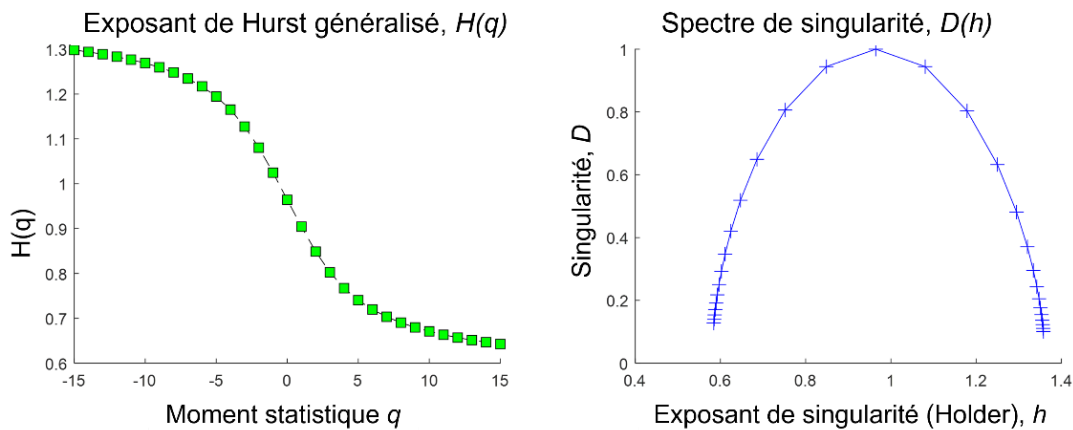


Figure 19 - Illustration de l'application de la méthode du point focus. En haut : fonctions de fluctuations pour des valeurs de q allant de -15 à +15, et qualité de l'ajustement pour les méthodes avec (FMF) et sans (MF) le point focus. Au milieu : spectre de singularité corrompu, lié à une absence de monotonie dans la décroissance des exposants de Hurst avec la valeur de q . En bas : spectre de singularité obtenu en forçant la décroissance monotone des exposants de Hurst en utilisant le point focus.

Une fois l'exposant de Hurst généralisé obtenu, la mesure de la multifractalité peut s'obtenir de deux façons. Une première méthode directe consiste à calculer la différence entre l'exposant de Hurst mesuré pour les valeurs extrêmes de h . Dans les analyses effectuées lors de ce travail de thèse, cette différence sera systématiquement calculée pour des valeurs de q allant de -15 à +15, et l'exposant multifractal sera noté ΔH_{15} .

Une autre méthode consiste à construire un spectre de singularité $f(\alpha)$ à partir de l'exposant de Hurst généralisé. Pour construire le spectre de singularité, il faut d'abord calculer l'exposant d'échelle $\tau(q)$:

$$\tau(q) = qh(q) - 1 \quad (8)$$

Cet exposant est communément relié aux fonctions de partition. Une fois cet exposant obtenu, le spectre de singularité est calculé en estimant la force de singularité α (aussi appelé exposant de Hölder) ainsi que $f(\alpha)$, qui peut être défini comme la dimension du sous-ensemble de la série temporelle caractérisée par α .

$$\alpha = \tau'(q) \text{ et } f(\alpha) = q\alpha - \tau(q) \quad (9)$$

En remplaçant $\tau(q)$ par l'équation 8, on obtient :

$$\alpha = h(q) + qh'(q) \text{ et } f(\alpha) = q[\alpha - h(q)] + 1 \quad (10)$$

En utilisant ce formalisme, on peut estimer la multifractalité d'une série temporelle à partir de la largeur du spectre de singularité $f(\alpha)$, calculée par l'écart entre les valeurs les plus éloignées de α .

Sur les séries temporelles utilisées et analysées au cours de ce travail de thèse, l'utilisation comparée de la largeur du spectre multifractal ou de ΔH_{15} n'a jamais donné de résultats différents d'un point de vue statistique ; on peut donc utiliser l'un ou l'autre de ces indicateurs indifféremment.

Multifractalité non-linéaire

Il est possible d'observer de la multifractalité dans une série temporelle sans que cette mesure témoigne de la présence de non-linéarité. Une étape cruciale de l'analyse consiste à vérifier que la signature multifractale provient effectivement de corrélations long-terme agissant sur plusieurs échelles. Plusieurs processus ont été identifiés comme pouvant conduire à une mesure multifractale incorrecte : des

distributions asymétriques des valeurs du signal (Ivanov et al., 1999; Kantelhardt et al., 2002), des autocorrélations linéaires, des interactions entre différents éléments d'une même échelle, ou encore la taille finie de la série temporelle. Comme la multifractalité peut provenir – de façon calculatoire - des irrégularités du signal, certains processus linéaires sont capables de présenter une structure multifractale (Kelty-Stephen et al., 2022). Par conséquent, il a été recommandé de vérifier par le calcul que la multifractalité observée provient effectivement d'interactions non-linéaires entre les différentes échelles de temps plutôt que d'autocorrélations linéaires. Pour vérifier cette particularité, il est recommandé de comparer la multifractalité mesurée dans une série temporelle à celle obtenue en après en avoir supprimé les corrélations long-terme (Ihlen and Vereijken, 2010, 2013a; Kelty-Stephen et al., 2013). Pour détruire ces corrélations long-terme agissant sur plusieurs échelles temporelles, qui pourraient par erreur être interprétées comme de l'interactivité non-linéaire, la série temporelle originale peut être randomisée en phase à l'aide de la méthode IAAFT (*Iterated Amplitude Adjusted Fourier Transform*, Schreiber and Schmitz, 1996). Cette méthode a pour effet de mélanger les phases tout en conservant la position des amplitudes, ce qui préserve la fonction de densité de probabilité et la densité spectrale de puissance tout en détruisant les corrélations long-terme dans le signal. En appliquant la méthode FMF-DFA décrite dans la section précédente à chaque série et à son substitut (*surrogate*) randomisé en phase, la valeur de ΔH_{15} de la série originale peut être comparée à la valeur ΔH_{15} de la série randomisée.

À partir de cette analyse des séries randomisées, deux indicateurs sont particulièrement pertinents pour l'analyse multifractale du mouvement humain. Si le ΔH_{15} de la série originale est statistiquement supérieur à celui des séries randomisées en phase, alors il est possible d'affirmer que la multifractalité calculée dans la série originale provient effectivement de processus non-linéaires agissant sur plusieurs échelles ; on obtient un marqueur robuste de la notion d'interactivité (non-linéaire). De plus, la valeur du test statistique utilisé pour comparer les ΔH_{15} peut être utilisée pour quantifier la part de non-linéarité dans le calcul de la multifractalité des séries temporelles. En utilisant un test de Student, cette valeur est appelée t_{MF} , et son utilisation permet de déceler des différences fines dans certaines séries multifractales présentant une même valeur de ΔH_{15} , mais ne présentant pas la même la proportion de non-linéarité (Bell et al., 2019; Kelty-Stephen et al., 2022).

Méthode d'analyse générale de la multifractalité

Pour calculer la multifractalité des signaux enregistrés au cours de cette thèse, la méthode générale suivante sera appliquée :

1) Pré-processing des signaux

Dans un premier temps, les signaux recueillis sont systématiquement observés à l'œil pour détecter de potentiels artefacts ou défauts de l'outil de mesure. Dans le cas où des erreurs liées au système d'acquisition sont détectées, celles-ci sont corrigées si elles sont peu nombreuses. Si elles correspondent à une partie trop importante du signal, la série est jugée inexploitable.

2) Présence de fractalité

Avant de chercher à calculer de la multifractalité, il est primordial de vérifier que les signaux présentent de la complexité. Comme les algorithmes de calcul de multifractalité peuvent parfois donner des résultats visuellement cohérents en les appliquant à des séries temporelles aléatoires, il est primordial de s'assurer que les calculs s'effectuent effectivement sur des signaux complexes. Pour cela, la valeur du $h(2)$ est retenue comme indicateur, et doit se situer autour d'une valeur de 1. En cas de doute, une analyse monofractale est réalisée.

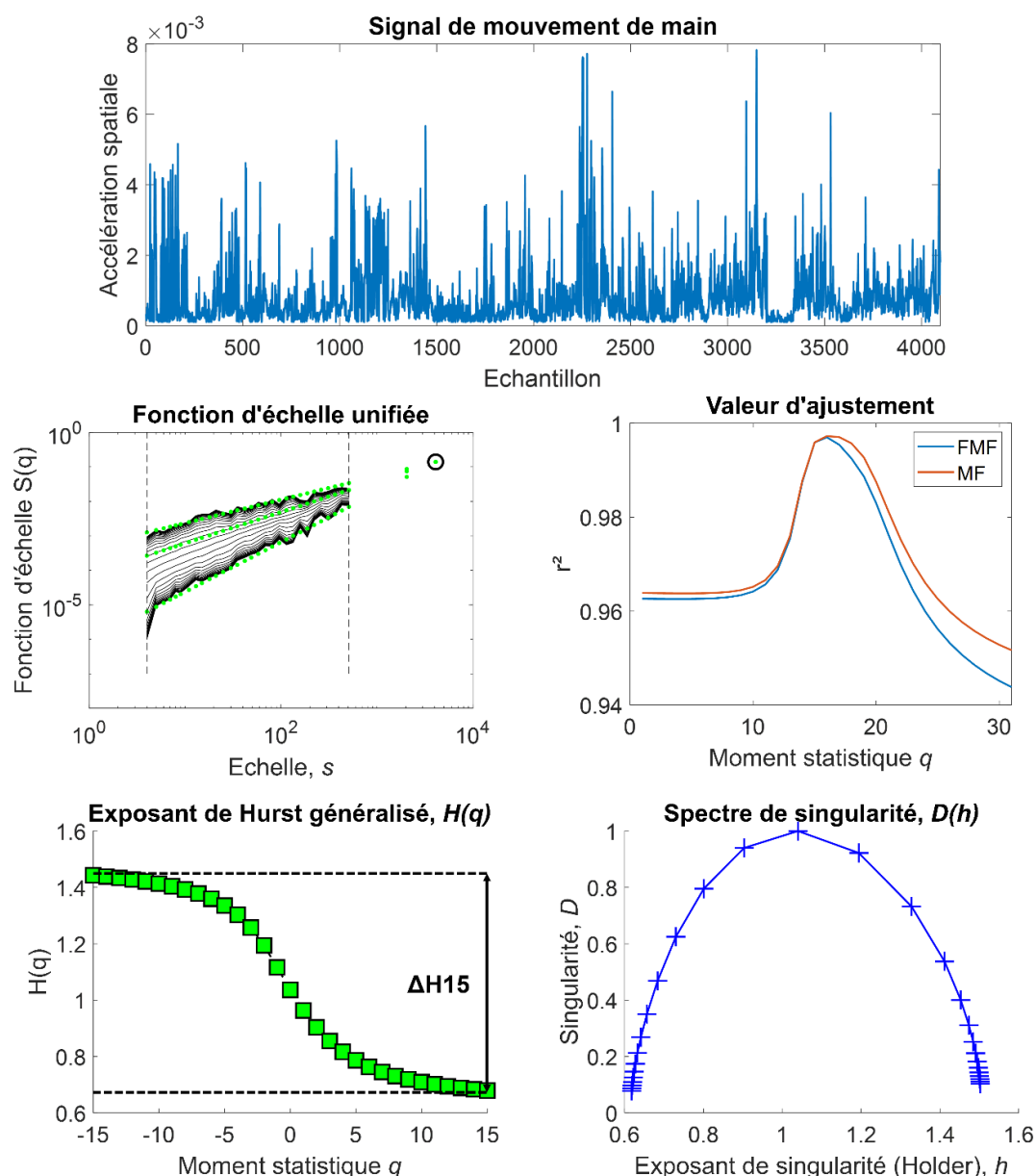
3) Présence de multifractalité

L'étape suivante consiste à s'assurer que le signal observé présente bien de la multifractalité, avec un exposant de Hurst décroissant de façon monotone avec le moment statistique q . Dans le cas où toutes les fonctions d'échelles sont parallèles, le signal est alors purement monofractal, et l'analyse ne doit pas aller plus loin. Pour éviter d'obtenir des spectres corrompus, la méthode du point focus est systématiquement appliquée lors de l'utilisation de MF-DFA. Afin de s'assurer que cette technique n'introduit pas un artefact manifeste dans les résultats de l'analyse, les qualités d'ajustement (*goodness of fit*, mesurées avec des r^2) pour les méthodes avec et sans point focus sont représentées comparativement ; la différence entre les valeurs de r^2 doit rester marginale.

4) Vérification avec la méthode des séries phase-randomisée (*surrogates*)

Enfin, les valeurs statistiques obtenues pour la série temporelle originale sont comparées à celles de 40 séries randomisées par la méthode IAAFT. Dans un premier

temps, observer une largeur de spectre (ou une valeur de ΔH_{15}) de la série originale significativement supérieure à celle des surrogates permet de s'assurer que la multifractalité provient effectivement d'autocorrélations sur plusieurs échelles, et pas de phénomènes linéaires. De plus, la valeur t du test de Student est utilisée pour déterminer dans quelles proportions la multifractalité est liée à des phénomènes non-linéaires entre plusieurs échelles.



Applications de la multifractalité

Observer de la multifractalité dans les signaux biologiques est intéressant, mais n'est pas forcément un résultat en soi. Depuis le début de l'utilisation de cet outil, la présence et l'évolution de la multifractalité dans les séries temporelles ont fait l'objet de multiples interprétations, dont nous allons en détailler quelques-unes dans les paragraphes suivants.

La multifractalité comme marqueur des adaptations cognitivo-motrices

La (mono)fractalité est utilisée depuis de nombreuses années comme marqueur de bonne santé, en représentant la capacité d'un système biologique à s'adapter aux contraintes de son environnement. Il a par exemple été montré que la complexité de la marche diminue chez les personnes âgées et celles atteintes de maladies neuro-dégénératives (Hausdorff, 2007; Hausdorff et al., 1997; Lamothe et al., 2011; Warlop et al., 2016), accentuant le risque de chutes. Un constat similaire est effectué en observant la fractalité du battement cardiaque (Ivanov et al., 1999; Peng et al., 1995). En montrant qu'une diminution de la complexité des systèmes de contrôle - mise en évidence par un blanchissement des exposants fractals - est liée au vieillissement et à des pathologies, il a été proposé que la fractalité est un marqueur de bonne santé, démontrant la faculté d'un système à s'adapter aux contraintes environnementales pour préserver l'homéostasie. Dans ce contexte, quelles informations la multifractalité permet-elle d'apporter ?

Dans une expérience portant sur une tâche de tapping, Torre et collaborateurs (2019) ont étudié l'effet de la perte de feedbacks sensorimoteurs sur les paramètres fractals et multifractals des séries temporelles mesurant l'écart de temps entre deux événements. Des sujets sains, auxquels les expérimentateurs ont retiré entre un et trois retours sensoriels (la vue, l'ouïe et le toucher), ont eu pour consigne de taper leur doigt sur la table à un rythme régulier. En termes de performances, le fait d'avoir accès à l'intégralité des retours sensorimoteurs ou d'en perdre entre un et trois n'a pas eu d'effet sur l'erreur temporelle absolue ni sur le coefficient de variation dans les intervalles de temps entre deux événements. De façon intéressante, la fractalité mesurée avec la méthode DFA est conservée entre la condition contrôle et celles avec déprivation sensorielle. En revanche, cette valeur était significativement plus élevée que celle d'un sujet pathologique souffrant de désafférentation chronique. Un premier résultat intéressant est que les participants semblent capables de s'adapter aux contraintes liées à la déprivation sensorielle, ce qui a pour effet de conserver les performances et de maintenir le niveau de complexité. Pourtant, en imposant des contraintes similaires à celles éprouvées par un sujet pathologique aux participants, il

était naturel de penser que leurs performances ainsi que leur niveau de complexité diminueraient. La (mono)fractalité semble donc illustrer la capacité d'un système à s'adapter, et se conserve donc lorsque le système doit effectivement répondre à des contraintes plus élevées : cette faculté serait donc un trait, dont la valeur mesurée peut difficilement évoluer avec la difficulté de la tâche.

Cependant, en réalisant une analyse multifractale des séries temporelles, les auteurs ont montré une augmentation significative de la largeur du spectre de singularité avec le nombre de déprivations sensorielles. Cette observation permet d'émettre l'hypothèse que la multifractalité est un marqueur des adaptations internes de l'organisme mises en œuvre pour répondre aux contraintes exercées par la tâche et l'environnement sur le participant. La distinction entre les caractéristiques mesurées par la mono- et la multifractalité résiderait donc dans la différence entre « adaptabilité » et « adaptation ».

De façon calculatoire, cette différence entre la faculté intrinsèque d'un système à répondre aux contraintes et les adaptations se produisant en temps réel pour y faire face correspond aux variations d'exposants fractals entre les différentes échelles. Cependant, les adaptations internes de l'organisme mises en place pour répondre à des contraintes plus élevées ne génèrent pas forcément une augmentation de la multifractalité mesurée. Dans une étude récente (Arsac, 2021), huit rugbywomen de haut niveau ont pédalé sur une bicyclette ergométrique et réalisé des tâches de tapotage avec un doigt (tapping) et du traçage de cercle (circling). En plus de réaliser ces actions de façon séparée, les participants ont aussi dû réaliser le tapping et le circling tout en pédalant. Lors de l'exécution de ces tâches en parallèle, ni la monofractalité ni la multifractalité n'ont été modifiées, ce qui suggère que des participants ayant développé une grande faculté motrice grâce à l'entraînement n'ont potentiellement pas besoin de s'adapter lorsqu'il s'agit de coordonner des tâches motrices simples du haut et du bas du corps.

Il est toutefois important de noter que l'adaptation au cours d'une tâche n'est pas forcément uniquement mesurée avec de la multifractalité, et que la (mono)fractalité est elle aussi un indicateur capable de mesurer la réorganisation d'un système à la suite d'une contrainte. Lors d'une tâche consistant à trier des cartes en fonction de différents critères (couleur, animal, accessoire), les positions des mains de participants ont été enregistrées avec une fréquence de 60Hz (Anastas et al., 2011). Lors des différents essais, soit les participants connaissaient la règle selon laquelle trier les cartes dès le début, soit ils devaient la deviner par essais-erreurs à l'aide du retour d'un expérimentateur. Une analyse DFA réalisée sur différentes périodes superposées du signal recueilli pendant un essai (consistant à trier les cartes jusqu'à obtenir dix réussites consécutives) montre des trajectoires d'exposants de Hurst différentes au cours de la tâche en fonction de la consigne initiale. Si la consigne est explicite, la mesure de fractalité reste constante, tandis qu'elle augmente pendant que le

participant doit trouver la nouvelle règle dans la condition implicite, avant de diminuer lorsqu'il l'a trouvée. La même tâche a été effectuée auprès d'enfants préscolaires, en mesurant la multifractalité des mouvements des mains avant et après changement de la règle de tri (Anastas et al., 2014). Les résultats obtenus montrent la présence de multifractalité dans les mouvements des mains avant et après le changement de règle, suggérant que la fonction exécutive étudiée est un processus interaction-dominant. Cependant, les auteurs n'ont pas trouvé de différence en termes de multifractalité entre les périodes avant changement et après changement de règle. Dans ce cas présent, c'est donc la (mono)fractalité plus que la multifractalité qui est utilisée comme marqueur des adaptations cognitives lors d'une fonction exécutive. Il reste important de noter que les résultats de ces deux expériences ont été obtenus à l'aide de méthodes de calcul et populations différentes.

Dans la deuxième étude présentée dans ce manuscrit, nous reviendrons sur le concept de multifractalité comme marqueur des adaptations, lorsque le système visuomoteur est sollicité.

La multifractalité comme marqueur d'un système cognitif étendu

Comme démontré dans les travaux sur les fonctions exécutives (Anastas et al., 2014, 2011), le système cognitif est dominé par les interactions entre les composants. Dans ce contexte, les facultés cognitives d'un individu peuvent être inférées par une mesure de multifractalité effectuée sur des séries temporelles de mouvement asservies par la cognition. De façon intéressante, et pour faire le lien avec les notions d'incarnation évoquées dans la première partie de l'introduction, la littérature s'est intéressée à l'inclusion d'outils dans un système cognitif étendu.

Comme décrit précédemment, la multifractalité est un marqueur des interactions non-linéaires à l'intérieur d'un système biologique. Observer de la multifractalité dans les mouvements des mains lors de l'exécution d'une tâche permet donc de mettre en évidence les interactions à l'œuvre entre la main, le bras, les structures cognitives engagées et l'environnement. En partant de ce constat, observer de la multifractalité dans les mouvements réalisés par un outil serait alors un marqueur des interactions entre cet outil et l'utilisateur. À l'opposé d'un système composant-dominant, dans lequel le corps donnerait une instruction à l'outil pour réaliser une tâche, un système interaction-dominant souligne la présence d'interactions naturelles au-delà des frontières corporelles.

Readiness-to-hand

Pour aborder l'utilisation d'outil, et en particulier la fluidité des interactions avec ces derniers, il faut évoquer d'idée de *readiness-to-hand*. Ce concept, trouvant son origine dans la philosophie de Martin Heidegger (1962), décrit la façon dont un individu perçoit et interagit avec un outil. Un exemple courant utilisé pour décrire cette notion est l'utilisation d'un marteau. Lorsqu'un individu a cet outil en main, il pense immédiatement à son utilisation, sans se demander comment il est fabriqué ou comment l'utiliser. Cependant, si le marteau se brise, son utilisation n'est pas plus intuitive ; ce qu'il *est* devient plus important que ce qu'il *fait*, et l'outil n'est plus considéré comme *ready-to-hand*.

Au cours de la dernière décennie, plusieurs études ont examiné la possibilité de relier ce concept philosophique aux sciences cognitives. Cependant, le principal obstacle consiste à réussir à quantifier la *readiness-to-hand* en valeurs chiffrées. Des études récentes ont proposé une approche quantitative consistant à relier la *readiness-to-hand* à la quantité d'attention que l'utilisateur est capable de donner à la tâche ou à l'outil. Par exemple, Alzayat et collaborateurs (2017) utilisent plusieurs indicateurs lumineux, positionnés proche de l'utilisateur (là où ses mains sont positionnées pour manipuler l'outil) ou proches de « l'action » (vers la partie de l'outil interagissant avec les objets de la tâche), pouvant s'allumer ou s'éteindre à différents moments. Les participants sont moins prompts à remarquer les changements lumineux des stimuli proches de la main que ceux proches de l'outil, ce qui indique une attention majoritairement portée sur la « tâche » plutôt que sur « l'outil ». De plus, la performance en tâche était corrélée avec le nombre de changements lumineux non détectés, ce qui suggère que le fait d'être concentré sur la tâche et d'interagir correctement avec l'outil est lié à une attention accrue portée sur la tâche plutôt que l'outil.

Marqueurs de l'incarnation d'un outil

Un autre aspect important dans l'étude de la *readiness-to-hand* est la notion d'incarnation de l'outil. Ce terme fait référence au fait que, lorsqu'un outil est *ready-to-hand*, il devient une partie de notre corps. Une notion clé pour comprendre comment un outil peut être incarné est le concept d'affordances (Gibson and Carmichael, 1966), qui peut être défini comme les possibilités d'actions offertes par l'outil. Lorsqu'il utilise un outil, l'utilisateur peut alors faire usage de ses affordances, qui étendent ses capacités corporelles (Smitsman, 1997). Ce phénomène avait été anticipé par Merleau-Ponty (1962), qui proposait qu'une canne puisse étendre la capacité de toucher d'un aveugle, et donc d'étendre son espace corporel. Cette intuition a ensuite été démontrée expérimentalement, Serino et al. (2007) montrant que l'expérience des aveugles avec

la canne induit une extension durable de leur espace péripersonnel (PPS), un concept décrit précédemment dans le cadre de l'induction des illusions.

Comment faire croire à un cerveau qu'un "outil" est une partie du corps ? Récemment, il a été discuté que l'objet à incarner ne doit pas obligatoirement ressembler à une partie du corps. Il a été démontré que d'autres facteurs peuvent favoriser l'incarnation d'un outil ; par exemple, l'utilisation habile d'un outil contribue à modifier les représentations du corps (Weser and Proffitt, 2019, 2021), et les propriétés partagées avec un membre peuvent aider un outil à être incarné même s'il ne présente que peu de ressemblance visuelle (Cardinali et al., 2021).

De façon générale, on retrouve dans la littérature deux façons d'aborder l'incarnation d'outils (Schettler et al., 2019). Une première consiste - de la même façon qu'avec les paradigmes de la main en caoutchouc et des avatars en réalité virtuelle - à s'intéresser à la façon dont l'outil est intégré dans une image ou un schéma corporel. La deuxième approche, regroupant différentes théories réunies sous le nom d'« incarnation radicale » (*radical embodiment*), cherche à étudier l'utilisation d'un outil via ses interactions avec l'utilisateur et l'environnement. Dans ce but, cette théorie emprunte ses méthodes de mesure aux sciences de la complexité pour déterminer le caractère interaction-dominant dans l'utilisation d'un outil. C'est cette approche que nous allons développer dans la suite de ce manuscrit, et sur laquelle porteront les expériences 3 et 5 de ce travail de thèse.

L'incarnation radicale prend sa source dans l'approche phénoménologique de la *readiness-to-hand*. En effet, au-delà d'une intégration dans une image ou un schéma corporel, et d'une impression consciente ou inconsciente de posséder un outil comme partie de son corps, c'est bien le fait de pouvoir interagir avec le monde qui donne son sens à la notion « d'outil ». De même, dans une optique de performance, en s'intéressant aux instruments de sport par exemple (club de golf, raquette de tennis...), l'utilisateur s'intéressera moins à la façon dont l'outil peut être perçu comme une extension ou un remplacement de son corps qu'à la facilité d'utilisation et l'efficacité permise dans les tâches qu'il lui permet d'accomplir. Tout comme la complexité peut être utilisée pour étudier un mécanisme corporel, ou la santé du corps dans son ensemble, elle peut avoir un intérêt pour observer la façon dont un outil est « incarné » (*tool embodiment*).

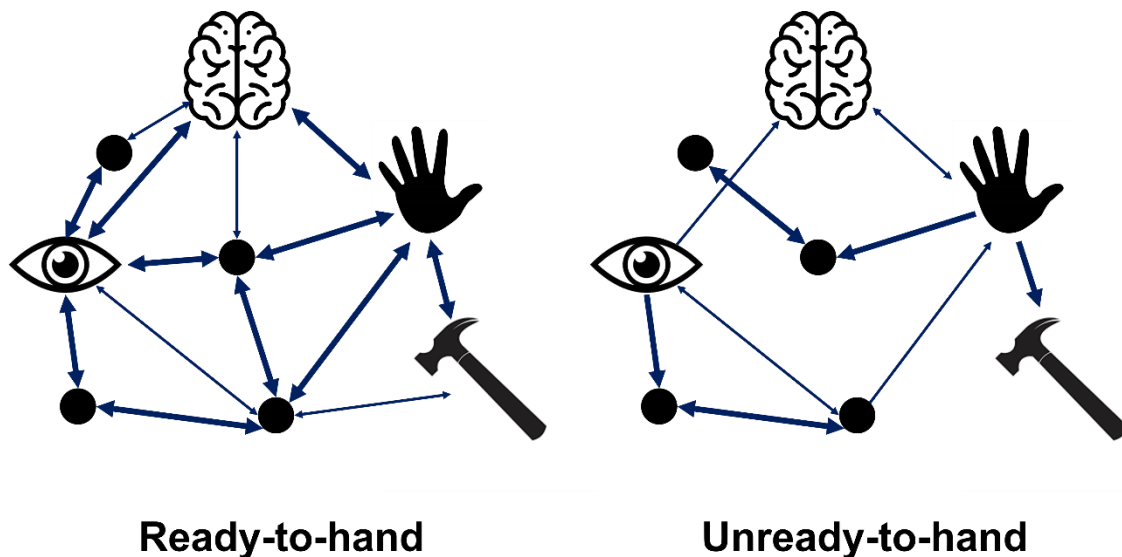


Figure 21 - Illustration du concept d'interaction-dominance dans l'utilisation d'un outil. Lorsque l'outil est *ready-to-hand*, il est inclus dans un système cognitif étendu et interagit avec l'ensemble des éléments. Lorsqu'il est *unready-to-hand*, il reçoit uniquement des ordres de la part de l'utilisateur.

Plusieurs expériences ont utilisé la multifractalité comme marqueur des interactions fluides et intuitives avec un outil. Le cas particulier de l'utilisation d'une souris d'ordinateur a notamment été étudié par plusieurs expériences (Bennett et al., 2022; Dotov et al., 2017, 2010; Nie et al., 2011). Lorsqu'elle fonctionne correctement, l'utilisateur se sert de la souris sans avoir à y penser, et les mouvements présentent de la multifractalité. En revanche, quand elle cesse de fonctionner correctement, en ajoutant des délais ou en modifiant sa trajectoire, celle-ci redevient visible aux yeux de l'utilisateur, qui doit alors penser à la souris pour l'utiliser. Elle sort alors du schéma corporel et de la cognition étendue, et devient un élément auquel l'utilisateur donne des ordres. Cette transition entre un état *ready-to-hand* et un état *unready-to-hand* a été mise en évidence par une diminution de la valeur de la multifractalité dans le signal de déplacement de la souris, mettant en évidence la perte des interactions avec l'outil (Bennett et al., 2022; Nie et al., 2011). La méthode d'analyse multifractale peut donc être utilisée comme mesure de l'incarnation radicale d'un outil.

Marqueur de l'incarnation d'un avatar en réalité virtuelle

L'utilisation de marqueurs issus de la complexité pour caractériser l'intégration d'un outil dans un système cognitif étendu est encore récente, et se développe avec les évolutions des méthodes de calcul multifractales. Dans le cadre de l'utilisation d'avatars, l'incarnation est majoritairement étudiée avec des questionnaires et des tâches comportementales. Cependant, ces méthodes ont été développées pour des

avatars statiques, et sont transposées à l'incarnation d'avatars dynamiques, se déplaçant avec les mouvements de l'utilisateur. En utilisant une synchronisation visuomotrice à l'aide de technologies de capture du mouvement, les données de mouvement sont facilement accessibles, et leur exploitation pourrait permettre d'apporter un éclairage nouveau sur la mesure du phénomène d'incarnation. En effet, lorsque l'utilisateur doit mettre en mouvement son avatar pour réaliser une action dans l'environnement virtuel, l'interaction avec l'avatar peut être perçue différemment en fonction du phénomène d'incarnation. Le participant utilise-t-il l'avatar comme un outil, qu'il doit conceptualiser pour utiliser, ou agit-il *à travers* lui ? La réponse se situe sans doute dans la nature des interactions, et par conséquent dans la signature multifractale, emprunte ou non de non-linéarité.

S'intéresser à la nature des interactions entre l'utilisateur et son avatar doit permettre de déterminer si ce dernier est inclus dans un système cognitif étendu et intégré au schéma corporel, ou s'il est perçu comme un objet extérieur à manipuler. Cette dichotomie ressemble à celle entre les concepts d'interaction-dominance et de composant-dominance. Observer de la multifractalité non-linéaire dans les mouvements de l'avatar permettrait de supposer une utilisation fluide et intuitive du corps virtuel en VR, en faveur de l'hypothèse d'une incarnation réussie.

Problématique et objectifs

L'étude des modifications de la conscience de soi corporelle a reçu beaucoup d'attention ces dernières années, en grande partie grâce aux nouvelles possibilités offertes par les environnements immersifs. Le phénomène d'incarnation avec un avatar a été principalement étudié par le biais de la conscience de soi corporelle. De nombreuses méthodes ont été développées pour caractériser l'évolution de ses composantes principales (auto-localisation, prise de perspective, sentiment d'agentivité, auto-identification), des questionnaires à l'imagerie cérébrale en passant par les réponses physiologiques autonomes et les mesures comportementales. En outre, il existe aussi de multiples façons de provoquer les illusions corps-entier à partir de stimulations multisensorielles, qu'elles soient cardio-visuelles (Aspell et al., 2013; Heydrich et al., 2021), visuo-tactiles (Ehrsson, 2007; Lenggenhager et al., 2007), visuo-vestibulaires (Macauda et al., 2015; Preuss and Ehrsson, 2019) ou visuomotrices (Barra et al., 2020; Keenaghan et al., 2020).

Initialement créée pour étudier l'incorporation d'un objet ou d'un outil dans un système cognitif étendu, la notion d'incarnation radicale peut potentiellement aussi s'appliquer aux avatars. Analyser la structure des mouvements d'un utilisateur contrôlant son avatar pour effectuer des tâches par des méthodes multifractales pourrait permettre de déterminer la nature des interactions au sein de ce système.

Utiliser un avatar peut s'effectuer en utilisant un point de vue à la première (*first-person perspective*, 1PP) ou la troisième personne (*third-person perspective*, 3PP). Le développement des techniques de motion capture permet maintenant de réaliser simplement une synchronisation visuomotrice entre le participant et son avatar, lui permettant de le contrôler à distance pour réaliser des tâches motrices. En particulier, utiliser un avatar avec la 3PP offre de nouvelles opportunités pour l'apprentissage (Caserman et al., 2020; Hoang et al., 2016; Yan et al., 2015), la rééducation (Trombetta et al., 2017; Ustinova et al., 2010) ou encore l'entraînement tactique dans les sports collectifs (Pagé et al., 2019; Tsai, 2018). En revanche, le lien entre les mécanismes d'incarnation avec l'avatar et le comportement du participant en réalité virtuelle n'a pas encore été établi. Il semble pourtant primordial de s'intéresser à ce paramètre, l'incarnation de l'avatar conditionnant son intégration dans un système cognitif étendu, nécessaire à des interactions fluides et intuitives avec ce dernier. Ce point particulier représente l'objectif final de ce travail de thèse.

Pour étudier la relation entre un utilisateur et son avatar en mouvement dans un environnement virtuel, les différentes études présentées dans ce manuscrit visent à construire un paradigme d'expérimentation permettant de mesurer des performances visuomotrices en réalité virtuelle, en utilisant une 1PP ou une 3PP, et de

caractériser l'influence des mécanismes d'incarnation de l'avatar sur le comportement des participants.

Pour cela, de nombreux verrous méthodologiques ont dû être levés.

Dans l'étude 1, l'objectif était de trouver une tâche mesurant des temps de réponse visuomoteurs en réalité virtuelle. Pour cela, un dispositif réel existant a été transposé et validé dans un environnement virtuel sur des participants jeunes et en bonne santé. Les qualités test-retest de l'outil ont été évaluées, et les mesures issues de questionnaires ainsi que des outils de réalité virtuelle ont permis d'établir des profils de participants.

Dans l'étude 2, les données des mouvements des mains des participants pendant l'exécution de la tâche visuomotrice obtenues dans l'étude précédente sont traitées avec une approche multifractale. Sur la base de nombreuses interactions au sein d'un système empreint de complexité liant perception, cognition et mouvement, nous explorons les propriétés multifractales des mouvements de la main pour étudier les phénomènes d'adaptation à la tâche.

Dans l'étude 3, la réalité virtuelle est délaissée pour s'intéresser particulièrement aux mécanismes d'incarnation d'un outil, et plus particulièrement du corps utilisé comme un outil. Cette étude, réalisée avec une tâche sur ordinateur effectuée avec une souris ou la main dont les déplacements sont enregistrés par capture du mouvement, a pour but de faire le lien entre le phénomène d'incarnation et la multifractalité des mouvements densément échantillonnés. En particulier, partant du postulat qu'un outil *ready-to-hand* présente de la multifractalité non-linéaire, nous faisons l'hypothèse que la main utilisée comme un outil, dans le cas où les mouvements seraient correctement reproduits à l'écran, présenterait aussi ces propriétés.

Dans l'étude 4, les premiers avatars en réalité virtuelle apparaissent. Cette expérience a pour but de construire un environnement virtuel permettant de mesurer les composantes de la conscience de soi corporelle avec les méthodes les plus récentes. Le protocole est réalisé deux fois pour chaque participant, afin d'observer les effets comparés de deux types d'induction de l'illusion corps-entier, en utilisant une synchronisation visuo-tactile ou cardio-visuelle sur un avatar statique. De plus, l'ajout de mesures de facultés cognitives individuelles et de questionnaires devrait permettre de déterminer si les participants sont plus sensibles à un type de stimulation multisensorielle qu'à un autre.

Les résultats de ces quatre premières études sont ensuite réinvestis pour construire l'étude 5, permettant d'étudier les liens entre les performances visuomotrices dans un environnement virtuel et les mécanismes d'incarnation avec un avatar.

Dans l'étude 5, nous étudions le phénomène d'incarnation d'un avatar en VR avant et après une illusion corps-entier. La tâche de temps de réponse visuomoteurs développée et validée dans l'étude 1 est utilisée en utilisant la 1PP et la 3PP. Les mouvements des mains sont traités avec les méthodes multifractales utilisées dans l'étude 2. En reprenant les résultats de l'étude 3, la multifractalité non-linéaire est proposée comme mesure de l'incarnation d'un avatar mobile en réalité virtuelle. Enfin, les résultats de l'étude 4 sont réinvestis pour mesurer les modifications de la conscience de soi corporelle à la suite d'une synchronisation visuomotrice, et pour étudier les potentiels effets d'une stimulation multisensorielle supplémentaire.

Les objectifs de cette thèse sont multiples. Si le but principal est d'étudier la relation entre conscience de soi corporelle et le comportement de l'utilisateur en réalité virtuelle, de nombreux objectifs secondaires sont venus se greffer à partir du développement des autres études.

- Valider une tâche de mesure de temps de réponse visuomoteurs en réalité virtuelle
- Démontrer la présence de multifractalité dans les mouvements des mains, et son utilisation pour quantifier des adaptations visuomotrices
- Étudier les mécanismes d'incarnation d'un outil et de la main utilisée comme un outil à partir de la multifractalité non-linéaire
- Appliquer des méthodes comportementales en VR pour étudier les liens entre les principales composantes de la conscience de soi corporelle
- Comparer les performances d'une illusion cardio-visuelle et visuo-tactile sur une même population
- Observer l'évolution de temps de réponse lors d'une tâche visuomotrice en passant de la 1PP à la 3PP
- Déterminer les effets des différentes stimulations sur la nature des illusions corps-entier

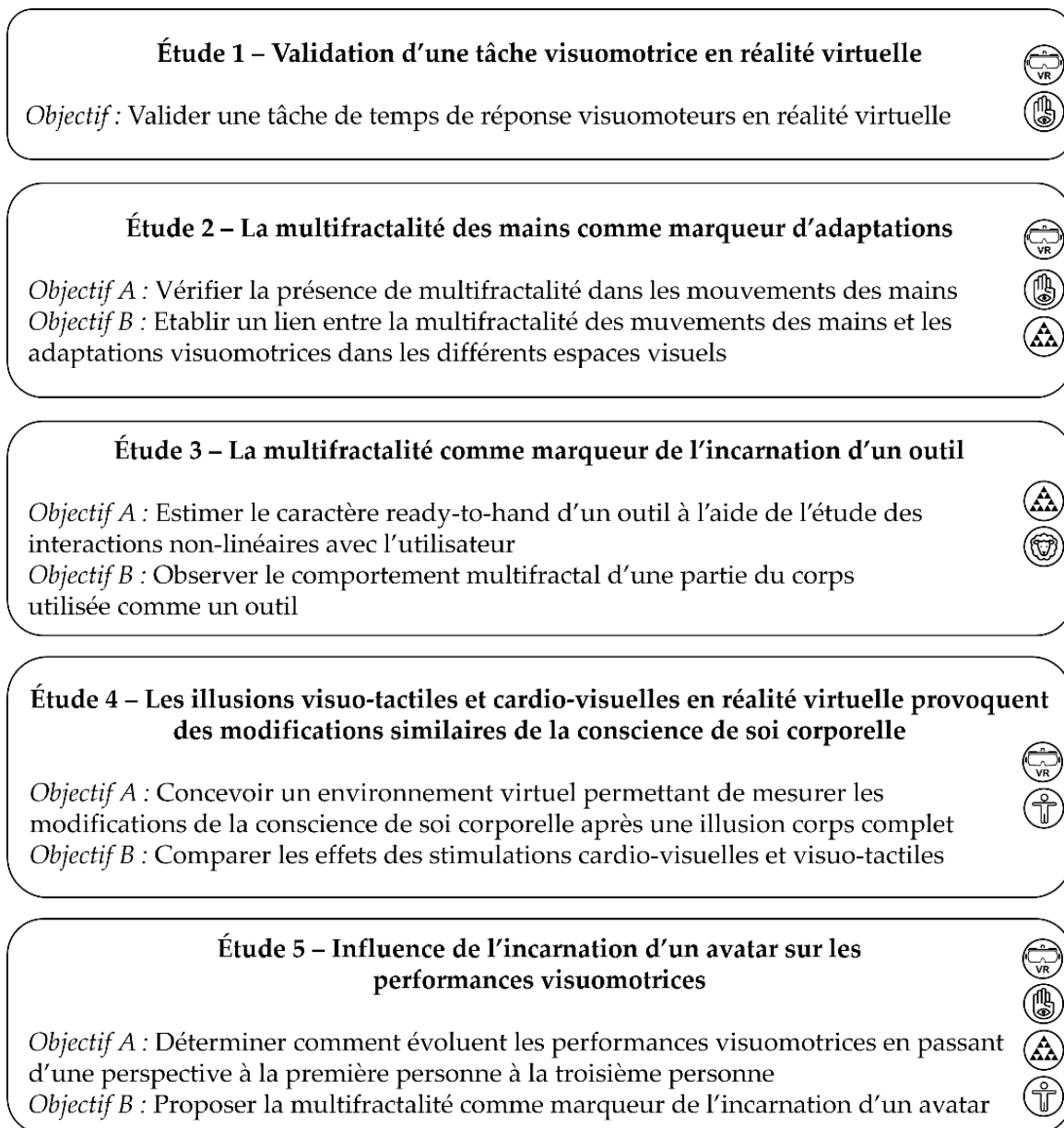


Figure 22 - Résumé des objectifs des différentes études.

Étude 1 - Validation d'une tâche visuomotrice en réalité virtuelle

Objectifs

L'objectif de cette étude est de valider en réalité virtuelle la tâche permettant de mesurer des temps de réponse visuomoteurs qui sera utilisée dans la suite de ce travail de thèse. La réalité virtuelle induisant des modifications comportementales inhérentes à la technologie, il est indispensable d'étudier le transfert d'une tâche du monde réel au monde virtuel en appréciant sa fiabilité test-retest et ses caractéristiques particulières. Dans cette expérience, le but est de mesurer des performances dans différents espaces visuels et avec une condition induisant une légère charge cognitive, pour déterminer si l'usage de cette tâche en réalité virtuelle permet d'obtenir des résultats fiables quel que soit le mode d'utilisation.

Dans un premier temps, les propriétés statistiques du dispositif en réalité virtuelle sont évaluées avec des coefficients de corrélation intraclass et des graphiques de Bland-Altman. Ensuite, les caractéristiques individuelles des participants ainsi que celles des mouvements de la tête sont mises en relation avec les scores dans les différents espaces visuels (haut, bas, central, périphérique) pour démontrer l'utilité de la tâche en réalité virtuelle pour l'exploration de « phénotypes VR » individuels.

Introduction

La plupart des activités de la vie quotidienne nécessitent une intégration d'informations visuomotrices, un processus sensorimoteur complexe doté d'une grande plasticité. Les fonctions visuo-perceptives et visuo-cognitives peuvent être dégradées par des troubles neurologiques ou des lésions cérébrales, mais peuvent aussi être améliorées par la pratique, notamment chez les athlètes. Que ce soit pour l'entraînement ou pour la rééducation, le développement d'outils permettant d'évaluer et d'améliorer des facultés visuomotrices est très important à la fois pour les psychologues, les neurophysiologistes, les cliniciens et les professionnels du sport. En plaçant des contraintes élevées sur les systèmes visuels, cognitifs et moteurs, des résultats prometteurs ont été obtenus pour la rééducation suite à des dommages cérébraux (Crotty and George, 2009) ou l'entraînement psychomoteur des athlètes (Clark et al., 2012; Feldhacker et al., 2019; Schwab and Memmert, 2012), ce dernier

ayant notamment montré un potentiel transfert sur le terrain (Burris et al., 2018; Formenti et al., 2019).

Pour évaluer et entraîner les capacités visuomotrices, le Dynavision (Klavora et al., 1994) est particulièrement utilisé. Lors de la tâche Dynavision, le participant se tient droit face à un tableau et doit appuyer le plus rapidement possible sur des boutons lumineux s'allumant successivement devant lui. D'abord utilisée pour assister la réhabilitation de patients atteints de dommages cérébraux (Klavora et al., 1995b; Klavora and Warren, 1998), cette tâche s'est ensuite démocratisée ; des valeurs normatives ont été mesurées (Blackwell et al., 2019), la fiabilité test-retest de l'appareil a été établie pour des athlètes (Wells et al., 2014), l'appareil a été utilisé pour leur entraînement (Ong, 2018), et l'utilisation de différents champs visuels a permis de déceler des capacités visuomotrices particulières chez certains athlètes (Stone et al., 2019).

Dans ce travail de thèse, nous avons transposé la tâche visuomotrice Dynavision en réalité virtuelle afin d'obtenir un outil flexible permettant d'imposer des exigences élevées aux processus perceptifs et cognitifs visuels, et d'explorer les capacités individuelles d'intégration visuomotrice.

En particulier, la réalité virtuelle présente l'avantage de pouvoir choisir précisément les stimuli à présenter au sujet. Le dispositif original contient un écran LCD, utilisé pour afficher des informations utilisées pour ajouter une charge cognitive au participant (Figure 23). Dans un environnement virtuel, les modalités d'affichage sont infinies et permettent de créer de nouveaux paradigmes expérimentaux. Une autre spécificité de la réalité virtuelle est qu'elle permet d'enregistrer les données de déplacement des mains et de la tête à partir des manettes et du casque. Ces données, associées aux caractéristiques individuelles des participants ainsi qu'à leurs performances dans différents espaces visuels, pourraient permettre de rassembler certains participants en fonction de phénotypes particuliers. Par exemple, si les processus attentionnels dans la recherche visuelle sont plus efficaces lorsque les yeux et la tête sont orientés dans la même direction (Nakashima and Shioiri, 2014), cette observation n'est pas systématique, certains participants utilisant davantage leur vision périphérique pour localiser les cibles. De même, la pratique de jeux-vidéos est supposée améliorer la recherche visuelle en réalité virtuelle, l'attention sélective ou encore la coordination visuomotrice (Feng et al., 2007; Green and Bavelier, 2007, 2003). Enfin, un dimorphisme sexuel a été identifié en établissant un lien entre la flexibilité cognitive et la connectivité fonctionnelle du cerveau (Chén et al., 2019; Waller, 2000).

Dans un premier temps, nous avons démontré la fiabilité test-retest de la tâche en réalité virtuelle chez des étudiants physiquement actifs et en bonne santé (n = 64, 32 femmes). Ensuite, l'exploitation des données de mouvement de la tête issues du casque de réalité virtuelle permet d'obtenir des informations intéressantes sur les stratégies visuelles et perceptives individuelles, ce qui ajoute une valeur significative

à l'exploration de phénotypes visuomoteurs. Une analyse factorielle des données mixtes et une classification ascendante hiérarchique sur les composantes principales indiquent que les mouvements de la tête, la pratique des jeux vidéo et la pratique sportive sont des indicateurs pertinents pour classer les participants selon différents phénotypes visuomoteurs.

En conclusion, la tâche du Dynavision transposée en réalité virtuelle est un outil précis et flexible permettant d'obtenir des informations pertinentes quant aux capacités visuomotrices des utilisateurs.

Matériel et méthodes

Participants

64 étudiants en Sciences et Techniques des Activités Physiques et Sportives (32 hommes, 32 femmes, 19.0 ± 2.1 ans (entre 17 et 25), 1.70 ± 0.09 m, 63.5 ± 9.6 kg, indice de masse corporelle 21.4 ± 2.3 kg/m²) ont donné leur consentement éclairé pour participer à ce programme, qui faisait partie de leur cursus universitaire et pour lequel ils ont reçu des crédits. Le comité de révision institutionnel a approuvé la procédure qui respectait toutes les recommandations éthiques et suivait la déclaration d'Helsinki. Tous les participants avaient une vision normale ou corrigée à normale. Aucun d'entre eux n'avait une expérience préalable avec la tâche.

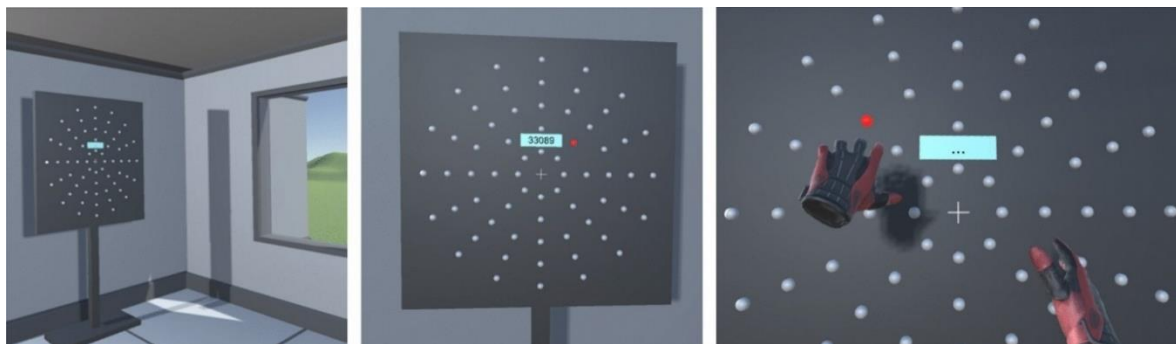


Figure 23 – Illustration de la tâche VMVR. À gauche : vue d'ensemble de l'environnement virtuel. Au milieu : illustration de la condition Cognitive de la tâche VMVR, avec les chiffres apparaissant sur l'écran LCD. À droite : point de vue du participant. Le point rouge est la cible à atteindre. Les gants rouges représentent les mains de l'utilisateur tenant les contrôleurs dans l'environnement virtuel.

VisuoMotor Virtual Reality Task (VMVR)

La tâche visuomotrice utilisée est une transposition de la tâche du Dynavision (D2, Dynavision International LLC, West Chester, OH) en réalité virtuelle. L'objectif est d'éteindre le plus rapidement possible des boutons lumineux s'allumant successivement en rouge sur un tableau de 120 cm × 120 cm. 64 boutons lumineux sont

disposés en cinq cercles concentriques (Figure 23). La hauteur du tableau est ajustée en fonction de la taille du participant, de telle sorte que ses yeux soient au niveau de l'écran LCD. Lorsqu'un bouton est touché, un signal sonore ainsi qu'une vibration dans la manette servent de retour à l'utilisateur. Au début, il est demandé au participant de se tenir à une distance telle qu'il puisse voir l'intégralité (ou la plus grande partie possible) du tableau tout en pouvant toucher les boutons sans avoir à se déplacer. Les essais durent chacun une minute. Les expériences ont été effectuées dans quatre configurations différentes.

- **Standard** : les boutons peuvent s'allumer à n'importe quel endroit sur le tableau. L'écran LCD est positionné au niveau des yeux du participant.
- **Cognitive** : la condition est similaire à Standard, mais des nombres à 5 chiffres sont affichés sur l'écran LCD du tableau et sont modifiés toutes les 5.5 secondes. Le participant doit énoncer à haute voix tous les chiffres affichés tout en continuant à appuyer sur les boutons.
- **Upper Visual Field (UVF, champ visuel haut)** : les boutons ne peuvent s'allumer que dans la partie haute du tableau, à l'exception des trois situés le plus haut. Le milieu du tableau est positionné au niveau des yeux du participant.
- **Lower Visual Field (LVF, champ visuel bas)** : même condition que UVF, mais les boutons ne s'allument qu'en bas, à l'exception des trois situés le plus bas.

Questionnaires

Avant d'effectuer la tâche visuomotrice en réalité virtuelle (VMVR) avec différentes modalités, les participants ont rempli un formulaire dans lequel ils ont renseigné des informations sur leur pratique sportive au cours de chacune des 3 dernières années, ainsi que sur leurs habitudes en matière de jeux-vidéos. Ils ont également rempli un questionnaire pour déterminer leur main dominante (Cohen, 2008; Oldfield, 1971). Immédiatement après la tâche VMVR, les participants ont rempli un autre formulaire pour décrire leur propre expérience et leurs sentiments pendant les tâches VR répétées, y compris une version traduite du Simulator Sickness Questionnaire (SSQ, version française, Bouchard et al., 2009).

Procédure

L'expérience s'est déroulée dans un environnement virtuel (Figure 23), développé par le CATIE (Centre Aquitain des Technologies de l'Information et

Électronique, Bordeaux, France) partenaire industrielle de la présente thèse CIFRE avec le logiciel Unity (Unity Technologies, San Francisco, USA), visualisé dans un casque HTC Vive Pro avec deux contrôleurs manuels (HTC America, Inc. Seattle, WA, USA). La position de chaque contrôleur dans l'environnement VR était affichée sous forme de gants virtuels, constituant ainsi un retour visuel.

L'ensemble de la procédure (y compris la familiarisation) a duré environ 15 minutes pendant lesquelles le participant est resté immergé dans l'environnement virtuel. La procédure consistait en deux passages dans chacune des conditions 'Standard', 'Cognitive', 'UVF' et 'LVF'. Les participants étaient prévenus des spécificités du mode dans lequel ils allaient effectuer la tâche.

En accord avec les recommandations précédentes pour la familiarisation (Wells et al., 2014), avant d'exécuter la tâche VMVR dans les différents modes, chaque participant a effectué deux tests d'une minute en mode Standard. Les participants avaient pour instruction d'atteindre de préférence les boutons de gauche avec la manette de gauche, et inversement.

Les sujets ont été répartis au hasard en huit groupes afin de randomiser l'ordre de passage dans les différents modes.

Mesures à partir des développements du logiciel Unity

Pendant les tâches, le logiciel enregistre le nombre de boutons touchés, leur position ainsi que le temps entre deux appuis successifs. Pour éviter un nombre excessif de cibles manquées, une zone de collision suffisamment large autour de la main virtuelle (contrôleur) a été mise en place. Lors de la tâche, il arrive que certains boutons soient touchés lorsque le participant repositionne sa main. Ces appuis involontaires sont détectés en repérant les temps de réponse inférieurs à 200 ms, trop courts pour être liés à une action volontaire. Le pourcentage moyen d'appuis involontaires pour chaque sujet, calculé sur l'ensemble des conditions, était inférieur à 3 % (2.1 ± 1.0 %, entre 0.3 et 4.2 %).

Les temps de réponse (RT) sont obtenus à partir de l'écart temporel entre deux appuis successifs sur les boutons. Par conséquent, les RT représentent (grossièrement) la combinaison d'un temps de réaction visuel (le temps nécessaire pour identifier le stimulus et initier une réaction) et d'un temps d'exécution moteur (le temps nécessaire pour atteindre la cible). La donnée exploitée dans la suite de l'étude est le temps de réponse moyen sur chaque répétition d'une minute.

Mouvements de la tête (HM) évalués par les capteurs du casque VR

Les mouvements de la tête ont été acquis à partir des capteurs du casque HTC Vive en utilisant le plugin SteamVR (Figure 24). La fréquence d'échantillonnage calculée à partir des données acquises est de 90.5 ± 5.5 Hz, similaire à la fréquence de

rafraîchissement de 90 Hz annoncée par le constructeur. Les données recueillies présentent une résolution spatiale de 1 mm. Le sujet restant globalement dans la même position au cours de la tâche, la zone de suivi est relativement petite. Dans cette configuration, l'erreur de position du HMD est inférieure à 10 mm, ce qui permet d'obtenir des données exploitables (Luckett, 2018; Niehorster et al., 2017). Nous avons recueilli les mouvements de la tête parallèles au plan du tableau virtuel (en 2D, le long des axes X et Y). Pour quantifier les mouvements de la tête, nous avons calculé l'ellipse de confiance à 95% (Figure 24) de la trajectoire de la tête. Les calculs de l'ellipse ont été effectués avec Matlab (Matlab 2019b, Matworks, Natick, MA, USA), conformément à certaines recommandations (Duarte, 2015), à partir de la projection des mouvements de la tête dans le plan frontal en deux dimensions.

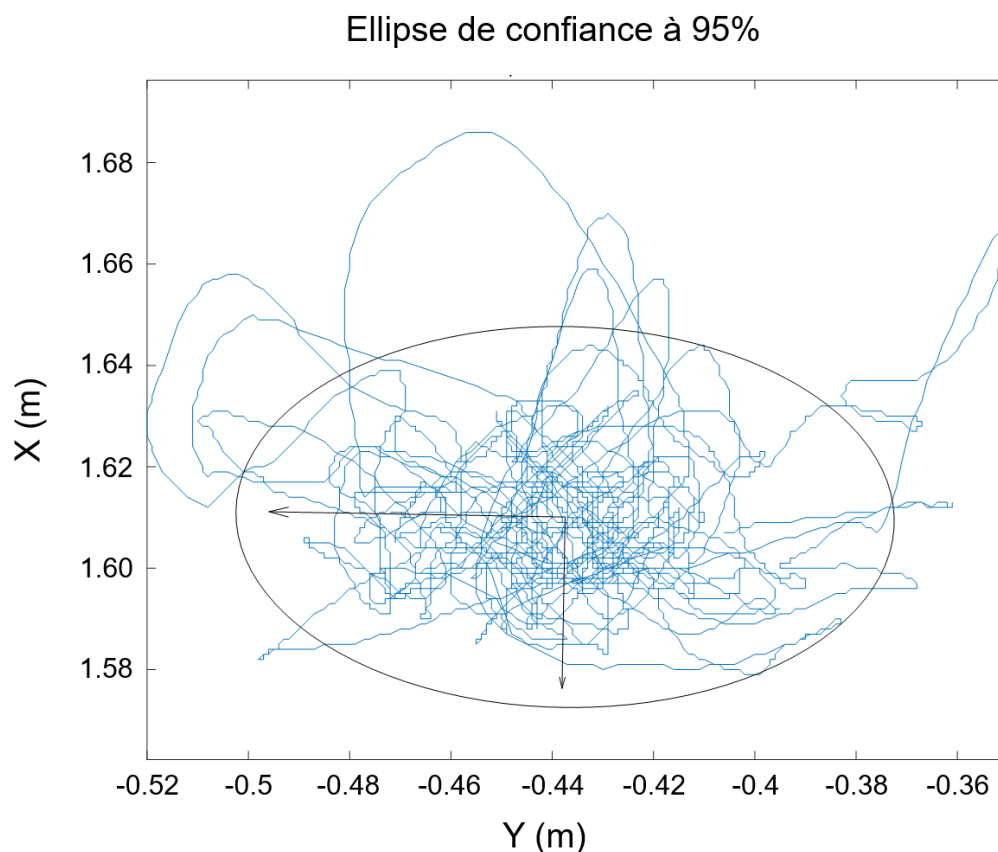


Figure 24 – Mouvements de tête et ellipse à 95%. Données obtenues dans la condition Standard.

Statistiques

La normalité de la distribution des temps de réponse (RT) dans chaque condition a été évaluée à l'aide du test de Shapiro-Wilk. Les RT et les mouvements de la tête (HM) ont été calculés pour chaque mode pendant le test et le retest, et sont exprimés en moyenne \pm SD. En plus des RT obtenus pour chaque condition, nous

avons moyenné les données obtenues pour obtenir un indicateur de performance 'Mixte' (voir Tableau 2).

Fiabilité test-retest

- **t-tests** : des tests t d'échantillons appariés ont été utilisés pour comparer les RT et les HM entre les tests et les retests dans chaque condition (Standard, Cognitive, UVF, LVF et Mixte).
- **ICC** : la fiabilité test-retest a été évaluée à l'aide du coefficient de corrélation intraclasse (*Intraclass Correlation Coefficient* - ICC), de l'erreur standard de mesure (SEM) et des graphiques de Bland-Altman (Kottner et al., 2011; Weir, 2005). Alors que les études précédentes de Dynavision utilisaient la version 3.1 (Klavora et al., 1995a, 1994; Wells et al., 2013), il semblerait que la version 2.1 de l'ICC, considérant les effets des essais comme un facteur aléatoire, soit un meilleur choix (Wells et al., 2014). En suivant les indications et les directives précédentes (Koo and Li, 2016), nous avons choisi un modèle de concordance absolue à deux voies, aléatoire et à mesure unique (ICC_{2.1}). Les valeurs inférieures à 0.5 indiquent une mauvaise fiabilité, des valeurs entre 0.5 et 0.75 une fiabilité modérée, des valeurs entre 0.75 et 0.9 une bonne fiabilité et des valeurs supérieures à 0.9 une excellente fiabilité. L'ICC_{2.1} a été calculé à l'aide de Matlab, en utilisant un algorithme (Salarian, 2020).
- **SEM** : l'erreur standard par rapport à la moyenne (SEM) et le SEM% (exprimé en pourcentage de la moyenne) ont été utilisés pour montrer la dispersion des scores mesurés autour d'un "vrai score". Le SEM a été calculé à partir des valeurs des ICC_{2.1} (Weir, 2005) :

$$SEM = SD\sqrt{1 - ICC_{2.1}}$$

SD représentant l'écart-type des scores de tous les sujets pour les deux essais.

- **SEM%** : l'indicateur SEM% a été obtenu en divisant le SEM par les RT moyens de tous les sujets pour chaque condition.
- **Graphiques de Bland-Altman** : pour évaluer la concordance entre les résultats du test et du retest, des graphiques de Bland-Altman ont été construits pour chaque condition en traçant la différence entre chaque test par rapport à la différence moyenne. Tous les calculs statistiques ont été effectués avec Matlab et XLSTAT (Addinsoft, 2019, XLSTAT statistical and data analysis solution, Long Island, NY, USA).

Analyse factorielle des données mixtes

Les analyses factorielles (analyse en composantes principales, ACP, et classification hiérarchique sur composantes principales, CHCP) ont été réalisées à l'aide du logiciel R (R Core Team, 2020). Dans un premier temps, une ACP mixte incluant des variables qualitatives et quantitatives a été réalisée. Seules les valeurs propres supérieures à 1 (le facteur contient la même quantité d'informations qu'une seule variable) et répondant à la règle de Kaiser (l'approche la plus couramment utilisée pour sélectionner le nombre de composantes) ont été retenues.

La CHPC a été réalisée à partir des dimensions de l'ACP. La CHPC permet de délimiter des groupes d'individus ayant des caractéristiques communes. L'arbre hiérarchique utilise le critère de Ward qui consiste en une série d'étapes agglomératives. Les sujets ont été successivement combinés en clusters, qui maximisent à la fois l'homogénéité interne (variation à l'intérieur du cluster) et l'hétérogénéité externe (variation entre clusters) ("A Review of Clustering Methods," 1984). Cette méthode est basée sur la fonction objective connue sous le nom de somme des carrés à l'intérieur du groupe ou somme des carrés de l'erreur. Dans la méthode de CHPC de Ward, le cluster émergent est déterminé par la plus petite augmentation de la somme des carrés de la distance euclidienne, réduisant ainsi la perte d'information qui est inévitablement associée à la fusion des clusters.

Résultats

Acceptabilité de la tâche basée sur la VR

Lors de la tâche, nous avons obtenu des scores assez bas pour le Simulator Sickness Questionnaire (SSQ) (6.8 ± 4.1 , entre 0 et 20), sachant que des scores > 10 indiquent des symptômes significatifs, des scores > 15 sont inquiétants, et des scores > 20 indiquent un problème de simulateur (Kennedy et al., 1993). Seuls 7 des 64 participants ont obtenu un score > 10 , et aucun n'a obtenu un score > 20 . Les scores des sous-échelles du SSQ sont de 2.4 ± 1.8 (entre 0 et 8) pour 'Nausée', et de 4.3 ± 2.9 (entre 0 et 14) pour 'Oculomoteur'.

Des tests de corrélation n'ont pas trouvé de lien entre le type de sport pratiqué et le cybermalaise généré (tableau 1). Le sexe n'a pas eu d'effet non plus (femmes 7.2 ± 3.8 , hommes 6.3 ± 4.5 , $p = 0.40$).

Condition/score	Oui	Non	p-value
Sport collectif/SSQ	6.3 ± 3.6	7.1 ± 4.5	0.41
Sport de balle/SSQ	6.3 ± 3.6	7.2 ± 4.7	0.40
Jeux vidéo/SSQ	5.7 ± 4.1	7.6 ± 4.0	0.08
Jeux vidéo/Nausée	2.1 ± 2.0	2.7 ± 1.7	0.18
Jeux vidéo/Occulomoteur	3.6 ± 2.8	4.9 ± 2.9	0.09

Tableau 1 - Relations entre la pratique sportive et de jeux vidéos et le cybermalaise ressenti pendant l'expérience

En s'intéressant aux caractéristiques individuelles en lien avec les performances, nous n'avons pas trouvé de corrélation entre les scores du SSQ et les RT ($r = 0.065$, $p = 0.612$).

Temps de réponse visuomoteurs (RT)

Les tests de Shapiro-Wilk ont indiqué une distribution normale des données dans chaque condition ($p > 0.53$ dans chaque condition). Une ANOVA avec mesures répétées a montré des RT différents dans les quatre conditions ($F = 267.1$, $p = 6 \times 10^{-78}$). Les tests post-hoc de Bonferroni ont montré que les RT sont différents dans chacun des modes (Cognitive > Standard > UVF > LVF, $p < 0,002$ pour chacune des comparaisons).

	UVF	LVF	Standard	Cognitive	Mixed
Temps de réponse (RTs)					
Test (ms)	610.8	573.3	779.2	1001.3	702.8
Retest (ms)	607.2*	564.1	784.6	974.0*	695.3*
ICC _{2.1}	0.913	0.846	0.855	0.748	0.944
SEM (ms)	21.85	21.89	39.48	72.08	16.68
SEM %	3.59	3.85	5.05	7.30	2.39
Mouvements de tête (HMs, ellipse à 95%)					
Test (mm ²)	4333.4	3202.2	13,228.4	13,949.2	8678.3
Retest (mm ²)	4195.3	3086.6	13,716.7	13,352.3	8587.7
ICC _{2.1}	0.887	0.891	0.883	0.891	0.965
SEM (mm ²)	956.3	856.4	2375.2	2288.2	747.8
SEM %	22.4	27.2	17.6	16.8	8.7

Tableau 2 - Temps de réponse obtenus dans les différences conditions, et indicateurs statistiques associés pour caractériser la fiabilité test-retest.

Concernant la fiabilité test-retest, des RT similaires entre le test et le retest ont été mis en évidence en utilisant des test-t avec échantillons appariés (Tableau 2) en mode Standard ($p = 0.439$) et LVF ($p = 0.350$) ; une amélioration légère, mais significative de la performance (diminution des RT) pendant le retest a été observée

pour les modes UVF ($p = 0.017$) et Cognitive ($p = 0.033$). Par conséquent, les scores globaux de RT individuels (mixtes) obtenus en faisant la moyenne des scores obtenus dans tous les modes étaient légèrement meilleurs pendant le nouveau test ($p = 0.010$). Ce résultat était attendu puisqu'il a été conseillé d'effectuer 2 à 3 sessions d'entraînement avant le test définitif si l'on veut supprimer les effets à court terme de l'accoutumance au test (Stone et al., 2019; Wells et al., 2014).

Mouvements de la tête (HMs)

Les tests de Shapiro-Wilk pour les mouvements de la tête (ellipse de confiance à 95 %) ont montré une absence de normalité dans la distribution des échantillons (toutes les valeurs $p < 0.01$). Par conséquent, un test ANOVA de Kruskal-Wallis a été utilisé et a montré que les mouvements de la tête étaient différents selon les conditions ($\text{Chi}^2 = 158.1, p = 5 \times 10^{-34}$). Les tests post-hoc de Bonferroni ont indiqué des HM plus faibles en UVF et LVF par rapport aux conditions Standard et Cognitive (toutes les valeurs $p < 0.001$) ; cependant, il n'y avait pas de différence entre les conditions UVF et LVF ($p = 0.3$) et entre les conditions Standard et Cognitive ($p = 1.0$). En résumé, les mouvements de tête sont distribués comme suit : Standard = Cognitif > UVF = LVF.

Temps de réponse (RT) vs mouvements de tête (HM)

Il n'existe pas de corrélation entre les RT et les HM, et ce dans chaque condition (tous les $r < 0.2$ et $p > 0.10$).

Fiabilité test-retest entre les RT et les MH

Le niveau de fiabilité test-retest pour les RT a été évalué comme bon en Standard ($\text{ICC}_{2.1} = 0.855$) et en LVF ($\text{ICC}_{2.1} = 0.846$), excellent en UVF ($\text{ICC}_{2.1} = 0.913$), et modéré en Cognitive ($\text{ICC}_{2.1} = 0.748$). Dans l'ensemble, les RT mesurés ont démontré une excellente fiabilité test-retest (Mixte, $\text{ICC}_{2.1} = 0.944$).

Dans le même ordre d'idées, les HM quantifiées par des ellipses de confiance à 95 % ont montré une bonne fiabilité test-retest dans toutes les conditions, comme en témoignent les coefficients $\text{ICC}_{2.1} > 0.88$ (Tableau 2). Il en résulte une excellente fiabilité test-retest lorsque l'on considère les performances en mode mixte (mixte, $\text{ICC}_{2.1} = 0.965$), ce qui prouve la robustesse de l'utilisation des HM en tant que nouvel indice pour explorer les stratégies visuelles et perceptives.

Diagrammes de Bland-Altman

Les diagrammes de Bland-Altman ont pour but d'identifier des valeurs aberrantes ou des biais dans la mesure des temps de réponse. Ici, on observe un faible nombre de valeurs aberrantes (en dehors de l'intervalle de confiance de 95%) dans chaque mode de la tâche VMVR. Plus important encore, en ce qui concerne le biais,

pour évaluer la concordance entre le test et le retest, la méthode examine la moyenne des différences entre les données appariées, qui est idéalement égale à zéro et quantifie autrement un biais. La figure 25 montre que la valeur idéale zéro se situe à l'intérieur de l'intervalle de confiance de 95 % de la valeur moyenne du biais, ce qui indique une bonne concordance entre le test et le retest. Une inspection visuelle du biais et des limites de confiance montre que les données, en particulier dans les conditions Standard et Mixte, indiquent une bonne concordance.

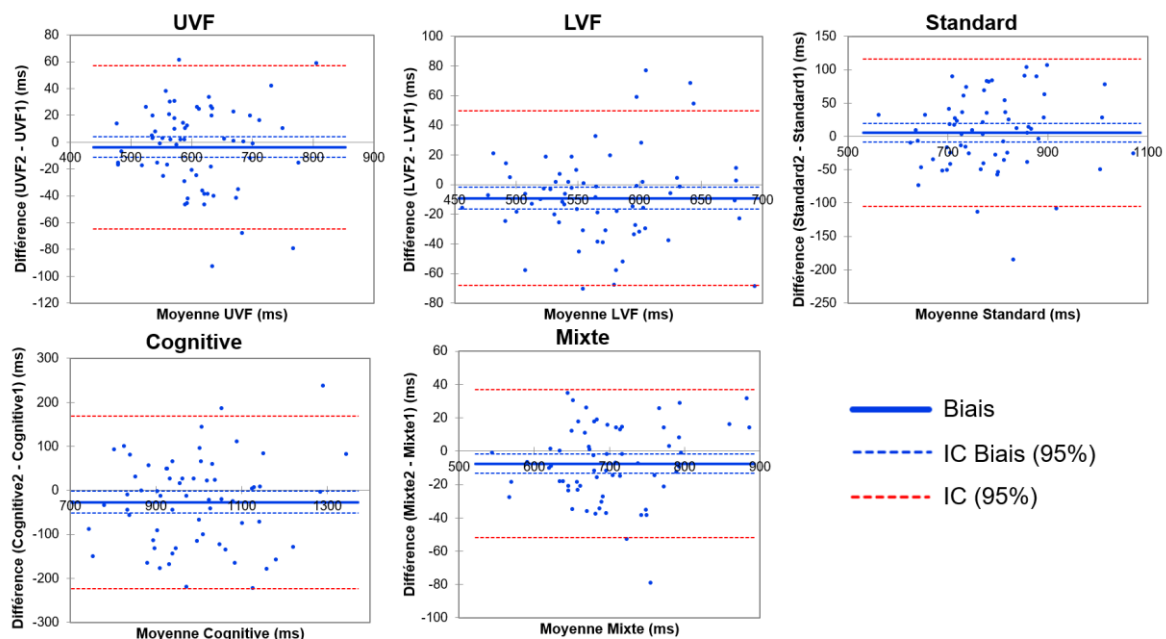


Figure 25 – Graphiques de Bland-Altman pour le test et le retest dans chaque mode

Analyse en composantes principales de données mixtes

Deux dimensions ont été retenues pour l'ACP, qui expliquent respectivement 21% et 15% de la variance totale (Figure 26). Les contributions les plus importantes de la dimension 1 sont les temps de réponse (RT), principalement dans les conditions UVF et Standard. Afin de mettre en valeur les meilleures performances, les performances sont représentées par $1/RT$. De la même manière, des valeurs plus élevées pour les HM représentent des mouvements de tête plus importants. Parmi les autres variables, les hommes (sexe = 1), la taille et la masse ont contribué de manière significative à la dimension 1 (Figure 26, panneau inférieur). Cela indique que les hommes globalement grands ont tendance à être les plus performants et les femmes de petite taille les moins performantes. Les contributions les plus élevées à la dimension 1 dans l'ACP sont les mouvements de la tête (HM). L'orthogonalité entre les dimensions 1 et 2 dans l'ACP indique une absence de covariation entre les RT et les HM. Il convient de noter que l'activité physique (dans notre population physiquement entraînée) et le cybersickness ont très peu contribué à la variance totale.

Classification hiérarchique sur les composantes principales (CHCP)

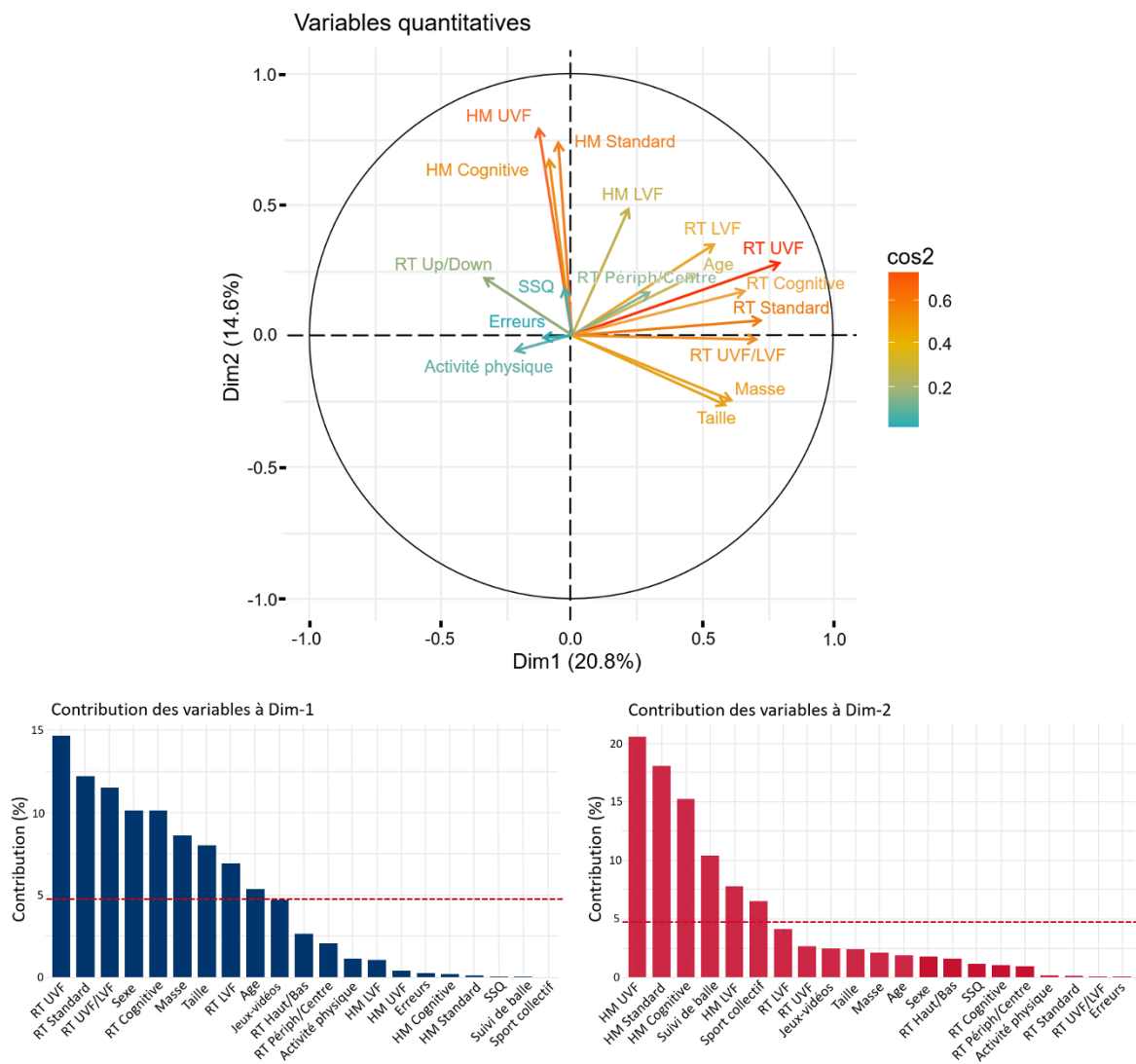


Figure 26 – Analyse en composantes principales. En haut : Analyse en composantes principales des données avec les deux dimensions principales projetées sur des axes orthogonaux. Les performances (RT) dans chaque mode représentent la moyenne test-retest exprimée en $1/RT$, de sorte qu'une valeur élevée indique une meilleure performance. Les HM représentent l'ellipse de confiance à 95% moyennée sur le test et le retest pour les mouvements de la tête dans chaque mode. L'activité physique est exprimée comme le nombre d'heures de pratique hebdomadaire. Erreurs indique le nombre de mauvaises réponses pendant la condition Cognitive. Les indicateurs RT Périph/Centre et RT Haut/Bas représentent les performances dans les cercles périphériques par aux autres localisations, et le rapport entre les RT pour les stimuli apparaissant dans les moitiés haute et basse du tableau dans les condition Standard + Cognitive. Seules les variables quantitatives sont représentées. Les valeurs plus élevées pour chaque variable sont réparties positivement le long des axes. En bas : contribution de chaque variable aux deux premières dimensions de l'ACP mixte. La ligne pointillée correspond à la valeur attendue de chaque variable si leur contribution était uniforme.

Variable quantitative	v.test	p.value	Qualitative Var	v.test	p.value	Cla/Mod	Mod/Cla	Global
Cluster 1								
HM cognitive	5.0	0.000	Aucune					
HM standard	4.8	0.000						
HM UVF	4.3	0.000						
RT standard	- 3.4	0.001						
RT haut/bas	3.2	0.001						
HM LVF	2.8	0.004						
RT cognitive	- 2.5	0.012						
RT UVF	- 2.4	0.015						
RT LVF	- 2.2	0.028						
Cluster 2								
Taille	- 4.5	0.00001	Femmes	5.7	1.15E-08	63	100	50
RT UVF/LVF	- 3.3	0.00113	Jeux-vidéos = Non	3.1	1.81E-03	47	85	56
RT UVF	- 3.0	0.00239						
HM standard	- 3.0	0.00265						
Masse	- 3.0	0.00275						
Age	- 2.9	0.00349						
HM cognitive	- 2.8	0.00485						
HM LVF	- 2.7	0.00698						
RT standard	- 2.1	0.03857						
Cluster 3								
Taille	5.0	0.0000005	Hommes	6.1	8.56E-10	75	96	50
Masse	3.7	0.0002304	Jeux-vidéos = Oui	4.7	3.28E-06	71	80	44
HM UVF	- 3.2	0.0014187	Suivi de balle = Oui	2.2	2.95E-02	51	72	55
RT UVF/LVF	2.6	0.0084472						
HM standard	- 2.2	0.0298603						
HM cognitive	- 2.1	0.0340746						
Cluster 4								
RT UVF	4.9	0.000001	Suivi de balle = Oui	2.6	0.009992	31	82	45
RT LVF	4.8	0.000002	Sport collectif = Non	2.0	0.042034	26	82	53
RT standard	3.8	0.000175						
Age	3.6	0.000280						
RT cognitive	3.6	0.000318						
HM UVF	2.6	0.009153						

Tableau 3 – Description des clusters en termes de variables qualitatives. La colonne 'v.test' représente la valeur statistique utilisée pour déterminer la signification des variables décrivant le groupe (une valeur positive indique une surreprésentation de la modalité considérée ; une valeur négative représente une sous-représentation). La colonne 'Cla/Mod' indique le pourcentage de tous les individus ayant cette modalité dans ce groupe. Par exemple, près de 63% des femmes se trouvent dans le cluster 2. La colonne 'Mod/Cla' indique le pourcentage de tous les individus du groupe qui ont cette modalité. Par exemple, 100% des sujets classés dans le cluster 1 sont des femmes. La colonne 'Global' indique le pourcentage de sujets de la population totale ayant cette modalité.

La CHPC a permis de construire quatre clusters (Figure 27 et Tableau 3), regroupant des participants largement similaires les uns aux autres. Les clusters sont positionnés par rapport aux dimensions 1 et 2 de l'ACP. La position individuelle des participants par rapport aux dimensions (axes orthogonaux) indique les contributions respectives des RT (principal contributeur de la dimension 1) et des HM (principaux contributeurs de la dimension 2) dans les phénotypes identifiés par les clusters de l'ACP.

Le cluster 1 est composé de personnes bougeant beaucoup la tête et ayant des temps de réponse assez faibles.

Le cluster 2 est composé de personnes bougeant peu la tête et ayant des performances assez faibles. Comme le montre le tableau 3, les personnes composant ce cluster sont des femmes, de petite taille et rencontrant des difficultés à performer dans l'espace visuel haut (UVF).

Le cluster 3 est composé majoritairement d'hommes, grands, jouant aux jeux vidéo et pratiquant des sports de balle, bougeant peu la tête.

Le cluster 4 est composé de sujets pratiquant des sports individuels dans lesquels il n'y a pas de cibles à suivre, et performant mieux que la moyenne.

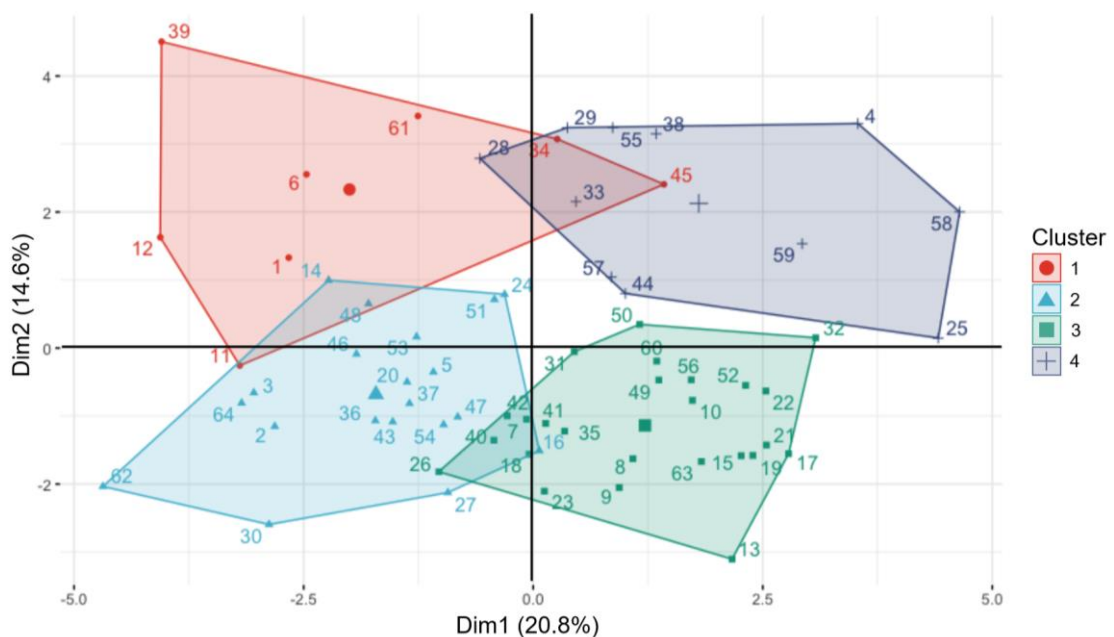


Figure 27 - Cartographie des clusters en fonction des axes de l'ACP. Les individus sont numérotés et colorés en fonction de leur cluster. Le barycentre de chaque cluster est représenté par un grand symbole.

Discussion

La principale conclusion de l'étude 1 est que la tâche visuomotrice implémentée en réalité virtuelle (VMVR), inspirée de la tâche du Dynavision, permet d'évaluer de façon fiable et répétable des temps de réponse visuomoteurs ainsi que les mouvements de tête associés. Ces indices sont essentiels pour l'exploration des phénotypes visuomoteurs, comme le montre l'analyse en composantes principales associée à la classification hiérarchique en composantes principales. Il est important de noter que l'implémentation de cette tâche en réalité virtuelle ne génère pas un cybermalaise trop important, et que ce dernier n'est pas corrélé aux performances ou aux mouvements de tête. La tâche présentée ici, utilisée pour mesurer de façon fiable et répétable des temps de réaction, est couplée aux intérêts de la réalité virtuelle, pour proposer un outil transportable, peu coûteux et adaptable. Ce dispositif pourrait trouver un intérêt chez les thérapeutes, les cliniciens ou encore les entraîneurs.

Dans une première étape de l'étude, nous avons évalué la fiabilité test-retest parmi les principales mesures. Les calculs de l'ICC_{2,1}, du SEM et du SEM% ont démontré une bonne fiabilité test-retest, en accord avec les résultats obtenus avec un dispositif réel (Wells et al., 2014). Pour la condition Standard, les études précédentes ont trouvé des SEM de 21 ms (Wells et al., 2013) et 43 ms (Wells et al., 2014), ce qui est en accord avec les valeurs obtenues ici en réalité virtuelle (39.5 ms).

Il est intéressant de noter que les temps de réponse mesurés ici en réalité virtuelle sont légèrement plus élevés que ceux obtenus avec un dispositif réel. Wells et al. (2014) ont obtenu des RT moyens de 755 ms et 710 ms dans la condition Standard, ce qui représente des temps plus rapides de 3 à 10% par rapport à ceux obtenus dans cette étude (Tableau 2). Ces résultats sont en accord avec de précédentes études s'intéressant au temps passé pour atteindre des cibles en réalité virtuelle, mettant en évidence une phase de décélération plus longue en fin de mouvement (Just et al., 2016). Le fait que le participant s'adapte à cette particularité de l'environnement virtuel au cours de l'expérience (Just et al., 2016) explique probablement la légère amélioration des performances lors du retest. Ce phénomène se produit principalement lors des conditions les plus difficiles (ici Cognitive et UVF), avec une diminution plus marquée des RT lors du retest. Dans l'ensemble, ces observations soulignent le fait qu'il est nécessaire de réaliser au moins deux essais d'entraînement dans l'environnement virtuel pour mesurer des temps de réponse visuomoteurs.

Les mesures des temps de réponse, associés aux mouvements de tête et aux caractéristiques individuelles, permettent d'effectuer une analyse plus fine des capacités visuomotrices des sujets. Cette méthode apporte des avantages pour la détection de signaux faibles de troubles neurologiques (Carment et al., 2020) ou le suivi des progrès dans les programmes de rééducation (Klavora and Warren, 1998) et d'entraînement à la vision (Ong, 2018).

Nous avons montré que dans notre population, les performances de temps de réponse ne sont pas corrélées aux mouvements de la tête, montrant l'existence de différentes stratégies. En théorie, l'alignement des yeux et de la tête empêche la division des ressources attentionnelles lors du traitement attentif dans la recherche visuelle (Nakashima and Shioiri, 2014), et doit donc améliorer les performances. Ici, cette observation n'est pas vérifiée, ce qui est sans doute lié à des stratégies individuelles différentes en termes d'utilisation de la vision périphérique, un paramètre notamment déterminant dans la conduite de véhicule (Klavora et al., 2000, 1995b) ou la rééducation suite à une commotion cérébrale (Clark et al., 2017). L'usage de technologies d'oculométrie pourrait permettre d'améliorer notre compréhension de ces phénomènes. Malgré tout, un certain nombre de facteurs covarient ici avec l'usage de la vision périphérique, reflétée par des mouvements de tête plus faibles. Les individus jouant aux jeux vidéo bougent généralement peu la tête, ce qui fait écho à des études antérieures montrant un lien entre la pratique de jeux vidéo d'action et l'amélioration de la vision périphérique (Chopin et al., 2019) ainsi que la prise de décision (Pavan et al., 2019). De plus, les participants pratiquant des sports collectifs et de suivi de balle sont majoritairement des individus bougeant peu la tête, soutenant l'hypothèse selon laquelle ces pratiques sportives développent la vision périphérique.

Un dimorphisme sexuel a été rapporté dans l'utilisation de la tâche en conditions réelles, sans pour autant être expliqué (Klavora and Esposito, 2002). Ici, les participants féminins présentent globalement des temps de réponse plus longs. Nous avons observé que les participants les plus petits montraient des difficultés à atteindre les boutons les plus éloignés dans nos conditions, et se rapprochaient spontanément du tableau virtuel de 1.2×1.2 m, diminuant alors leur champ de vision périphérique. Cela pourrait représenter un problème méthodologique. Dans ce domaine, l'utilisation de la réalité virtuelle peut apporter des améliorations grâce à la flexibilité de l'affichage. Le tableau virtuel pourrait s'adapter à la taille du sujet, pour permettre une évaluation plus personnalisée des facultés visuomotrices.

La population utilisée pour cette expérience est jeune et en bonne santé. Chez ces personnes, lire et prononcer des chiffres à haute voix tout en continuant la tâche ne semble pas imposer de contrainte trop importante. Imposer une contrainte cognitive a préalablement été utilisé pour distinguer des déficiences visuomotrices dans l'autisme et la schizophrénie (Carment et al., 2020). L'intérêt d'utiliser cette tâche en réalité virtuelle réside aussi dans le fait que les stimulations peuvent être adaptées à l'utilisateur. En particulier, le niveau de difficulté de la condition Cognitive peut être ajusté en fonction de la population, en imposant des contraintes plus élevées chez des participants jeunes et sportifs, et moins contraignantes pour des sujets âgés ou pathologiques par exemple.

Conclusion

Cette première étude a permis de montrer l'utilisabilité de la tâche de Dynavision en réalité virtuelle (VMVR). En montrant une bonne fiabilité test-retest, à la fois sur les temps de réponse (RT) et sur les mouvements de la tête (HM), nous pouvons affirmer que les performances recueillies sont un marqueur des capacités visuomotrices d'un individu. Le fait que cette tâche induise un cybermalaise relativement faible est un atout supplémentaire pour son utilisation. Enfin, l'utilisation des mouvements de la tête couplés aux caractéristiques individuelles des participants permet de construire différents profils visuomoteurs, qui pourraient se révéler utiles pour des applications cliniques, la recherche en psychophysiologie ou encore l'entraînement sportif.

Toutefois, il faut garder en mémoire que, comme pour toutes les expériences qui seront présentées dans ce manuscrit, les résultats ont été obtenus auprès de jeunes sportifs en bonne santé, et qu'ils ne sont pas automatiquement transférables à d'autres types de population.

Étude 2 – La multifractalité des mouvements des mains comme marqueur d’adaptation

Objectifs

Après avoir développé et validé la tâche de mesure de temps de réponse visuomoteurs en VR, nous avons exploré la dynamique complexe des mouvements des mains.

L’objectif principal est de démontrer que les mouvements des mains obtenus lors de cette tâche présentent de la multifractalité, et que les indicateurs obtenus évoluent en fonction des contraintes imposées au système visuomoteur, en signe d’adaptation à la difficulté perçue de la tâche.

Introduction

Au-delà d’une apparente simplicité, l’action de localiser une cible et de l’atteindre nécessite la coordination de nombreux éléments des systèmes visuels et moteurs. Dans le cadre d’une tâche de temps de réponse visuomoteurs, telle que la tâche du Dynavision présentée précédemment, il est assez courant de découper le temps de réponse en trois périodes distinctes : le temps de réaction, le temps nécessaire à convertir la perception en commande motrice et le temps d’exécution motrice (Hülsdünker et al., 2016). Toutefois, cette approche, bien qu’elle soit largement répandue et ait permis d’obtenir des résultats intéressants dans certains sports, est potentiellement un peu réductrice. En effet, découper le temps de réponse en actions réalisées par des composants distincts est une approche ‘composant-dominante’, en opposition aux approches ‘interaction-dominantes’ utilisées dans le cadre des analyses de complexité. Si le système visuomoteur était une succession de composants encapsulés se donnant des ordres, le signal de sortie (ici, le mouvement des mains) devrait présenter une fréquence unique correspondant au système le plus lent, ou bien différentes bandes de fréquences localisées correspondant aux quelques éléments agissant comme générateurs de timing. Or, le spectre des mouvements des mains ne montre pas de pic de fréquence unique, et ressemble plus à un bruit rose (jusqu’à une fréquence de 20 Hz environ), ce qui suppose la présence d’interactions entre les différents composants impliqués dans l’exécution de la tâche (Figure 28).

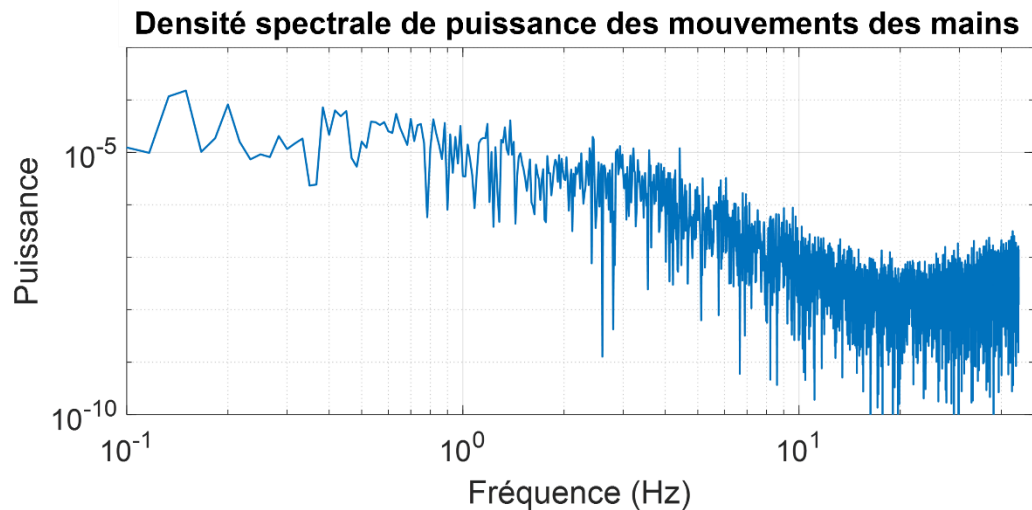


Figure 28 – Densité spectrale des mouvements de la main. Main dominante, condition Upper Visual Field (les boutons ne peuvent s’allumer que dans l’espace haut).

Prêter attention aux interactions entre les composants d’un système plutôt qu’à leur activité séparée est supposé permettre de mieux décrire l’émergence de nouvelles structures cognitives au cours d’une tâche (Anastas et al., 2014; Dixon et al., 2012; Wijnants, M.L., 2014). La capacité du système complet à s’adapter à de nouvelles contraintes (dans cette expérience, les différents espaces visuels utilisés) dépend alors des interactions entre ses composants agissants à différentes échelles temporelles. Pour analyser cette faculté d’adaptation, le formalisme multifractal s’est récemment révélé être une approche robuste, permettant de quantifier les interactions non-linéaires qui façonnent la flexibilité des systèmes (Bell et al., 2019; Carver et al., 2017; Ihlen and Vereijken, 2013a; Torre et al., 2019).

Dans le cas présent, le formalisme multifractal sera appliqué à l’analyse des mouvements des mains, pour lesquels les indicateurs issus de la complexité ont été utilisés ces dernières années comme marqueurs d’expertise ou d’adaptation (Anastas et al., 2014; Likens et al., 2017; Nonaka and Bril, 2014). Ici, l’analyse est appliquée à des mouvements des mains densément échantillonnés, et portera donc sur des échelles de temps assez courtes. Selon l’hypothèse de la tenségrité multifractale, les comportements observés aux échelles de temps courtes présentent une bonne corrélation avec les échelles de temps plus longues et les contraintes globales de la tâche (Anastas et al., 2014; Kelty-Stephen et al., 2021b; Mangalam et al., 2020a, 2020c, 2020b; Palatinus et al., 2013).

Pour faire varier la contrainte imposée au système visuomoteur et observer des mécanismes d’adaptation correspondants, la tâche VMVR sera utilisée en considérant les espaces visuels bas (LVF), haut (UVF) ainsi que le tableau entier (Standard). Pour faire écho aux résultats de l’étude 1, des temps de réponse plus courts sont observés lorsque les participants doivent réagir à des stimuli présentés dans l’espace bas

comparativement à ceux présentés dans l'espace haut. Cet avantage de l'espace bas par rapport à l'espace haut a déjà été mis en évidence dans des études précédentes, et ce déséquilibre peut être compensé par l'entraînement (Stone et al., 2019). D'un point de vue biologique, cet avantage de l'espace visuel bas provient de processus liés à l'évolution, encourageant les comportements d'alimentation (Milner and Goodale, 2006), et dont les origines rétiniennes (Curcio and Allen, 1990) et neuronales (Maltempo et al., 2021; Rossit et al., 2013) ont été identifiées. De ce fait, manipuler le champ de recherche visuel induit une contrainte plus ou moins grande sur le système visuomoteur, provoquant des adaptations nécessaires à l'utilisateur pour effectuer la tâche.

Dans cette étude, l'objectif sera donc de déterminer comment la multifractalité peut être utilisée comme marqueur des adaptations liées à des contraintes plus ou moins élevées appliquées sur le système visuomoteur. Dans le cadre du projet plus global de ce travail de thèse, cette étude a notamment pour but de démontrer que les mouvements des mains échantillonnés à haute fréquence dans le cadre de la tâche VMVR présentent de la multifractalité.

Matériel et méthodes

Participants

Les données ont été analysées à partir des 64 participants de la première étude. Les données de deux participants étaient corrompues, et trois autres participants ont été identifiés comme outliers lors de l'analyse multifractale. Les résultats portent donc sur les données de 59 participants (32 femmes, 27 hommes, 19.0 ± 1.8 ans (entre 18 et 25), 1.71 ± 0.09 m, 63.3 ± 9.5 kg, 5 gauchers).

Procédure

La procédure et la tâche sont les mêmes que celles utilisées dans l'expérience précédente. Les résultats se concentreront sur l'analyse des données issues des conditions Standard (les boutons peuvent s'allumer partout sur le tableau), UVF (les boutons ne peuvent s'allumer que dans la moitié haute du tableau) et LVF (les boutons ne peuvent s'allumer que dans la partie basse).

Acquisition des mouvements des mains

Dans chaque condition, les mouvements des mains ont été acquis à partir des déplacements des contrôleurs HTC Vive en utilisant le plugin SteamVR. Les positions instantanées des contrôleurs ont été échantillonnées à 90 Hz avec une résolution spatiale de 1mm. Les séries temporelles des mouvements de chaque main ont été calculées via la distance euclidienne entre chaque paire de points consécutifs

(combinant ainsi les axes x , y et z). Sur la base des résultats du questionnaire de latéralité, les données provenant des mains gauche et droite ont été correctement étiquetées comme provenant de mains 'dominantes' et 'non-dominantes'. L'analyse des données a été réalisée à l'aide de Matlab (Matlab 2019b, Matworks, Natick, MA, États-Unis).

Prétraitement des signaux

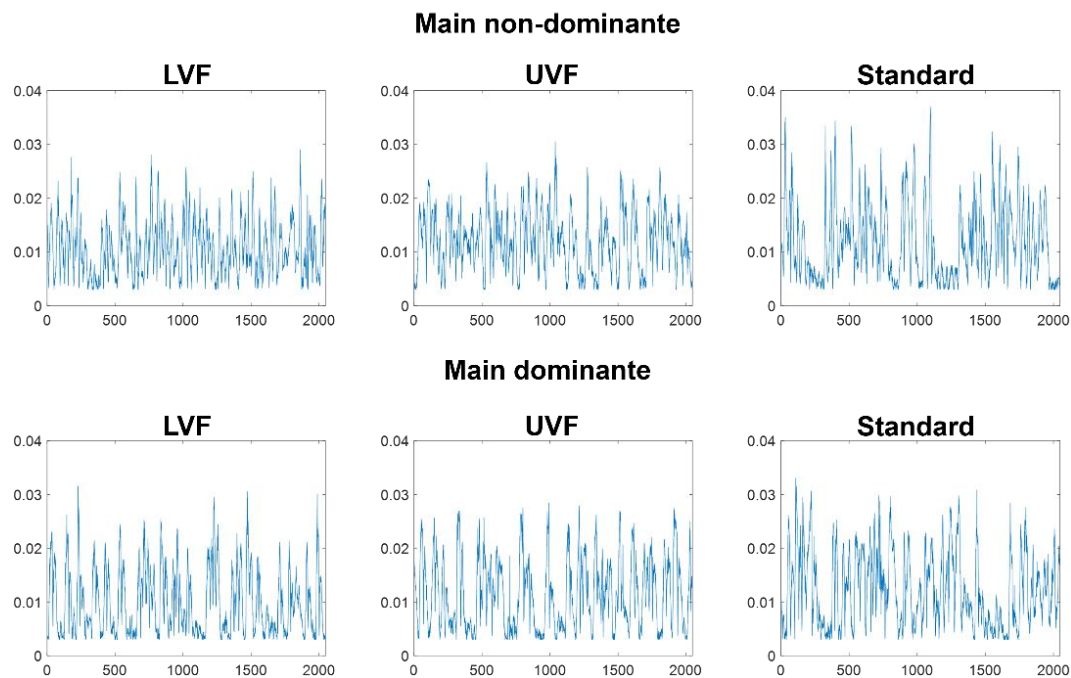


Figure 29 – Exemple de signaux de mouvement des mains. Distance entre deux points successifs par rapport au temps, pour un participant, dans les conditions LVF, UVF et Standard, avec les mains dominante et non-dominante.

Les signaux ont d'abord été traités en enlevant chaque déplacement inférieur à la résolution spatiale de l'appareil de mesure (ici, 3 mm pour des déplacements dans l'espace 3D). Cette première étape a pour effet de supprimer certains instants lors desquels les mains ne se déplacent pas. Ensuite, 2048 points ont été conservés dans chaque série temporelle (test et retest pour Standard, UVF et LVF, avec les mains dominante et non-dominante). Des exemples de signaux sont présentés sur la figure 29.

Multifractalité dans les mouvements des mains

L'analyse multifractale des mouvements des mains a été réalisée avec la méthode FMF-DFA présentée dans le chapitre introductif.

Pour les signaux de déplacement des mains en 3D utilisés ici, la méthode est utilisée avec des valeurs de q allant de -15 à +15, et des échelles d'observations allant de 16 à 256 (N/8) points. Du fait de l'incertitude de mesure liée au dispositif utilisé, les échelles inférieures à 16 points ont tendance à présenter une forte quantité de bruit blanc, ce qui crée un crossover dans la méthode DFA et biaise les résultats de l'analyse multifractale. De même, nous utilisons N/8 plutôt que N/4 comme taille de boîte maximale pour éviter d'éventuels drifts de position mesurée.

Enfin, concernant le nombre d'exposants q utilisés, il a été choisi à la fois en accord avec des expériences précédentes utilisant des données physiologiques (Nagy et al., 2017; Racz et al., 2018b, 2018a), et aussi par la forme sigmoïdale de la représentation des exposants de Hurst en fonction de q . Cette forme suggère que la quasi-totalité des informations liées à la multifractalité se trouve entre ces limites asymptotiques, qui sont couramment atteintes pour des valeurs de q allant de -15 à +15 (Grech and Pamuła, 2012). La mesure retenue pour estimer la multifractalité des séries temporelles est l'écart entre les exposants de Hurst les plus éloignés ($h(-15) - h(15)$), et sera appelée dans la suite du manuscrit $\Delta H15$.

En accord avec les méthodes décrites dans la section *Méthode d'analyse générale de la multifractalité*, un calcul de multifractalité a été effectué sur 40 surrogates générées avec la méthode IAAFT à partir de chaque série temporelle.

Analyses statistiques

La normalité des échantillons de temps de réponse et de multifractalité a été démontrée avec le test de Shapiro-Wilk. Pour comparer $\Delta H15$ entre les différentes conditions avec les mains dominante et non-dominante, une ANOVA à deux facteurs a été utilisée. Comme un effet d'interaction a été détecté, les différentes mains n'ont pas pu être analysées séparément. Une ANOVA à mesures répétées (six répétitions : Standard, UVF et LVF pour les deux mains) a donc été utilisée avec un post-hoc Tuckey pour comparer la multifractalité mesurée dans les différentes conditions. La sphéricité des données est vérifiée avec un test de Mauchly. La taille d'effet est mesurée avec le ω^2 . Dans les cas où l'hypothèse de normalité des données n'est pas vérifiée, une ANOVA Kruskal-Wallis avec un post-hoc Bonferroni sont utilisés, et la taille d'effet est mesurée avec le η^2 .

Résultats

Temps de réponse visuo moteurs

Les temps de réponse visuo moteurs obtenus sont présentés comme la moyenne obtenue sur le test et le retest. Comme pour la première étude, on observe des temps de réponse différents entre les conditions (ANOVA Kruskal-Wallis : $\text{Chi}^2 = 109.8$, $p = 1 \times 10^{-24}$, $\eta^2 = 0.62$). Le post-hoc Bonferroni indique encore une fois une augmentation

du temps de réponse avec la difficulté de la tâche (Figure 30) : $RT_{LVF} < RT_{UVF} < RT_{Standard}$ ($p < 2 \times 10^{-5}$ pour toutes les comparaisons).

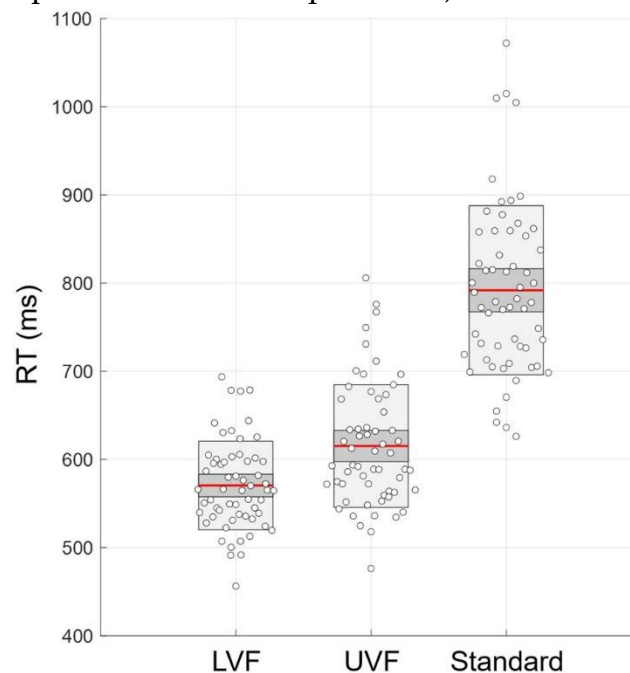


Figure 30 – Temps de réponse (RT) calculés dans chaque condition. Les RT sont calculés à partir de la moyenne du test et du retest pour les conditions LVF, UVF et Standard. La ligne rouge indique la moyenne, le gris foncé indique $\pm 1SD$ et le gris clair l'intervalle de confiance à 95%.

Vraie multifractalité

En comparant le $\Delta H15$ des séries originales par rapport à ceux des surrogates, on obtient 81% (571/708) des séries ayant une largeur de spectre multifractal significativement plus élevée que celle de leurs surrogates. Ce pourcentage est de 78% pour la main dominante, et 84% pour la main non-dominante. Il n'y a pas de différence marquée dans ce pourcentage en comparant les conditions LVF, UVF et Standard (81%, 88% et 73%, respectivement).

Multifractalité dans les mouvements des mains en fonction des conditions

Comme première étape, un test-t d'échantillons appariés a été effectué pour comparer la valeur de $\Delta H15$ entre les séries test et retest. Aucune différence n'a été trouvée ($p > 0.23$ pour toutes les comparaisons). Ensuite, deux ANOVA à mesures répétées effectuées à la fois pour le test ($F(5,353) = 21.67$, $p = 7 \times 10^{-19}$) et le retest ($F(5,353) = 28.11$, $p = 6 \times 10^{-24}$) ont conclu à des résultats similaires. Pour la suite de l'analyse, nous utiliserons donc la moyenne du $\Delta H15$ obtenu entre le test et le retest comme mesure de multifractalité.

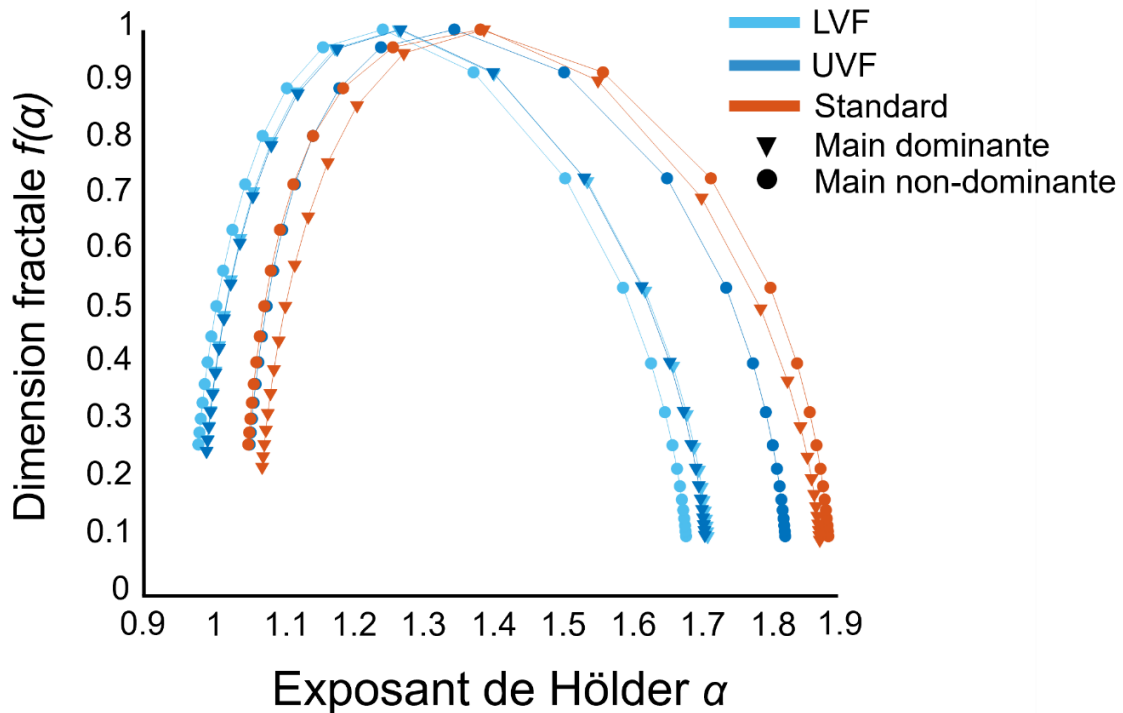


Figure 31 - Spectres de singularité moyens obtenus à partir de la méthode FMF-DFA dans les trois conditions (couleurs) pour les deux mains (marqueurs). La largeur des spectres donne une information similaire à ΔH_{15} pour déduire le comportement multifractal. La position des spectres de singularité le long de l'axe x donne un indice sur le comportement monofractal (l'exposant de Hurst calculé pour $q = 2$, $h(2)$). La méthode du point focus, utilisée pour forcer un comportement multifractal et éviter d'obtenir des spectres corrompus, pourrait influencer la valeur des exposants obtenus, et donc la valeur $h(2)$ en tant qu'indicateur de monofractalité. Bien que la moyenne de $h(2)$ ($1 < h(2) < 1.2$) semble indiquer un comportement plutôt persistant, il s'agit probablement d'une conséquence de l'application de la méthode du point focus à nos données.

Une ANOVA à deux facteurs, utilisant la modalité de passage (LVF, UVF, Standard) et la main (dominante ou non-dominante) comme facteurs indépendants a permis de détecter un effet d'interaction ($F(2,353) = 10.37$, $p = 4.22 \times 10^{-5}$). Une ANOVA avec mesures répétées a mis en évidence des différences de ΔH_{15} par rapport à la modalité de passage étudiée, et ce pour chaque main ($F(5,353) = 39.84$, $p = 6 \times 10^{-31}$, $\omega^2 = 0.34$). Le test de sphéricité de Mauchly a montré que la sphéricité était respectée ($W = 0.745$, $p = 0.285$). Les résultats du post-hoc Tuckey indiquent des valeurs de ΔH_{15} plus élevées pour la condition Standard par rapport aux conditions LVF et UVF dans les deux mains ($p < 1 \times 10^{-4}$ pour toutes les comparaisons). De façon intéressante, aucune différence entre LVF et UVF n'a été détectée pour la main dominante ($p = 1.00$),

alors qu'il y a une différence significative en s'intéressant à la main non-dominante ($p = 3.14 \times 10^{-8}$). Tous les résultats du post-hoc Tuckey sont présentés en Table 4.

Condition 1	Condition 2	Différence moyenne	p-value
LVF dominant	UVF dominant	0.00	1.00
LVF dominant	Standard dominant	-0.06	2.08×10^{-8}
LVF dominant	LVF non-dominant	0.02	0.62
LVF dominant	UVF non-dominant	-0.05	6.28×10^{-5}
LVF dominant	Standard non-dominant	-0.11	2.07×10^{-8}
UVF dominant	Standard dominant	-0.08	2.07×10^{-8}
UVF dominant	LVF non-dominant	0.02	0.62
UVF dominant	UVF non-dominant	-0.06	1.96×10^{-5}
UVF dominant	Standard non-dominant	-0.11	2.07×10^{-8}
Standard dominant	LVF non-dominant	0.10	2.07×10^{-8}
Standard dominant	UVF non-dominant	0.03	0.23
Standard dominant	Standard non-dominant	-0.03	0.20
LVF non-dominant	UVF non-dominant	-0.08	3.14×10^{-8}
LVF non-dominant	Standard non-dominant	-0.13	2.07×10^{-8}
UVF non-dominant	Standard non-dominant	-0.05	9.64×10^{-5}

Tableau 4 - Résultats du post-hoc Tukey concernant le degré de multifractalité ΔH_{15} .

Discussion

Les résultats généraux de cette étude supportent l'hypothèse selon laquelle les cascades multiplicatives sont responsables des interactions entre les échelles dans la coordination visuomotrice. Trois résultats principaux ressortent de cette expérience :

- Les mouvements des mains échantillonnés à haute fréquence et recueillis par les contrôleurs en réalité virtuelle présentent de la multifractalité non-linéaire.
- Le degré de multifractalité varie en fonction de la contrainte imposée par le champ visuel
- Les indicateurs multifractals utilisés sont suffisamment fins pour détecter des différences entre l'utilisation des mains dominante et non-dominante.

Ces résultats supportent les notions de fluctuations du corps entier provenant d'interactions entre de nombreuses échelles (Mangalam and Kelty-Stephen, 2020) et d'analyse des mécanismes d'adaptation par la multifractalité (Torre et al., 2019). De façon générale, ces résultats pourraient être réinvestis pour suivre et caractériser les adaptations lors de tâches visuomotrices, dans le but de restaurer ou d'améliorer la dextérité visuomotrices de sujets pathologiques ou d'athlètes.

En démontrant que plus de 80% des séries temporelles analysées présentent de la multifractalité non-linéaire, il est possible d'affirmer que les mouvements des mains ne sont pas additivement décomposables, et que le signal de sortie est un marqueur des interactions non-linéaires provenant de cascades multiplicatives. De ce fait, le formalisme multifractal peut être appliqué pour témoigner des coordinations entre différentes échelles se mettant en place dans le système cognitif à partir des fluctuations des mouvements des mains (Diniz et al., 2011; Ihlen and Vereijken, 2013b; Van Orden et al., 2005; Wijnants, M.L., 2014)

Comme preuve principale de l'intérêt de la multifractalité en tant que marqueur des adaptations visuomotrices, il faut s'intéresser aux différences observées entre les espaces visuels. La plupart des interactions entre l'humain et son environnement ont lieu dans l'espace visuel bas (LVF) (Previc, 1990), ce qui génère au cours du temps un avantage pour y traiter les informations et agir en fonction (Danckert and Goodale, 2001; Khan and Lawrence, 2005; Krigolson and Heath, 2006; Rossit et al., 2013; Stone et al., 2019). Ce postulat est confirmé par l'analyse multifractale, montrant un ΔH_{15} plus élevé dans la situation UVF par rapport à la situation LVF, indiquant un besoin d'adaptation plus important. La contrainte sur le système visuomoteur augmentant encore en condition Standard, lors de laquelle le champ de recherche visuel s'agrandit, la valeur de ΔH_{15} est elle aussi plus élevée.

Il est intéressant de noter que l'adaptation n'est pas un mécanisme « tout-ou-rien », qui pourrait se caractériser par une dichotomie simple entre besoin et absence d'adaptation. L'augmentation continue de la valeur de ΔH_{15} avec la contrainte imposée au système visuomoteur plaide en faveur d'une adaptation progressive avec la difficulté de la tâche (Torre et al., 2019).

Des différences ont été observées entre les valeurs de ΔH_{15} pour les mains dominantes et non-dominantes en UVF. Pour comprendre cet effet, il faut s'intéresser aux mécanismes facilitateur permettant de localiser et d'atteindre des cibles dans ces différents espaces visuels. En effet, des mécanismes de contrôle neuronal distinct ont été identifiés entre les mains dominante et non-dominantes (Sainburg and Kalakanis, 2000). Des études en neuroimagerie ont montré une activité accrue dans les aires cérébrales visuelles et motrices lors de l'utilisation de la main non-dominante, et dans les aires liées à la planification motrice en utilisant la main dominante (Kirby et al., 2019). En mettant en relation ces informations avec les propriétés connues de l'avantage lié au traitement d'informations dans l'espace visuel bas, reposant sur une plus grande densité de cellules ganglionnaires dans la rétine périphérique (Curcio and Allen, 1990), il est possible de supposer un traitement pré cortical des informations plus efficace dans cet espace. Dans l'espace bas, les mécanismes facilitateurs liés à l'espace visuel et à la main non-dominante se recoupent, expliquant ainsi l'absence de différences en termes de besoin d'adaptation entre les deux mains. En revanche, dans l'espace visuel haut, la main dominante, dont les mouvements sont davantage régis

par la planification motrice, possède un avantage par rapport à la main non-dominante, ce qui explique un besoin d'adaptation moins important mis en évidence par une valeur de $\Delta H15$ moins élevée (Figure 32).

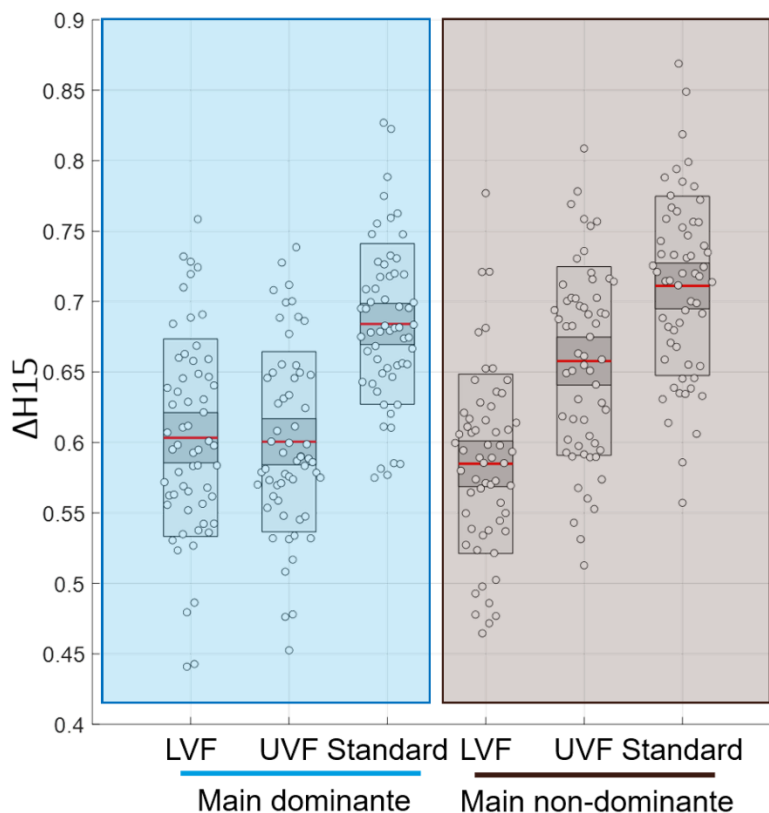


Figure 32 – Multifractalité des mouvements des mains dominante et non-dominante dans les différents espaces visuels.

Les hypothèses avancées dans ce paragraphe, bien que supportées par des études en neuroimagerie, doivent évidemment être supportées par d'autres données faisant notamment intervenir de la connectivité cérébrale.

Il est courant d'étudier la complexité d'un système sensorimoteur à l'aide de séries d'événements, comme lors de tâches de tapping ou de traçage de cercle par exemple. Ici, l'intervalle de temps entre deux appuis sur un bouton lumineux pourrait potentiellement constituer une série d'événements sur laquelle appliquer des méthodes fractales et multifractales afin de confronter les résultats aux observations faites sur des mouvements densément échantillonnés. Cependant, cette méthodologie se confronte à certains obstacles. Les séries d'événements sont assez courtes (132, 126 et 99 événements au maximum dans les conditions LVF, UVF et Standard, respectivement). Pour obtenir plus de points, les durées de chaque répétition devraient être rallongées, ce qui provoquerait néanmoins de la fatigue chez l'utilisateur dont les performances diminueraient. Une solution possible à construire

des séries temporelles à partir de deux essais consécutifs – même si cette approche n'est pas recommandée pour extraire un exposant fractal (Marmelat and Meidinger, 2019), permettant ainsi d'obtenir certaines séries présentant plus de 256 échantillons. En appliquant une méthode DFA et ARFIMA(0,d,0), l'exposant d'échelle obtenu se rapproche de 0.5, caractéristique d'un bruit blanc et donc d'un phénomène aléatoire. En effet, les lumières apparaissant à des endroits aléatoires sur le tableau, c'est ce phénomène qui est mis en lumière par l'analyse fractale des séries d'événements, plus que l'organisation du système visuomoteur.

Un autre point important à discuter concerne les phénomènes mis en lumière par les analyses fractales d'une part, et multifractales d'autre part. Comme évoqué précédemment, la multifractalité est utilisée comme une mesure d'adaptation, quand la monofractalité représente la faculté d'adaptation d'un système (Torre et al., 2019). Toutefois, les différents espaces visuels semblent avoir un impact sur la monofractalité, dont la position du $h(2)$ dans le spectre de singularité (figure 31) donne une indication de la valeur. Cependant, ces valeurs sont impactées par l'utilisation de la méthode du point focus dans la méthode MF-DFA (Mukli et al., 2015), et dépendent notamment du caractère multifractal des séries temporelles analysées. L'approche utilisée prend le parti d'étudier les fluctuations à haute fréquence dans l'hypothèse des cascades multiplicatives, dont les propriétés sont mises en évidence par des méthodes de calcul multifractales.

Conclusion

L'objectif de cette étude était de mettre en évidence le caractère interaction-dominant dans la coordination visuomotrice. En accord avec la littérature, les mouvements des mains densément échantillonnés présentent des propriétés multifractales, permettant de témoigner des adaptations se produisant dans le contrôle cognitif pour répondre aux contraintes imposées par la tâche. La tâche VMVR permet donc d'enregistrer des mouvements des mains avec une précision suffisante pour effectuer des analyses multifractales.

Dans l'hypothèse d'un contrôle cognitif impliquant des cascades multiplicatives observées dans les fluctuations du corps entier, il aurait été intéressant de s'intéresser aux propriétés des mouvements de la tête. Cependant, ceux-ci présentaient une précision spatiale trop basse pour pouvoir être analysés sans que l'aliasing impacte fortement les méthodes d'analyse. Dans la même veine, l'analyse des fluctuations du regard pourrait permettre d'obtenir de nouvelles informations pertinentes sur l'organisation du système visuomoteur.

Étude 3 – La multifractalité comme marqueur de l’incarnation d’un outil

Objectifs

Cette partie du manuscrit s’intéresse à l’utilisation de la multifractalité pour observer le caractère interaction-dominant d’un système utilisateur-outil-environnement. L’étude présentée reprend un paradigme développé depuis 2010 pour étudier la transition entre un outil fonctionnel et un outil cassé. Ici, ce contexte expérimental est utilisé pour étudier l’interaction avec un outil (la main ou la souris) lors d’une tâche sur ordinateur à l’aide de la multifractalité non-linéaire. Les résultats obtenus permettent de valider l’utilisation de cette méthode comme marqueur de l’incarnation d’un outil, et seront repris dans la dernière étude en remplaçant l’outil par l’avatar contrôlé par l’utilisateur.

Introduction

Un exemple couramment utilisé pour illustrer la notion de *readiness-to-hand* est celui du marteau. Pour s’en servir, il n’est pas nécessaire de penser à l’outil ou de réfléchir à son fonctionnement : il devient invisible aux yeux de l’utilisateur, et est perçu pour ce qu’il *fait* plutôt que pour ce qu’il *est*. En revanche, lorsque ce dernier est cassé et cesse de fonctionner normalement, il redevient visible aux yeux de l’utilisateur, qui doit alors conceptualiser son usage avant de s’en servir. Le marteau passe alors dans un état *unready-to-hand*, ou *present-at-hand*. Récemment, des paradigmes expérimentaux ont été mis en place pour démontrer expérimentalement ce concept d’origine philosophique. En s’intéressant à la part d’attention portée sur la tâche ou sur l’outil nécessaire à la réalisation de la tâche, Alzayat et collaborateurs (2017) ont mené une expérience dans laquelle les participants devaient manipuler un outil de type clé à l’aide de deux doigts, soit avec un objet physique, soit avec un objet virtuel (présenté sur un écran tactile). Des lumières étaient positionnées sur l’ensemble de l’outil, avec une distinction entre les stimuli apparaissant près de l’*action* (la partie de l’outil interagissant avec les objets pertinents pour la tâche) et près de la main du sujet. Les participants étaient moins prompts à signaler des changements de lumière près de la main que près de l’outil, ce qui indique une attention portée sur la tâche plutôt que sur l’outil. En outre, les performances élevées de la tâche ont entraîné un plus grand nombre de lumières manquées.

Les études sur la *readiness-to-hand* peuvent être mises en lien avec les approches récentes de la cognition humaine, et notamment la cognition 4E (embodied, embedded, enacted, extended). Cette vision incarnée, incorporée, mise en œuvre et étendue (Newen et al., 2018) suggère que la cognition ne se déroule pas uniquement dans le cerveau. Lorsque l'outil est *ready-to-hand*, celui-ci est incarné par l'utilisateur lorsqu'il l'utilise, et la cognition s'étend au-delà des frontières corporelles pour incorporer l'outil. L'inclusion de cet outil dans un système cognitif étendu est provoquée par l'utilité perçue de l'outil par l'utilisateur, soit ses possibilités d'action, une notion que se réfère au concept d'affordances (Gibson, 2014; Gibson and Carmichael, 1966). Les possibilités d'action offertes par un outil étendent alors les capacités corporelles de l'utilisateur (Smitsman, 1997). Ce phénomène d'extension des frontières corporelles a d'abord été théorisé par Merleau-Ponty (1962), en proposant notamment qu'une canne étendait le sens du toucher d'un aveugle, et donc les frontières de son espace corporel. Cette considération philosophique a été démontrée expérimentalement, l'usage d'une canne induisant une extension durable de l'espace péri personnel (Serino et al., 2007), et donc des frontières de perception corporelle. De même, l'usage prolongé d'une souris d'ordinateur étend l'espace péri personnel autour de l'écran, soit proche de la zone d'action de l'outil (Bassolino et al., 2010). L'espace péri personnel est un concept dont les origines cérébrales ont été identifiées (di Pellegrino and Làdavas, 2015; Grivaz et al., 2017b).

En partant de ces différentes considérations philosophiques, cognitives et neurologiques, le concept de *readiness-to-hand* peut se résumer par la faculté d'un outil à étendre les frontières corporelles de l'utilisateur via ses possibilités d'action, en étant inclus dans un système cognitif étendu. L'utilisation fluide et intuitive de l'outil au sein d'un schéma corporel suggère des interactions naturelles avec l'utilisateur. À ce titre, certaines expériences se sont intéressées à la caractérisation du concept de *readiness-to-hand* avec la théorie de l'interaction-dominance. En effet, si un outil est incarné, et considéré comme faisant partie du corps, ses mouvements devraient présenter des caractéristiques complexes similaires à celles observées lors de mouvements corporels.

Une série d'expériences s'intéresse notamment à cet aspect en observant les mouvements d'une souris d'ordinateur lors d'une tâche de « rassemblement de troupeau » (*herding task*). Il a d'abord été montré que lorsque l'outil fonctionne correctement, les séries temporelles d'accélération de l'outil échantillonnées à haute fréquence présentent une signature en $1/f$ (Dotov et al., 2010). Après quelques essais, l'expérimentateur provoque un dysfonctionnement de l'outil. Son fonctionnement n'est plus intuitif, et l'utilisateur doit à nouveau conceptualiser l'outil pour l'utiliser : il devient alors *unready-to-hand*. La transition d'un état *ready-to-hand* se traduit par un blanchiment (vers un bruit blanc, signal aléatoire) des indices de fractalité.

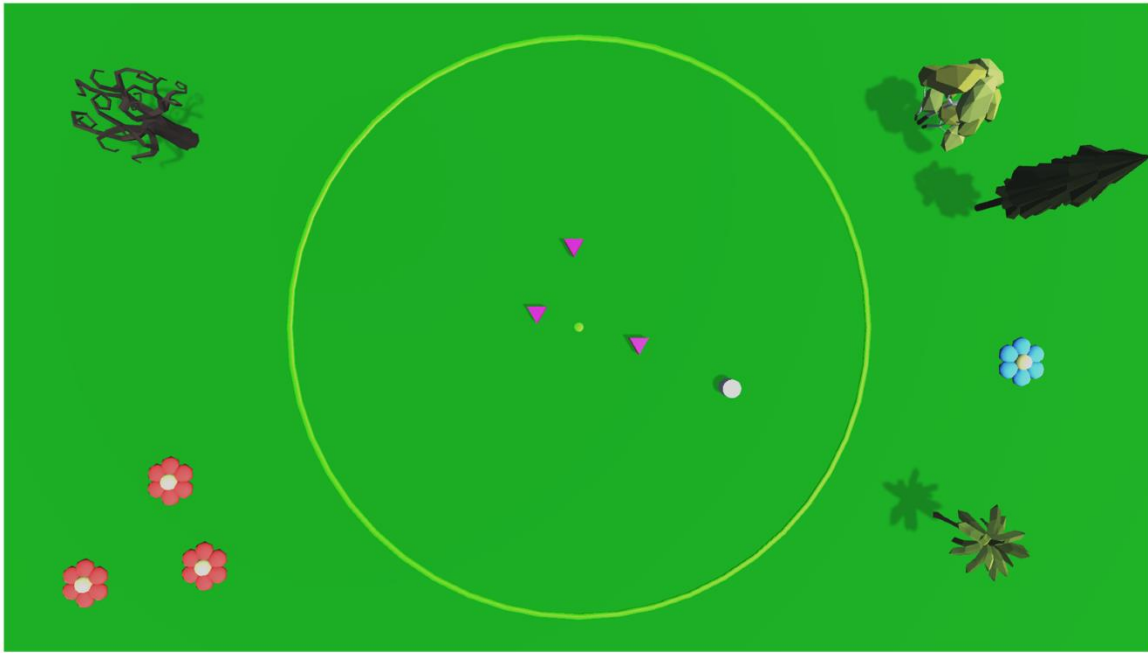


Figure 33 - Capture d'écran de la tâche des moutons. Les trois objets 'moutons' sont représentés par des triangles violets inversés. L'objet 'chien' est le rond blanc. Le cercle vert représente l'enclos.

Cependant, comme décrit dans l'introduction générale, la présence de fluctuations en $1/f$ n'est pas nécessairement suffisante pour décrire le caractère interaction-dominant du système incorporant le cerveau, le corps, l'outil et la tâche (Thornton and Gilden, 2005; Torre and Wagenmakers, 2009). Un exposant d'échelle unique ne permet pas de caractériser les interactions se produisant entre les différentes échelles d'un système ; pour ce faire, il faut se tourner vers les analyses multifractales (Ihlen and Vereijken, 2013b; Kelty-Stephen et al., 2013).

Une réanalyse des données de l'expérience sur la souris utilisant un formalisme multifractal (*Wavelet Transform Modulus Maxima* - WTMM) a permis de montrer que les séries temporelles de mouvement de la souris ne présentent pas uniquement une signature en $1/f$, mais aussi de la multifractalité (Nie et al., 2011). De plus, la largeur du spectre multifractal, et donc la richesse des interactions, se réduit lorsque l'outil cesse de fonctionner normalement (Dotov et al., 2017). Ces résultats ont été confirmés et étendus dans une expérience récente (Bennett et al., 2022), dans laquelle un questionnaire portant sur l'apparence des outils utilisés était présenté en fin d'expérience. Les participants pour lesquels l'outil cessait de fonctionner retenaient plus d'informations sur les caractéristiques de l'outil que ceux pour lesquels tout fonctionnait correctement, confirmant l'hypothèse selon laquelle la *readiness-to-hand* se caractérise par une attention accrue sur la tâche plutôt que sur les objets nécessaires à sa réalisation. Pour résumer, la multifractalité semble être une méthode robuste pour étudier les interactions entre un utilisateur et son outil, et ainsi aborder expérimentalement la notion de *readiness-to-hand*.

Mouvements de souris

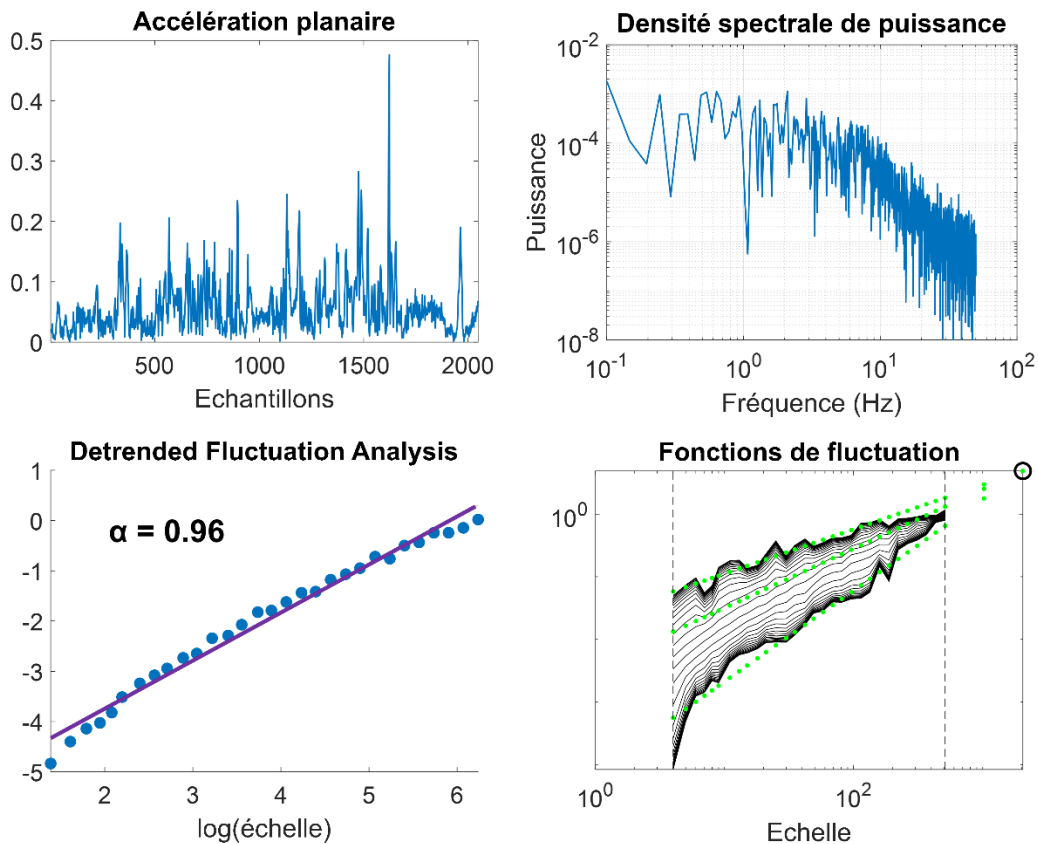


Figure 34 – Propriétés fractales et multifractales des mouvements de la souris. En haut : signal d'accélération planaire (calculée avec la distance euclidienne sur les axes X et Y) et densité spectrale de puissance associée. En bas : fonctions du fluctuations obtenues avec une analyse monofractale et multifractale.

Dans une certaine mesure, la notion de *readiness-to-hand* peut être rapprochée de celle d'incarnation radicale évoquée dans l'introduction générale. Un avatar - ou une partie du corps - est incarné quand ses propriétés sont traitées comme faisant partie du corps (Kilteni et al., 2012), ce qui se rapproche de la notion d'utilisation fluide et intuitive d'un outil. Dans cette condition, l'avatar devient « invisible » aux yeux de l'utilisateur, qui n'a plus besoin d'y réfléchir pour l'utiliser, et est traité comme faisant partie d'un système cognitif étendu. Cependant, une différence majeure existe entre ces deux cas : incarner un avatar ou un membre le substitue à sa contrepartie réelle, quand le fait d'incarner un outil vient s'ajouter au schéma corporel préexistant. Par exemple, dans le paradigme de la main en caoutchouc (Botvinick and Cohen, 1998), la prothèse est perçue comme étant la vraie partie du corps du participant, le bras réel étant occulté suite aux stimulations multisensorielles. En revanche, dans le cas de

l'incarnation d'un outil, ce dernier ne se substitue pas au membre qui le manipule, mais vient étendre ses possibilités d'action.

Récemment, il a été montré qu'il est possible d'incarner des objets ne ressemblant pas forcément à une partie du corps. En effet, la ressemblance visuelle avec une partie du corps n'est pas un paramètre indispensable pour pouvoir incarner un outil. En particulier, l'utilisation experte d'un outil permet de modifier les représentations corporelles (Weser and Proffitt, 2019, 2021), et il est possible d'incarner des outils présentant très peu de ressemblances visuelles avec le corps humain, mais partageant des propriétés communes (Cardinali et al., 2021).

Lorsque l'on s'intéresse à l'incarnation d'avatars en réalité virtuelle, les méthodologies multifractales pourraient être appliquées pour estimer, via la notion d'incarnation radicale (Schettler et al., 2019), la façon dont ils sont inclus dans un système cognitif étendu. Cependant, le lien entre l'incarnation d'un outil et d'un corps virtuel – ou d'une partie du corps – n'est pas encore établi. Les méthodes permettant d'étudier le caractère interaction-dominant du système utilisateur – outil peuvent-elles être utilisées de la même façon pour un système utilisateur – avatar ? Pour répondre à cette interrogation, le paradigme expérimental utilisé pour étudier les interactions avec une souris d'ordinateur est étendu en ajoutant une condition utilisant la main comme un outil. Dans cette modalité, l'utilisateur n'agit pas avec la souris, mais déplace directement sa main sur la table ; les mouvements requis pour effectuer la tâche sont les mêmes que ceux effectués avec la souris. Cependant, une différence conceptuelle majeure existe : lorsque l'on utilise une partie du corps, l'action effectuée se situe directement à proximité de l'effecteur. Ici, la main utilisée comme un outil provoque des conséquences visuelles sur l'écran, une surface perpendiculaire au plan d'action. En appliquant des méthodes d'analyse similaires entre les conditions utilisant la main et la souris, l'objectif sera ici de déterminer si l'incarnation d'une partie du corps dont l'action est visualisée à distance peut être évaluée à partir d'une approche multifractale. Cette expérience s'inscrit donc dans le projet plus large de mesure de l'incarnation d'un avatar, en questionnant la validité des méthodes de mesure de la *readiness-to-hand* appliquées à des représentations corporelles virtuelles.

Matériel et méthodes

Participants

Soixante-quatorze participants (43 hommes, 31 femmes, âgés de 21 ± 2 ans) ont participé à l'étude. Les participants étaient en grande majorité des étudiants de la faculté des STAPS de Bordeaux.

Tâche des moutons

La tâche utilisée pour étudier la *readiness-to-hand* est inspirée de celles utilisées lors d'expériences précédentes (Bennett et al., 2022; Dotov et al., 2010; Nie et al., 2011). Nous avons développé notre propre version avec Unity (Unity Technologies, San Francisco, CA, USA) pour obtenir plus de contrôle sur les différents paramètres et permettre d'utiliser différentes modalités d'interaction.

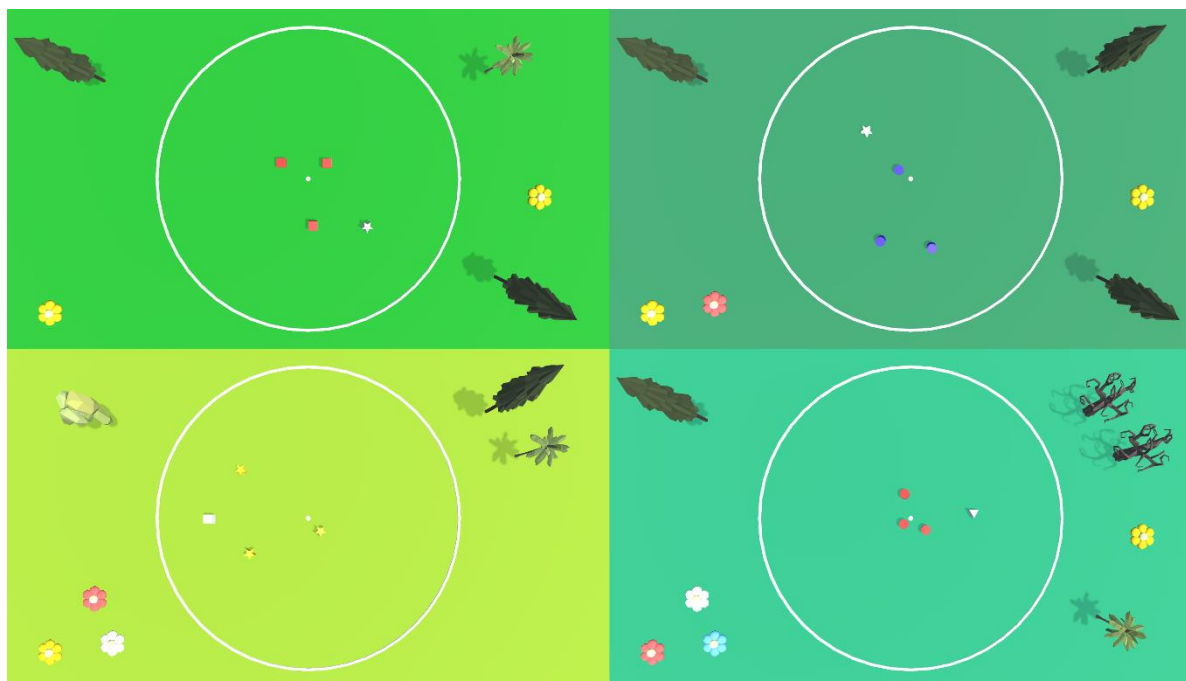


Figure 35 - Captures d'écran de différents environnements générés procéduralement pour la tâche des moutons

Lors de cette tâche, les participants ont pour consigne de déplacer un objet « chien » pour empêcher trois objets « mouton » de sortir d'un enclos. L'objectif est de conserver à chaque instant les moutons les plus proches possibles du centre de l'écran, ce qui permet d'atteindre les meilleurs scores. Le déplacement de chaque mouton est régi par trois forces :

- Répulsion : les moutons sont repoussés par le chien, et se déplacent dans la direction opposée. Plus le chien est proche, plus l'intensité de cette force sera élevée.
- Agrégation : les moutons cherchent à chaque instant à se rapprocher les uns des autres. Ils sont attirés vers le barycentre de leurs positions.
- Déplacement aléatoire : des mouvements aléatoires sur les axes vertical et horizontal sont générés à partir d'un bruit Perlin, pour donner un aspect aléatoire au déplacement des moutons.

Si les moutons sont maintenus à l'intérieur de l'enclos pendant six secondes consécutives, le niveau de difficulté augmente. Ce dernier n'est pas marqué explicitement, mais la couleur de l'enclos donne un retour visuel à l'utilisateur. Au premier niveau, l'enclos est vert. Il change ensuite de couleur pour devenir jaune, orange, rouge puis blanc pour le niveau de difficulté maximal. Le niveau de difficulté se conserve d'une répétition à l'autre. L'intensité des trois forces (répulsion, agrégation, déplacement aléatoire) varie avec le niveau de difficulté ; plus il augmente, plus les déplacements aléatoires sont rapides, plus la force d'agrégation est faible, et plus les moutons sont repoussés par le chien.

La position d'un mouton k ($sheep_k$) à l'instant $n + 1$ est déterminée par sa position à l'instant n et par les forces de répulsion ($r_k(n)$), d'agrégation ($s_k(n)$) et le bruit aléatoire ($\eta_k(n)$). La force de répulsion ne s'applique que si le chien est assez proche du mouton, à une distance inférieure à d_{max} . Les coefficients a , b et c évoluent avec le niveau de difficulté : la force d'agrégation diminue, l'intensité du mouvement aléatoire augmente, et la force de répulsion du chien est améliorée.

$$sheep_k(n + 1) = sheep_k(n) + a \times r_k(n) + b \times s_k(n) + c \times \eta_k(n)$$

$$r_k(n) = (d_{max} - [sheep_k(n) - dog(n)])^{1.5} \times (sheep_k(n) - dog(n))$$

$$s_k(n) = sheep_k(n) - \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 sheep_i(n)$$

Lorsque les moutons sortent de l'enclos pendant une trop longue durée, le niveau de difficulté descend. Lorsqu'un mouton sort de l'écran, le niveau de difficulté descend d'un cran et tous les moutons sont repositionnés au centre de l'enclos. Plus le niveau de difficulté est élevé, plus le score augmente rapidement. Pour cette raison, les scores sont systématiquement plus faibles pendant la première répétition que pendant les suivantes, le niveau de difficulté étant plus faible.

Modalités d'interaction

La tâche a été conçue pour pouvoir être effectuée de deux façons : en utilisant la souris ou la main. Dans la condition 'Souris', les participants déplacent le chien en utilisant la souris d'ordinateur, dont la sensibilité a été réduite au minimum. Dans la condition 'Main', les participants sont équipés d'une mitaine sur laquelle trois marqueurs infrarouges sont positionnés. La position de ces marqueurs est observée par une caméra Optitrack Trio (V120 : Trio, OptiTrack ; NaturalPoint, Inc., Corvallis, OR, USA), puis les données de position sont retransmises au logiciel pour déplacer le chien. Le gain entre le déplacement de la main et celui du curseur à l'écran est ajusté pour qu'il corresponde à celui effectué en utilisant la souris.

Procédure

Pendant l'expérience, les participants sont assis en face d'un écran 27 pouces, les deux avant-bras placés sur la table. Ils sont aléatoirement répartis en deux groupes ('Main' et 'Souris'). Les participants effectuent 5 répétitions durant 70 secondes chacune.

Acquisition des données de mouvement

Pour étudier le comportement de l'utilisateur, nous avons recueilli les données d'accélération de l'outil (la main ou la souris) lors de chaque répétition à l'aide de l'accéléromètre d'une Apple Watch Série 4 (Apple, Cupertino, CA, USA). Cet outil d'acquisition était positionné soit à l'intérieur de la souris, soit sur la mitaine dans la condition 'Main'. Les signaux sont collectés à une fréquence de 100 Hz.

L'accélération plan est obtenue en récupérant les données des axes x et y , puis en calculant la distance euclidienne ($\sqrt{x^2 + y^2}$). Contrairement à l'expérience précédente, l'appareil de mesure étant bien plus précis, nous ne supprimons pas les données inférieures à un certain seuil, et conservons 7000 échantillons (70 secondes à 100 Hz) dans chacune des répétitions.

Multifractalité des mouvements de l'outil

La multifractalité des mouvements de l'outil est obtenue en appliquant la méthode du point focus aux signaux d'accélération. La valeur conservée pour estimer la multifractalité est encore une fois le ΔH_{15} . Les calculs sont effectués à partir de 7000 points, et la méthode est appliquée pour 52 échelles temporelles allant de 8 à 875 échantillons ($N/8$).

La vérification de vraie multifractalité est effectuée avec 40 surrogates générées pour chacune des séries. Cette fois-ci, la valeur t du test statistique comparant le ΔH_{15} de la série originale à ceux des surrogates (t_{MF}) est calculée, et représente un indicateur de la part de multifractalité provenant de processus non-linéaires.

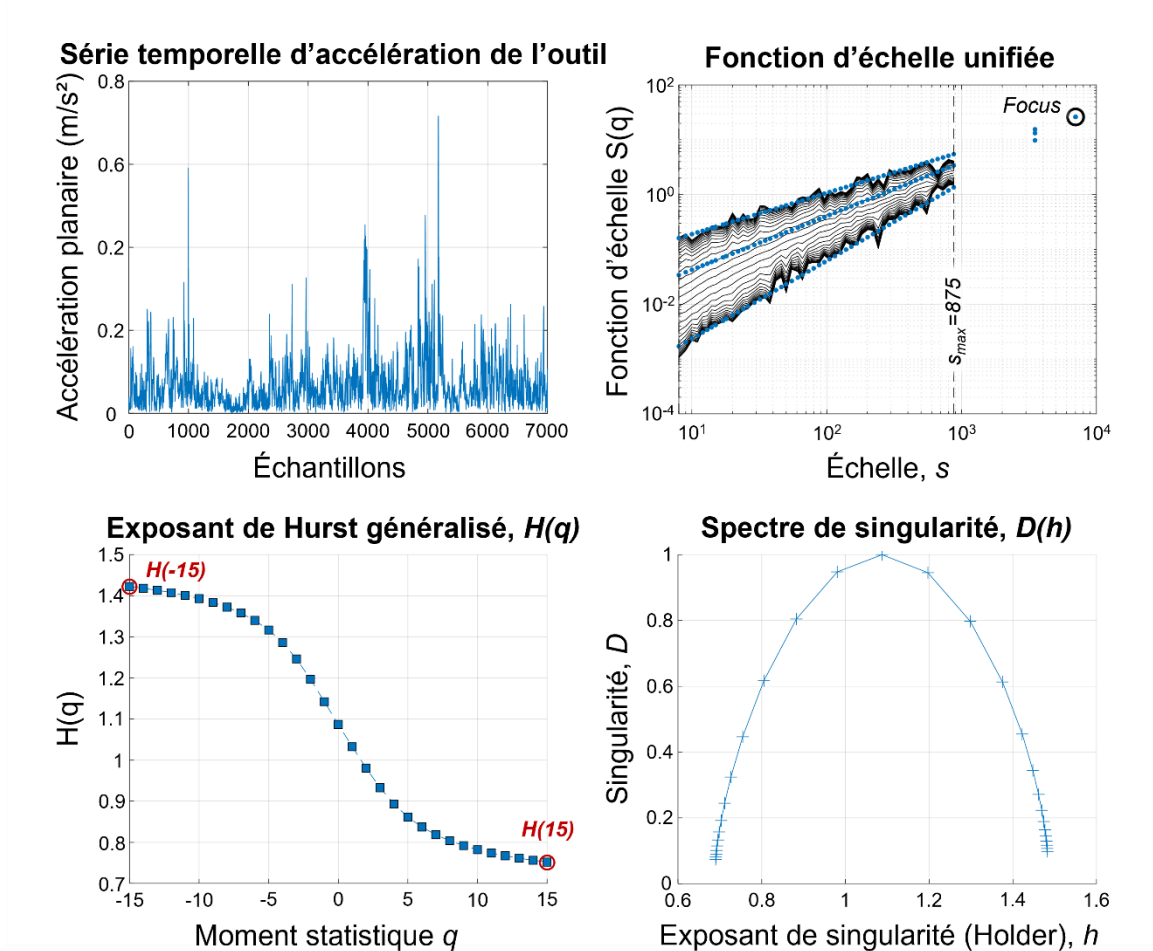


Figure 36 – Analyse multifractale des mouvements de la souris. En haut à gauche : série temporelle présentant des cascades multiplicatives, obtenue à partir de l'accélération plan mesurée pendant une répétition de la tâche. En haut à droite : Géométrie en éventail des exposants fractals obtenue par application de la méthode du point focus. Les points bleus représentent les calculs effectués pour $q = 15, 2,$ et -15 . En bas à gauche : distribution des exposants de Hurst en fonction du moment statistique q . En bas à droite : spectre de singularité, obtenu par transformée de Legendre des $h(q)$.

Analyses statistiques

Dans chaque situation, certains outliers ont été identifiés à l'aide de la fonction 'isoutlier' de Matlab, et supprimés des analyses. La normalité des échantillons est vérifiée avec un test de Shapiro-Wilk. La majorité des échantillons présente une distribution normale. Quand la normalité n'est pas vérifiée, les calculs sont réalisés sur le log des données. Pour comparer les effets de l'outil ('Main' ou 'Souris') et des répétitions de la tâche (de 1 à 5), une ANOVA deux facteurs est effectuée. Quand aucun effet d'interaction n'est trouvé, des ANOVA à mesures répétées sont utilisées.

Résultats

Scores pendant la tâche des moutons

Les outils 'Main' et 'Souris' mènent à des scores similaires en moyenne. Une ANOVA à deux facteurs sur les scores des répétitions 2 à 5 n'a montré aucun effet de l'outil ($F(1, 295) = 0.9, p = 0.34$), aucun effet de la répétition ($F(3, 295) = 1.98, p = 0.12$) et aucun effet d'interaction ($F(3, 295) = 0.79, p = 0.50$). La répétition 1 n'a pas été incluse dans l'analyse statistique, car elle sert de familiarisation à la tâche, et montre donc des scores systématiquement plus faibles, comme expliqué dans la section Matériel et Méthodes.

Trouver des scores similaires avec la main et la souris montre que la performance des sujets est la même, quel que soit l'outil utilisé. De plus, ne pas trouver de différence entre les répétitions montre qu'il n'y a pas d'effet d'apprentissage au-delà de la première répétition, et pas d'effet de la fatigue.

Multifractalité non-linéaire

Le caractère non-linéaire de la multifractalité des séries temporelles a été démontré dans 97% des séries enregistrées (174/180) dans la condition 'Main', et 98% (187/190) dans la condition 'Souris'. Les valeurs de t_{MF} obtenues sont présentées dans le tableau 5.

Répétition	1	2	3	4	5
t_{MF} 'Souris'	44.2	52.8	56.1	49.2	47.4
t_{MF} 'Main'	16.6	16.3	211	25.0	31.7

Tableau 5 – Valeurs des t_{MF} pour les mouvements de la souris et de la main. Ici, le niveau de significativité ($p < 0,05$) correspond à $t_{MF} > 2.02$, ce qui montre que la valeur de t_{MF} dans chaque condition est hautement significative.

Une ANOVA deux facteurs effectuée avec l'outil ('Main' ou 'Souris') et les répétitions (de 1 à 5) comme variables indépendantes montre une plus grande multifractalité (un ΔH_{15} plus large) en utilisant la souris plutôt que la main ($F(1, 369) = 50.21, p = 7 \times 10^{-12}$). Il n'y a pas d'effet des répétitions ($F(4, 369) = 1.3, p = 0.27$) ni d'effet d'interaction ($F(4, 369) = 1.25, p = 0.29$).

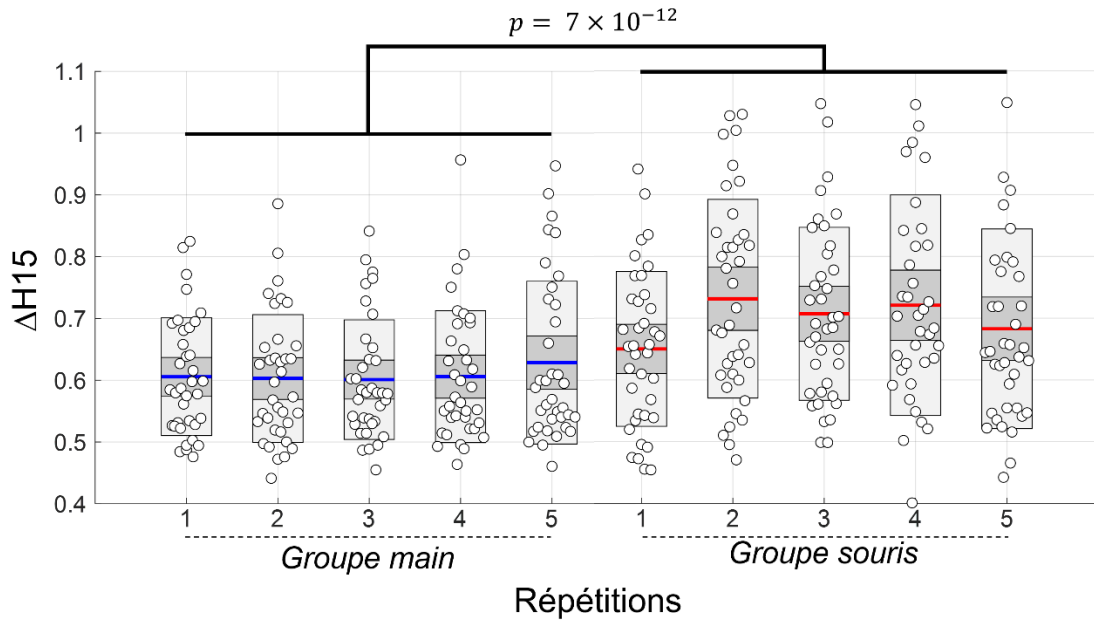


Figure 37 - Multifractalité mesurée par $\Delta H15$ dans chacune des cinq répétitions de la tâche pour les deux conditions : main et souris. Les lignes colorées indiquent la moyenne, le gris foncé $\pm 1SD$ et le gris clair l'intervalle de confiance à 95%. Les valeurs individuelles sont représentées par des cercles blancs.

Discussion

En accord avec les théories actuelles sur la cognition incarnée, les séries de déplacement de la souris et de la main présentent de la multifractalité non-linéaire (Dotov, 2014; Schettler et al., 2019). La non-linéarité est démontrée dans plus de 97% des séries temporelles, présentant un spectre multifractal plus large que celui de leurs surrogates linéaires. La présence de multifractalité non-linéaire dans la souris peut être interprétée comme un marqueur de l'intégration de cet outil dans un système cognitif étendu, mis en évidence par le caractère interaction-dominant du système cerveau-corps-souris-tâche. L'incarnation radicale d'un outil *ready-to-hand* permet d'étendre les frontières corporelles (Mangalam et al., 2022).

Les séries de déplacement de la souris présentent une valeur de $\Delta H15$ plus élevée que celles obtenues avec la main. Pour interpréter ces différences, il faut se replonger dans les origines de la présence de multifractalité dans les séries temporelles. Dans un système dominé par les interactions, la série temporelle correspondant au déplacement de l'outil n'est pas additivement décomposable : en effet, le mouvement ne s'explique pas par les propriétés individuelles des composants impliqués dans l'exécution de la tâche, mais va au contraire émerger des interactions entre ces composants. La largeur du spectre multifractal (ou la valeur du $\Delta H15$) va donc augmenter avec la richesse des interactions non-linéaires entre les composants.

En utilisant la souris, le système global est composé d'un élément de plus par rapport à celui incluant la main comme un outil. Lorsque l'outil est incarné et intégré au système cognitif étendu, de nouvelles interactions se créent, ce qui se reflète dans la valeur de la multifractalité. Cette hypothèse est supportée par les valeurs de t_{MF} , plus élevées pour la souris que pour la main. Encore une fois, l'ajout d'un nouvel élément, agissant à des échelles de temps différentes, crée de nouvelles interactions non-linéaires se reflétant dans les cascades multiplicatives observées dans le signal d'accélération.

Il est intéressant de noter que les dynamiques observées par la multifractalité, témoins des propriétés différentes des systèmes cognitifs incluant la main ou la souris, ne se retrouvent pas avec une analyse monofractale (Figure 38).

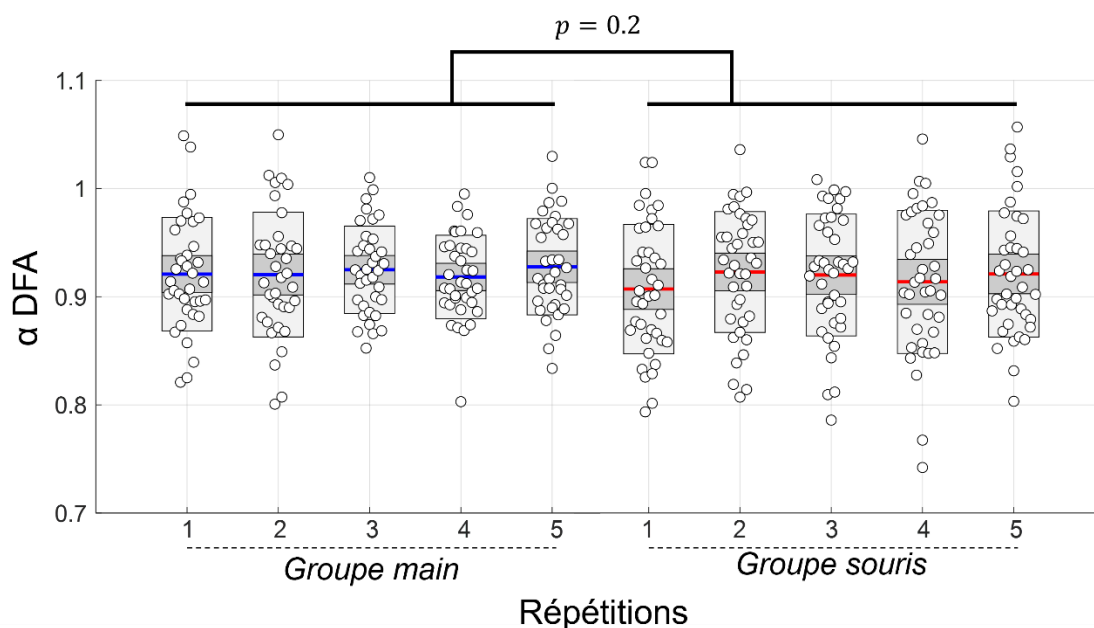


Figure 38 - Monofractalité mesurée avec DFA dans chacune des cinq répétitions de la tâche, dans les conditions 'Main' et 'Souris'. Les lignes colorées indiquent la moyenne, le gris foncé $\pm 1SD$ et le gris clair l'intervalle de confiance à 95%. Les valeurs individuelles sont représentées par des cercles blancs.

En effet, comme décrit dans l'introduction générale, la (mono)fractalité n'est pas suffisante pour capturer l'entière des propriétés d'interaction dominance d'un système.

Dans un premier temps, le protocole expérimental contenait une sixième itération, dans laquelle l'outil cessait de fonctionner pour la moitié des participants lors de la seconde moitié de la répétition. Ce protocole avait pour objectif d'étudier la transition entre un état *ready-to-hand* et *unready-to-hand* à la fois avec l'outil, comme démontré dans des expériences précédentes (Bennett et al., 2022; Dotov et al., 2010), mais surtout d'étudier cette transition en utilisant la main comme un outil. S'il est

assez facile de conceptualiser le fait qu'un outil puisse être « désincarné » et mis à l'écart du système cognitif, qu'en est-il d'une partie du corps ? En perturbant la perception des actions effectuées par la main, est-il possible de la « désincarner » en la privant de ses affordances ?

Une critique peut être émise à l'encontre des expériences précédentes étudiant la transition entre *ready-to-hand* et *unready-to-hand* avec une souris d'ordinateur : dans les conditions incluant l'outil cessant de fonctionner, ce dernier s'arrêtait parfois pendant de longues secondes, venant fortement modifier la forme du signal de sortie. De ce fait, il ne peut pas être exclu que les modifications de multifractalité observées puissent provenir d'une modification particulière du signal, dans lequel de grandes pauses sont présentes. Afin d'éviter ce potentiel biais, la perturbation appliquée à l'outil était suffisamment forte pour être perceptible par l'utilisateur, mais assez légère pour lui permettre de continuer à performer dans la tâche, comme démontré par la présence de scores similaires dans la répétition incluant le dysfonctionnement. Cependant, il est possible que la modalité avec l'outil cassé ait été trop subtile pour être interprétée comme telle par le participant. En effet, certains utilisateurs ont pensé que le problème venait plus de l'affichage ou du logiciel que de l'outil, ne remettant donc pas en cause son fonctionnement et la place qui lui est attribuée dans le système cognitif étendu. De ce fait, les scores concernant l'observation des caractéristiques des moutons et du chien ne présentaient pas de différences significatives entre les participants contrôle et ceux ayant subi le dysfonctionnement. Ces observations se retrouvent dans les analyses multifractales, présentant des valeurs de ΔH_{15} et de t_{MF} similaires.

La question portant sur la possibilité de « désincarner » une partie du corps mérite d'être posée, mais doit pour cela être vérifiée avec un protocole expérimental adapté, s'interrogeant sur la nature du dysfonctionnement à appliquer à l'outil. La transition vers un état *unready-to-hand* ne doit pas pour autant induire des modifications trop fortes dans le signal recueilli, qui pourraient avoir un impact trop important sur les méthodes d'analyse multifractales et générer des résultats biaisés.

Conclusion

En résumé, les méthodes d'analyse multifractales peuvent être utilisées pour étudier l'incarnation d'un outil. En démontrant la présence d'interactions non-linéaires dans les séries temporelles d'accélération de la souris, le caractère interaction-dominant du système global est mis en évidence et rapproché de la notion d'incarnation radicale.

Étude 4 – Les illusions visuo-tactiles et cardio-visuelles en réalité virtuelle provoquent des modifications similaires de la conscience de soi corporelle

Objectifs

Après avoir développé une tâche mesurant des temps de réponse visuomoteurs en réalité virtuelle, observé de la multifractalité dans les mouvements des mains, puis relié la présence de multifractalité non-linéaire avec la notion d'incarnation, le prochain objectif est de transposer cette méthodologie au cas particulier des avatars. Avant d'aborder la partie finale du manuscrit s'intéressant à l'application des méthodes décrites précédemment à l'analyse des mouvements d'un avatar lors de la tâche visuomotrice, cette étude a pour but de construire un environnement expérimental permettant l'étude des modifications de la conscience de soi corporelle. Les méthodes présentées dans cette partie seront en grande partie réinvesties dans la cinquième étude.

Au-delà de cet objectif, cette expérience a pour but de comparer les effets des stimulations cardio-visuelles et visuo-tactiles, qui ne sont jamais observées chez une même population dans la littérature. De plus, cette expérience vise à comprendre les liens entre les composantes de la conscience de soi corporelle, et déterminer si des phénotypes individuels peuvent influencer leur évolution à la suite d'une illusion corps-entier.

Introduction

Avec le récent développement des technologies de réalité virtuelle, les applications faisant intervenir des avatars sont de plus en plus accessibles. Les premières inductions d'expériences « hors du corps », effectuées à l'aide de stimulations électriques au niveau du gyrus angulaire droit (Blanke et al., 2002), ont ensuite été réalisées en filmant un participant dont l'image était retranscrite dans un casque de réalité virtuelle (Ehrsson, 2007). Au début de son utilisation pour ces expériences, le casque de réalité virtuelle n'était qu'un écran servant à retranscrire la vision du sujet. La démocratisation d'outil de création d'environnement virtuels (Unity, Unreal Engine, Godot...) associé aux kits de développement accompagnant les casques récents rend aujourd'hui plus facile la conception d'expériences dans des

environnements contrôlés. L'intérêt d'utiliser un monde virtuel plus qu'une retransmission filmée est de générer des stimulations spécifiques, répétables et adaptées à l'utilisateur.

Par exemple, certaines expériences fondatrices dans l'étude des illusions corps-entier s'intéressaient à l'incarnation par les sujets d'un mannequin filmé depuis un point de vue à la troisième personne (Aspell et al., 2013; Lenggenhager et al., 2007). Pour étudier les effets de la ressemblance entre le sujet et sa représentation visuelle, il faudrait donc posséder des mannequins de différentes tailles, corpulences et couleurs. En réalité virtuelle, chaque élément étant modifiable à volonté, il est très facile de générer des avatars partageant naturellement certaines caractéristiques anthropométriques avec le participant, ou même de concevoir des avatars présentant une fidélité visuelle photoréaliste (Gorisse et al., 2019). De plus, l'avatar peut être déformé pour générer des réponses autonomes, par exemple en séparant les jambes du reste du corps (Maselli and Slater, 2013). Enfin, il est possible de faire agir l'avatar auquel l'utilisateur s'est identifié, pour provoquer une simulation d'activité physique (Kokkinara et al., 2016).

Les expériences en réalité virtuelle cherchent couramment à générer et mesurer le sentiment d'incarnation avec l'avatar. Pour induire une illusion corps-entier, les méthodes de la littérature reposent la plupart du temps sur l'utilisation de stimulations multisensorielles. Lorsque l'avatar se déplace avec les mouvements du participant, l'illusion est générée par la synchronisation d'informations visuomotrices. En utilisant un avatar statique, les méthodes les plus utilisées sont les synchronisations d'entrées visuelles et cardiaques (illusions cardio-visuelles) d'une part, et visuelles et tactiles (illusions visuo-tactiles) d'autre part. Généralement, le succès d'une illusion est mesuré par son effet sur les composantes de la conscience de soi corporelle. L'incarnation n'étant pas un phénomène pouvant être mesuré en soi, il est généralement mesuré par les modifications de quatre composantes définies dans la littérature (Blanke, 2012) : l'auto-localisation, la prise de perspective, l'auto-identification et le sentiment d'agentivité.

Il est communément admis dans la littérature qu'une illusion est réussie lorsque les mesures des composantes de la conscience de soi corporelle présentent des valeurs significativement différentes entre des conditions faisant intervenir des stimulations synchrones et asynchrones. Même si cette façon de faire est extrêmement répandue, elle pourrait générer un biais méthodologique. Premièrement, il est possible de générer un sentiment d'incarnation envers un avatar virtuel en l'absence de stimulation, par simple capture visuelle des caractéristiques anatomiques du corps virtuel (Carey et al., 2019). Ces informations congruentes visuo-proprioceptives sont suffisantes pour générer une incarnation subjective de l'avatar chez 40% des participants parmi un effectif de 80 personnes. De ce fait, il est important de se questionner sur l'utilisation des stimulations multisensorielles asynchrones comme

condition « contrôle ». En utilisant un avatar mobile, le sentiment d'appartenance envers l'avatar se construit immédiatement avec la perception du mouvement, mais disparaît dès lors que les mouvements de l'avatar ne sont plus synchronisés avec ceux de l'utilisateur (Keenaghan et al., 2020). La présentation de stimulations asynchrones peut alors être perçue comme une condition « dégradée » ; dès lors, il est difficile d'affirmer si les différences observées entre les conditions synchrones et asynchrones témoignent de l'efficacité d'une stimulation pour générer une illusion, ou de la faculté d'une incongruence temporelle à détruire cette illusion.

Dans l'expérience présentée, chaque participant passe deux fois un protocole similaire, avec des stimulations cardio-visuelles et visuo-tactiles. Pour éviter une trop forte familiarisation avec les tâches présentées, les conditions asynchrones habituellement utilisées pour témoigner de l'efficacité de l'illusion n'ont pas été intégrées au protocole. Par soucis d'éviter des biais liés à l'apprentissage, et en prenant en compte les critiques liées à l'utilisation de stimulations asynchrones, les effets des illusions seront observés en comparant les mesures obtenues suite aux stimulations synchrones avec celles obtenues en l'absence de stimulations.

En l'absence de mouvement, cette étude ne s'intéresse pas au sentiment d'agentivité. En revanche, des mesures comportementales ont été mises en place pour mesurer l'auto-localisation, la prise de perspective et l'auto-identification. À partir de ces mesures comportementales, l'objectif sera d'étudier les relations entre les composantes de la conscience de soi corporelle, afin de déterminer si elles évoluent ensemble ou indépendamment. De plus, en obtenant ces mesures pour une même population subissant chacune des deux illusions, leurs effets comparés sur les composantes de la conscience de soi corporelles pourront être étudiés.

Afin de compléter l'analyse effectuée et de déterminer si des profils individuels influencent la susceptibilité à un type de stimulations multisensorielles en particulier, des questionnaires et des mesures de facultés cognitives ont été ajoutés au protocole. En particulier, l'empathie a été liée à la puissance de l'illusion de la main en caoutchouc (Seiryte and Rusconi, 2015), à la faculté à prendre la perspective de l'avatar (Heydrich et al., 2021) ou encore au drift de localisation perçue (Nakul et al., 2020). De même, l'intéroception a été identifiée comme un prédicteur de la malléabilité de la représentation de soi (Suzuki et al., 2013; Tsakiris et al., 2011). Le style perceptif, mesuré par le Rod and Frame test, ainsi que la faculté à effectuer des rotations mentales ont aussi été mesurées.

En outre, des questionnaires portant sur l'expérience subjective en réalité virtuelle, et notamment le sentiment de présence et le cybermalaise perçu ont été complétés par les participants.

Les principaux objectifs de cette étude sont :

- Mettre en place un paradigme expérimental permettant de mesurer avec des méthodes comportementales les composantes de la conscience de soi corporelle.
- Observer les liens entre l'évolution de ces composantes.
- Étudier les effets comparés des illusions cardio-visuelles et visuo-tactiles sur ces composantes.
- Déterminer si des profils individuels permettent de prédire la susceptibilité à un type de stimulations multisensorielles en particulier.

Matériel et méthodes

Participants

29 étudiants en Sciences et Techniques des Activités Physiques et Sportives (16 hommes, 13 femmes, 21.9 ± 3.4 ans, 64.7 ± 12.8 kg, 171.5 ± 8.9 cm) ont donné leur consentement éclairé pour participer à ce programme, qui faisait partie de leur cursus universitaire et pour lequel ils ont reçu des crédits. Le comité de révision institutionnel a approuvé la procédure qui respectait toutes les recommandations éthiques et suivait la déclaration d'Helsinki. Tous les participants avaient une vision normale ou corrigée à normale. Aucun d'entre eux n'avait une expérience préalable avec la tâche.

Appareils

Les expérimentations ont été effectuées dans un environnement virtuel développé avec Unity, et présenté dans un casque HTC Vive Pro. Les participants ont été placés dans une pièce de $10 \text{ m} \times 6 \text{ m} \times 3 \text{ m}$, derrière un avatar humanoïde situé à 2 mètres devant eux. La taille de l'avatar était adaptée à celle du sujet. Le choix d'un avatar neutre (ni féminin ni masculin), de couleur grise et sans signe distinctif particulier est effectué pour éviter de potentiels biais liés notamment à l'effet Proteus. Tout au long de l'expérience, l'électrocardiogramme des participants est enregistré à 1kHz avec trois électrodes reliées à un PowerLab 8/35 et un amplificateur de signaux biologiques dédié (FE132, ADInstruments, Dunedin, Nouvelle Zélande).

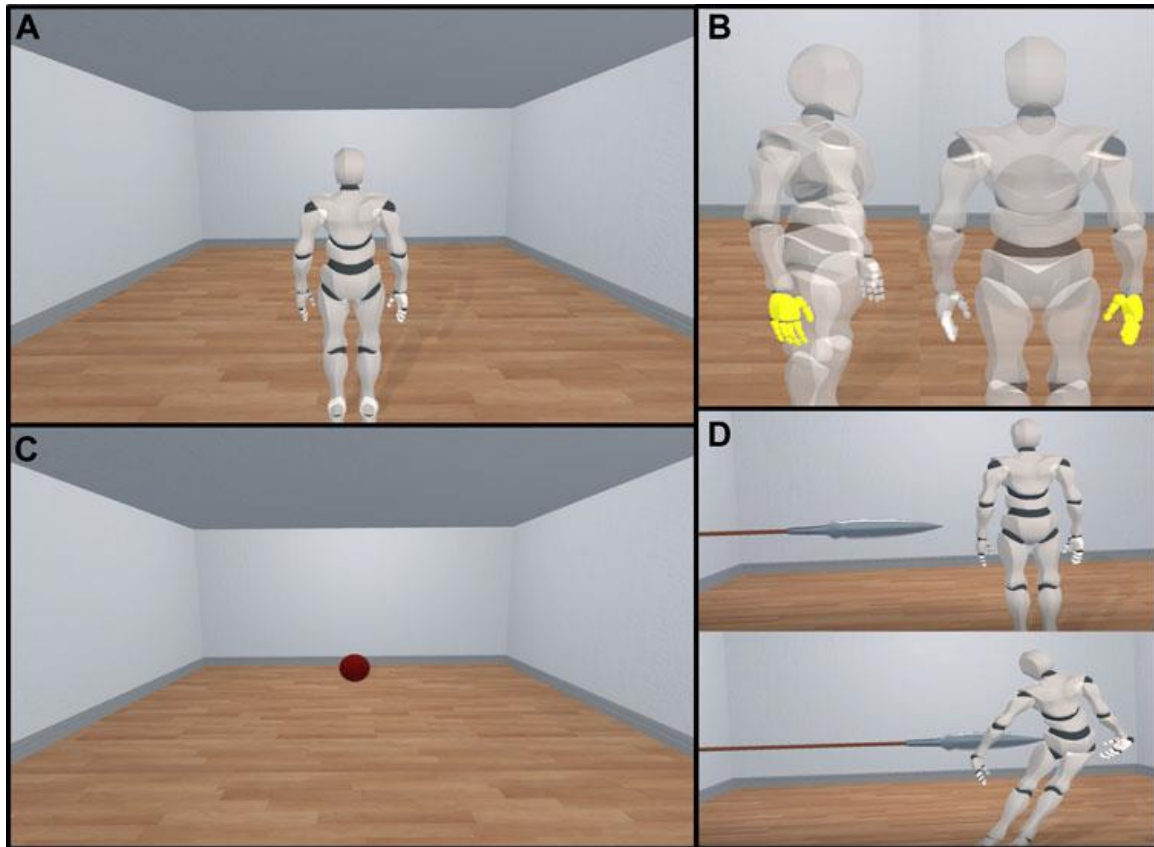


Figure 39 – Vues VR des tâches avec l’avatar. A : Point de vue du participant, voyant l’avatar de dos, 2 mètres devant lui. B : Orientations de l’avatar pendant la tâche, présenté à +120° et 0°. C : Image de la balle roulant vers le participant dans la tâche MIT. D : Stimulus menaçant apparaissant à l’écran et transperçant l’avatar.

Stimulations cardio-visuelles et visuo-tactiles

La moitié des participants ($n = 15$) a d'abord expérimenté la stimulation visuo-tactile avant la stimulation cardio-visuelle 2 jours plus tard, et l'autre moitié a expérimenté la stimulation dans l'ordre inverse.

Pour la stimulation visuo-tactile, l'expérimentateur utilisait le contrôleur VR pour toucher le dos du participant de manière imprévisible, avec des intervalles de temps pseudo-aléatoires (1.6 ± 0.6 secondes) étant les mêmes pour chacun des sujets. Pour guider l'expérimentateur, des signaux visuels apparaissent sur un écran pour lui indiquer quand appliquer la stimulation. Le participant voyait le contrôleur VR toucher le dos de l'avatar en même temps qu'il percevait le toucher sur son propre corps.

Pendant la stimulation cardio-visuelle, le battement cardiaque du participant est obtenu à partir de l'acquisition brute de l'électrocardiogramme. Le pic de l'onde R a été utilisé pour déclencher un stimulus visuel sur la silhouette de l'avatar, affiché sous la forme d'une lumière clignotante bleue. La silhouette lumineuse grandit jusqu'à atteindre sa taille maximale 100 ms après le pic de l'onde R détecté par l'ECG, puis

disparaît progressivement pendant une durée de 400 ms. Le délai de présentation du stimulus est choisi en accord avec des expériences précédentes (Brener et al., 1993; Brener and Kluvitse, 1988; Ring and Brener, 1992; Yates et al., 1985) pour afficher un information visuelle congruente avec la perception subjective du sujet de son battement cardiaque. En prenant en compte les délais nécessaires à la détection de l'onde R, à la fréquence d'affichage, à la perception du stimulus par le participant et les 100ms additionnelles, le battement cardiaque est affiché sur l'avatar et perçu par le participant environ 200 ms après l'onde R.

Auto-localisation : Mental Imagery Task (MIT)

L'auto-localisation est mesurée avec une tâche d'imagerie mentale (Nakul et al., 2020), lors de laquelle un participant voit apparaître une balle rouge de 50 cm de diamètre au bout de la pièce dans laquelle l'avatar a disparu, à une distance variant entre 5.7 et 6.3 mètres (Figure 39.C). La position moyenne d'apparition de la balle est la même pour les différentes répétitions de la tâche. Après un signal sonore, la balle commence à rouler vers le participant à une vitesse de 1 m/s. Après trois secondes, l'écran du casque s'éteint, et le participant doit imaginer la balle rouler dans sa direction. Lorsqu'il pense que la balle est rentrée en contact avec ses pieds, il doit appuyer sur le bouton du contrôleur VR. La position de la balle à cet instant est utilisée comme mesure d'auto-localisation.

Prise de perspective : Own Body Transformations (OBT)

Pour mesurer la faculté des participants à prendre la perspective de l'avatar, une tâche adaptée d'expériences précédentes a été développée (Deroualle et al., 2015; Heydrich et al., 2021). Lors de cette tâche, l'avatar reste dans la pièce, toujours à une distance de 2 mètres du participant, et apparaît avec une orientation de 0°, 60°, -60°, 120°, -120° ou 180° après un délai aléatoire. Une des mains de l'avatar (la gauche ou la droite) s'allume en jaune (Figure 39.B), et le participant doit répondre le plus précisément et rapidement possible en utilisant la manette tenue dans la main similaire à celle allumée chez l'avatar. Le temps de réponse moyen de l'utilisateur pour appuyer sur le bouton est utilisé pour quantifier la prise de perspective. Pour s'assurer que les participants ne répondaient pas au hasard, le taux de bonnes réponses a été calculé (97.2%).

Auto-identification : réponses autonomes face à un stimulus menaçant

Pour mesurer l'auto-identification à l'avatar, un stimulus menaçant a été présenté pour observer des réponses autonomes. Le participant avait pour consigne de regarder son avatar, et une lance s'approchait lentement de ce dernier. Après 6 secondes passés à l'écran, elle embroche l'avatar qui s'écroule au sol. En reprenant le

protocole mis en place dans une étude précédente (Maselli and Slater, 2013), le rythme cardiaque du participant est enregistré à partir de 20 secondes avant l'apparition du stimulus menaçant. L'auto-identification est quantifiée par la décélération de la fréquence cardiaque pendant la phase initiale de « freeze », avant l'accélération de la fréquence cardiaque. La décélération de la fréquence cardiaque (Heart Rate Deceleration, HRD) a été mesurée comme la différence entre les valeurs maximales et minimales de l'intervalle RR pendant la période de décélération la plus importante, d'une durée supérieure à 1,5 s, survenant dans la fenêtre temporelle allant de l'apparition de la lance à l'écran jusqu'au moment où elle transperce l'avatar (Adenauer et al., 2010; Maselli and Slater, 2013; Tajadura-Jiménez et al., 2012).

Questionnaire d'illusion

Q1	J'avais l'impression que le corps virtuel était mon corps
Q2	J'avais l'impression que mon (vrai) corps se déplaçait vers l'avant (vers le corps virtuel)
Q3	J'avais l'impression d'avoir plusieurs corps
Q4	J'avais l'impression que le corps virtuel se déplaçait vers l'arrière (vers mon corps)
Q5	J'avais l'impression d'être à deux endroits en même temps
Q6	J'avais l'impression de pouvoir animer (mettre en mouvement) le corps virtuel comme mon vrai corps si je le souhaitais
Q7	J'avais l'impression de me trouver dans la scène virtuelle
Q9	J'ai eu des maux d'estomac (nausées)
QC1	J'avais l'impression que la lumière clignotante était mon battement cardiaque
QC2	J'avais l'impression d'avoir deux cœurs
QC3	J'avais l'impression que mon cœur était dans le corps virtuel
QC4	J'avais l'impression de sentir mon cœur là où je voyais la lumière clignotante
QT1	J'avais l'impression de sentir la manette à l'endroit où je voyais le corps virtuel (donc sur le corps virtuel)
QT2	J'avais l'impression que le toucher que je ressentais était causé par la manette touchant le corps virtuel
QT3	J'avais l'impression que le toucher que je ressentais provenait de quelque part entre mon vrai corps et le corps virtuel

Tableau 6 - Questionnaire d'illusion présenté aux participants. Les questions 1 à 8 sont présentées lors de chacun des passages. Les questions C1 à C4 sont présentées uniquement après induction d'une illusion cardio-visuelle, et les questions T1 à T3 après induction d'une illusion visuo-tactile.

En plus des mesures comportementales, un questionnaire est présenté aux participants pour recueillir des valeurs auto-rapportées concernant des questions relatives à la conscience de soi corporelle (questions 1 à 8 : Aspell et al., 2013; Lenggenhager et al., 2009; Nakul et al., 2020), aux stimulations cardio-visuelles (questions C1 à C4 : Aspell et al., 2013) et aux stimulations visuo-tactiles (questions T1 à T3 : Nakul et al., 2020), toutes reprises d'études précédentes. Les participants devaient répondre à chacune des questions sur une échelle de Likert en 7 points (allant de -3 à +3), en pointant la réponse dans l'environnement virtuel à l'aide du contrôleur VR.

Profils individuels

Le style perceptif, ou dépendance au champ visuel, a été évaluée en utilisant le Rod and Frame test. La configuration utilisée est la même que celle décrite dans (Maneuvrier et al., 2020), avec une baguette verticale orientée à 27° présentée à l'intérieur d'un cadre incliné à 18° . Les participants avaient pour consigne de prendre leur temps, afin d'orienter la baguette le plus proche possible de la verticale gravitaire. L'angle moyen de déviation en direction de l'orientation du cadre au cours des 20 essais est utilisé comme mesure de la dépendance au champ visuel.

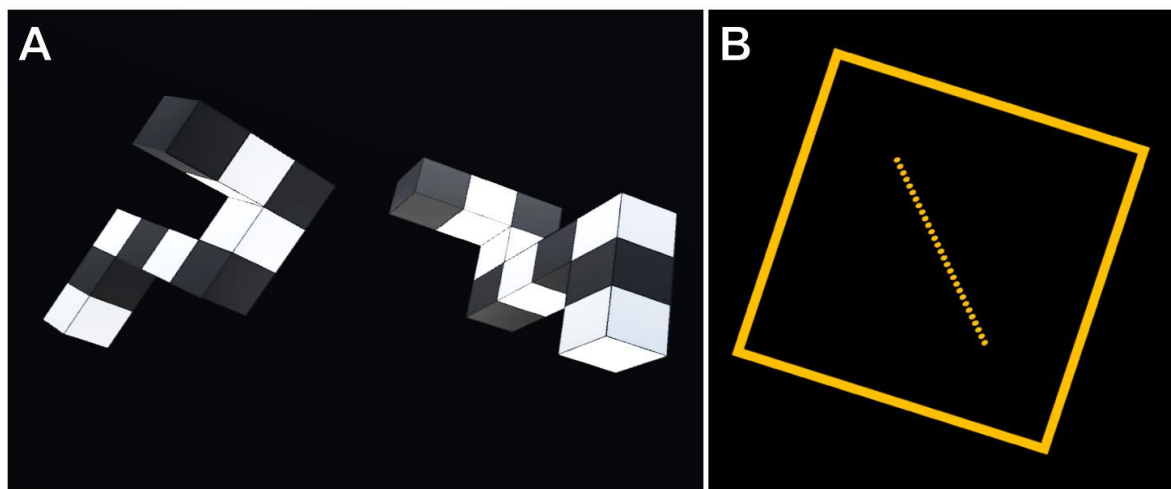


Figure 40 – A : Deux objets 3D présentés pendant la tâche de rotations mentales. Ici, l'objet de droite est l'image miroir de l'objet de gauche. B : Capture d'écran du Rod and Frame Test présenté au participant.

La faculté des participants à effectuer des rotations mentales a été évaluée avec une tâche classique (Shepard and Metzler, 1971), dont l'adaptation en réalité virtuelle a été validée récemment (Lochhead et al., 2022). Pendant cette tâche, deux formes sont présentées aux participants, l'une d'entre elles avec une rotation de 0° , 60° , -60° , 120° , -120° ou 180° par rapport à la première. Les participants devaient déterminer, le plus précisément et rapidement possible, si les deux formes étaient les mêmes, ou le miroir l'une de l'autre. Après 4 essais d'entraînement lors desquelles les réponses sont

données à l'oral pour s'assurer que la consigne est correctement respectée, 64 paires d'objets sont présentées consécutivement. Les performances sont calculées sur les essais lors desquels les formes sont similaires (2/3 des essais). Le pourcentage de bonnes réponses est mesuré pour s'assurer que les participants ne répondent pas de façon aléatoire.

Concernant l'intéroception, deux aspects ont été étudiés. En premier lieu, la précision intéroceptive a été mesurée avec une tâche de comptage de battements cardiaques (Fittipaldi et al., 2020), lors de laquelle les participants doivent appuyer sur un bouton lorsqu'ils ressentent un battement cardiaque. S'ils ne ressentent rien, il leur est demandé de faire confiance à leur intuition, et d'appuyer au moment où ils pensent ressentir quelque chose. La distance médiane mesurée au cours de deux répétitions de 90 secondes de la tâche est utilisée comme mesure de la précision intéroceptive, et sera nommée md index. La sensibilité intéroceptive est mesurée avec l'Interoceptive Accuracy Scale (IAS, Annexe 5, Murphy et al., 2019), un questionnaire portant sur la faculté globale d'un individu à prêter attention à ses signaux internes. Enfin, l'empathie est mesurée avec l'Empathy Quotient (EQ, Annexe 4, Baron-Cohen and Wheelwright, 2004).

Procédure

À leur arrivée au laboratoire, la procédure expérimentale complète est expliquée aux participants. Ils sont ensuite équipés avec les trois électrodes de l'électrocardiogramme, et commencent par remplir des questionnaires (Empathy Quotient, Interoceptive Accuracy Scale) sur ordinateur avant d'effectuer les deux répétitions de la tâche de comptage de battement cardiaque. Après cela, les participants sont équipés avec le casque en réalité virtuelle, et effectuent les tâches de Rod and Frame Test et de rotations mentales. Ensuite, la tâche de l'avatar commence. La taille de l'avatar est modifiée pour correspondre à celle du participant, puis des mesures basales de l'auto-localisation (avec 8 répétitions de la tâche MIT) et de la prise de perspective (48 répétitions d'OBT) sont effectuées. Ces mesures représentent les valeurs de la condition « contrôle », lors de laquelle aucune stimulation n'est appliquée.

Ensuite, l'illusion corps-entier est induite en effectuant deux minutes de stimulations synchrones, cardio-visuelles ou visuo-tactiles en fonction du passage. Après cela, quatre blocs expérimentaux sont réalisés. Chacun des blocs contient 4 répétitions de la tâche d'imagerie mentale, 24 répétitions d'OBT, un questionnaire, puis un rappel de l'illusion de 35 secondes. À la fin de la quatrième répétition, le stimulus menaçant est présenté aux participants.

Les participants ont ensuite pour instruction de retirer le casque de réalité virtuelle, puis de répondre à des questionnaires portant sur leur ressenti. Le cybermalaise est mesuré avec le SSQ (Bouchard et al., 2009), et la présence avec l'IPQ (Schubert et al., 2001).

Durant le second passage, les participants réalisaient un protocole similaire avec l'autre modalité, mais sans les questionnaires de début et la tâche de comptage de battement cardiaque.

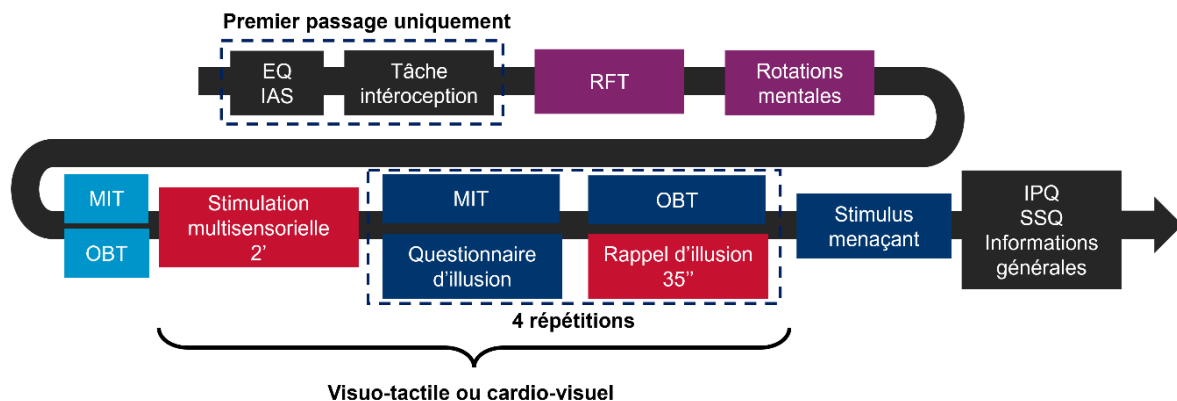


Figure 41 - Protocole expérimental. EQ : questionnaire d'empathie. IAS : questionnaire mesurant la sensibilité intéroceptive. La tâche d'intéroception correspond à deux fois 90 secondes de perception de battement cardiaque. Ces premières tâches ne sont effectuées que lors du premier passage. RFT : Rod and Frame Test. MIT : Mental Imagery Task. OBT : Own Body Transformations. IPQ : questionnaire d'immersion. SSQ : Simulator Sickness Questionnaire. IPQ : Igroup Presence Questionnaire.

Traitement des données

Les données récoltées ont été traitées avec Matlab. Comme les mesures d'auto-localisation et de prise de perspective ne différaient pas statistiquement entre les blocs, elles ont été moyennées pour former une mesure « post-illusion ».

Analyse statistique

La distribution normale des données a été évaluée à l'aide du test de Shapiro-Wilk. Pour explorer les effets des stimulations visuelles sur OBT (prise de perspective) et MIT (auto-localisation), une ANOVA à trois facteurs a été utilisée avec le type de stimulation (cardio-visuelle/visuo-tactile), la mesure pré/post illusion et l'ordre de passage (premier passage /second passage) comme facteurs dépendants.

La décélération de la fréquence cardiaque n'a été mesurée qu'après l'induction de l'illusion corps-entier ; une ANOVA à deux facteurs a donc été utilisée avec le type de stimulation (cardio-visuelle vs visuo-tactile) et l'ordre de passage comme facteurs

dépendants. Des tests de Wilcoxon ont été utilisés pour comparer les réponses au questionnaire après les stimulations cardio-visuelle ou visuo-tactile.

Pour étudier conjointement l'évolution des composantes de la conscience de soi corporelle avec les profils individuels, une analyse en composantes principales (ACP) a été réalisée à l'aide du logiciel R (R Core Team, 2020) en utilisant les données du premier passage de chaque participant, un effet de familiarisation ayant été observé pour certaines variables.

Dans un premier temps, seules les variables quantifiant l'auto-localisation, la prise de perspective et l'auto-identification ont été introduites dans l'ACP en tant que variables principales. Ensuite, des variables supplémentaires (n'influençant pas les dimensions de l'ACP) ont été ajoutées et cartographiées sur le cercle de corrélation de l'ACP : les performances lors du Rod and Frame Test, les performances dans la tâche des rotations mentales, les performances de la tâche de comptage des battements cardiaques (md index), la sensibilité intéroceptive (IAS), la présence et l'empathie. Pour obtenir des informations sur les variables qualitatives mesurées, des ellipses à 95% ont été tracées en identifiant le sexe, la pratique sportive (individuel/équipe), les habitudes de jeux vidéo (joueur/non-joueur) ainsi que le type de stimulation (cardio-visuelle/visuo-tactile).

Sur la base des résultats de l'ACP et d'études antérieures, des analyses supplémentaires ont été effectuées afin de déceler de potentielles relations entre les composantes de la conscience de soi corporelle et les profils individuels. La relation entre les capacités de rotation mentale et les performances de l'OBT a été évaluée à l'aide des coefficients de corrélation de Pearson. Les participants ont été séparés en deux groupes (faible/élevé) en fonction de leurs scores d'empathie et d'intéroception (mesurés respectivement par le QE et le md index), et des tests t d'échantillons indépendants entre les groupes ont été effectués pour les composantes de la conscience de soi corporelle. La répartition entre les groupes à faible empathie (n = 15) et à forte empathie (n = 14) a été effectuée pour une valeur de EQ = 40. Les groupes à faible intéroception (n = 15) et à forte intéroception (n = 14) ont été séparés en fonction de valeurs de md index supérieures ou inférieures à 0.35, respectivement.

Résultats

Questionnaire d'illusion

Les réponses au questionnaire d'illusion fournissent des résultats en accord avec ceux obtenus dans la littérature avec des expériences similaires (Nakul et al., 2020; Salomon et al., 2017), notamment en ce qui concerne la question 1 (« J'avais l'impression que le corps virtuel était mon corps »), couramment utilisée comme argument principal en faveur de l'illusion corps-entier. Les réponses au questionnaire

ne montrent aucune différence significative entre les effets des stimulations cardio-visuelles et visuo-tactiles.

Item	Visuo-tactile	Cardio-visuel	Wilcoxon p-value
Q1	-0.06 ± 1.92	-0.64 ± 1.74	0.22
Q2	-1.10 ± 1.69	-1.18 ± 1.84	0.82
Q3	-0.89 ± 1.73	-1.35 ± 1.65	0.38
Q4	-1.75 ± 1.42	-2.16 ± 0.94	0.38
Q5	-0.44 ± 1.78	-1.20 ± 1.64	0.09
Q6	-0.15 ± 2.08	-0.37 ± 1.94	0.53
Q7	1.16 ± 1.44	0.55 ± 1.88	0.23
Q9	-2.76 ± 0.75	-2.80 ± 0.75	0.81
QC1		0.86 ± 1.55	
QC2		-1.56 ± 1.30	
QC3		-0.87 ± 1.78	
QC4		-1.00 ± 1.63	
QT1	1.44 ± 1.57		
QT2	0.65 ± 1.78		
QT3	-0.97 ± 1.59		

Tableau 7 - Réponses aux questionnaires après induction des illusions cardio-visuelles et visuo-tactiles.

Auto-localisation

La tâche d'imagerie mentale n'a montré aucun changement de localisation perçue après l'illusion ($F(1,115) = 0.17, p = 0.68$), aucun effet de l'ordre de passage ($F(1,115) = 0.16, p = 0.69$) et aucun effet du type d'illusion ($F(1,115) = 0.18, p = 0.67$). En moyenne, les participants se sont localisés à 61 ± 60 cm devant eux avant l'illusion (cardio-visuel : 63 ± 58 cm ; visuo-tactile : 58 ± 62 cm), et à 55 ± 70 cm après la stimulation multisensorielle (cardio-visuel : 58 ± 73 cm ; visuo-tactile : 53 ± 67 cm).

Prise de perspective

En revanche, une ANOVA à trois facteurs sur les évaluations quantitatives de la prise de perspective a montré des effets significatifs des stimulations multisensorielles. Les temps de réponse ont significativement diminué après l'induction de l'illusion ($F(1,115) = 9.98, p = 0.002$), indistinctement des stimulations cardio-visuelles et visuo-tactiles ($F(1,115) = 0.46, p = 0.50$). Comme il n'existe pas d'effet d'interaction entre les scores avant et après l'illusion et l'ordre de passage (premier ou deuxième passage) ($F(1,115) = 2.37, p = 0.13$), il est exclu que la répétition seule puisse expliquer une amélioration du temps de réponse.

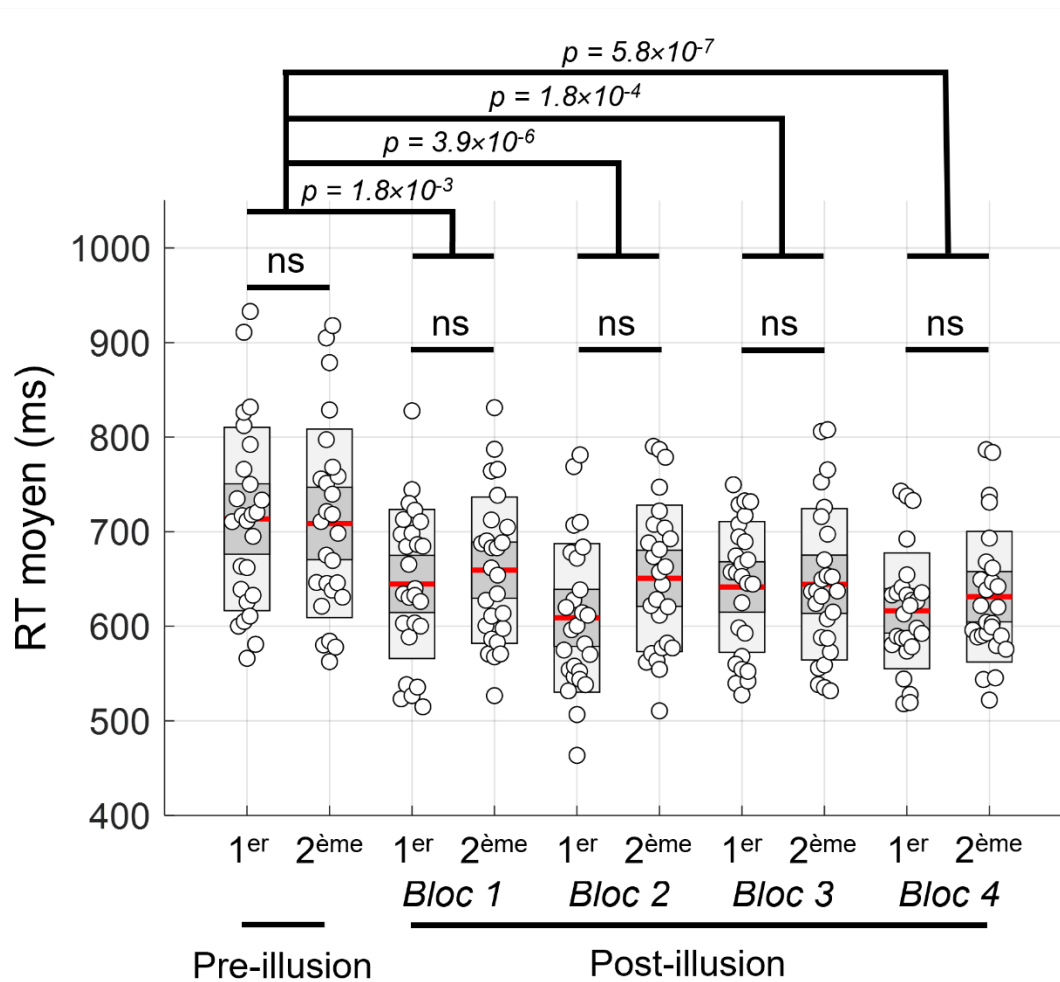


Figure 42 - Temps de réponse moyen lors de la tâche d'OBT. Les RT sont présentés avant et après induction de l'illusion, lors de la première et deuxième moitié de chaque bloc.

De plus, pour s'assurer que l'amélioration observée des capacités de prise de perspective était bien liée à l'induction d'une illusion du corps entier, et pas seulement à la familiarisation avec la tâche, une ANOVA à deux facteurs a été réalisée sur la répétition (PRE, bloc 1, bloc 2, bloc 3 et bloc 4) et la moitié (1^{ère} ou 2^{ème} moitié de chaque répétition de la tâche OBT) comme facteurs indépendants. Nous avons constaté un effet de la répétition ($F(4,259) = 9.98$, $p = 1.65 \times 10^{-7}$), aucun effet de la moitié ($F(1,259) = 1.99$, $p = 0.16$) et aucun effet d'interaction ($F(4,259) = 0.64$, $p = 0.64$). Un test post-hoc de Tukey a montré des différences significatives entre la condition PRE et le bloc 1 ($p = 1.78 \times 10^{-3}$), le bloc 2 ($p = 3.92 \times 10^{-6}$), le bloc 3 ($p = 1.80 \times 10^{-4}$) et le bloc 4 ($p = 5.78 \times 10^{-7}$). Il n'y avait aucune différence significative entre les blocs 1, 2, 3 et 4. De plus, le test post-hoc de Tukey n'a montré aucune différence entre les temps de réponse moyens dans chaque moitié pour le PRE ($p = 1.00$), le bloc 1 ($p = 1.00$), le bloc 2 ($p = 0.67$), le bloc 3 ($p = 1.00$) et le bloc 4 ($p = 1.00$). Les temps de réponse moyens dans chaque moitié de toutes les répétitions sont présentés dans la figure 42.

Dans l'ensemble, les stimulations cardio-visuelles et visuo-tactiles ont eu pour effet d'améliorer les performances des participants de 95 ± 100 ms et 82 ± 64 ms, respectivement. En moyenne, les participants ont obtenu des résultats encore meilleurs lors de leur second passage ($F(1,115) = 7.01, p = 0.01$). Lors du premier passage, les participants ont amélioré leur temps de réponse moyen après l'illusion de 133 ± 85 ms lors du premier passage, et de 44 ± 53 ms lors du second passage. La figure 43 montre le temps de réponse en fonction de l'angle avec un profil en parfait accord avec la littérature (Falconer and Mast, 2012).

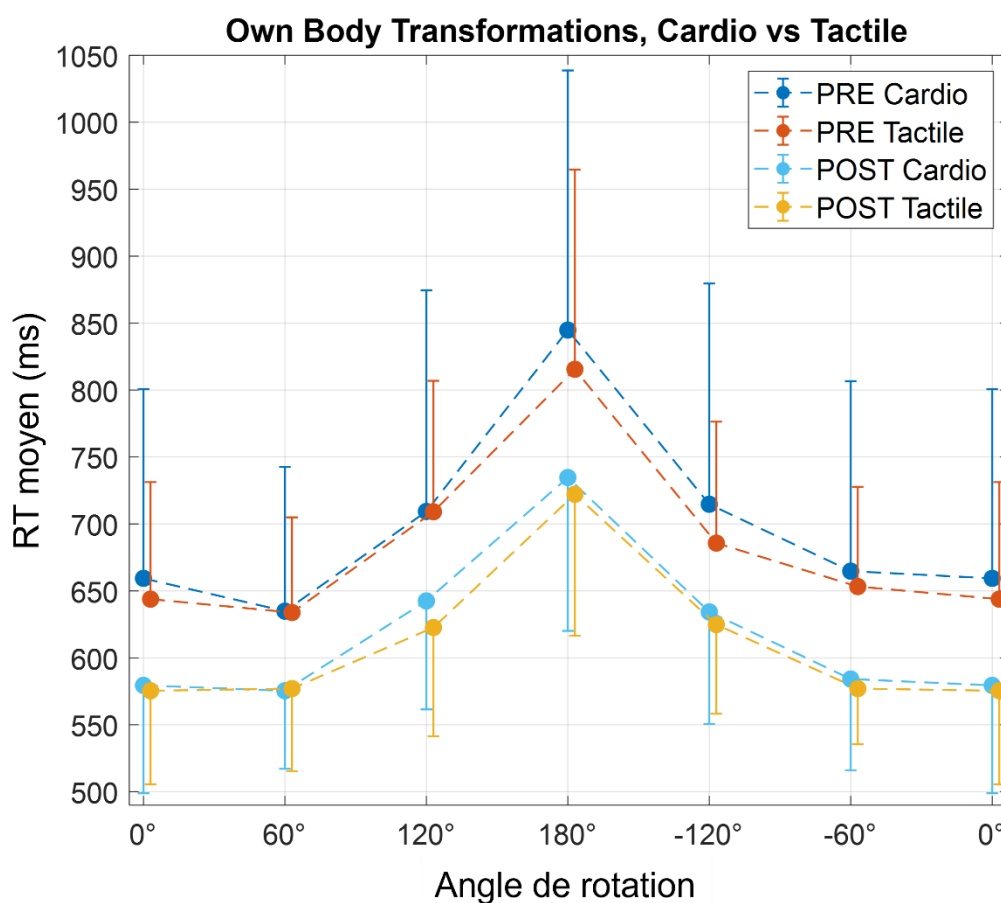


Figure 43 - Temps de réponse lors de la tâche OBT pour chacun des angles de présentation de l'avatar, avant et après chaque type d'illusion.

Auto-identification

Comme attendu, la décélération de la fréquence cardiaque était plus marquée lors du premier passage. En effet, après avoir été exposé une première fois au stimulus menaçant, la réponse autonome provoquée lors d'une nouvelle présentation de la lance diminue ($F(1,57) = 4.14, p = 0.047$). Concernant le premier passage uniquement, la décélération du battement cardiaque consécutive à la présentation du stimulus menaçant n'est pas différente en fonction du type de stimulation multisensorielle

appliquée ($F(1,57) = 1.45, p = 0.23$). La décélération de la fréquence cardiaque mesurée lors du premier passage est de 16.3 ± 8.7 battements par minute après la stimulation visuo-tactile, et 23.1 ± 9.7 battements par minute après la stimulation cardio-visuelle.

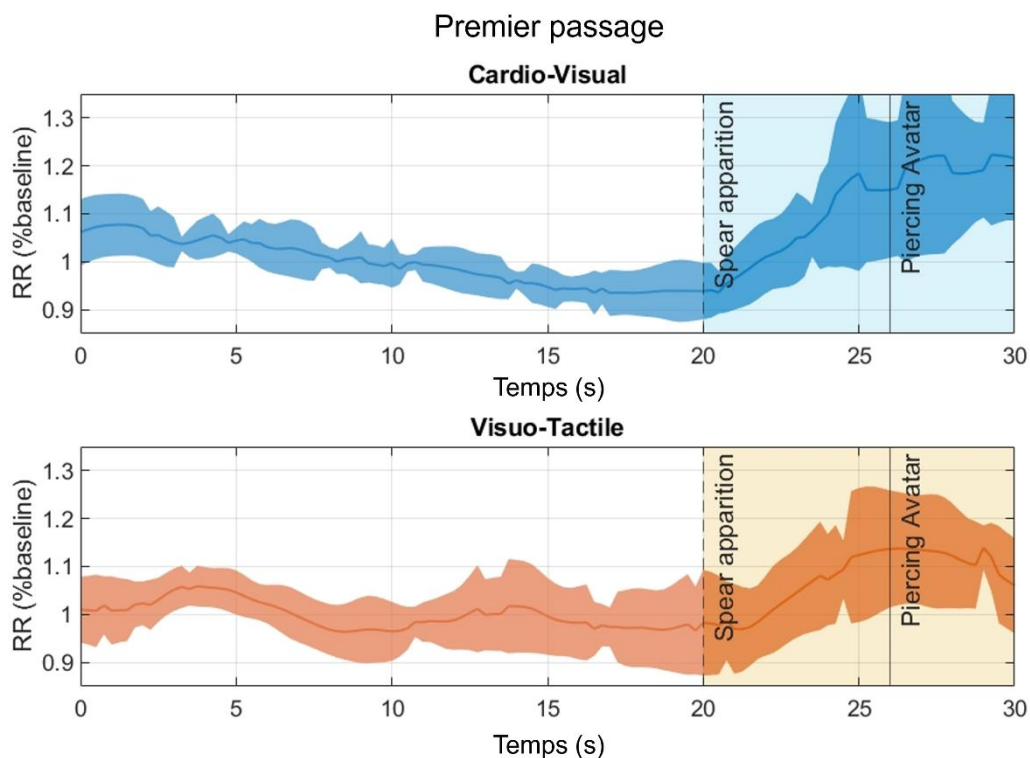


Figure 44 - Décélération du battement cardiaque lors du premier passage suite aux illusions cardio-visuelle (en haut) et visuo-tactile (en bas)

Profils individuels

Données qualitatives	
Jeux vidéo	45% (13/29) déclarent jouer régulièrement
Pratique sportive	48% (14/29) pratiquent un sport collectif
Données quantitatives	
Rotations mentales	Temps de réponse moyen : $3.1 \pm 1.1s$ (1 - 6.5s)
Rod and Frame Test	Angle moyen de déviation : $2.2 \pm 1.3^\circ$ (0.3 - 5.3°)
IAS	Score : 78.34 ± 8.67 (64 - 95)
md index	Score : 0.35 ± 0.15 (0.05 - 0.68)
Empathie	Score : 42.24 ± 8.43 (31 - 63)
Présence	Score : 55.69 ± 8.04 (41 - 76)
Activité physique	Pratique hebdomadaire : $9.38 \pm 5.18h$ (0 - 20h)

Tableau 8 - Profils individuels des participants à l'expérience

Les variables issues des tâches mesurant les profils individuels pouvant influencer le comportement d'un participant en immersion dans un environnement virtuel sont présentées dans le tableau 8. Les données quantitatives présentent une

grande hétérogénéité, ce qui suppose la présence de nombreux profils distinctifs parmi nos participants.

Comme le score de cybermalaise (évalué par le Simulator Sickness Questionnaire) était en moyenne assez peu élevé (6.6 ± 5.5 (de 0 à 22), six participants ayant obtenu un score >10), il n'a pas été inclus dans l'analyse en composantes principales.

En complément, des données quant à la fiabilité test-retest du RFT et de la tâche de rotations mentales en VR sont présentées dans les Annexes 6 et 7.

Analyse en composantes principales

L'analyse en composantes principales (ACP) a révélé une absence de covariation entre les composantes de la conscience de soi corporelle : l'auto-localisation (MIT), la prise de perspective (OBT) et l'auto-identification (HRD). L'absence de covariation entre ces composantes soutient le fait qu'elles doivent être étudiées en parallèle, et qu'elles représentent des aspects distincts de la conscience de soi corporelle. Aucune des variables utilisées pour construire des profils individuels n'a présenté de covariation forte avec les différentes composantes de la conscience de soi corporelle.

Il est intéressant de noter certains points : tout d'abord, la prise de perspective (mesurées avec OBT) n'est pas fortement corrélée à la faculté à effectuer des rotations mentales. Ensuite, la précision intéroceptive (md Index) ne covarie pas avec la sensibilité intéroceptive (IAS), un point qui est développé dans l'Annexe 6.

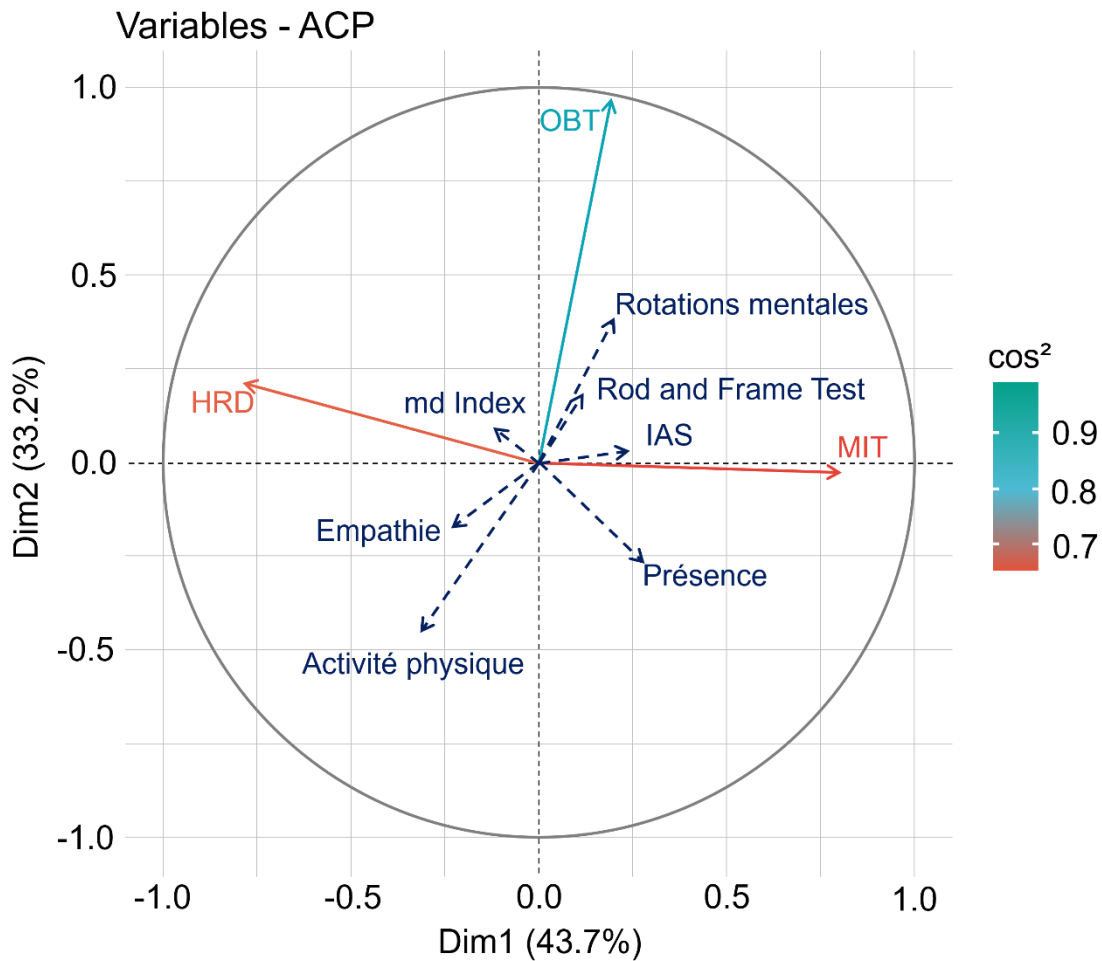


Figure 45 - Analyse en composantes principales.

Ellipses de confiance à 95%

Aucune des variables (sexe, type de sport, pratique de jeux vidéo) n'a permis de détecter des profils particuliers sur la base des dimensions de l'ACP. En particulier, lorsque la distinction est faite par rapport au type de stimulation multisensorielle (cardio-visuelle vs visuo-tactile), la répartition des participants n'est pas différente en moyenne (les barycentres des ellipses sont proches), mais quelques singularités individuelles peuvent être observées, suggérant certains cas spécifiques réagissant différemment à un certain type d'illusion.

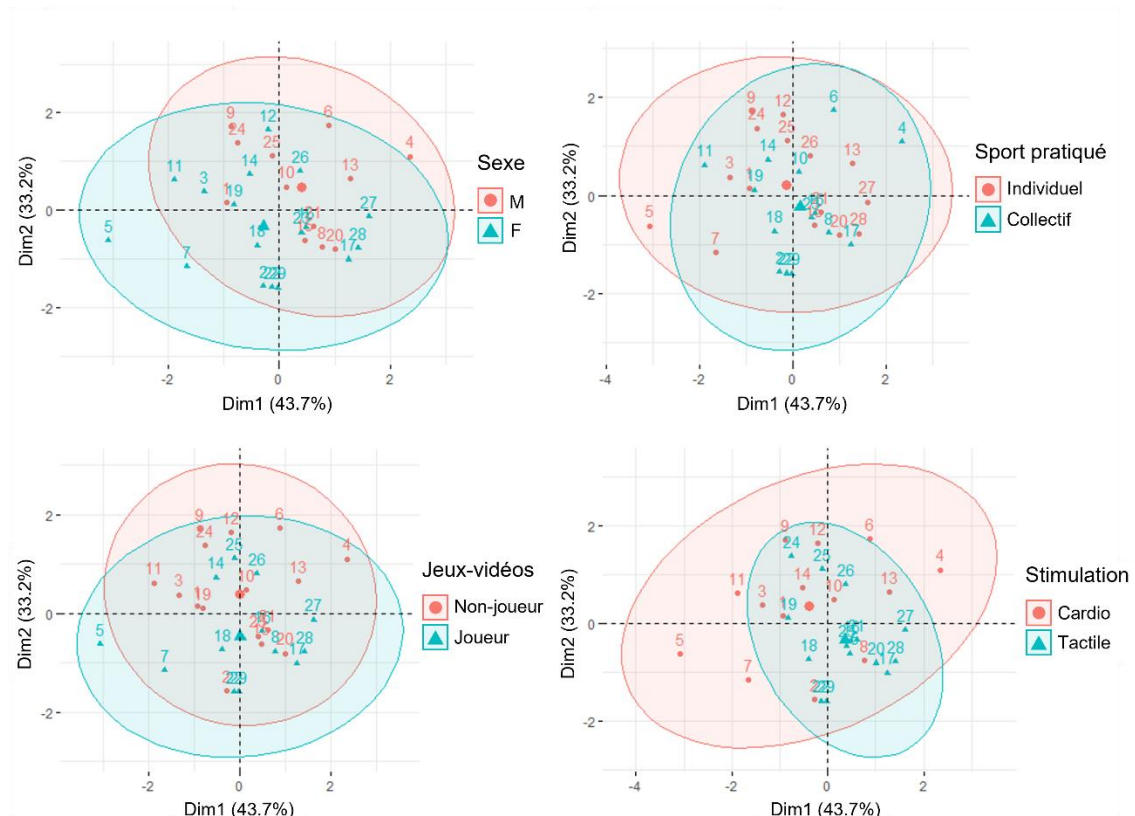


Figure 46 - Ellipses de confiance à 95%.

Rotations mentales et performances lors de la tâche d'OBT

Aucune corrélation claire entre la rotation mentale et les performances lors de la tâche d'OBT n'a été observée, que ce soit avant ($r^2 = 0.10$, $p = 0.10$) ou après la stimulation multisensorielle ($r^2 = 0.06$, $p = 0.22$). Il n'y a pas non plus de corrélation entre la capacité à effectuer des rotations mentales et l'amélioration des performances d'OBT avant et après l'illusion ($r^2 = 0.13$, $p = 0.06$).

Relations entre l'empathie, l'intéroception et les composantes de la conscience de soi corporelle

Sur la base d'une distinction entre participants présentant une empathie et une précision intéroceptive forte ou faible, aucune relation n'a été observée entre ces traits spécifiques et les composantes de la conscience de soi corporelle, que ce soit avant ou après l'illusion, ou en considérant la différence entre ces deux valeurs.

Discussion

Dans cette étude, nous avons comparé l'effet des stimulations cardio-visuelles et visuo-tactiles sur les composantes de la conscience de soi corporelle dans une même population. Le résultat principal est que les deux types de stimulation n'impactent pas de façon différente les mesures d'auto-localisation, de prise de perspective et d'auto-identification. De plus, ni les caractéristiques individuelles des participants (sexe, activité physique, habitudes de jeux vidéo) ni les variables psycho-cognitives mesurées ici (dépendance au champ visuel, faculté à effectuer des rotations mentales, intéroception, empathie) ne semblent être en mesure de prédire une susceptibilité accrue à un type de stimulations multisensorielles en particulier.

Ici, chaque participant a fait l'expérience des deux types de stimulation, avec un minimum de deux jours d'intervalle entre les deux passages. Le parti pris dans cette étude a été de s'appuyer sur les résultats de la littérature, suggérant que les stimulations multisensorielles cardio-visuelles et visuo-tactiles, appliquées dans les modalités utilisées ici, permettent de générer une illusion corps-entier. Il est courant de vérifier qu'une illusion s'est bien produite en comparant les effets de stimulations synchrones et asynchrones sur les composantes de la conscience de soi corporelle ; or, comme évoqué dans l'introduction de cette étude, cette méthodologie n'est pas forcément exempte de tout reproche. De ce fait, les preuves d'une induction de l'illusion peuvent sembler 'indirectes' au regard des résultats de la littérature. Comme principaux arguments en faveur de l'induction d'une illusion, nous pouvons évoquer les scores des réponses aux questionnaires concernant à la fois les questions relatives aux stimulations (questions T1 à T4 et C1 à C3) et celle concernant l'auto-identification (question 1), dont les résultats sont similaires à ceux obtenus dans la littérature avec des design expérimentaux similaires (Aspell et al., 2013; Nakul et al., 2020).

Concernant la prise de perspective, les temps de réponse mesurés pendant la tâche d'OBT diminuent de façon significative après l'induction d'une stimulation multisensorielle synchrone. Il est important de noter qu'un fort effet de familiarisation est observé : lors du deuxième passage, les temps de réponse sont significativement plus faibles, et l'amélioration des temps de réponse à la suite de l'illusion est elle aussi réduite. Cependant, l'ANOVA trois facteurs n'a pas montré d'effet de l'illusion ou de l'ordre de passage (cardio-visuel puis visuo-tactile et inversement) sur l'amélioration des résultats pré/post illusion. De même, une analyse des temps de réponse entre les premières et secondes moitiés de chaque bloc ne montre pas d'amélioration au sein d'une même répétition. Même si un effet d'apprentissage est remarqué, il n'explique pas à lui seul l'amélioration des temps de réponse au cours de la tâche, qui peuvent donc être attribués à une amélioration de la faculté de prise de perspective après une illusion corps-entier.

Ensuite, une réaction autonome est observée lors de la présentation d'un stimulus menaçant. Cependant, ce résultat n'est pas une preuve directe d'une amélioration de l'auto-identification due à l'illusion. En effet, pour vérifier cet effet, il faudrait observer les réponses autonomes d'un sujet en regardant un avatar sur lequel aucune stimulation n'aurait été appliquée. Toutefois, comme un fort effet du passage est observé dans le calcul de HRD, probablement lié à une habitude au stimulus lors de la seconde présentation, construire un protocole lors duquel chaque participant serait exposé à la lance avant et après une stimulation multisensorielle ferait potentiellement intervenir le même effet de familiarisation, rendant alors difficile l'exploitation des données.

Enfin, contrairement aux résultats observés dans la littérature, les illusions cardio-visuelles et visuo-tactiles n'ont pas eu d'effet sur l'auto-localisation mesurée par la tâche MIT.

Pour résumer, même si certaines preuves sont indirectes et que les résultats obtenus pour l'auto-localisation sont en désaccord avec la littérature, les modifications observées en termes de prise de perspective, les réponses autonomes lors de la présentation d'un stimulus dangereux et les scores des questionnaires plaident pour une induction réussie de l'illusion corps-entier avec les deux méthodes de stimulations multisensorielles.

Comme résultat principal de cette étude, les deux types d'illusion (cardio-visuelle et visuo-tactile) ont eu des résultats similaires sur les modifications de la conscience de soi corporelle, mesurée par questionnaires et par trois tâches comportementales. De plus, aucune des variables individuelles couramment mises en lien avec les performances des illusions ne semble en mesure de prédire une susceptibilité accrue à un type de stimulation particulier (comme mis en évidence par l'ACP et les ellipses à 95%). Pourtant, des études précédentes suggèrent des liens entre certaines de ces variables. Par exemple, l'empathie et l'intéroception ont été parfois décrites comme covariant avec les modifications de la conscience de soi corporelle suite à une illusion (Heydrich et al., 2021; Nakul et al., 2020; Suzuki et al., 2013), même si certains résultats montrent une absence de corrélation (Ainley et al., 2015). De même, une hypothèse intéressante était que l'intéroception, identifiée comme un prédicteur de la malléabilité de la représentation de soi (Suzuki et al., 2013; Tsakiris, 2010), aurait pu déterminer la susceptibilité particulière à l'illusion cardio-visuelle, dans laquelle la perception subjective du battement cardiaque pourrait jouer un rôle dans l'intégration multisensorielle des informations visuelles synchrones.

Les effets similaires des illusions cardio-visuelles et visuo-tactiles sur les composantes de la conscience de soi corporelle, associés à l'absence de variables individuelles permettant de prédire une susceptibilité accrue à un type d'illusion, plaident pour une conception « tout-ou-rien » de l'illusion corps-entier induite par les stimulations multisensorielles. L'illusion se créerait alors par le seul phénomène

d'intégration multisensorielle d'afférences temporellement congruentes, indépendamment du type d'information. Cette observation avait déjà été faite dans la littérature, en remarquant que stimuler de multiples parties du corps (O'Kane and Ehrsson, 2021) ou superposer plusieurs stimulations (Swinkels et al., 2021) n'affectait pas les résultats des illusions.

Cette étude comporte plusieurs limitations à évoquer. Premièrement, même si le choix d'utiliser la modalité sans stimulation plutôt que la stimulation asynchrone comme condition contrôle a été argumenté précédemment, cette façon de faire n'est pas utilisée dans la littérature et rend plus difficile la comparaison des résultats obtenus avec ceux d'études précédentes. Ensuite, aucune modification de l'auto-localisation n'a été observée ici, ce phénomène étant pourtant décrit depuis les premières expériences sur la main en caoutchouc et les avatars (Botvinick and Cohen, 1998; Lenggenhager et al., 2007).

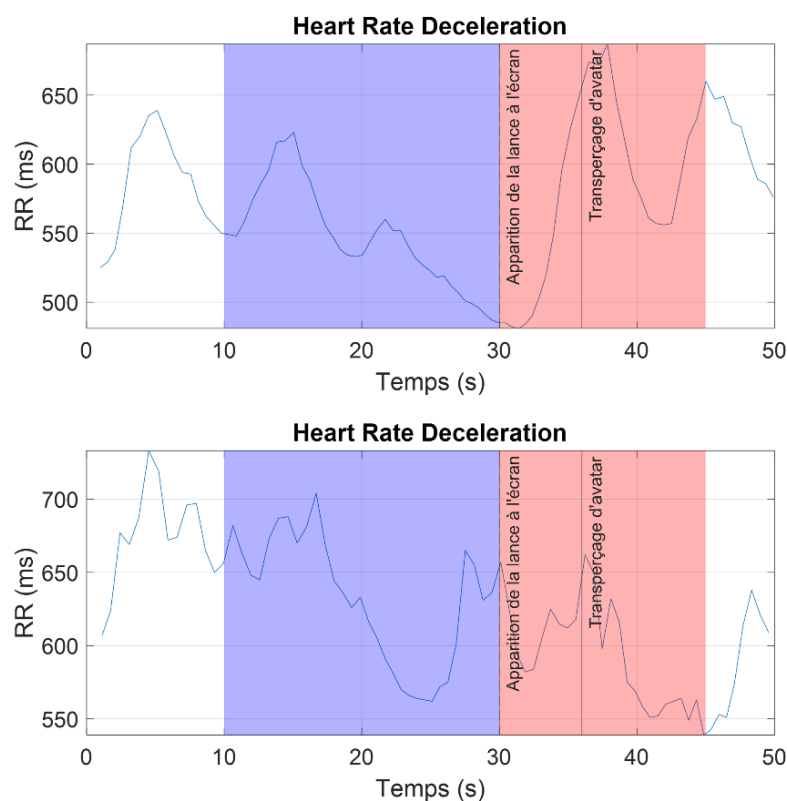


Figure 47 - Interprétation des résultats HRD. En haut : participant pour laquelle la réponse est clairement identifiée après apparition de la lance à l'écran. En bas : réponse autonome absente ou difficile à interpréter.

Enfin, il faut noter que l'exploitation des signaux cardiaques pour le calcul de HRD n'est pas triviale. Dans certains signaux, la décélération liée à l'apparition du stimulus menaçant est clairement identifiable ; cependant, dans d'autres cas, les évolutions de l'intervalle RR sont difficiles à interpréter. Différentes approches ont été testées pour obtenir des résultats cohérents, mais aucune d'entre elles ne donne une satisfaction absolue.

Conclusion

Dans cette étude, nous avons mis en place un environnement virtuel permettant d'étudier l'évolution des composantes de la conscience de soi corporelle après une illusion corps-entier. Les stimulations cardio-visuelles et visuo-tactiles ne provoquent pas de différences dans les modifications de l'auto-localisation, de la prise de perspective et de l'auto-identification dans une population de jeunes sportifs en bonne santé.

Étude 5 – Influence de l’incarnation d’un avatar sur les performances visuomotrices

Objectifs

Dans cette étude, l’objectif principal est d’étudier l’influence des mécanismes d’incarnation de l’avatar sur les performances lors d’une tâche visuomotrice, effectuée avec un point de vue à la première personne (1PP) ou à la troisième personne (3PP). Dans un premier temps, nous étudions les potentiels liens entre les dispositions individuelles des individus, les mesures des composantes de la conscience de soi corporelle et les performances lors de la tâche VMVR. Ensuite, les mouvements des mains des participants contrôlant l’avatar pour réaliser la tâche avec une 3PP sont analysés avec des méthodes multifractales, pour proposer une nouvelle mesure de l’incarnation via une quantification des interactions non-linéaires entre le participant et son avatar.

Introduction

Nous faisons généralement l’expérience du monde qui nous entoure avec un point de vue à la première personne. En réalité virtuelle, il est possible de changer ce paradigme en déplaçant la caméra dans l’environnement. À l’origine, percevoir son corps bouger à la troisième personne était réalisé en filmant le participant, et en retransmettant l’image dans le casque de réalité virtuelle (Salamin et al., 2010). Avec les récents développements des technologies de réalité virtuelle et de capture du mouvement, il est à présent possible d’animer directement un avatar dans l’environnement virtuel en synchronisant le dispositif de capture du mouvement avec la gestion du scénario VR. Adopter un point de vue à la troisième personne offre de nouvelles possibilités pour des applications de rééducation (Ferreira dos Santos et al., 2016) ou d’apprentissage. Par exemple, des situations dans lesquelles un participant pourrait observer ses mouvements en même temps que leur exécution, en superposant l’image d’un instructeur corrigeant le geste, peuvent être imaginées (Yan et al., 2015). De même, dans les sports collectifs, observer des actions depuis un point de vue extérieur permettrait d’aider à la compréhension du jeu, et potentiellement améliorer les performances sur le terrain (Pagé et al., 2019; Shimizu and Sumi, 2019; Tsai, 2018).

En comparant des performances en adoptant des points de vue à la première ou à la troisième personne, il a été observé que plus la caméra s’éloigne de l’action,

plus il est difficile d'attraper une balle (Alonso et al., 2016). Cependant, dans ce travail, seules les manettes VR étaient représentées dans l'environnement, pas l'avatar de l'utilisateur. Or, représenter le corps du participant a une influence sur la performance lors de tâches motrices en réalité virtuelle (Pastel et al., 2020). La prise de perspective à la troisième personne peut s'effectuer de façon égocentrée (la position de la caméra dans l'environnement dépend de la position de la tête de l'utilisateur) ou allocentrée (la caméra est fixe dans l'environnement virtuel). Dans plusieurs tâches dynamiques, les performances ont tendance à se dégrader en passant d'une perspective à la première personne à des points de vue allocentrés puis égocentrés (Bhandari and O'Neill, 2020), même si ces différences sont de moins en moins marquées lorsque la tâche présente un caractère très dynamique (par exemple, fléchettes vs tir à l'arc). En ajoutant une rotation par rapport à l'avatar dans une tâche de lancer de fléchettes, la performance est encore plus dégradée par rapport à la condition utilisant la perspective à la première personne (Tumialis et al., 2020). Au-delà d'une modification des performances, on observe aussi des modifications dans la gestuelle de l'utilisateur, notamment en adoptant une perspective à la troisième personne lors d'un exercice de lancers francs au basket (Covaci et al., 2014). Il a aussi été noté que, même si la perspective à la première personne permet d'obtenir de meilleures performances, la troisième personne permet une meilleure estimation des distances (Gorisse et al., 2017).

En plus de modifications des performances, l'usage de la perspective à la troisième personne a un impact sur les composantes de la conscience de soi corporelle. Le sentiment d'agentivité ainsi que l'auto-identification sont moins élevés à la troisième par rapport à la première personne (Debarba et al., 2017), même s'il faut noter que la possibilité d'alterner entre plusieurs points de vue peut mitiger ces différences.

Pour résumer, l'usage de la perspective à la troisième personne provoque à la fois une modification des performances, mais aussi des modifications de la conscience de soi corporelle par rapport à une visualisation de l'environnement et de l'avatar à la première personne. Il semble naturel de se demander si les modifications de la conscience de soi corporelle, liées à des différences individuelles dans le phénomène d'incarnation de l'avatar, peuvent être responsables des différences en termes de performances.

Pour répondre à cette question, les participants à cette expérience réalisent une tâche visuomotrice dans deux conditions, utilisant les points de vue à la première (1PP) et à la troisième personne (3PP). Afin de forcer une prise de perspective, des angles de rotation ont été ajoutés entre le participant et son avatar pendant l'exécution de la tâche. Pour appréhender des dispositions individuelles particulières, les tâches évaluatives du Rod and Frame Test (RFT) et des rotations mentales sont préalablement réalisées par les participants. Une hypothèse en particulier se détache

quant aux liens entre les performances à la troisième personne et les rotations mentales. Comme la faculté de prendre la perspective d'un avatar – ou d'un agent social en général – est un processus incarné (Kessler and Rutherford, 2010; Surtees et al., 2013), mesurer la faculté intrinsèque d'un individu à effectuer des rotations mentales permet de déterminer si les performances obtenues avec un angle de rotation par rapport à l'avatar dépendent effectivement des mécanismes de prise de perspective, ou uniquement d'une bonne aptitude individuelle pour effectuer des rotations mentales. Les résultats de l'étude précédente suggèrent une relative indépendance entre ces deux informations, qu'il sera intéressant de tester à nouveau ici après une illusion visuomotrice.

Une des conclusions de l'expérience précédente concernait le caractère « tout-ou-rien » de l'illusion corps-entier, suggérée par l'absence de différences liée au type de stimulation. Cette observation sera testée à nouveau ici, en superposant une stimulation visuo-tactile à la synchronisation visuomotrice lors de la visualisation d'un avatar à la troisième personne, ce qui - d'après la littérature - n'est pas supposé modifier l'incarnation de l'avatar (Swinkels et al., 2021). En théorie, la synchronisation visuomotrice est censée générer un sentiment d'incarnation à l'avatar maximal, qui ne peut pas être amélioré par une stimulation multisensorielle additionnelle. L'objectif ici est de vérifier cette hypothèse, et d'étendre ces observations aux performances lors d'une tâche visuomotrice. Dans la suite de cette étude, la prise de perspective à la première personne sera notée 1PP, celle à la troisième personne 3PP, et la condition incluant une stimulation visuo-tactile additionnelle 3PP+.

Dans cette expérience, nous utiliserons la tâche VMVR, dont la transposition en réalité virtuelle a été validée dans l'étude 1. L'intérêt de cette tâche est qu'elle permet, en plus d'obtenir des temps de réponse et de pouvoir s'effectuer à la première et à la troisième personne, d'enregistrer facilement les mouvements des mains des participants.

En considérant l'avatar comme un outil utilisé par le participant pour répondre à la tâche, le concept d'incarnation peut être abordé par l'étude des interactions entre le participant, l'avatar et la tâche. En s'intéressant à ces interactions, une question se pose : le participant utilise-t-il l'avatar comme un outil déconnecté de son propre corps, ou agit-il à travers lui (incarnation radicale) ? Cette interrogation se rapproche de la notion de *readiness-to-hand* : si le participant est capable d'agir à travers l'avatar, ce dernier devient invisible à ces yeux, et l'attention est entièrement focalisée sur la tâche. Au contraire, s'il est nécessaire de réfléchir à la façon de faire bouger l'avatar pour appuyer sur les boutons lumineux, il peut être comparé à un outil *unready-to-hand*. Le paradigme expérimental de l'incarnation d'outil, utilisé dans l'étude 3, est ici réutilisé pour mesurer l'incarnation de l'avatar par la nature interaction-dominante du système humain-avatar-tâche. Dans l'étude 2, nous avons montré que les mouvements des mains de l'utilisateur échantillonnés à haute fréquence pendant

l'exécution de la tâche à la première personne présentent de la multifractalité. Observer de la multifractalité non-linéaire dans les mouvements des mains de l'avatar perçu à la troisième personne pourrait constituer une preuve comportementale de l'incarnation de l'avatar, par la notion d'incarnation radicale (Schettler et al., 2019).

Pour résumer, les principaux objectifs de cette étude sont :

- Mesurer l'évolution des performances lors d'une tâche de temps de réponse visuomoteurs (VMVR) dans les conditions 1PP, 3PP et 3PP+.
- Observer si les modifications de la conscience de soi corporelle peuvent impacter les performances lors de la tâche à la troisième personne, et chercher si les profils individuels des participants sont déterminants dans l'induction de l'illusion ou la performance.
- Déterminer le rôle d'une stimulation visuo-tactile supplémentaire sur la conscience de soi corporelle et les performances.
- Introduire la multifractalité non-linéaire des mouvements des mains comme marqueur de l'incarnation d'un avatar.

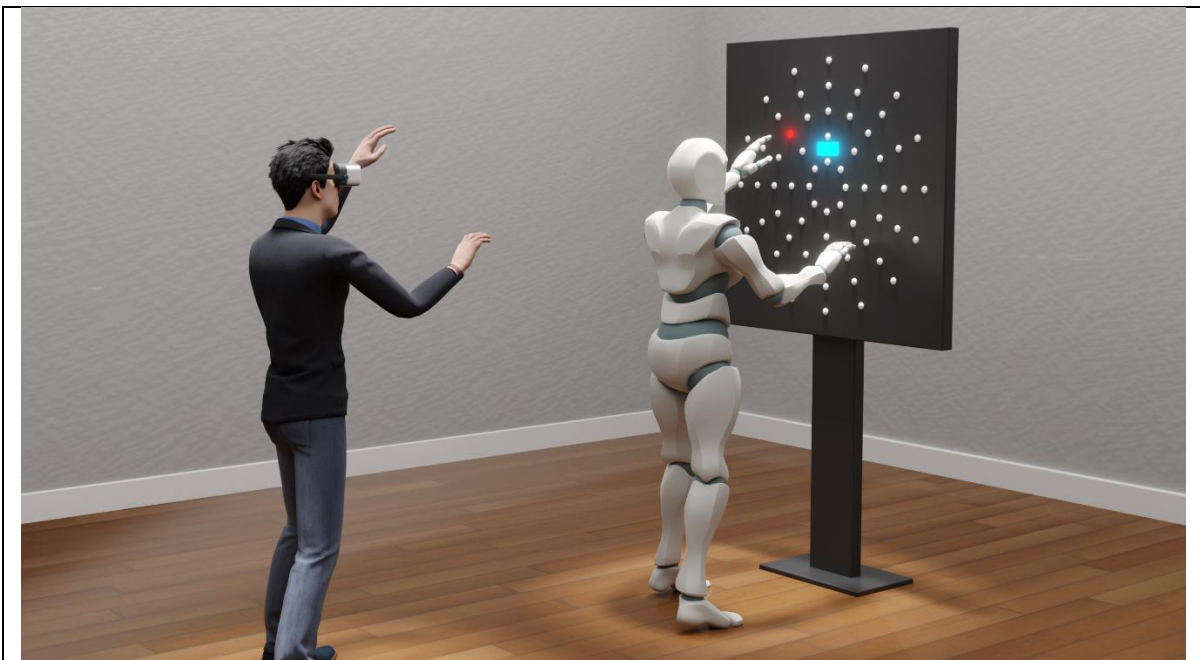


Figure 48 – Représentation schématique du contrôle d'un avatar pour réaliser la tâche VMVR à la troisième personne

Matériel et méthodes

Participants

31 étudiants en Sciences et Techniques des Activités Physiques et Sportives (18 hommes, 13 femmes, 20.1 ± 3.4 ans, 63.9 ± 10.9 kg, 173.1 ± 9.1 cm) ont donné leur consentement éclairé pour participer à ce programme, qui faisait partie de leur cursus universitaire et pour lequel ils ont reçu des crédits. Le comité de révision institutionnel a approuvé la procédure qui respectait toutes les recommandations éthiques et suivait la déclaration d'Helsinki. Tous les participants avaient une vision normale ou corrigée à normale. Neuf d'entre eux avaient une expérience préalable avec la tâche, ayant participé à l'étude précédente.

Appareil

L'expérience a été réalisée dans le même environnement que celui développé pour l'expérience précédente. Le dispositif utilisé pour mesurer les temps de réponse visuomoteurs est la tâche VMVR utilisée dans les études 1 et 2. En condition 1PP, les participants effectuent la tâche avec la condition Standard, lors de laquelle les boutons lumineux peuvent apparaître partout sur le tableau.

Dans les conditions 3PP et 3PP+, les participants voient leur avatar à une distance de 2 mètres, et doivent réaliser la tâche en éteignant les boutons à l'aide des mains de l'avatar. Afin de donner un retour tactile aux participants (dans la condition 1PP, ce retour est obtenu par une vibration du contrôleur VR lorsqu'un bouton est touché), un tableau en bois est placé dans l'environnement réel, à la même distance du participant que celle entre le tableau virtuel et l'avatar. L'avatar et le tableau sont vus par le participant avec un angle de 0° (de dos), ou avec des angles de $+60^\circ$ et -60° (Figure 49).

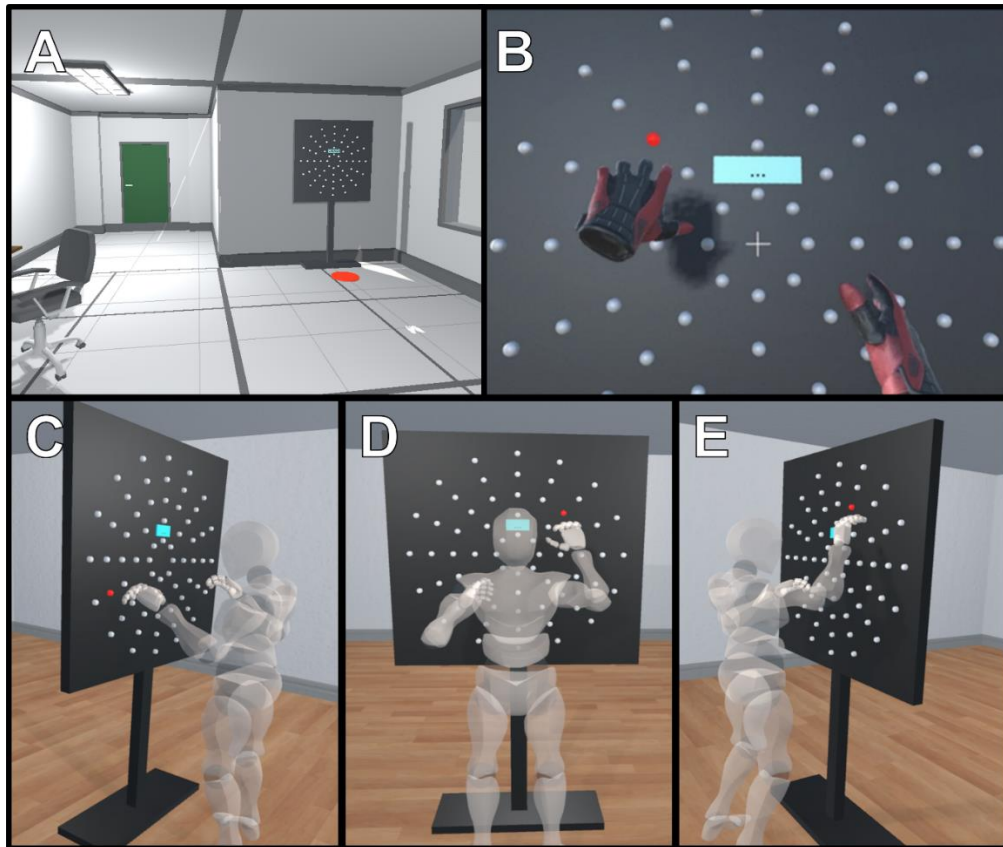


Figure 49 – Captures d'écran de la tâche VMVR à la troisième personne. A : Vue de l'environnement en réalité virtuelle. B : Point de vue du sujet pendant la tâche. C, D et E : vision de l'avatar situé à deux mètres de distance avec des angles de -60° , 0° et $+60^\circ$.

Capture du mouvement et synchronisation visuomotrice

Lors de la seconde partie de l'expérience nécessitant une synchronisation visuomotrice avec l'avatar, les participants sont équipés d'une combinaison de capture de mouvement avec 37 marqueurs infrarouges réfléchissants. Un système Optitrack (Natural Point, Corvallis, OR, USA) avec 10 caméras PrimeX 13 est utilisé pour repérer les positions des marqueurs, qui ont ensuite été utilisées pour créer un modèle corporel avec le logiciel Motive:Body (Natural Point, Corvallis, OR, USA). Pour animer l'avatar présent dans l'environnement virtuel à partir des données de mouvement, un plugin convertissant les données enregistrées par le logiciel de motion capture est implémenté dans Unity. Le délai entre l'exécution d'un mouvement et son affichage dans le casque de réalité virtuelle est imperceptible pour les participants.

L'illusion visuomotrice est obtenue en demandant aux participants de lever le bras, la jambe, puis de tourner la tête à gauche et à droite. Ensuite, il leur est demandé de bouger le moins possible, et d'observer leur avatar pendant 90 secondes.

Stimulation visuo-tactile additionnelle

La moitié des participants (n = 15) de l'expérience ont reçu une stimulation visuo-tactile additionnelle pendant la deuxième répétition des tâches à la troisième personne. La méthode d'induction de la stimulation visuo-tactile est la même que celle décrite dans l'expérience précédente.

Mesures des modifications de la conscience de soi corporelle

Les modifications de la conscience de soi corporelle sont étudiées en comparant les mesures obtenues après synchronisation visuomotrice (et visuo-tactile additionnelle pour la moitié des participants dans la seconde répétition des tâches à la troisième personne, 3PP+) par rapport à celles mesurées en comparant un avatar statique. Les tâches utilisées pour l'auto-localisation et la prise de perspective ainsi que le questionnaire d'illusion sont décrites dans l'expérience précédente.

Auto-localisation

L'auto-localisation est mesurée avec la tâche d'imagerie mentale (MIT). 8 essais sont réalisés avec l'avatar statique, et 4 essais sont effectués pour chacune des deux répétitions de la tâche avec l'avatar mobile.

Prise de perspective

La prise de perspective est mesurée avec la tâche d'Own body transformation (OBT). 24 essais de familiarisation sont d'abord effectués, avant de réaliser des blocs de 48 essais dans la condition avec l'avatar statique et pendant chaque répétition de la tâche avec l'avatar mobile.

Questionnaire d'illusion – auto-identification et sentiment d'agentivité

Le questionnaire est présenté aux sujets à la fin de la partie utilisant l'avatar statique, et après chaque répétition de la tâche avec l'avatar mobile. Les questions 1 à 8 sont présentées à l'ensemble des sujets, et les questions T1 à T3 sont présentées uniquement aux sujets ayant eu l'illusion visuo-tactile additionnelle (3PP+).

Profils individuels

Les mesures d'empathie et d'intéroception n'ayant pas donné de résultats concluants lors de l'étude précédente, elles n'ont pas été incluses dans cette expérience. Les profils individuels des participants sont établis à partir d'un questionnaire d'informations générales (sexe, habitudes de jeux vidéo, type de sport pratique...) et des tâches de rotations mentales et du Rod and Frame Test.

Acquisition des mouvements des mains

Les mouvements des mains sont enregistrés à partir du système de capture de mouvement Optitrack. Le point utilisé pour les mesures est le marqueur positionné à la base du métacarpe du petit doigt. Les positions instantanées du marqueur sur les axes x, y et z sont échantillonnées à 120 Hz, avec une précision spatiale inférieure à 0.1 mm selon le logiciel de mesure. Les données de position sont dérivées deux fois pour obtenir des séries temporelles d'accélération. L'accélération spatiale est obtenue en combinant les accélérations sur les trois axes :

$$\text{Accélération } 3D = \sqrt{\left(\frac{d^2x}{dt^2}\right)^2 + \left(\frac{d^2y}{dt^2}\right)^2 + \left(\frac{d^2z}{dt^2}\right)^2}$$

En fonction de la latéralité des participants, les données sont caractérisées comme provenant des mains dominante et non-dominante. En suivant la méthode de pré-traitement utilisée dans l'étude 2, utilisant les données issues des contrôleurs VR, les échantillons inférieurs à la résolution spatiale (0.1 mm) ont été supprimés. Des séries temporelles composées de 4096 points situés au milieu du signal total ont été conservées pour chaque main et chacune des deux répétitions dans les trois conditions (0°, +60° et -60°).

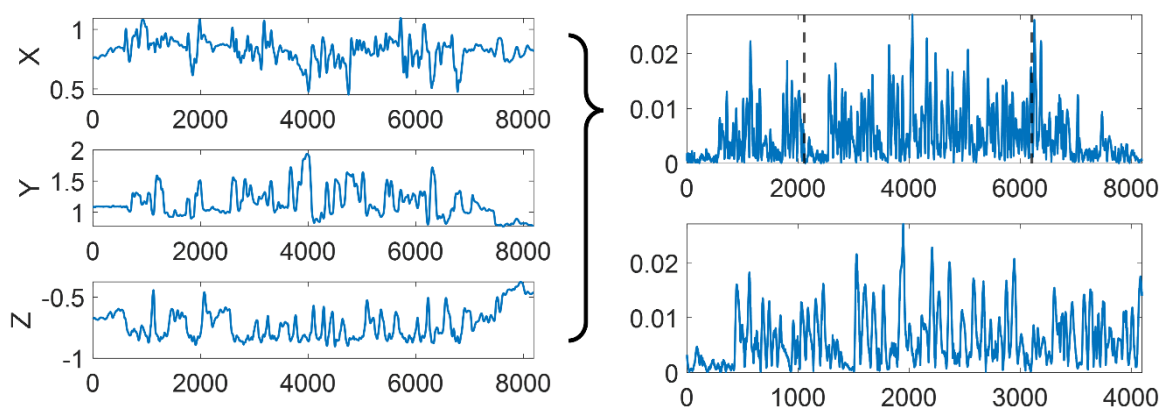


Figure 50 - Prétraitement des signaux de mouvement des mains. À gauche : positions des mains enregistrées sur les axes X, Y et Z à 120Hz. En haut à droite : accélération spatiale, calculée avec la distance euclidienne. En bas à droite : signal seuillé et découpé pour obtenir 4096 points.

Protocole

À leur arrivée au laboratoire, les participants ont reçu une explication globale du protocole ainsi qu'une présentation des différents outils. Ils étaient ensuite directement immergés en réalité virtuelle avec un HTC Vive Pro. La première partie de l'expérience consiste en une mesure des composantes de la conscience de soi corporelle en observant un avatar statique, sans stimulations multisensorielles. La taille de l'avatar est modifiée pour correspondre à celle du participant, qui le regardent

pendant 90 secondes en conservant une position statique. Ensuite, des mesures d'auto-localisation (8 essais de la tâche MIT) et de prise de perspective (24 essais d'entraînement, puis 48 répétitions d'OBT) sont réalisées, suivies de la présentation du questionnaire. Cette partie du protocole a pour but d'obtenir des mesures « contrôle » de l'incarnation de l'avatar, lorsqu'aucune stimulation multisensorielle (visuomotrice et visuo-tactile) n'est appliquée.

Ensuite, les participants réalisent deux essais d'entraînements de 1 minute de la tâche VMVR, lors desquels les consignes sont rappelées. Pour éviter d'induire trop de fatigue musculaire, 20 essais du Rod and Frame Test suivis de 64 essais de tâche de rotations mentales sont réalisés. Suite à cela, un dernier essai d'entraînement de la tâche VMVR est effectué, suivi de deux essais retenus comme marqueurs de la performance 1PP.

À la fin de cette première partie, les participants retirent le casque de réalité virtuelle et s'équipent avec la tenue de capture de mouvement. L'expérimentateur place ensuite les 37 marqueurs infrarouges sur des positions anatomiques spécifiques, et l'avatar du participant est créé dans le logiciel Motive en effectuant une position en T. Les participants sont ensuite immergés à nouveau dans la pièce de l'avatar, qu'ils voient à présent bouger en synchronisation avec leurs propres mouvements. Pendant la première répétition, la synchronisation visuomotrice est effectuée en demandant aux participants de regarder leur avatar pendant 90 secondes. Les composantes de la conscience de soi corporelle sont ensuite mesurées de la même manière que dans la condition avec l'avatar statique. Après la présentation du questionnaire, les participants effectuent à nouveau la tâche VMVR, cette fois-ci avec un point de vue extérieur (3PP), avec des angles de 0°, +60° et -60°. L'ordre de passage (+60° puis -60° et inversement) est randomisé entre les participants. Le deuxième passage est similaire, à la différence qu'une stimulation visuo-tactile additionnelle (3PP+) est appliquée sur la moitié (15/31) des participants.

Enfin, les participants retirent le casque et complètent des questionnaires sur l'état de présence (IPQ, Schubert et al., 2001), le cybermalaise (SSQ, Bouchard et al., 2009) ainsi qu'un questionnaire d'informations générales.

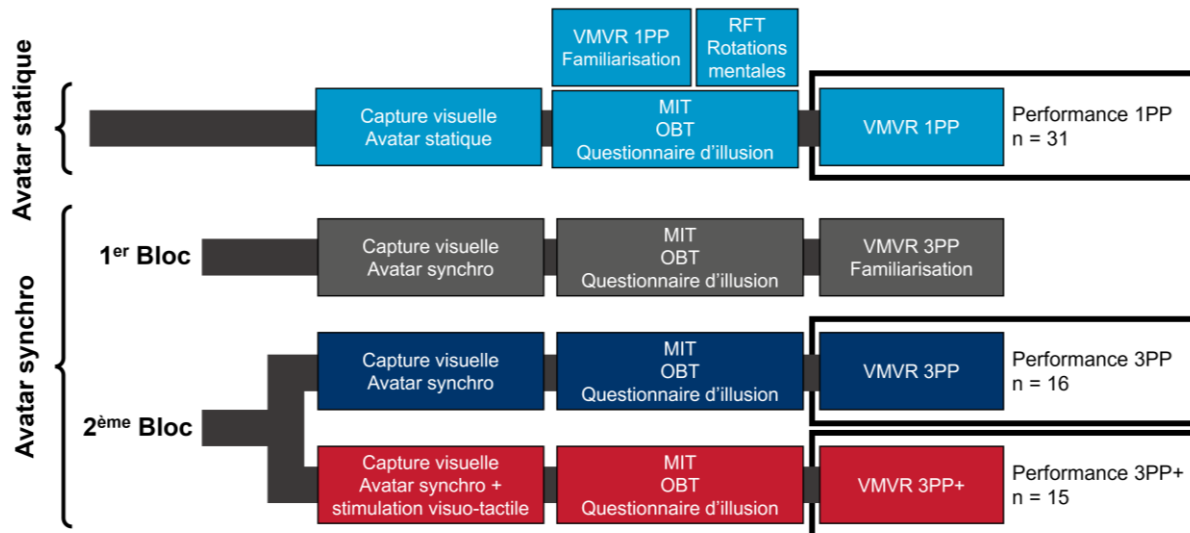


Figure 51 - Protocole expérimental de l'étude 5.

Traitement des données

Les données ont été analysées à l'aide de Matlab (Matlab 2020b, Mathworks, Natick, MA, USA). La performance 1PP pendant la tâche VMVR (RT_{1PP}) représente la moyenne des temps de réponse moyens obtenus lors des deux derniers essais. Les performances 3PP (RT_{3PP}) correspondent aux temps de réponse mesurés lors des trois dernières répétitions de la tâche (deuxième bloc des tâches faisant intervenir l'avatar mobile). Les performances en MIT, OBT ainsi que les réponses au questionnaire (utilisées pour étudier les effets des illusions visuomotrices) n'étant pas statistiquement différentes dans les deux blocs, elles ont été moyennées lors des analyses statistiques.

Calculs de multifractalité dans les mouvements des mains

Les calculs de multifractalité ont été effectués en suivant la méthode décrite dans le chapitre introductif. La méthode FMF-DFA a été appliquée à l'ensemble des séries de données, pour des échelles allant de $n=4$ à $n=512$ points. La multifractalité est évaluée avec le ΔH_{15} , calculé pour des valeurs de q allant de -15 à $+15$.

Le test de « vraie » multifractalité est effectué en comparant la valeur du ΔH_{15} de la série originale à celle de 40 surrogates générées avec la méthode IAAFT. Enfin, pour estimer la part de multifractalité due à des phénomènes non-linéaires, les t_{MF} sont calculées à partir de la valeur t du test de Student comparant le ΔH_{15} de la série originale à ceux des surrogates.

Analyses statistiques

La distribution normale de chaque ensemble de données est avec le test de Shapiro-Wilk. Les éventuelles valeurs aberrantes (identifiées à l'aide de la fonction "

isoutlier " de Matlab, sur la base de trois déviations absolues de la médiane) sont supprimées des analyses statistiques. Pour évaluer l'évolution des performances lors de la tâche VMVR effectuée dans les groupes 1PP, 3PP et 3PP+, une ANOVA est réalisée. Pour contrôler les effets de la stimulation additionnelle (3PP ou 3PP+) et de l'angle (-60°, 0° et +60°), une ANOVA à deux facteurs est utilisée.

Les performances visuomotrices en 3PP et 3PP+ ont été évaluées en comparant les résultats obtenus lors du second bloc dans la condition avec l'avatar synchro, lors duquel la moitié des participants (15/31) recevait une stimulation visuo-tactile additionnelle (Figure 51).

Aucune différence significative n'a été observée entre les mesures de la conscience de soi corporelle (questionnaire d'illusion, MIT, OBT) obtenues lors des blocs 1 et 2 en utilisant l'avatar synchro ; ces mesures ont donc été moyennées. Ces valeurs moyennes ont été comparées à celles obtenues après visualisation d'un avatar statique, pour déterminer l'effet de l'illusion visuomotrice sur les composantes de la conscience de soi corporelle.

Pour chaque mesure (performances visuomotrices et composantes de la conscience de soi corporelle), l'effet d'une stimulation visuo-tactile additionnelle a été testé en comparant les résultats du deuxième bloc avec l'avatar synchro, avec (3PP+) et sans (3PP) cette stimulation.

Pour étudier les liens entre les composantes de la conscience de soi corporelle, les performances et les profils individuels, une analyse en composantes principales (ACP) a été réalisée à l'aide du logiciel R (R Core Team, 2020), accompagnée d'ellipses de confiance à 95 %.

Résultats

Comparaison des performances visuomotrices : 1PP vs 3PP (rassemblant 3PP et 3PP+)

L'ANOVA montre une absence de différences entre les temps de réponse dans les conditions 1PP et 3PP, quel que soit le point de vue (-60°, 0°, +60°) utilisé avec la 3PP ($F(3,123) = 1.30, p = 0.28$). Les participants présentent de meilleures performances pour éteindre les cibles situées en périphérie de la tâche comparativement à celles situées au centre dans la condition 3PP ($F(3,1123) = 17.40, p = 1.9 \times 10^{-9}$). Ce résultat s'explique par le fait que les stimuli apparaissant dans le champ de vision périphérique lorsque la tâche est effectuée à la 1PP se retrouvent centrés dans le champ de vision lorsque les participants regardent le tableau depuis une distance de 2 mètres dans la condition 3PP.

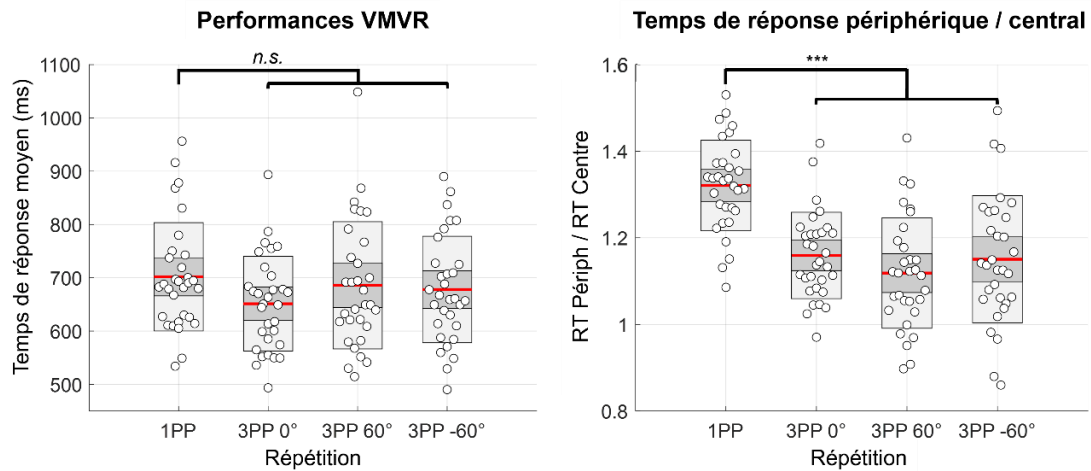


Figure 52 – Performances lors de la tâche VMVR. À gauche : temps de réponse mesurés pendant les deux derniers essais de la tâche VMVR effectuée à la première personne, puis pendant la deuxième répétition pour des angles à 0°, +60° et -60° à la troisième personne. À droite : ratio entre les temps de réponse mesurés pour les signaux apparaissant sur le cercle périphérique et les autres signaux, dans les mêmes conditions.

Comparaison des performances visuomotrices : 3PP vs 3PP+

Une ANOVA deux facteurs avec l'angle (0°, +60° et -60°) et la condition (3PP ou 3PP+) comme facteurs indépendants a montré qu'une illusion visuo-tactile supplémentaire ne modifiait pas la performance à la troisième personne, exprimée ici en pourcentage de la performance 1PP pour éviter des biais liés à des performances individuelles différentes. L'analyse n'a montré aucun effet de la condition ($F(1,92) = 0.04, p = 0.85$), aucun effet de l'angle ($F(2,92) = 0.91, p = 0.40$) et aucun effet d'interaction ($F(2,92) = 0.23, p = 0.79$).



Figure 53 – Comparaison de l'évolution des temps de réponse entre les perspectives 3PP et 1PP (à gauche), et 3PP+ et 1PP (à droite).

Corrélation entre les performances 1PP et 3PP

Confirmant les résultats de l'étude 1, une forte corrélation est trouvée entre les performances 1PP mesurées entre les deux derniers essais ($r^2 = 0.81$). Dans la condition 3PP, les résultats mesurés avec un angle de 0° et ceux obtenus en moyennant les performances à $+60^\circ$ et -60° montrent aussi une forte corrélation ($r^2 = 0.82$).

En revanche, même si les analyses statistiques ne montrent pas de différences entre les performances mesurées avec la 1PP et la 3PP au niveau du groupe, ces performances ne sont pas corrélées ($r^2 = 0.16$).

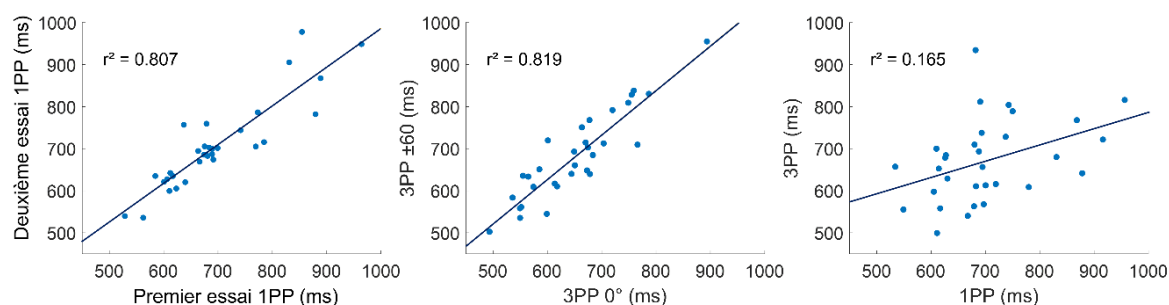


Figure 54 – Corrélations entre les performances à la tâche VMVR. En haut à gauche : corrélation entre les temps de réponse mesurés lors de deux essais successifs à la 1PP. En bas à gauche : corrélation entre les temps de réponse mesurés avec la 3PP avec des angles à 0° , et la moyenne des angles à $+60^\circ$ et -60° . À droite : corrélation entre les performances mesurées avec la 1PP et la 3PP

Modifications des composantes de la conscience de soi corporelle après illusion visuomotrice

Auto-localisation

Il est important de noter que dès la première répétition de MIT, avec l'avatar statique, les participants se localisaient vers l'avant, en direction de l'avatar (58 ± 62 cm devant eux, $p = 1.4 \times 10^{-5}$, $t = 5.19$). Ce changement de localisation perçue n'a pas été affecté par l'incarnation d'un avatar synchrone (Statique vs Synchro : test t avec échantillons appariés, $p = 0.47$, $t = -0.73$). Cette absence de différences a également été observée entre 3PP et 3PP+ (test t avec échantillons indépendants, $p = 0.97$, $t = -0.03$).

Prise de perspective

Les performances d'OBT ont été calculées en comparant le temps de réponse moyens en utilisant l'avatar statique et synchro. Trois participants répondant significativement plus lentement que les autres participants ont été identifiés comme outliers et retirés de l'analyse. Les participants ont répondu en moyenne plus

rapidement après la synchronisation visuomotrice par rapport à la situation avec l'avatar statique (Statique vs Synchro : test t avec échantillons appariés, $p = 0.007$, $t = 2.9$). L'ajout d'une stimulation visuo-tactile (3PP+) n'a fourni aucun effet supplémentaire (3PP vs 3PP+, test t avec échantillons indépendants, $p = 0.65$, $t = -0.46$).

Il est intéressant d'observer que l'évolution des temps de réponse lors de la tâche d'OBT n'est pas la même dans les conditions utilisant l'avatar statique et l'avatar synchro (Figure 55). En particulier, l'utilisation d'un avatar synchro augmente principalement les performances pour les angles 0° et 180° . Pour les angles intermédiaires, les résultats sont plus difficiles à interpréter. Ce phénomène pourrait s'expliquer par le fait que l'illusion visuomotrice permet au participant de plus facilement déterminer si un avatar est de dos ou de face, alors que les postures changeantes rendraient difficile l'analyse des données lorsque l'avatar est présenté à des angles intermédiaires.

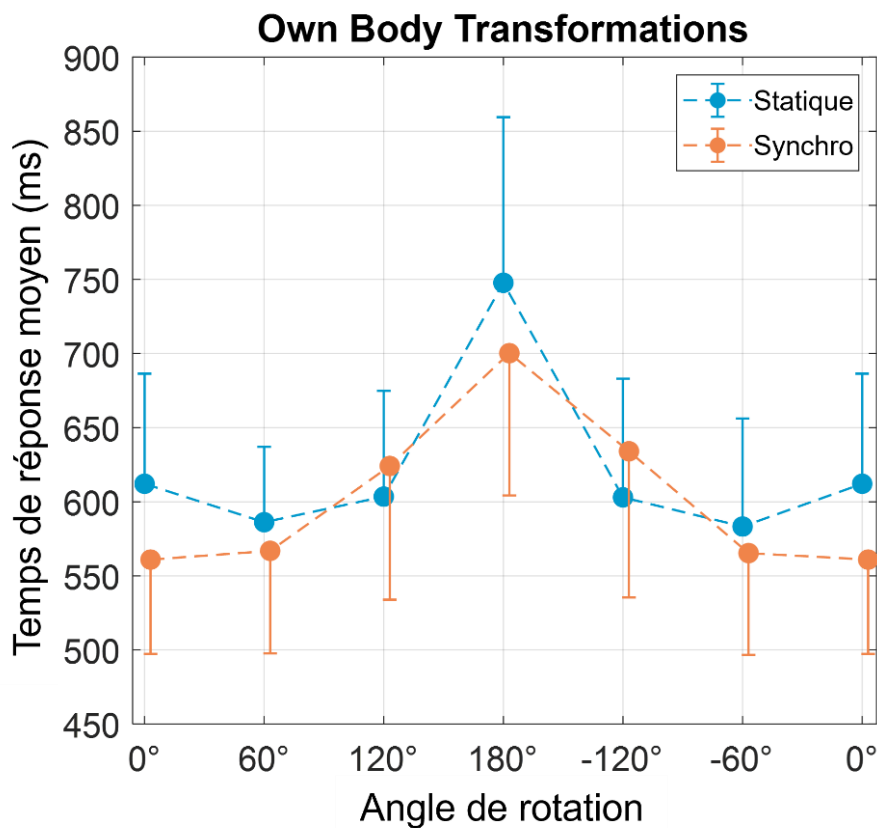


Figure 55 - Temps de réponse moyen en fonction des angles de rotation de l'avatar

Auto-identification et sentiment d'agentivité

Les résultats du test de Wilcoxon montrent un effet significatif de l'illusion visuomotrice (Figure 56, panneau de gauche) pour l'auto-identification (Question 1 : "J'avais l'impression que le corps virtuel était mon corps", $p = 0.02$, Statique : -0.55 ± 1.80 , Synchro : 0.60 ± 1.67) et pour le sentiment d'agentivité (Question 6 : "J'avais l'impression de pouvoir animer (mettre en mouvement) le corps virtuel comme mon

vrai corps si je le voulais", $p = 4.7 \times 10^{-8}$, Statique : -0.13 ± 1.94 , Synchro : 2.37 ± 0.91). Aucune différence n'a été trouvée dans les réponses au questionnaire (Figure 56, panneau de droite) entre les groupes 3PP (situation contrôle) et 3PP+ (avec stimulation visuo-tactile additionnelle).

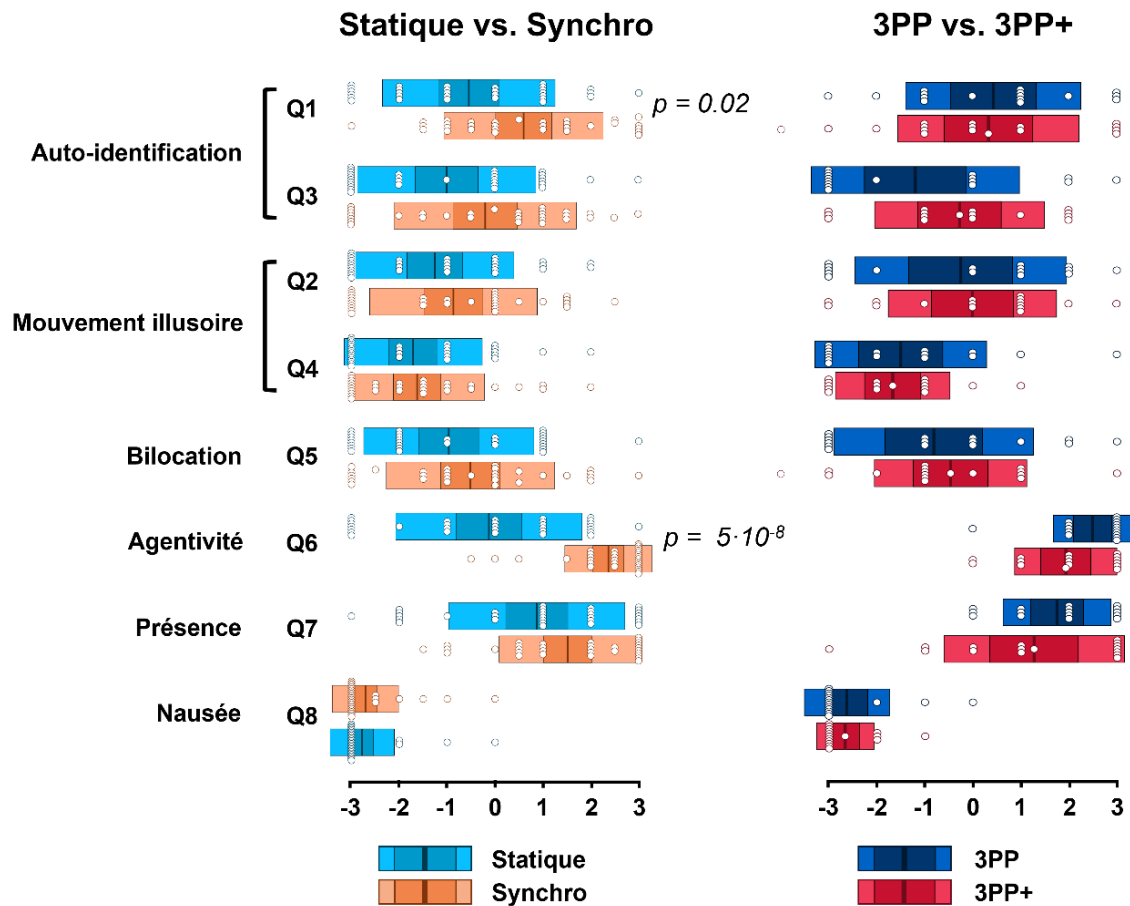


Figure 56 – Résultats du questionnaire d'illusion. À gauche : réponses au questionnaire d'illusion avant (en bleu clair) et après l'induction de l'illusion visuomotrice (en orange). À droite : réponses obtenues en comparant les sujets contrôle (3PP, en bleu foncé) et ceux ayant subi la stimulation visuo-tactile additionnelle lors du second passage (3PP+, en rouge)

Profils individuels

Le score de cybermalaise était relativement faible pour tous les sujets (5.4 ± 3.3 [entre 0 et 15], six participants ayant obtenu un score > 10) ; il n'a donc pas été inclus dans l'analyse en composantes principales qui a suivi.

Comme dans l'expérience précédente, les valeurs mesurées pour les profils individuels présentent une grande hétérogénéité. Les résultats sont présentés dans le tableau 9.

Données qualitatives	
Jeux vidéo	39% (12/31) déclarent jouer régulièrement
Pratique sportive	42% (13/31) pratiquent un sport collectif
Expérience avec la tâche	29% (9/31) ont participé à l'expérience précédente
Données quantitatives	
Rotations mentales	Temps de réponse moyen : $2.9 \pm 1.6s$ [0.9-6.7s]
Rod and Frame Test	Déviations par rapport à la verticale : $2.0 \pm 1.8^\circ$ [-0.4-9°]
Présence	Score : 59.9 ± 10.7 [38-78]
Activité physique	Pratique hebdomadaire : 11.5 ± 4.6 h [4-25h]

Tableau 9 - Résultats des profils individuels.

Relations entre les performances, la conscience de soi corporelle et les profils individuels

L'ACP n'a pas montré de covariation claire entre les performances mesurées en 1PP et 3PP, comme montré précédemment avec l'absence de corrélation. De plus, aucune covariation n'a été trouvée entre les performances 1PP, 3PP et la différence entre ces performances. Une absence de covariation a été observée entre les mesures d'auto-localisation, d'auto-identification, du sentiment d'agentivité, de la prise de perspective et les performances en 3PP. Ce résultat suggère que les performances ne dépendent pas des mécanismes d'incarnation de l'avatar.

Les temps de réponse à la troisième personne avec des angles de 0° , $+60^\circ$ et -60° ont été représentés comme des variables supplémentaires ($RT_{3PP} 0^\circ$, $RT_{3PP} +60^\circ$ et $RT_{3PP} -60^\circ$) et covarient fortement.

De manière intéressante, une légère covariation entre les performances en rotation mentale et les mesures d'OBT après l'induction de l'illusion visuomotrice peut être observée.

Ensuite, des ellipses à 95 % ont montré qu'aucune des variables qualitatives explorées ici (sexe, expérience de la tâche, type de stimulation, jeu vidéo et pratique sportive) n'était discriminante (Figure 58).

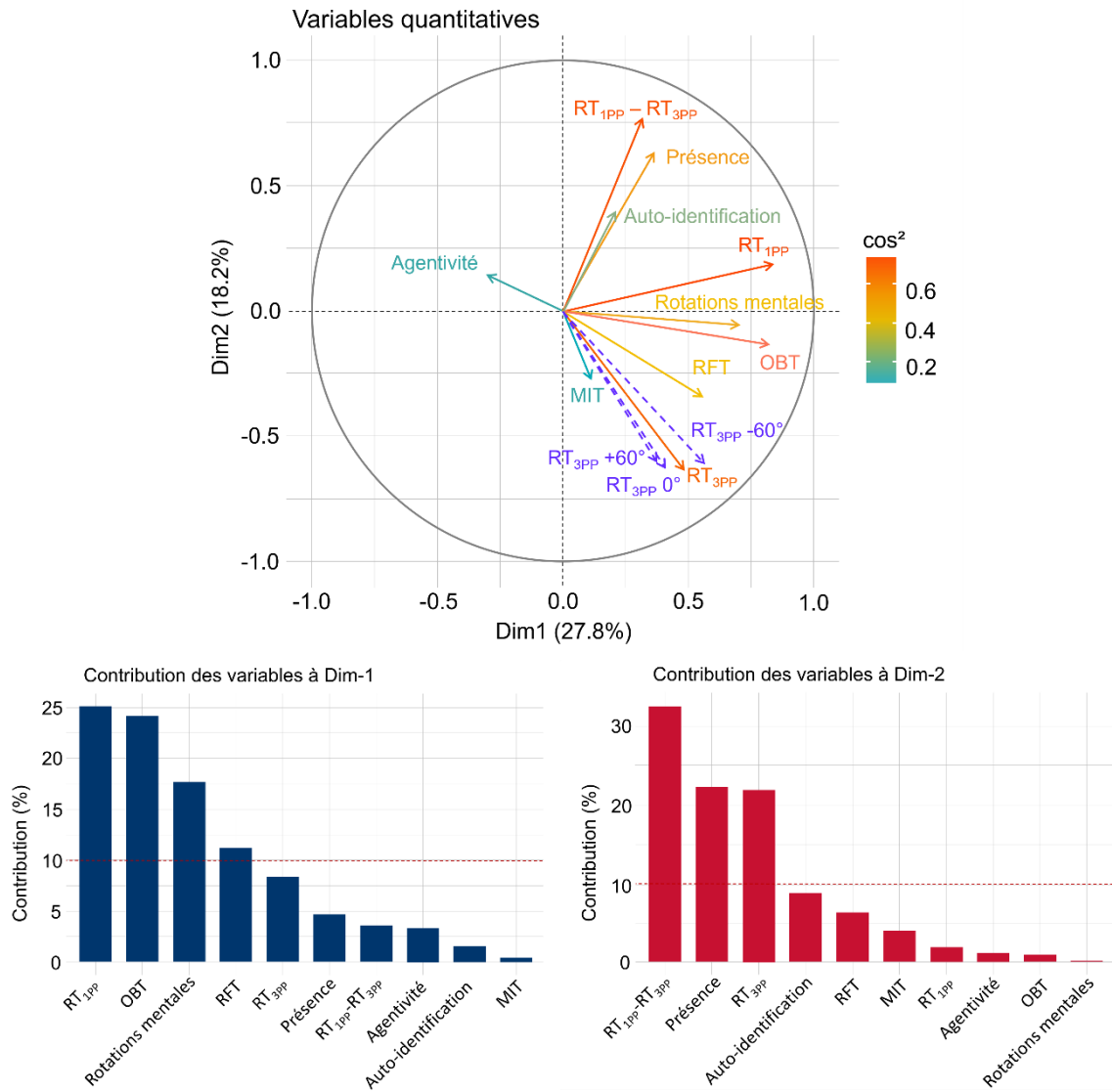


Figure 57 - Analyse en composante principale. En haut : variables représentées sur les deux dimensions de l'ACP. En bas : Contributions des différentes variables aux deux dimensions principales de l'ACP.

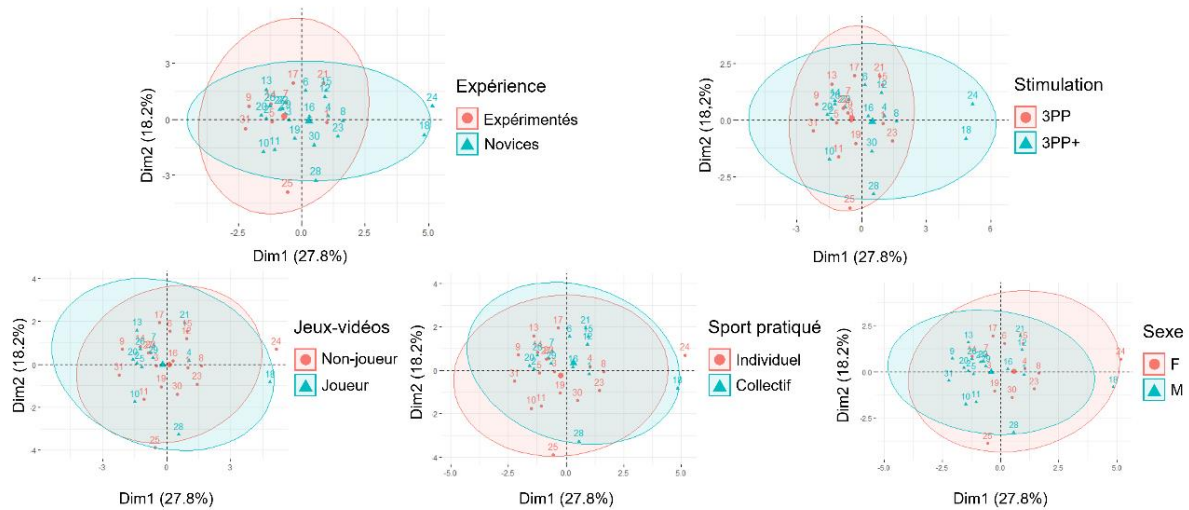


Figure 58 - Ellipses de confiance à 95%.

Multifractalité des mouvements des mains

Une ANOVA à trois facteurs sur la multifractalité des mouvements de la main (en utilisant l'indicateur ΔH_{15}) n'a pas mis en évidence d'effets significatifs de la répétition (premier ou deuxième passage, $F(1,371) = 0.13$, $p = 0.71$), de l'angle (0° , $+60^\circ$ et -60° , $F(2,371) = 0.57$, $p = 0.56$) ni de la main (dominante ou non dominante, $F(1,371) = 0.78$, $p = 0.38$). Cependant, il existe un effet d'interaction significatif entre la main et la répétition ($F(1,371) = 4.49$, $p = 0.035$), les valeurs de ΔH_{15} pour la main non dominante diminuant entre les répétitions 1 et 2, tandis que les valeurs de ΔH_{15} pour la main dominante augmentent. Les résultats de ΔH_{15} sont présentés dans le tableau 10.

Condition	ΔH_{15} main non-dominante	ΔH_{15} main dominante
Bloc 1 / 0°	0.680 ± 0.066	0.696 ± 0.086
Bloc 1 / -60°	0.683 ± 0.088	0.656 ± 0.077
Bloc 1 / $+60^\circ$	0.682 ± 0.092	0.661 ± 0.079
Bloc 2 / 0°	0.658 ± 0.076	0.681 ± 0.094
Bloc 2 / -60°	0.660 ± 0.084	0.674 ± 0.088
Bloc 2 / $+60^\circ$	0.662 ± 0.070	0.702 ± 0.088

Tableau 10 - Valeurs de ΔH_{15} pour les mains dominante et non-dominante. Valeurs obtenues pour la première et la deuxième répétition avec chacun des angles de présentation de l'avatar.

De plus, une ANOVA trois facteurs sur les données du deuxième bloc avec la main, l'angle et la condition (3PP ou 3PP+) comme facteurs indépendants a révélé un effet significatif de la main ($F(1,185) = 4.3$, $p = 0.040$), aucun effet d'une stimulation visuo-tactile supplémentaire ($F(1,185) = 0.47$, $p = 0.50$) et aucun effet d'interaction.

Multifractalité non-linéaire

Condition	t_{MF} main non-dominante	t_{MF} main dominante
Bloc 1 / 0°	25.02 ± 15.41	31.24 ± 11.73
Bloc 1 / -60°	25.66 ± 13.30	28.18 ± 10.84
Bloc 1 / $+60^\circ$	25.93 ± 13.34	27.96 ± 13.15
Bloc 2 / 0°	26.57 ± 13.70	27.61 ± 15.35
Bloc 2 / -60°	22.62 ± 9.76	25.79 ± 13.43
Bloc 2 / $+60^\circ$	26.76 ± 14.13	31.98 ± 19.99

Tableau 11 - Valeurs de t_{MF} pour les mains dominante et non-dominante. Valeurs obtenues pour la première et la deuxième répétition avec chacun des angles de présentation de l'avatar.

Un test t comparant la multifractalité (ΔH_{15}) dans les séries originales avec leurs 40 surrogates linéarisés a démontré la présence de multifractalité non-linéaire ($p < 0.05$) dans 367 des 372 séries (99%).

La statistique t (t_{MF}) résultant de cette comparaison a été utilisée pour évaluer la quantité de multifractalité provenant de mécanismes non-linéaires dans chaque condition (tableau 11). Une ANOVA à trois facteurs a révélé des valeurs de t_{MF} plus élevées dans la main dominante par rapport à la main non-dominante ($F(1,371) = 5.47$, $p = 0.02$), aucun effet du passage ($F(1,371) = 0.1$, $p = 0.76$) et aucun effet de l'angle ($F(2,371) = 1.2$, $p = 0.30$). Aucun effet d'interaction n'a été observé.

Une deuxième ANOVA à trois facteurs effectuée sur les données de la deuxième répétition, avec l'angle, la main et la condition comme facteurs indépendants, n'a révélé aucun effet d'une stimulation visuo-tactile supplémentaire ($F(1,185) = 0.57$, $p = 0.45$). Il n'y avait aucun effet de la main, de l'angle ou de l'interaction.

Discussion

Dans cette étude, la tâche VMVR a été effectuée avec des modalités 1PP, 3PP et 3PP+. Comme résultat principal, des temps de réponse visuo-moteurs (performance) similaires sont observés dans chacune de ces conditions expérimentales. De plus, les performances sont conservées lorsqu'un angle est ajouté entre l'utilisateur et son avatar, montrant que les participants sont capables de naturellement prendre la perspective de l'avatar pour maintenir leur performance visuo-motrice. Il n'existe pas non plus d'influence des profils individuels, et l'ajout d'une stimulation visuo-tactile lors d'une situation 3PP n'a aucun effet sur la performance ni les composantes de la conscience de soi corporelle, suggérant que la synchronisation visuo-motrice à elle seule induit une illusion corps-entier. Enfin, une nouvelle approche pour mesurer l'incarnation d'un avatar virtuel contrôlé par capture du mouvement est proposée : trouver de la multifractalité non-linéaire dans les mouvements effectués pendant une tâche motrice suggère que l'avatar est intégré dans un schéma cognitif étendu, et que l'utilisateur peut donc naturellement agir à travers lui.

Dans la littérature, le changement de perspective (de 1PP à 3PP) peut entraîner une diminution (Bhandari and O'Neill, 2020; Tumialis et al., 2020) ou un maintien des performances (Covaci et al., 2014; Pastel et al., 2020). Ici, les temps de réponse moyens ne sont pas affectés en modifiant le point de vue, et ce même en ajoutant un angle de rotation entre l'utilisateur et son avatar. Cependant, il est important d'interpréter ces résultats en gardant en mémoire les spécificités de la tâche. La tâche VMVR implique un processus de localisation de stimuli ayant un impact important dans la performance. En particulier, en utilisant la 1PP, les temps de réponse associés aux stimuli en périphérie sont plus élevés que ceux apparaissant au centre de la cible (Figures 49, 52). En prenant de la distance par rapport à la cible, l'influence de la vision périphérique dans les résultats est moins élevée ; cette observation pourrait expliquer le maintien des performances par une amélioration des temps de réponse associés aux stimuli périphériques. Ce paramètre est alors important à prendre en compte au moment de développer une application en réalité virtuelle, notamment lorsqu'il faut changer de point de vue. Par exemple, entraîner la vision périphérique dans des situations utilisant la 3PP nécessite de développer des environnements virtuels adaptés.

Le second résultat concerne les performances mesurées avec la 3PP, et notamment en ajoutant les angles de $+60^\circ$ et -60° . L'hypothèse initiale était que les temps de réponse dans ces conditions spécifiques dépendraient des facultés des participants à prendre la perspective de l'avatar. Or, aucun lien n'a été mis en évidence entre les performances en tâche et les résultats d'OBT ou de la tâche de rotations mentales. De façon générale, les performances ne semblent pas dépendre des composantes de la conscience de soi corporelle, qu'elles soient auto-rapportées (auto-

identification, sentiment d'agentivité) ou mesurées par des tâches comportementales (auto-localisation par MIT, et prise de perspective par OBT). Ces résultats sont conformes à la littérature, qui propose que la congruence d'informations multisensorielles (plus que le sentiment d'appartenance avec l'avatar) est déterminant dans la performance lors de tâches motrices ou de prise de décision (Odermatt et al., 2021).

En accord avec la littérature, et soutenant l'hypothèse d'un phénomène d'incarnation avec l'avatar de nature « tout-ou-rien », l'ajout d'une stimulation visuo-tactile n'a eu d'effet ni sur les performances visuomotrices (temps de réponse), ni sur les mesures des composantes de la conscience de soi corporelle. Ces résultats s'ajoutent à ceux montrant que toucher son propre corps en plus d'effectuer un mouvement avec le bras n'améliore pas le sentiment d'appartenance avec l'avatar (Swinkels et al., 2021), et notant que stimuler de multiples parties du corps n'améliore pas l'illusion par rapport à une stimulation unique (O'Kane and Ehrsson, 2021). Les résultats de cette étude, combinée à ceux de l'étude 4, permettent de proposer que les stimulations multisensorielles *per se*, plus que le type de stimulation ou le nombre de stimulations redondantes dans la scène VR, sont responsable de l'induction d'une illusion corps-entier.

Il est important de noter que si les performances sont les mêmes en moyenne avec la 1PP et la 3PP, elles ne sont pas pour autant corrélées (Figure 54). Ces différences individuelles ne semblent pas être expliquées par les mesures d'incarnation de l'avatar ou les profils individuels, comme le montre l'absence de variable covariant avec la mesure des différences entre les performances en fonction du point de vue (Figure 57, $RT_{3PP-1PP}$). Nous ne sommes pas encore capables d'expliquer ces différences avec les données mesurées ici.

Enfin, une nouvelle approche permettant d'étudier l'incarnation d'un avatar est proposée. En s'intéressant à la nature des interactions entre le participant et son avatar, une analyse multifractale a permis de mettre en évidence des phénomènes non-linéaires dans les mouvements des mains lors de l'exécution de la tâche. Observer de la multifractalité non-linéaire suggère la présence d'interactions non-linéaires entre toutes les échelles, ce qui témoigne de l'intégration de l'avatar dans un schéma cognitif étendu. Les indicateurs utilisés ici, ΔH_{15} et t_{MF} , ont déjà été utilisés pour observer l'incarnation d'outils (Bennett et al., 2022; Nie et al., 2011), l'adaptation au cours d'une tâche réalisée sous différentes modalités (Anastas et al., 2014; Torre et al., 2019) ou encore la précision lors de la tâche de pointage de Fitts (Bell et al., 2019). La présence de multifractalité non-linéaire démontre la présence d'interactions entre tous les composants impliqués dans l'exécution de la tâche : le cerveau, le corps, l'avatar et l'environnement.

Cette étude comporte de nombreuses limitations qu'il est important d'évoquer pour ouvrir de nouvelles pistes et améliorer les méthodes d'exploration des

phénomènes d'incarnation en VR. En accord avec les résultats de l'étude 4, l'illusion corps-entier n'a pas eu d'effet sur l'auto-localisation mesurée avec MIT. Les résultats de cette expérience ont été obtenus avec une population jeune, sportive et en bonne santé, possédant suffisamment de flexibilité cognitive et d'habiletés physiques pour effectuer la tâche visuomotrice en utilisant l'avatar à la troisième personne. Il serait intéressant d'appliquer le même protocole à des populations d'âge et de niveau d'activité physique différent.

Enfin, une limite importante de l'étude concerne le matériel utilisé. Pour ajouter un retour tactile, une planche en bois a été ajoutée à la position perçue du tableau virtuel. De ce fait, il est possible que cet indicateur ait joué un rôle important dans les performances à la troisième personne. L'hypothèse selon laquelle certains sujets répondraient à la tâche en faisant correspondre la position perçue du stimulus apparaissant sur le tableau virtuel à un emplacement précis sur la planche de bois ne peut pas être complètement écartée.

Conclusion

Cette étude apporte de nouvelles informations sur la façon dont les performances lors d'une tâche visuomotrice évoluent en passant de la 1PP à la 3PP en utilisant un avatar. En particulier, les différences individuelles dans les mesures d'incarnation de l'avatar ne semblent pas influencer les performances à la suite d'une illusion corps-entier induite par une synchronisation visuomotrice. En accord avec les résultats de la littérature, la stimulation visuo-tactile additionnelle n'a eu aucun impact sur les variables mesurées ici.

Les résultats obtenus peuvent être exploités pour concevoir des environnements virtuels favorisant l'apprentissage moteur, en utilisant notamment des avatars avec un point de vue décalé. Observer ses mouvements sur un avatar en utilisant un point de vue externe pourrait ouvrir de nouvelles perspectives, notamment dans le domaine du sport. Par exemple, la présentation d'une situation de jeu avec un point de vue externe pourrait permettre d'obtenir une meilleure compréhension des déplacements des joueurs sur le terrain, et ainsi améliorer l'apprentissage tactique et la prise de décision. De même, des applications dans lesquelles l'avatar incarné par l'utilisateur effectuerait des mouvements influençant ceux de l'utilisateur pourraient être envisagées. Par exemple, il a été montré que les mouvements réalisés lors d'une tâche de traçage de cercle peuvent être influencés lorsque l'utilisateur perçoit son avatar tracer des ellipses (Burin et al., 2019). De même, voir son avatar courir en restant dans une position assise suscite des réponses autonomes sympathiques (Kokkinara et al., 2016) pouvant être utilisées pour réduire le stress et l'anxiété chez le participant (Burin et al., 2022).

La littérature suggère qu'adopter une 3PP induit un sentiment d'appartenance réduit envers l'avatar. Pour mitiger cet effet, certaines solutions ont été envisagées, en proposant notamment la possibilité de changer de point de vue pendant l'expérience (Debarba et al., 2017). Dans le cas de thérapies, il peut être intéressant de coupler la 1PP et la 3PP pour adapter l'environnement à l'utilisateur, en profitant à la fois des effets des stimulations sur l'avatar et de l'effet Proteus, tout en conservant l'incarnation avec l'avatar, pour induire les effets désirés chez l'utilisateur.

Discussion générale

Le travail de cette thèse portait sur l'étude des interactions entre l'homme et son environnement, et particulièrement après induction d'une illusion corps-entier lors d'une immersion en réalité virtuelle. Une approche psycho-physio-comportementale a été adoptée pour induire et mesurer certains états particuliers chez un utilisateur, notamment lorsque ce dernier utilise un avatar. Nous avons fait le choix d'associer à cette thématique la théorie des systèmes complexes, en étudiant les phénomènes cognitifs émergeant des interactions entre les différents éléments impliqués en accord avec les théories récentes de l'incarnation radicale. En s'intéressant à des phénomènes psycho-cognitifs et physiologiques par des méthodes empruntées aux sciences de la complexité, tout en développant les environnements virtuels nécessaires à l'induction d'états particuliers, le travail de cette thèse est résolument pluridisciplinaire. En particulier, l'utilisation de techniques non-linéaires de traitement du signal a permis de mettre en lumière des phénomènes psycho-cognitifs traditionnellement évalués par des questionnaires ou de la neuroimagerie.

Deux aspects principaux ont été développés au cours de ce travail de thèse : l'utilisation de la multifractalité comme marqueur des interactions non-linéaires entre l'humain et son environnement, et l'incarnation d'un avatar en réalité virtuelle. La finalité de ce travail de thèse consistait à étudier le phénomène d'incarnation par les interactions non-linéaires entre le participant et son avatar, et de déterminer si les modifications de la conscience de soi corporelle pouvaient avoir un impact sur les performances visuomotrices.

Pour répondre à cet objectif, différentes études ont été mises en place afin de développer les environnements virtuels, les tâches à utiliser ainsi que les techniques d'analyse des données.

La première étude de cette thèse a eu pour but de trouver une tâche visuomotrice appropriée, puis de la transposer et valider en réalité virtuelle. La tâche choisie, nommée VisuoMotor Virtual Reality (VMVR), a été testée auprès de 64 étudiants dans différents espaces visuels. La fiabilité test-retest du dispositif a été évaluée à l'aide de coefficients de corrélation intraclasse (ICC) et de graphiques de Bland-Altman. Des caractéristiques observées sur un dispositif réel, concernant notamment les différences de temps de réponse entre les stimuli apparaissant dans les espaces visuels haut et bas (Stone et al., 2019), sont retrouvées avec l'usage de l'outil en réalité virtuelle. De plus, les données issues des outils utilisés dans la réalité virtuelle - notamment les mouvements de la tête - couplées aux performances et aux caractéristiques individuelles des participants permettent d'établir des profils de sujets.

Dans la seconde étude, les données issues des mouvements des mains des participants lors de la tâche VMVR ont été exploitées pour étudier les adaptations visuomotrices à l'œuvre pendant l'exécution de la tâche. Il est assez courant de s'intéresser au temps de réponse en le découpant en plusieurs périodes : le temps de

réaction, la conversion de cette perception en mouvement, et la durée d'exécution motrice (Hülsdünker et al., 2016). Cependant, la densité spectrale de puissance dans les mouvements des mains suggère que l'action de localiser et d'éteindre une cible lumineuse ne peut pas être décomposée comme l'addition de plusieurs phénomènes, mais plutôt que ces différents systèmes interagissent en permanence, impliquant des interactions non-linéaires sur plusieurs échelles temporelles. Cette intuition a été confirmée par la présence de multifractalité dans les mouvements des mains mise en évidence avec la méthode FMF-DFA. La valeur de cette multifractalité (ΔH_{15}) montre un lien cohérent avec les adaptations visuomotrices nécessaires dans les différents espaces de recherche visuelle (espaces visuels haut et bas). De plus, l'indicateur ΔH_{15} utilisé est suffisamment précis pour observer des différences de comportement entre les mains dominantes et non-dominantes, qui ont été mises en relation avec les mécanismes neurologiques facilitant l'action de localiser et d'atteindre une cible. Le travail réalisé dans les deux premières études, portant sur la validation d'une tâche mesurant des temps de réponse visuomoteurs en réalité virtuelle et l'utilisation de la multifractalité des mouvements des mains comme marqueur d'adaptations, a ensuite été réinvesti lors de la dernière étude portant sur l'utilisation d'un avatar à la troisième personne.

Afin de faire le lien entre les méthodes d'analyse multifractales et la notion d'incarnation, une étude a été réalisée avec une tâche sur ordinateur. Dans cette expérience, la notion d'incarnation a été abordée via le concept de *readiness-to-hand*, décrivant des interactions fluides et intuitives avec un outil. La théorie de l'incarnation radicale (Schettler et al., 2019) propose que l'incarnation d'un outil puisse s'observer via son inclusion dans un système cognitif étendu, démontrée par la présence d'interactions non-linéaires avec l'utilisateur et la tâche. Observer des interactions non-linéaires via la multifractalité des mouvements de l'outil permet donc de caractériser l'outil comme étant *ready-to-hand*, et incarné par l'utilisateur. Cette méthode d'analyse, déjà utilisée au préalable dans la littérature (Bennett et al., 2022; Dotov et al., 2010), a ici été étendue en utilisant une partie du corps comme un outil. En utilisant de la capture du mouvement, la main a été utilisée pour agir à la place de la souris d'ordinateur, comme un outil. La comparaison des interactions non-linéaires se produisant dans les systèmes utilisant ou non la souris montre que cette dernière est effectivement incarnée par l'utilisateur, comme si elle était une extension de son propre corps. Cette méthode d'analyse de l'incarnation a été utilisée à nouveau dans la dernière étude pour étudier les interactions entre l'utilisateur et son avatar.

Les méthodes d'analyse multifractales ayant été mises au point et reliées à la notion d'incarnation d'un outil – ou d'une partie du corps utilisée comme tel, le travail suivant a consisté à développer un environnement permettant d'étudier le phénomène d'incarnation d'un avatar statique en utilisant les méthodes les plus récentes développées dans la littérature. Cette expérience était aussi l'occasion de

s'intéresser aux effets comparés des deux méthodes d'induction d'illusion corps-entier les plus utilisées dans la littérature, utilisant des stimulations multisensorielles visuo-tactiles (Lenggenhager et al., 2007) et cardio-visuelles (Aspell et al., 2013). Le phénomène d'incarnation a été étudié via les modifications des composantes de la conscience de soi corporelle, et notamment l'auto-localisation, la prise de perspective et l'auto-identification (Blanke, 2012). Des mesures de chacune de ces composantes ont été obtenues à partir de méthodes comportementales. Les résultats obtenus montrent que les deux types d'illusion provoquent des modifications similaires de la conscience de soi corporelle chez notre population, et qu'aucune des variables utilisées pour construire un profil psycho-cognitif des participants ne semble permettre de prédire une susceptibilité accrue à un type de stimulation en particulier.

Enfin, l'ensemble des résultats issus des expériences précédentes sont réinvestis dans la cinquième étude. L'utilisation de la réalité virtuelle couplée à la capture du mouvement permet aux participants de réaliser la tâche VMVR à la troisième personne, en contrôlant leur avatar. En moyenne, les performances lors de cette tâche n'ont pas été dégradées en adoptant un point de vue éloigné, même lorsqu'un angle est rajouté entre l'utilisateur et son avatar. Les modifications de la conscience de soi corporelle à la suite de l'incarnation de l'avatar ne semblent pas être en mesure de déterminer les différences individuelles de performances entre les différents points de vue utilisés. Ce résultat suggère que tous les participants peuvent utiliser la perspective éloignée pour performer, indépendamment des différences individuelles liées à l'incarnation de l'avatar. De plus, les résultats de cette étude et de la précédente plaident en faveur d'une illusion corps-entier créée par les stimulations multisensorielles *per se*, indépendamment du type (cardio-visuelle ou visuo-tactile) et du nombre d'inductions (aucun effet d'une stimulation visuo-tactile en plus de la synchronisation visuomotrice). Enfin, la présence de multifractalité non-linéaire dans les mouvements des mains peut être utilisée comme marqueur comportemental et non-invasif de l'incarnation avec l'avatar.

Les avancées principales liées à ce travail de thèse portent sur deux aspects principaux. D'une part, les méthodes multifractales ont été utilisées comme marqueur des adaptations visuomotrices et des phénomènes d'incarnation d'un outil et d'un avatar. D'autre part, les méthodologies utilisées pour caractériser l'évolution des composantes de la conscience de soi corporelle ont permis d'améliorer notre compréhension de l'influence des stimulations multisensorielles sur l'incarnation d'un avatar.

Il est important de noter que ce travail de thèse comporte de nombreuses limites. Dans chacune des études, les participants sont issus d'une population de jeunes en bonne santé, et pratiquant une activité physique régulière. De ce fait, les résultats obtenus ne peuvent pas être généralisés à l'ensemble de la population. Le choix méthodologique de ne pas utiliser de condition asynchrone pour vérifier

l'induction d'une illusion corps-entier complique la comparaison de l'effet des stimulations multisensorielles appliquées avec les résultats de la littérature. Ce choix a cependant été justifié dans les études concernées. Dans la dernière étude, les conclusions obtenues sur les performances doivent être mises en relation avec les différences d'afférences sensorimotrices mises à disposition des sujets lors de l'exécution de la tâche. À la première personne, le retour tactile correspondant à l'appui sur un bouton est obtenu avec la vibration des manettes ; à la troisième personne, un retour tactile plus réaliste est proposé par la planche de bois positionnée à l'emplacement du tableau virtuel.

De plus, les dispositifs expérimentaux mis en place n'ont pas permis de vérifier certaines hypothèses. En particulier, dans la troisième étude, le protocole prévoyait une répétition incluant le dysfonctionnement de l'outil. Ce dernier n'a pas forcément été interprété comme tel par les participants, qui ont pour certains vu un dysfonctionnement de la tâche ou de l'écran, plutôt que de la souris ou de la main. Le paradigme mis en place n'a donc pas été en mesure d'étudier le phénomène de désincarnation de la main utilisée comme un outil. Le dispositif expérimental incluait de plus un dispositif d'oculométrie, utilisé pour déterminer si les mouvements des yeux effectués par le participant pendant cette tâche présentaient des caractéristiques multifractales similaires à celles de l'outil. L'objectif sous-jacent visait à déterminer si les propriétés d'interactions non-linéaires d'un système pouvaient s'observer indépendamment du point de mesure, à savoir au niveau de l'outil (ou de la main) et des yeux. Des problèmes liés à la fréquence fluctuante d'acquisition des données ainsi qu'à l'application des méthodes de traitement ont rendu difficile cette exploitation de l'oculométrie, qui n'a donc pas pu être utilisée pour déterminer si les adaptations du comportement cognitif peuvent être révélées par le comportement dynamique multifractal et non-linéaire du déplacement de la vision centrale.

Conclusion

Caractériser les interactions entre l'homme et son environnement est un enjeu majeur dans la conception de nouveaux outils, de méthodes de rééducation et d'entraînement, ou encore dans le milieu du divertissement. En utilisant une approche transdisciplinaire, les travaux présentés dans ce manuscrit mettent en lumière l'intérêt d'aborder cette question via l'étude du mouvement émergeant de nombreuses interactions entre les phénomènes de perception, de cognition et d'action, et l'environnement.

En particulier, les méthodes d'analyse multifractales permettent de caractériser des adaptations visuomotrices, ainsi que le phénomène d'incarnation d'un outil ou d'un avatar.

Les méthodes et outils utilisés dans les différentes études sont pour la plupart peu coûteux et non-invasifs. Ils pourraient être utilisés pour étudier l'humain en milieu écologique, dans un environnement réel ou virtuel. L'analyse simultanée d'indicateurs de performances, de paramètres psychologiques et physiologiques croisée avec des dispositions individuelles permet de décrire le fonctionnement de l'humain dans son ensemble, et de déterminer des liens entre les multiples facteurs influençant le comportement adapté à une tâche cognitivo-motrice.

Transfert et valorisation

Les méthodes et tâches développées pendant cette thèse ont fait – ou feront – l’objet d’un transfert technologique, à la fois pour le partenaire industriel (CATIE) et l’équipe de recherche (PMH_DySCo).

Par exemple, la tâche de mesure de temps de réponse en réalité virtuelle (expériences 1, 2 et 5) dont la fiabilité test-retest et l’utilité pour construire des groupes d’individus ayant un comportement similaire a été démontrée, peut être directement mise à disposition pour l’évaluation ou l’entraînement de facultés visuomotrices.

La méthodologie d’analyse multifractale (expériences 2, 3 et 5) appliquée aux mouvements des mains ou d’un outil peut être utilisée pour adresser différentes applications. En se basant sur les résultats de la deuxième étude, réalisée sur l’analyse multifractale des mouvements des mains dans différents espaces visuels, elle peut servir de marqueur d’adaptations lors d’une tâche visuomotrice. Cette analyse pourrait être utilisée dans la conception de nouvelles interfaces, pour améliorer l’expérience utilisateur. En particulier, lors d’interactions en réalité virtuelle faisant intervenir des mouvements dans l’espace, quantifier les adaptations nécessaires en fonction de la localisation des informations permettrait une approche quantitative de l’étude des interfaces.

Avec les points abordés dans la troisième et la cinquième étude, les indices issus de la multifractalité peuvent être utilisés comme marqueur de l’intégration d’un outil dans un système cognitif étendu. Cette méthodologie, utilisée avec la souris d’ordinateur et la main dans le cadre de la tâche des moutons, et avec l’avatar dans la tâche de temps de réponse visuomoteurs en réalité virtuelle, pourrait être réutilisée pour la conception et l’évaluation de nouveaux outils. Par exemple, l’utilisation de marqueurs issus de la multifractalité pourrait permettre d’évaluer le caractère *ready-to-hand* d’un nouvel outil, et donc sa fluidité et sa simplicité d’utilisation. De plus, une évaluation longitudinale apporterait des informations sur l’évolution des interactions entre un utilisateur, l’outil et l’environnement, et pourrait servir de marqueur d’expertise.

Les tâches faisant intervenir un avatar (expériences 4 et 5), ainsi que l’usage des technologies de capture du mouvement pour l’animation d’objets et de corps dans un environnement virtuel, peuvent être réutilisées pour adresser des applications nécessitant un point de vue à la troisième personne. Ces dernières peuvent concerner la formation, l’entraînement ou la santé.

Pendant cette thèse, d’autres thématiques ont pu être adressées. Par exemple, une expérience sur le cybermalaise a été réalisée pour s’intéresser aux potentiels marqueurs psycho-cognitifs précédant son apparition. Dans cette expérience, un

simulateur de conduite de véhicule dans un entrepôt a été développé en réalité virtuelle (Figure 59) pour introduire un cybermalaise modéré. En combinant la mesure auto-rapportée du cybermalaise avec des aptitudes individuelles (style perceptif, intéroception, données socio-démographiques) et des variables issues d'une analyse posturale, nous avons tenté de déterminer l'existence de profils de participants plus ou moins susceptibles de supporter une immersion en réalité virtuelle. L'hypothèse principale concernait l'évaluation d'un possible lien entre les adaptations visuomotrices mises en place lors de l'immersion dans un environnement virtuel et les adaptations posturales. En particulier, nous nous sommes intéressées à l'évolution des parts d'utilisation des différents systèmes impliqués dans le maintien de la posture, ce qui peut être mesuré par une analyse fréquentielle du déplacement du centre de pression dans des bandes de fréquence particulières (Golomer et al., 1994; Paillard et al., 2006, 2004, 2002). Les adaptations posturales peuvent aussi être étudiées avec des analyses multifractales (Kelty-Stephen et al., 2021a; Shimizu et al., 2002). De plus, des études précédentes ont mis en lien des adaptations posturales avec la visualisation d'un mur se déplaçant vers le participant (Lee and Aronson, 1974), et notamment en réalité virtuelle (Chander et al., 2019). Dans ce contexte, nous avons mis en place une expérience permettant d'effectuer des mesures posturales avant et après immersion en réalité virtuelle, en utilisant le paradigme d'un mur se déplaçant vers le sujet. L'objectif final était de déterminer si certains marqueurs posturaux pouvaient permettre de comprendre les stratégies d'adaptation adoptées par les participants lors d'une immersion, notamment lors de la visualisation d'un mouvement, afin de relier ces comportements à des phénotypes individuels et à l'apparition du cybermalaise. L'environnement virtuel développé, ainsi que les méthodes utilisées, peuvent être réinvestis dans des études portant sur le mal des simulateurs en réalité virtuelle.



Figure 59 – Simulateur de conduite en réalité virtuelle.

En collaboration avec les membres de l'équipe de recherche PMH_DySCo, deux autres tâches ont été développées pour adresser des questions de recherche portant sur la fatigue mentale et la collaboration. Dans un premier temps, une tâche d'attention continue (Figure 60) permettant d'induire une fatigue mentale modérée a

été développée en s'inspirant d'un dispositif déjà existant (Posada-Quintero and Bolkhovsky, 2019). Cette tâche s'inscrit dans un projet visant à déterminer des profils individuels dans l'apparition de la fatigue cognitive, à partir d'indicateurs issus de la variabilité du battement cardiaque et de l'activité électrodermale. Dans cette tâche, les participants doivent observer la ligne d'horizon, et appuyer le plus rapidement possible sur la barre d'espace s'ils aperçoivent un bateau rouge. Si le bateau est bleu, ils doivent inhiber la réponse. La performance est mesurée à partir du nombre de mauvaises inhibitions et du temps de réponse moyen pour repérer les bateaux rouges.

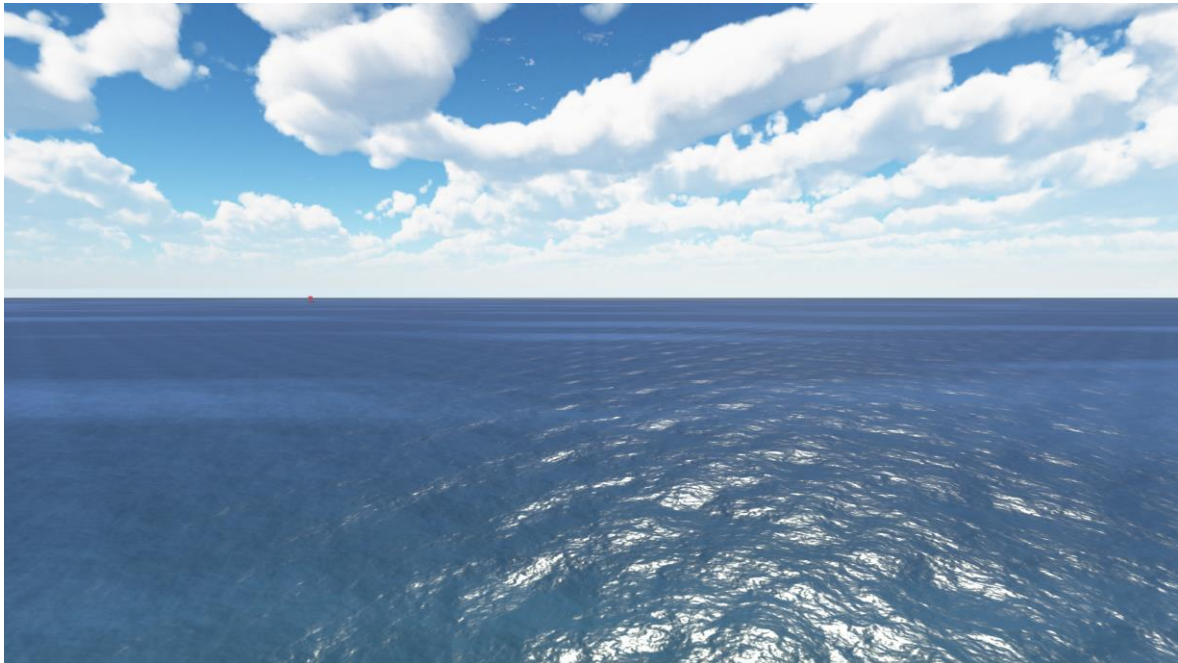


Figure 60 – Illustration de la tâche des bateaux. Le participant a pour consigne d'appuyer sur la barre d'espace le plus rapidement possible s'il perçoit un bateau rouge à l'horizon, et d'inhiber sa réponse si le bateau est bleu.

La seconde partie de ce projet s'intéressait ensuite à l'influence des profils identifiés sur des phénomènes de résonance physiologique. Pour cela, une tâche collective a été développée pour enregistrer les signaux physiologiques d'individus collaborant avant et après l'induction de la fatigue mentale par la tâche des bateaux. Pour observer les phénomènes souhaités, la tâche devait nécessiter de la collaboration entre deux individus pour progresser, tout en limitant l'impact des facultés individuelles des participants pour déplacer les personnages. L'application développée, R3B (Red Bonhomme and Blue Bonhomme, Figure 61), est un jeu constitué de 19 niveaux, dans lesquels deux utilisateurs doivent déplacer leur personnage respectif pour atteindre une sortie en s'entraïdant. Chaque personnage peut interagir avec les obstacles de sa couleur pour aider le coéquipier à progresser.

Le niveau se termine lorsque les deux personnages ont atteint la porte correspondant à leur couleur.



Figure 61 – Capture d'écran du niveau 17 de la tâche collective (R3B).

La propagation de la fatigue est étudiée en observant l'évolution des signaux physiologiques des binômes collaborants avant et après induction de fatigue cognitive avec la tâche des bateaux. La causalité de Granger a permis de mettre en évidence une résonance physiologique, et la direction de cette causalité dépend des profils identifiés précédemment. Les travaux effectués dans le cadre de ce projet ont fait l'objet de deux présentations en congrès, lors de l'ACAPS 2021 et de l'ECSS 2022.

D'un point de vue des méthodes d'analyse, cette thèse a permis de monter en compétences sur les analyses multivariées, utilisées pour observer l'évolution comparée de nombreuses variables et construire des groupes de participants présentant un comportement commun, ainsi que sur l'utilisation de la multifractalité. Les modalités d'application des méthodes multifractales ont été étudiées sur des signaux densément échantillonnés, provenant de la position de contrôleurs en réalité virtuelle, d'accéléromètres, d'appareils de capture du mouvement ou encore d'oculométrie. Les différentes études ont aidé à définir les modalités d'application de la méthode, la façon de recueillir des signaux, ainsi que les liens théoriques entre les résultats obtenus et les phénomènes psycho-physio-cognitifs associés.

Concernant les développements effectués, de nombreuses tâches sur ordinateur et en réalité virtuelle peuvent être mises à disposition de l'équipe de recherche et du partenaire industriel. Parmi ces celles-ci, on peut citer la tâche de

temps de réponse visuomoteurs, la tâche des moutons, la tâche des bateaux, R3B, le simulateur de conduite de véhicules, le Rod and Frame Test, la tâche de rotations mentales ainsi que l'environnement d'expérimentation avec l'avatar.

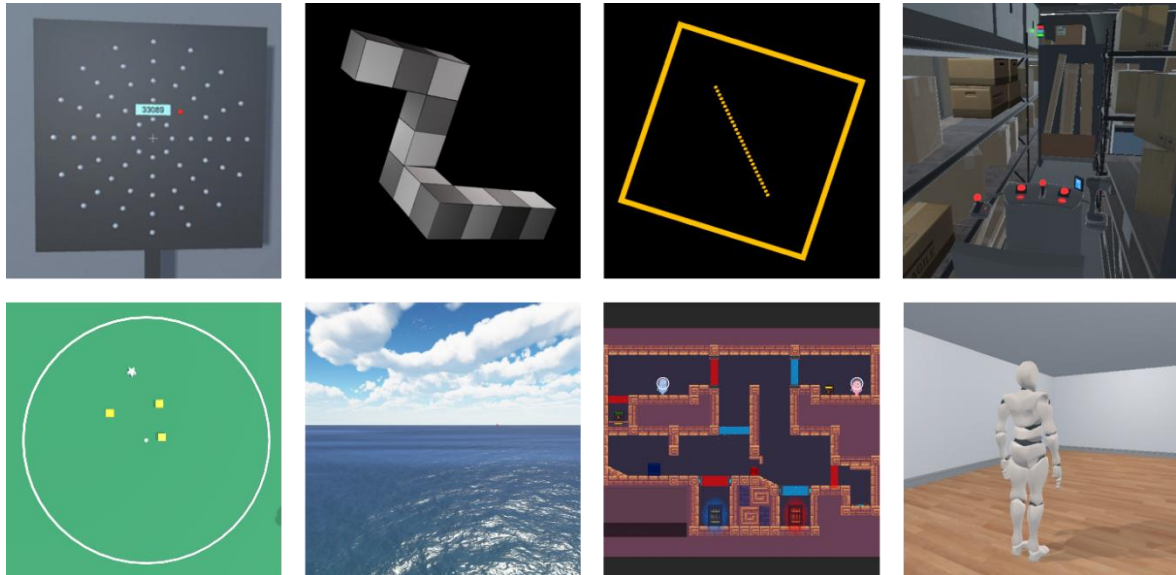


Figure 62 – Tâches développées et transférées pendant la thèse. De gauche à droite et de haut en bas : Temps de réponse visuomoteurs en réalité virtuelle (VMVR), Rotations mentales, Rod and Frame Test, Simulateur de conduite, Tâche des moutons, Tâche des bateaux, R3B, Tâche de l'avatar.

Perspectives

Il existe encore de nombreux verrous à lever, à la fois scientifiques et technologiques, avant de pouvoir industrialiser les méthodes et outils utilisés dans ce travail de thèse.

En particulier, les méthodes multifractales doivent être testées sur de nouveaux publics et dans de nouvelles conditions, afin de monter en niveau de maturité technologique. De même, les tâches développées en réalité virtuelle pourraient être testées pour des usages et publics spécifiques, différents des étudiants en STAPS recrutés dans les expériences présentées ici.

Pour que les différentes tâches développées puissent être mises à disposition par le partenaire industriel, certaines d'entre elles doivent d'abord être validées. En particulier, même si les rotations mentales et le Rod and Frame Test ont déjà été utilisées en réalité virtuelle dans d'autres expériences et papiers scientifiques, ces dernières n'ont pas encore été validées dans cet environnement. Il serait intéressant de tester ces tâches en comparaison avec un système physique pour déterminer les effets spécifiques de la réalité virtuelle sur les facultés mesurées. La tâche des bateaux a déjà été utilisée dans des articles à paraître, qui montrent qu'elle permet effectivement d'induire un niveau de fatigue mental modéré à la suite d'une exposition de 20 à 40 minutes. Comparer les effets de cette tâche par rapport à des tâches de référence comme l'AX-CPT (Cohen et al., 1999) pourrait permettre de valider son usage pour l'induction de fatigue cognitive.

La tâche de temps de réponse visuomoteurs (VMVR), utilisée dans les études 1, 2 et 5, a été validée pour une population de jeunes adultes, et les caractéristiques de l'outil ont été comparées avec celles obtenues dans la littérature pour un appareil physique. Comme l'usage de l'outil en réalité virtuelle permet d'obtenir des informations intéressantes sur l'organisation du système visuomoteur responsable de la performance via l'analyse des mouvements des mains, il peut être intéressant d'utiliser cet outil pour étudier les facultés d'adaptations dans différents types de population. En particulier, cette tâche pourrait être utilisée pour observer la diminution de complexité dans une population de personnes âgées ou pathologiques, et utilisée pour restaurer cette complexité.

Les méthodes de traitement du signal, les outils utilisés ainsi que les tâches développées au cours de cette thèse peuvent donner lieu à de nouvelles expériences, notamment dans le cadre de l'analyse des adaptations et de l'incarnation d'outil et d'avatars. Par exemple, il a été montré que la multifractalité peut être utilisée comme marqueur des adaptations cognitives lors d'une tâche faisant intervenir des fonctions exécutives, comme le Wisconsin Card Sorting Test (WCST). Un environnement virtuel

permettant d'effectuer le WCST à la troisième personne, par le biais d'un avatar, a été conçu pour observer les potentiels liens entre l'incarnation et la performance lors de fonctions exécutives, notamment via l'utilisation de la multifractalité.

En construisant sur les relations entre le participant et son avatar, il pourrait être intéressant d'étudier les liens entre l'incarnation et la coordination interpersonnelle (entre plusieurs individus, ou entre un utilisateur et son avatar). Développer cet aspect pourrait permettre de concevoir des applications en réalité virtuelle permettant d'améliorer l'apprentissage d'un geste, ou de restaurer la complexité d'individus âgés ou pathologiques (Almurad et al., 2018).

Comme autre piste, la présentation de stimulations spécifiques sur un avatar incarné par l'utilisateur pourrait permettre d'induire des états psycho-physiologiques spécifiques. En tirant parti de l'effet Proteus, présenter des avatars avec des caractéristiques physiques particulières peut permettre d'adresser de nouvelles applications. Par exemple, il a été montré que changer la couleur (ou la luminosité) d'un objet lourd (valise, haltères...) à l'aide d'un dispositif de réalité augmentée permet de diminuer la fatigue, autodéclarée et mesurée par électromyographie (Ban et al., 2013). Dans la même veine, est-ce qu'une illusion corps-entier générée envers un avatar de bodybuilder permettrait d'améliorer les performances physiques d'un individu ?

De façon générale, les environnements virtuels et outils développés dans cette thèse permettent d'adresser de nombreuses pistes, qui ne demandent qu'à être explorées dans un avenir proche.

Bibliographie

- A Review of Clustering Methods, 1984. , in: *Cluster Analysis*. SAGE Publications, Inc., 2455 Teller Road, Thousand Oaks California 91320 United States of America, pp. 34–62. <https://doi.org/10.4135/9781412983648.n3>
- Adenauer, H., Catani, C., Keil, J., Aichinger, H., Neuner, F., 2010. Is freezing an adaptive reaction to threat? Evidence from heart rate reactivity to emotional pictures in victims of war and torture. *Psychophysiology* 47, 315–322. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.2009.00940.x>
- Aglioti, S., DeSouza, J.F.X., Goodale, M.A., 1995. Size-contrast illusions deceive the eye but not the hand. *Curr. Biol.* 5, 679–685. [https://doi.org/10.1016/S0960-9822\(95\)00133-3](https://doi.org/10.1016/S0960-9822(95)00133-3)
- Ainley, V., Maister, L., Tsakiris, M., 2015. Heartfelt empathy? No association between interoceptive awareness, questionnaire measures of empathy, reading the mind in the eyes task or the director task. *Front. Psychol.* 6.
- Alonso, F.M., Kajastila, R., Takala, T., Matveinen, M., Kytö, M., Hämäläinen, P., 2016. Virtual ball catching performance in different camera views, in: *Proceedings of the 20th International Academic Mindtrek Conference, AcademicMindtrek '16*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, pp. 104–112. <https://doi.org/10.1145/2994310.2994335>
- Alzayat, A., Hancock, M., Nacenta, M.A., 2017. Measuring Readiness-to-Hand through Differences in Attention to the Task vs. Attention to the Tool, in: *Proceedings of the 2017 ACM International Conference on Interactive Surfaces and Spaces, ISS '17*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, pp. 42–51. <https://doi.org/10.1145/3132272.3134114>
- Anastas, J.R., Kelty-Stephen, D.G., Dixon, J.A., 2014. Executive Function as an Interaction-Dominant Process. *Ecol. Psychol.* 26, 262–282. <https://doi.org/10.1080/10407413.2014.957985>
- Anastas, J.R., Stephen, D.G., Dixon, J.A., 2011. The scaling behavior of hand motions reveals self-organization during an executive function task. *Phys. Stat. Mech. Its Appl.* 390, 1539–1545. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2010.11.038>
- Arlati, S., Keijsers, N., Paolini, G., Ferrigno, G., Sacco, M., 2021. Kinematics of aimed movements in ecological immersive virtual reality: a comparative study with real world. *Virtual Real.* <https://doi.org/10.1007/s10055-021-00603-5>
- Arsac, L.M., 2021. Multifractal Dynamics in Executive Control When Adapting to Concurrent Motor Tasks. *Front. Physiol.* 12.
- Arsac, L.M., Deschodt-Arsac, V., 2018. Detrended fluctuation analysis in a simple spreadsheet as a tool for teaching fractal physiology. *Adv. Physiol. Educ.* 42, 493–499. <https://doi.org/10.1152/advan.00181.2017>
- Arzy, S., Thut, G., Mohr, C., Michel, C.M., Blanke, O., 2006. Neural Basis of Embodiment: Distinct Contributions of Temporoparietal Junction and

- Extrastriate Body Area. *J. Neurosci.* 26, 8074–8081. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0745-06.2006>
- Aspell, J.E., Heydrich, L., Marillier, G., Lavanchy, T., Herbelin, B., Blanke, O., 2013. Turning Body and Self Inside Out : Visualized HEartbeats Alter Bodily Self-Consciousness and Tactile Perception. *Psychol. Sci.* 9.
- Baiano, C., Job, X., Santangelo, G., Auvray, M., Kirsch, L.P., 2021. Interactions between interoception and perspective-taking: Current state of research and future directions. *Neurosci. Biobehav. Rev.* 130, 252–262. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2021.08.007>
- Ban, Y., Narumi, T., Fujii, T., Sakurai, S., Imura, J., Tanikawa, T., Hirose, M., 2013. Augmented endurance: controlling fatigue while handling objects by affecting weight perception using augmented reality, in: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '13*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, pp. 69–78. <https://doi.org/10.1145/2470654.2470665>
- Banakou, D., Groten, R., Slater, M., 2013. Illusory ownership of a virtual child body causes overestimation of object sizes and implicit attitude changes. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 110, 12846–12851. <https://doi.org/10.1073/pnas.1306779110>
- Banakou, D., Hanumanthu, P.D., Slater, M., 2016. Virtual Embodiment of White People in a Black Virtual Body Leads to a Sustained Reduction in Their Implicit Racial Bias. *Front. Hum. Neurosci.* 10.
- Banakou, D., Kishore, S., Slater, M., 2018. Virtually Being Einstein Results in an Improvement in Cognitive Task Performance and a Decrease in Age Bias. *Front. Psychol.* 9.
- Banakou, D., Slater, M., 2014. Body ownership causes illusory self-attribution of speaking and influences subsequent real speaking. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 111, 17678–17683. <https://doi.org/10.1073/pnas.1414936111>
- Baron-Cohen, S., Wheelwright, S., 2004. The Empathy Quotient: An Investigation of Adults with Asperger Syndrome or High Functioning Autism, and Normal Sex Differences. *J. Autism Dev. Disord.* 34, 163–175. <https://doi.org/10.1023/B:JADD.0000022607.19833.00>
- Barra, J., Giroux, M., Metral, M., Cian, C., Luyat, M., Kavounoudias, A., Guerraz, M., 2020. Functional properties of extended body representations in the context of kinesthesia. *Neurophysiol. Clin., From postural control to gait. Physiological and pathophysiological approaches* 50, 455–465. <https://doi.org/10.1016/j.neucli.2020.10.011>
- Bartsch, R., Plotnik, M., Kantelhardt, J.W., Havlin, S., Giladi, N., Hausdorff, J.M., 2007. Fluctuation and synchronization of gait intervals and gait force profiles distinguish stages of Parkinson's disease. *Phys. Stat. Mech. Its Appl.* 383, 455–465. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2007.04.120>
- Bassolino, M., Serino, A., Ubaldi, S., Làdavias, E., 2010. Everyday use of the computer mouse extends peripersonal space representation. *Neuropsychologia* 48, 803–811. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2009.11.009>

- Bell, C.A., Carver, N.S., Zbaracki, J.A., Kelty-Stephen, D.G., 2019. Non-linear Amplification of Variability Through Interaction Across Scales Supports Greater Accuracy in Manual Aiming: Evidence From a Multifractal Analysis With Comparisons to Linear Surrogates in the Fitts Task. *Front. Physiol.* 10, 998. <https://doi.org/10.3389/fphys.2019.00998>
- Bennett, D., Roudaut, A., Metalta, O., 2022. Multifractal Mice: Operationalising Dimensions of Readiness-to-hand via a Feature of Hand Movement | CHI Conference on Human Factors in Computing Systems [WWW Document]. ACM Conf. URL <https://dl.acm.org/doi/abs/10.1145/3491102.3517601> (accessed 6.15.22).
- Bhandari, N., O'Neill, E., 2020. Influence of Perspective on Dynamic Tasks in Virtual Reality, in: 2020 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR). Presented at the 2020 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR), pp. 939–948. <https://doi.org/10.1109/VR46266.2020.00114>
- Biocca, F., 1997. The Cyborg's Dilemma: Progressive Embodiment in Virtual Environments [1]. *J. Comput.-Mediat. Commun.* 3, 0–0. <https://doi.org/10.1111/j.1083-6101.1997.tb00070.x>
- Biocca, F., Levy, M.R., 1995. *Communication in the Age of Virtual Reality*. Routledge.
- Blackwell, C., Cary, K., Holst, K., Mandle, K., Dryg, L., Clemens, S., Lemke, J.H., Castro, S., Hendricks, E., Kelly, R., 2019. Dynavision Normative Data for Healthy Adults: Reaction Test Program. *Am. J. Occup. Ther.* 74, 7401185060p1. <https://doi.org/10.5014/ajot.2020.036251>
- Blanke, O., 2012. Multisensory brain mechanisms of bodily self-consciousness. *Nat. Rev. Neurosci.* 13, 556–571. <https://doi.org/10.1038/nrn3292>
- Blanke, O., Arzy, S., 2005. The Out-of-Body Experience: Disturbed Self-Processing at the Temporo-Parietal Junction. *The Neuroscientist* 11, 16–24. <https://doi.org/10.1177/1073858404270885>
- Blanke, O., Landis, T., Spinelli, L., Seeck, M., 2004. Out-of-body experience and autoscopia of neurological origin. *Brain* 127, 243–258. <https://doi.org/10.1093/brain/awh040>
- Blanke, O., Metzinger, T., 2009. Full-body illusions and minimal phenomenal selfhood. *Trends Cogn. Sci.* 13, 7–13. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2008.10.003>
- Blanke, O., Mohr, C., 2005. Out-of-body experience, heautoscopy, and autoscopic hallucination of neurological origin: Implications for neurocognitive mechanisms of corporeal awareness and self-consciousness. *Brain Res. Rev.* 50, 184–199. <https://doi.org/10.1016/j.brainresrev.2005.05.008>
- Blanke, O., Mohr, C., Michel, C.M., Pascual-Leone, A., Brugger, P., Seeck, M., Landis, T., Thut, G., 2005. Linking Out-of-Body Experience and Self Processing to Mental Own-Body Imagery at the Temporoparietal Junction. *J. Neurosci.* 25, 550–557. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2612-04.2005>
- Blanke, O., Ortigue, S., Landis, T., Seeck, M., 2002. Stimulating illusory own-body perceptions. *Nature* 419, 269–270. <https://doi.org/10.1038/419269a>

- Blanke, O., Slater, M., Serino, A., 2015. Behavioral, Neural, and Computational Principles of Bodily Self-Consciousness. *Neuron* 88, 145–166. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2015.09.029>
- Blefari, M.L., Martuzzi, R., Salomon, R., Bello-Ruiz, J., Herbelin, B., Serino, A., Blanke, O., 2017. Bilateral Rolandic operculum processing underlying heartbeat awareness reflects changes in bodily self-consciousness. *Eur. J. Neurosci.* 45, 1300–1312. <https://doi.org/10.1111/ejn.13567>
- Bottini, G., Karnath, H.-O., Vallar, G., Sterzi, R., Frith, C.D., Frackowiak, R.S.J., Paulesu, E., 2001. Cerebral representations for egocentric space: Functional–anatomical evidence from caloric vestibular stimulation and neck vibration. *Brain* 124, 1182–1196. <https://doi.org/10.1093/brain/124.6.1182>
- Botvinick, M., Cohen, J., 1998. Rubber hands ‘feel’ touch that eyes see. *Nature* 391, 756–756. <https://doi.org/10.1038/35784>
- Bouchard, S., St-Jacques, J., Renaud, P., Wiederhold, B.K., 2009. Side effects of immersions in virtual reality for people suffering from anxiety disorders. *J. CyberTherapy Rehabil.* 2, 127–138.
- Bradley, M.M., Codispoti, M., Cuthbert, B.N., Lang, P.J., 2001. Emotion and motivation I: Defensive and appetitive reactions in picture processing. *Emotion* 1, 276–298. <https://doi.org/10.1037/1528-3542.1.3.276>
- Braun, N., Thorne, J.D., Hildebrandt, H., Debener, S., 2014. Interplay of Agency and Ownership: The Intentional Binding and Rubber Hand Illusion Paradigm Combined. *PLOS ONE* 9, e111967. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0111967>
- Brener, J., Kluitse, C., 1988. Heartbeat Detection: Judgments of the Simultaneity of External Stimuli and Heartbeats. *Psychophysiology* 25, 554–561. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.1988.tb01891.x>
- Brener, J., Liu, X., Ring, C., 1993. A method of constant stimuli for examining heartbeat detection: Comparison with the Brener-Kluitse and Whitehead methods. *Psychophysiology* 30, 657–665. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.1993.tb02091.x>
- Brener, J., Ring, C., 2016. Towards a psychophysics of interoceptive processes: the measurement of heartbeat detection. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* 371, 20160015. <https://doi.org/10.1098/rstb.2016.0015>
- Burin, D., Cavanna, G., Rabellino, D., Kotozaki, Y., Kawashima, R., 2022. Neuroendocrine Response and State Anxiety Due to Psychosocial Stress Decrease after a Training with Subject’s Own (but Not Another) Virtual Body: An RCT Study. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 19, 6340. <https://doi.org/10.3390/ijerph19106340>
- Burin, D., Kilteni, K., Rabuffetti, M., Slater, M., Pia, L., 2019. Body ownership increases the interference between observed and executed movements. *PLOS ONE* 14, e0209899. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0209899>

- Burris, K., Vittetoe, K., Ramger, B., Suresh, S., Tokdar, S.T., Reiter, J.P., Appelbaum, L.G., 2018. Sensorimotor abilities predict on-field performance in professional baseball. *Sci. Rep.* 8, 116. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-18565-7>
- Cardinali, L., Zanini, A., Yanofsky, R., Roy, A.C., de Vignemont, F., Culham, J.C., Farnè, A., 2021. The toolish hand illusion: embodiment of a tool based on similarity with the hand. *Sci. Rep.* 11, 2024. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-81706-6>
- Cardini, F., Fatemi-Ghomi, N., Gajewska-Knapik, K., Gooch, V., Aspell, J.E., 2019. Enlarged representation of peripersonal space in pregnancy. *Sci. Rep.* 9, 8606. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-45224-w>
- Carey, M., Crucianelli, L., Preston, C., Fotopoulou, A., 2019. The Effect of Visual Capture Towards Subjective Embodiment Within the Full Body Illusion. *Sci. Rep.* 9, 2889. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-39168-4>
- Carment, L., Khoury, E., Dupin, L., Guedj, L., Bendjemaa, N., Cuenca, M., Maier, M.A., Krebs, M.-O., Lindberg, P.G., Amado, I., 2020. Common vs. Distinct Visuomotor Control Deficits in Autism Spectrum Disorder and Schizophrenia. *Autism Res. Off. J. Int. Soc. Autism Res.* <https://doi.org/10.1002/aur.2287>
- Carver, N.S., Bojovic, D., Kelty-Stephen, D.G., 2017. Multifractal foundations of visually-guided aiming and adaptation to prismatic perturbation. *Hum. Mov. Sci.* 55, 61–72. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2017.07.005>
- Caserman, P., Garcia-Agundez, A., Göbel, S., 2020. A Survey of Full-Body Motion Reconstruction in Immersive Virtual Reality Applications. *IEEE Trans. Vis. Comput. Graph.* 26, 3089–3108. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2019.2912607>
- Castiglioni, P., Lazzeroni, D., Coruzzi, P., Faini, A., 2018. Multifractal-Multiscale Analysis of Cardiovascular Signals: A DFA-Based Characterization of Blood Pressure and Heart-Rate Complexity by Gender. *Complexity* 2018, e4801924. <https://doi.org/10.1155/2018/4801924>
- Chander, H., Kodithuwakku Arachchige, S.N.K., Hill, C.M., Turner, A.J., Deb, S., Shojaei, A., Hudson, C., Knight, A.C., Carruth, D.W., 2019. Virtual-Reality-Induced Visual Perturbations Impact Postural Control System Behavior. *Behav. Sci.* 9, 113. <https://doi.org/10.3390/bs9110113>
- Chang, F., Luo, M., Walton, G., Aguilar, L., Bailenson, J., 2019. Stereotype Threat in Virtual Learning Environments: Effects of Avatar Gender and Sexist Behavior on Women’s Math Learning Outcomes. *Cyberpsychology Behav. Soc. Netw.* 22, 634–640. <https://doi.org/10.1089/cyber.2019.0106>
- Chén, O.Y., Cao, H., Reinen, J.M., Qian, T., Gou, J., Phan, H., De Vos, M., Cannon, T.D., 2019. Resting-state brain information flow predicts cognitive flexibility in humans. *Sci. Rep.* 9, 3879. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-40345-8>
- Chhabra, A., Jensen, R.V., 1989. Direct determination of the $f(\alpha)$ singularity spectrum. *Phys. Rev. Lett.* 62, 1327–1330. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.62.1327>

- Chopin, A., Bediou, B., Bavelier, D., 2019. Altering perception: the case of action video gaming. *Curr. Opin. Psychol.* 29, 168–173. <https://doi.org/10.1016/j.copsyc.2019.03.004>
- Clark, J.F., Ellis, J.K., Bench, J., Khoury, J., Graman, P., 2012. High-Performance Vision Training Improves Batting Statistics for University of Cincinnati Baseball Players. *PLoS ONE* 7, e29109. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0029109>
- Clark, J.F., Ellis, J.K., Burns, T.M., Childress, J.M., Divine, J.G., 2017. Analysis of Central and Peripheral Vision Reaction Times in Patients With Postconcussion Visual Dysfunction: *Clin. J. Sport Med.* 27, 457–461. <https://doi.org/10.1097/JSM.0000000000000381>
- Cohen, J.D., Barch, D.M., Carter, C., Servan-Schreiber, D., 1999. Context-processing deficits in schizophrenia: Converging evidence from three theoretically motivated cognitive tasks. *J. Abnorm. Psychol.* 108, 120–133. <https://doi.org/10.1037/0021-843X.108.1.120>
- Cohen, M.S., 2008. Handedness Questionnaire.
- Collins, J.J., Richmond, S.A., 1994. Hard-wired central pattern generators for quadrupedal locomotion. *Biol. Cybern.* 71, 375–385. <https://doi.org/10.1007/BF00198915>
- Costa, M., Goldberger, A.L., Peng, C.-K., 2005. Multiscale entropy analysis of biological signals. *Phys. Rev. E* 71, 021906. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.71.021906>
- Costa, M., Goldberger, A.L., Peng, C.-K., 2002. Multiscale Entropy Analysis of Complex Physiologic Time Series. *Phys. Rev. Lett.* 89, 068102. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.89.068102>
- Costa, M., Peng, C.-K., L. Goldberger, A., Hausdorff, J.M., 2003. Multiscale entropy analysis of human gait dynamics. *Phys. Stat. Mech. Its Appl., RANDOMNESS AND COMPLEXITY: Proceedings of the International Workshop in honor of Shlomo Havlin's 60th birthday* 330, 53–60. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2003.08.022>
- Covaci, A., Olivier, A.-H., Multon, F., 2014. Third person view and guidance for more natural motor behaviour in immersive basketball playing, in: *Proceedings of the 20th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology, VRST '14*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, pp. 55–64. <https://doi.org/10.1145/2671015.2671023>
- Crotty, M., George, S., 2009. Retraining Visual Processing Skills To Improve Driving Ability After Stroke. *Arch. Phys. Med. Rehabil.* 90, 2096–2102. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2009.08.143>
- Curcio, C.A., Allen, K.A., 1990. Topography of ganglion cells in human retina. *J. Comp. Neurol.* 300, 5–25. <https://doi.org/10.1002/cne.903000103>
- Danckert, J., Goodale, M.A., 2001. Superior performance for visually guided pointing in the lower visual field. *Exp. Brain Res.* 137, 303–308. <https://doi.org/10.1007/s002210000653>

- de la Fuente, A., Sedeño, L., Vignaga, S.S., Ellmann, C., Sonzogni, S., Belluscio, L., García-Cordero, I., Castagnaro, E., Boano, M., Cetkovich, M., Torralva, T., Cánepa, E.T., Tagliazucchi, E., Garcia, A.M., Ibañez, A., 2019. Multimodal neurocognitive markers of interoceptive tuning in smoked cocaine. *Neuropsychopharmacology* 44, 1425–1434. <https://doi.org/10.1038/s41386-019-0370-3>
- De Leo, G., Diggs, L.A., Radici, E., Mastaglio, T.W., 2014. Measuring Sense of Presence and User Characteristics to Predict Effective Training in an Online Simulated Virtual Environment. *Simul. Healthc.* 9, 1–6. <https://doi.org/10.1097/SIH.0b013e3182a99dd9>
- de Vignemont, F., 2011. Embodiment, ownership and disownership. *Conscious. Cogn., Brain and Self: Bridging the Gap* 20, 82–93. <https://doi.org/10.1016/j.concog.2010.09.004>
- Debarba, H.G., Bovet, S., Salomon, R., Blanke, O., Herbelin, B., Boulic, R., 2017. Characterizing first and third person viewpoints and their alternation for embodied interaction in virtual reality. *PLOS ONE* 12, e0190109. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0190109>
- Debarba, H.G., Molla, E., Herbelin, B., Boulic, R., 2015. Characterizing embodied interaction in First and Third Person Perspective viewpoints, in: 2015 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI). Presented at the 2015 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI), pp. 67–72. <https://doi.org/10.1109/3DUI.2015.7131728>
- Delignières, D., Almurad, Z.M.H., Roume, C., Marmelat, V., 2016. Multifractal signatures of complexity matching. *Exp. Brain Res.* 234, 2773–2785. <https://doi.org/10.1007/s00221-016-4679-4>
- Delignières, D., Marmelat, V., 2013. Degeneracy and long-range correlations. *Chaos Interdiscip. J. Nonlinear Sci.* 23, 043109. <https://doi.org/10.1063/1.4825250>
- Delignieres, D., Marmelat, V., 2012. Fractal fluctuations and complexity: current debates and future challenges. *Crit. Rev. Biomed. Eng.* 40, 485–500. <https://doi.org/10.1615/critrevbiomedeng.2013006727>
- Deroualle, D., Borel, L., Devèze, A., Lopez, C., 2015. Changing perspective: The role of vestibular signals. *Neuropsychologia, Special Issue: Sensory Motor Integration* 79, 175–185. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2015.08.022>
- Desmedt, O., Luminet, O., Corneille, O., 2018. The heartbeat counting task largely involves non-interoceptive processes: Evidence from both the original and an adapted counting task. *Biol. Psychol.* 138, 185–188. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2018.09.004>
- di Pellegrino, G., Làdavas, E., 2015. Peripersonal space in the brain. *Neuropsychologia* 66, 126–133. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2014.11.011>
- Dichgans, J., Held, R., Young, L.R., Brandt, T., 1972. Moving Visual Scenes Influence the Apparent Direction of Gravity. *Science* 178, 1217–1219. <https://doi.org/10.1126/science.178.4066.1217>

- Diniz, A., Wijnants, M.L., Torre, K., Barreiros, J., Crato, N., Bosman, A.M.T., Hasselman, F., Cox, R.F.A., Van Orden, G.C., Delignières, D., 2011. Contemporary theories of 1/f noise in motor control. *Hum. Mov. Sci.* 30, 889–905. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2010.07.006>
- Dixon, J.A., Holden, J.G., Mirman, D., Stephen, D.G., 2012. Multifractal Dynamics in the Emergence of Cognitive Structure. *Top. Cogn. Sci.* 4, 51–62. <https://doi.org/10.1111/j.1756-8765.2011.01162.x>
- Dobricki, M., Rosa, S. de la, 2013. The Structure of Conscious Bodily Self-Perception during Full-Body Illusions. *PLOS ONE* 8, e83840. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0083840>
- Dotov, D., Nie, L., Wojcik, K., Jinks, A., Yu, X., Chemero, A., 2017. Cognitive and movement measures reflect the transition to presence-at-hand. *New Ideas Psychol.* 45, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.newideapsych.2017.01.001>
- Dotov, D.G., 2014. Putting reins on the brain. How the body and environment use it. *Front. Hum. Neurosci.* 8.
- Dotov, D.G., Nie, L., Chemero, A., 2010. A Demonstration of the Transition from Ready-to-Hand to Unready-to-Hand. *PLOS ONE* 5, e9433. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0009433>
- Duarte, M., 2015. Comments on “Ellipse area calculations and their applicability in posturography” (Schubert and Kirchner, vol.39, pages 518-522, 2014). *Gait Posture* 41, 44–45. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2014.08.008>
- Dutta, S., Ghosh, D., Chatterjee, S., 2013. Multifractal detrended fluctuation analysis of human gait diseases. *Front. Physiol.* 4.
- Ehrsson, H.H., 2007. The Experimental Induction of Out-of-Body Experiences. *Science* 317, 1048–1048. <https://doi.org/10.1126/science.1142175>
- Elsenbast, C., 2022. The use of the Simulator Sickness Questionnaire in high immersive Virtual Reality -A validation study in educational practice. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.17156.60802>
- Falconer, C.J., Mast, F.W., 2012. Balancing the mind: vestibular induced facilitation of egocentric mental transformations. *Exp. Psychol.* 59, 332–339. <https://doi.org/10.1027/1618-3169/a000161>
- Fantin, L., Ceyte, G., Maïni, E., Hossu, G., Ceyte, H., 2022. Do individual constraints induce flexibility of visual field dependence following a virtual immersion? Effects of perceptive style and cybersickness. *Virtual Real.* <https://doi.org/10.1007/s10055-022-00703-w>
- Farnè, A., Làdavas, E., 2000. Dynamic size-change of hand peripersonal space following tool use. *NeuroReport* 11, 1645–1649.
- Feder, J., 2013. *Fractals*. Springer Science & Business Media.
- Feldhacker, D., Molitor, W., Athmann, A., Boell, M., Kaiser, A., Musch, A., Willhite, L., 2019. Efficacy of High-performance Vision Training on Improving the Reaction Time of Collegiate Softball Athletes: A Randomized Trial. *J. Sports Med. Allied Health Sci. Off. J. Ohio Athl. Train. Assoc.* 4. <https://doi.org/10.25035/jsmahs.04.03.06>

- Felnhofer, A., Kothgassner, O., Beutl, L., Hlavacs, H., Kryspin-Exner, I., 2012. Is Virtual Reality made for Men only? Exploring Gender Differences in the Sense of Presence. Presented at the International Society for Presence Research Annual Conference – ISPR 2012, Philadelphia, Pennsylvania, USA.
- Feng, J., Spence, I., Pratt, J., 2007. Playing an Action Video Game Reduces Gender Differences in Spatial Cognition. *Psychol. Sci.* 18, 850–855. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.2007.01990.x>
- Ferreira dos Santos, L., Christ, O., Mate, K., Schmidt, H., Krüger, J., Dohle, C., 2016. Movement visualisation in virtual reality rehabilitation of the lower limb: a systematic review. *Biomed. Eng. OnLine* 15, 144. <https://doi.org/10.1186/s12938-016-0289-4>
- Fittipaldi, S., Abrevaya, S., Fuente, A. de la, Pascariello, G.O., Hesse, E., Birba, A., Salamone, P., Hildebrandt, M., Martí, S.A., Pautassi, R.M., Huepe, D., Martorell, M.M., Yoris, A., Roca, M., García, A.M., Sedeño, L., Ibáñez, A., 2020. A multidimensional and multi-feature framework for cardiac interoception. *NeuroImage* 212, 116677. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2020.116677>
- Formenti, D., Duca, M., Trecroci, A., Ansaldi, L., Bonfanti, L., Alberti, G., Iodice, P., 2019. Perceptual vision training in non-sport-specific context: effect on performance skills and cognition in young females. *Sci. Rep.* 9, 18671. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-55252-1>
- Freeman, D., Evans, N., Lister, R., Antley, A., Dunn, G., Slater, M., 2014. Height, social comparison, and paranoia: An immersive virtual reality experimental study. *Psychiatry Res.* 218, 348–352. <https://doi.org/10.1016/j.psychres.2013.12.014>
- Furlanetto, T., Bertone, C., Becchio, C., 2013. The bilocated mind: new perspectives on self-localization and self-identification. *Front. Hum. Neurosci.* 7.
- Garau, M., Slater, M., Vinayagamoorthy, V., Brogni, A., Steed, A., Sasse, M.A., 2003. The impact of avatar realism and eye gaze control on perceived quality of communication in a shared immersive virtual environment, in: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '03*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, pp. 529–536. <https://doi.org/10.1145/642611.642703>
- Garfinkel, S.N., Critchley, H.D., 2013. Interoception, emotion and brain: new insights link internal physiology to social behaviour. Commentary on: “Anterior insular cortex mediates bodily sensibility and social anxiety” by Terasawa et al. (2012). *Soc. Cogn. Affect. Neurosci.* 8, 231–234. <https://doi.org/10.1093/scan/nss140>
- Garfinkel, S.N., Seth, A.K., Barrett, A.B., Suzuki, K., Critchley, H.D., 2015. Knowing your own heart: Distinguishing interoceptive accuracy from interoceptive awareness. *Biol. Psychol.* 104, 65–74. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2014.11.004>
- Gibson, J.J., 2014. *The ecological approach to visual perception: classic edition*. Psychology press.

- Gibson, J.J., Carmichael, L., 1966. *The senses considered as perceptual systems*. Boston : Houghton Mifflin.
- Golomer, E., Dupui, Ph., Bessou, P., 1994. Spectral frequency analysis of dynamic balance in healthy and injured athletes. *Arch. Int. Physiol. Biochim. Biophys.* 102, 225–229. <https://doi.org/10.3109/13813459409007543>
- Gonzalez-Franco, M., Peck, T.C., 2018. Avatar Embodiment. Towards a Standardized Questionnaire. *Front. Robot. AI* 5.
- Gonzalez-Franco, M., Steed, A., Hoogendyk, S., Ofek, E., 2020. Using Facial Animation to Increase the Enfacement Illusion and Avatar Self-Identification. *IEEE Trans. Vis. Comput. Graph.* 26, 2023–2029. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2020.2973075>
- Gorisse, G., Christmann, O., Amato, E.A., Richir, S., 2017. First- and Third-Person Perspectives in Immersive Virtual Environments: Presence and Performance Analysis of Embodied Users. *Front. Robot. AI* 4.
- Gorisse, G., Christmann, O., Houzangbe, S., Richir, S., 2019. From Robot to Virtual Doppelganger: Impact of Visual Fidelity of Avatars Controlled in Third-Person Perspective on Embodiment and Behavior in Immersive Virtual Environments. *Front. Robot. AI* 6.
- Granger, C.W.J., Joyeux, R., 1980. An Introduction to Long-Memory Time Series Models and Fractional Differencing. *J. Time Ser. Anal.* 1, 15–29. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9892.1980.tb00297.x>
- Grech, D., Pamuła, G., 2012. Multifractal Background Noise of Monofractal Signals. *Acta Phys. Pol. A* 2B, B-34-B-39. <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.121.B-34>
- Green, C.S., Bavelier, D., 2007. Action-Video-Game Experience Alters the Spatial Resolution of Vision. *Psychol. Sci.* 18, 88–94. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.2007.01853.x>
- Green, C.S., Bavelier, D., 2003. Action video game modifies visual selective attention. *Nature* 423, 534–537. <https://doi.org/10.1038/nature01647>
- Grivaz, P., Blanke, O., Serino, A., 2017a. Common and distinct brain regions processing multisensory bodily signals for peripersonal space and body ownership. *NeuroImage* 147, 602–618. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2016.12.052>
- Grivaz, P., Blanke, O., Serino, A., 2017b. Common and distinct brain regions processing multisensory bodily signals for peripersonal space and body ownership. *NeuroImage* 147, 602–618. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2016.12.052>
- Guerraz, M., Poquin, D., Ohlmann, T., 1998. The role of head-centric spatial reference with a static and kinetic visual disturbance. *Percept. Psychophys.* 60, 287–295. <https://doi.org/10.3758/BF03206037>
- Gutiérrez-Maldonado, J., Wiederhold, B.K., Riva, G., 2016. Future Directions: How Virtual Reality Can Further Improve the Assessment and Treatment of Eating Disorders and Obesity. *Cyberpsychology Behav. Soc. Netw.* 19, 148–153. <https://doi.org/10.1089/cyber.2015.0412>

- Haar, S., Sundar, G., Faisal, A.A., 2021. Embodied virtual reality for the study of real-world motor learning. *PLOS ONE* 16, e0245717. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0245717>
- Hasler, B.S., Spanlang, B., Slater, M., 2017. Virtual race transformation reverses racial in-group bias. *PLOS ONE* 12, e0174965. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0174965>
- Hausdorff, J.M., 2009. Gait dynamics in Parkinson's disease: Common and distinct behavior among stride length, gait variability, and fractal-like scaling. *Chaos Interdiscip. J. Nonlinear Sci.* 19, 026113. <https://doi.org/10.1063/1.3147408>
- Hausdorff, J.M., 2007. Gait dynamics, fractals and falls: Finding meaning in the stride-to-stride fluctuations of human walking. *Hum. Mov. Sci., European Workshop on Movement Science* 26, 555–589. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2007.05.003>
- Hausdorff, J.M., Mitchell, S.L., Firtion, R., Peng, C.K., Cudkowicz, M.E., Wei, J.Y., Goldberger, A.L., 1997. Altered fractal dynamics of gait: reduced stride-interval correlations with aging and Huntington's disease. *J. Appl. Physiol.* 82, 262–269. <https://doi.org/10.1152/jappl.1997.82.1.262>
- Hausdorff, J.M., Peng, C.K., Ladin, Z., Wei, J.Y., Goldberger, A.L., 1995. Is walking a random walk? Evidence for long-range correlations in stride interval of human gait. *J. Appl. Physiol.* 78, 349–358. <https://doi.org/10.1152/jappl.1995.78.1.349>
- Hecht, D., Reiner, M., 2007. Field Dependency and the Sense of Object-Presence in Haptic Virtual Environments. *Cyberpsychol. Behav.* 10, 243–251. <https://doi.org/10.1089/cpb.2006.9962>
- Heidegger, M., 1962. Being and time.
- Herbelin, B., Salomon, R., Serino, A., Blanke, O. (Eds.), 2016. Neural Mechanisms of Bodily Self-Consciousness and the Experience of Presence in Virtual Reality. *Hum. Comput. Conflu., De Gruyter Online.* <https://doi.org/10.1515/9783110471137-005>
- Herbert, B.M., Pollatos, O., Flor, H., Enck, P., Schandry, R., 2010. Cardiac awareness and autonomic cardiac reactivity during emotional picture viewing and mental stress. *Psychophysiology* 47, 342–354. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.2009.00931.x>
- Heydrich, L., Walker, F., Blättler, L., Herbelin, B., Blanke, O., Aspell, J.E., 2021. Interoception and Empathy Impact Perspective Taking. *Front. Psychol.* 11.
- Ho, K.K.L., Moody, G.B., Peng, C.-K., Mietus, J.E., Larson, M.G., Levy, D., Goldberger, A.L., 1997. Predicting Survival in Heart Failure Case and Control Subjects by Use of Fully Automated Methods for Deriving Nonlinear and Conventional Indices of Heart Rate Dynamics. *Circulation* 96, 842–848. <https://doi.org/10.1161/01.CIR.96.3.842>
- Hoang, T.N., Reinoso, M., Vetere, F., Tanin, E., 2016. Onebody: Remote Posture Guidance System Using First Person View in Virtual Environment, in: *Proceedings of the 9th Nordic Conference on Human-Computer Interaction*,

- NordiCHI '16. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. <https://doi.org/10.1145/2971485.2971521>
- Holden, J.G., Van Orden, G.C., Turvey, M.T., 2009. Dispersion of response times reveals cognitive dynamics. *Psychol. Rev.* 116, 318–342. <https://doi.org/10.1037/a0014849>
- Hülsdünker, T., Strüder, H.K., Mierau, A., 2016. Neural Correlates of Expert Visuomotor Performance in Badminton Players. *Med. Sci. Sports Exerc.* 48, 2125–2134. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000001010>
- Ihlen, E.A.F., Vereijken, B., 2013a. Multifractal formalisms of human behavior. *Hum. Mov. Sci.* 32, 633–651. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2013.01.008>
- Ihlen, E.A.F., Vereijken, B., 2013b. Multifractal formalisms of human behavior. *Hum. Mov. Sci.* 32, 633–651. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2013.01.008>
- Ihlen, E.A.F., Vereijken, B., 2010. Interaction-dominant dynamics in human cognition: Beyond $1/f\alpha$ fluctuation. *J. Exp. Psychol. Gen.* 139, 436–463. <https://doi.org/10.1037/a0019098>
- Ingber, D.E., 2006. Cellular mechanotransduction: putting all the pieces together again. *FASEB J.* 20, 811–827. <https://doi.org/10.1096/fj.05-5424rev>
- Ionta, S., Heydrich, L., Lenggenhager, B., Mouthon, M., Fornari, E., Chapuis, D., Gassert, R., Blanke, O., 2011. Multisensory Mechanisms in Temporo-Parietal Cortex Support Self-Location and First-Person Perspective. *Neuron* 70, 363–374. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2011.03.009>
- Ivanov, P.C., Amaral, L.A.N., Goldberger, A.L., Havlin, S., Rosenblum, M.G., Struzik, Z.R., Stanley, H.E., 1999. Multifractality in human heartbeat dynamics. *Nature* 399, 461–465. <https://doi.org/10.1038/20924>
- Jeunet, C., Albert, L., Argelaguet, F., Lécuyer, A., 2018. “Do You Feel in Control?": Towards Novel Approaches to Characterise, Manipulate and Measure the Sense of Agency in Virtual Environments. *IEEE Trans. Vis. Comput. Graph.* 24, 1486–1495. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2018.2794598>
- Just, M., Stirling, D., Ros, M., Naghdy, F., Stapley, P., 2016. A comparison of upper limb movement profiles when reaching to virtual and real targets using the Oculus Rift: Implications for virtual-reality enhanced stroke rehabilitation. *Fac. Eng. Inf. Sci. - Pap. Part A* 277–281.
- Kantelhardt, J.W., Zschiegner, S.A., Koscielny-Bunde, E., Havlin, S., Bunde, A., Stanley, H.E., 2002. Multifractal detrended fluctuation analysis of nonstationary time series. *Phys. Stat. Mech. Its Appl.* 316, 87–114. [https://doi.org/10.1016/S0378-4371\(02\)01383-3](https://doi.org/10.1016/S0378-4371(02)01383-3)
- Keenaghan, S., Bowles, L., Crawford, G., Thurlbeck, S., Kentridge, R.W., Cowie, D., 2020. My body until proven otherwise: Exploring the time course of the full body illusion. *Conscious. Cogn.* 78, 102882. <https://doi.org/10.1016/j.concog.2020.102882>
- 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, e0163921. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0163921>

- Kello, C.T., Beltz, B.C., Holden, J.G., Van Orden, G.C., 2007. The emergent coordination of cognitive function. *J. Exp. Psychol. Gen.* 136, 551–568. <https://doi.org/10.1037/0096-3445.136.4.551>
- Kelty-Stephen, D., Lane, E., Bloomfield, L., Mangalam, M., 2022. Multifractal test for nonlinearity of interactions across scales in time series. <https://doi.org/10.31219/osf.io/ntcg4>
- Kelty-Stephen, D.G., 2018. Multifractal evidence of nonlinear interactions stabilizing posture for phasmids in windy conditions: A reanalysis of insect postural-sway data. *PLOS ONE* 13, e0202367. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0202367>
- Kelty-Stephen, D.G., Furmanek, M.P., Mangalam, M., 2021a. Multifractality distinguishes reactive from proactive cascades in postural control. *Chaos Solitons Fractals* 142, 110471. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2020.110471>
- Kelty-Stephen, D.G., Lee, I.C., Carver, N.S., Newell, K.M., Mangalam, M., 2021b. Multifractal roots of suprapostural dexterity. *Hum. Mov. Sci.* 76, 102771. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2021.102771>
- Kelty-Stephen, D.G., Palatinus, K., Saltzman, E., Dixon, J.A., 2013. A Tutorial on Multifractality, Cascades, and Interactivity for Empirical Time Series in Ecological Science. *Ecol. Psychol.* 25, 1–62. <https://doi.org/10.1080/10407413.2013.753804>
- Kennedy, R.S., 1975. Motion sickness questionnaire and field independence scores as predictors of success in naval aviation training. *Aviat. Space Environ. Med.* 46, 1349–1352.
- Kennedy, R.S., Lane, N.E., Berbaum, K.S., Lilienthal, M.G., 1993. Simulator Sickness Questionnaire: An Enhanced Method for Quantifying Simulator Sickness. *Int. J. Aviat. Psychol.* 3, 203–220. https://doi.org/10.1207/s15327108ijap0303_3
- Kessler, K., Rutherford, H., 2010. The Two Forms of Visuo-Spatial Perspective Taking are Differently Embodied and Subserve Different Spatial Prepositions. *Front. Psychol.* 1.
- Khan, M.A., Lawrence, G.P., 2005. Differences in visuomotor control between the upper and lower visual fields. *Exp. Brain Res.* 164, 395–398. <https://doi.org/10.1007/s00221-005-2325-7>
- Kilteni, K., Groten, R., Slater, M., 2012. The Sense of Embodiment in Virtual Reality. *Presence Teleoperators Virtual Environ.* 21, 373–387. https://doi.org/10.1162/PRES_a_00124
- Kim, G., Biocca, F., 2018. Immersion in Virtual Reality Can Increase Exercise Motivation and Physical Performance, in: Chen, J.Y.C., Fragomeni, G. (Eds.), *Virtual, Augmented and Mixed Reality: Applications in Health, Cultural Heritage, and Industry*, Lecture Notes in Computer Science. Springer International Publishing, Cham, pp. 94–102. https://doi.org/10.1007/978-3-319-91584-5_8
- Kim, H.K., Park, J., Choi, Y., Choe, M., 2018. Virtual reality sickness questionnaire (VRSQ): Motion sickness measurement index in a virtual reality environment. *Appl. Ergon.* 69, 66–73. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2017.12.016>

- Kim, J., Park, T., 2020. The Onset Threshold of Cybersickness in Constant and Accelerating Optical Flow. *Appl. Sci.* 10, 7808. <https://doi.org/10.3390/app10217808>
- Kindermann, N.K., Werner, N.S., 2014. The impact of cardiac perception on emotion experience and cognitive performance under mental stress. *J. Behav. Med.* 37, 1145–1154. <https://doi.org/10.1007/s10865-014-9564-7>
- Kirby, K.M., Pillai, S.R., Carmichael, O.T., Van Gemmert, A.W.A., 2019. Brain functional differences in visuo-motor task adaptation between dominant and non-dominant hand training. *Exp. Brain Res.* 237, 3109–3121. <https://doi.org/10.1007/s00221-019-05653-5>
- Klavora, P., Esposito, J.G., 2002. Sex differences in performance on three novel continuous response tasks. *Percept. Mot. Skills* 95, 49–56. <https://doi.org/10.2466/pms.2002.95.1.49>
- Klavora, P., Gaskovski, P., Forsyth, R., 1994. Test-Retest Reliability of the Dynavision Apparatus. *Percept. Mot. Skills* 79, 448–450. <https://doi.org/10.2466/pms.1994.79.1.448>
- Klavora, P., Gaskovski, P., Forsyth, R.D., 1995a. Test-retest reliability of three Dynavision tasks. *Percept. Mot. Skills* 80, 607–610. <https://doi.org/10.2466/pms.1995.80.2.607>
- Klavora, P., Gaskovski, P., Martin, K., Forsyth, R.D., Heslegrave, R.J., Young, M., Quinn, R.P., 1995b. The effects of Dynavision rehabilitation on behind-the-wheel driving ability and selected psychomotor abilities of persons after stroke. *Am. J. Occup. Ther. Off. Publ. Am. Occup. Ther. Assoc.* 49, 534–542. <https://doi.org/10.5014/ajot.49.6.534>
- Klavora, P., Heslegrave, R.J., Young, M., 2000. Driving skills in elderly persons with stroke: Comparison of two new assessment options. *Arch. Phys. Med. Rehabil.* 81, 701–705. <https://doi.org/10.1053/apmr.2000.6285>
- Klavora, P., Warren, M., 1998. Rehabilitation of Visuomotor Skills in Poststroke Patients Using the Dynavision Apparatus. *Percept. Mot. Skills* 86, 23–30. <https://doi.org/10.2466/pms.1998.86.1.23>
- Kobayashi, M., Musha, T., 1982. 1/f Fluctuation of Heartbeat Period. *IEEE Trans. Biomed. Eng.* BME-29, 456–457. <https://doi.org/10.1109/TBME.1982.324972>
- Kokkinara, E., Kiltani, 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. *Sci. Rep.* 6, 28879. <https://doi.org/10.1038/srep28879>
- Koo, T.K., Li, M.Y., 2016. A Guideline of Selecting and Reporting Intraclass Correlation Coefficients for Reliability Research. *J. Chiropr. Med.* 15, 155–163. <https://doi.org/10.1016/j.jcm.2016.02.012>
- Kottner, J., Audige, L., Brorson, S., Donner, A., Gajewski, B.J., Hróbjartsson, A., Roberts, C., Shoukri, M., Streiner, D.L., 2011. Guidelines for Reporting Reliability and Agreement Studies (GRRAS) were proposed. *Int. J. Nurs. Stud.* 48, 661–671. <https://doi.org/10.1016/j.ijnurstu.2011.01.016>

- Kreimeier, J., Hammer, S., Friedmann, D., Karg, P., Bühner, C., Bankel, L., Götzelmann, T., 2019. Evaluation of different types of haptic feedback influencing the task-based presence and performance in virtual reality, in: Proceedings of the 12th ACM International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments, PETRA '19. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, pp. 289–298. <https://doi.org/10.1145/3316782.3321536>
- Krigolson, O., Heath, M., 2006. A lower visual field advantage for endpoint stability but no advantage for online movement precision. *Exp. Brain Res.* 170, 127–135. <https://doi.org/10.1007/s00221-006-0386-x>
- Làdavias, E., 2002. Functional and dynamic properties of visual peripersonal space. *Trends Cogn. Sci.* 6, 17–22. [https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(00\)01814-3](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(00)01814-3)
- Lamoth, C.J., van Deudekom, F.J., van Campen, J.P., Appels, B.A., de Vries, O.J., Pijnappels, M., 2011. Gait stability and variability measures show effects of impaired cognition and dual tasking in frail people. *J. NeuroEngineering Rehabil.* 8, 2. <https://doi.org/10.1186/1743-0003-8-2>
- Latoschik, M.E., Roth, D., Gall, D., Achenbach, J., Waltemate, T., Botsch, M., 2017. The effect of avatar realism in immersive social virtual realities, in: Proceedings of the 23rd ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology, VRST '17. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, pp. 1–10. <https://doi.org/10.1145/3139131.3139156>
- Lee, D.N., Aronson, E., 1974. Visual proprioceptive control of standing in human infants. *Percept. Psychophys.* 15, 529–532. <https://doi.org/10.3758/BF03199297>
- Lee, J.-E.R., Nass, C.I., Bailenson, J.N., 2014. Does the Mask Govern the Mind?: Effects of Arbitrary Gender Representation on Quantitative Task Performance in Avatar-Represented Virtual Groups. *Cyberpsychology Behav. Soc. Netw.* 17, 248–254. <https://doi.org/10.1089/cyber.2013.0358>
- Lenggenhager, B., Lopez, C., Blanke, O., 2008. Influence of galvanic vestibular stimulation on egocentric and object-based mental transformations. *Exp. Brain Res.* 184, 211–221. <https://doi.org/10.1007/s00221-007-1095-9>
- Lenggenhager, B., Mouthon, M., Blanke, O., 2009. Spatial aspects of bodily self-consciousness. *Conscious. Cogn.* 18, 110–117. <https://doi.org/10.1016/j.concog.2008.11.003>
- Lenggenhager, B., Tadi, T., Metzinger, T., Blanke, O., 2007. Video Ergo Sum: Manipulating Bodily Self-Consciousness. *Science* 317, 1096–1099. <https://doi.org/10.1126/science.1143439>
- Likens, A.D., Allen, L.K., McNamara, D.S., 2017. Keystroke Dynamics Predict Essay Quality., in: *CogSci*.
- Lipsitz, L.A., Goldberger, A.L., 1992. Loss of “Complexity” and Aging: Potential Applications of Fractals and Chaos Theory to Senescence. *JAMA* 267, 1806–1809. <https://doi.org/10.1001/jama.1992.03480130122036>

- Lloyd, D.M., 2007. Spatial limits on referred touch to an alien limb may reflect boundaries of visuo-tactile peripersonal space surrounding the hand. *Brain Cogn.* 64, 104–109. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2006.09.013>
- Lochhead, I., Hedley, N., Çöltekin, A., Fisher, B., 2022. The Immersive Mental Rotations Test: Evaluating Spatial Ability in Virtual Reality. *Front. Virtual Real.* 3.
- Longo, M.R., Schüür, F., Kammers, M.P.M., Tsakiris, M., Haggard, P., 2008. What is embodiment? A psychometric approach. *Cognition* 107, 978–998. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2007.12.004>
- Lopez, C., Halje, P., Blanke, O., 2008. Body ownership and embodiment: Vestibular and multisensory mechanisms. *Neurophysiol. Clin. Neurophysiol.* 38, 149–161. <https://doi.org/10.1016/j.neucli.2007.12.006>
- Luckett, E., 2018. A Quantitative Evaluation of the HTC Vive for Virtual Reality Research (undergraduate). The University of Mississippi.
- Lugrin, J.-L., Latt, J., Latoschik, M.E., 2015. Avatar anthropomorphism and illusion of body ownership in VR, in: 2015 IEEE Virtual Reality (VR). Presented at the 2015 IEEE Virtual Reality (VR), IEEE, Arles, Camargue, Provence, France, pp. 229–230. <https://doi.org/10.1109/VR.2015.7223379>
- Macauda, G., Bertolini, G., Palla, A., Straumann, D., Brugger, P., Lenggenhager, B., 2015. Binding body and self in visuo-vestibular conflicts. *Eur. J. Neurosci.* 41, 810–817. <https://doi.org/10.1111/ejn.12809>
- Maister, L., Slater, M., Sanchez-Vives, M.V., Tsakiris, M., 2015. Changing bodies changes minds: owning another body affects social cognition. *Trends Cogn. Sci.* 19, 6–12. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2014.11.001>
- Makin, T.R., Holmes, N.P., Ehrsson, H.H., 2008. On the other hand: Dummy hands and peripersonal space. *Behav. Brain Res.* 191, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.bbr.2008.02.041>
- Maltempo, T., Pitzalis, S., Bellagamba, M., Di Marco, S., Fattori, P., Galati, G., Galletti, C., Sulpizio, V., 2021. Lower visual field preference for the visuomotor control of limb movements in the human dorsomedial parietal cortex. *Brain Struct. Funct.* 226, 2989–3005. <https://doi.org/10.1007/s00429-021-02254-3>
- Mandrigin, A., Thompson, E., 2015. Own-body perception, in: Matthen, M. (Ed.), . Oxford University Press, Oxford.
- Maneuvrier, A., Decker, L.M., Ceyte, H., Fleury, P., Renaud, P., 2020. Presence Promotes Performance on a Virtual Spatial Cognition Task: Impact of Human Factors on Virtual Reality Assessment. *Front. Virtual Real.* 1.
- Mangalam, M., Carver, N.S., Kelty-Stephen, D.G., 2020a. Multifractal signatures of perceptual processing on anatomical sleeves of the human body. *J. R. Soc. Interface* 17, 20200328. <https://doi.org/10.1098/rsif.2020.0328>
- Mangalam, M., Carver, N.S., Kelty-Stephen, D.G., 2020b. Global broadcasting of local fractal fluctuations in a bodywide distributed system supports perception via effortful touch. *Chaos Solitons Fractals* 135, 109740. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2020.109740>

- Mangalam, M., Chen, R., McHugh, T.R., Singh, T., Kelty-Stephen, D.G., 2020c. Bodywide fluctuations support manual exploration: Fractal fluctuations in posture predict perception of heaviness and length via effortful touch by the hand. *Hum. Mov. Sci.* 69, 102543. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2019.102543>
- Mangalam, M., Fragaszy, D.M., Wagman, J.B., Day, B.M., Kelty-Stephen, D.G., Bongers, R.M., Stout, D.W., Osiurak, F., 2022. On the psychological origins of tool use. *Neurosci. Biobehav. Rev.* 134, 104521. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2022.104521>
- Mangalam, M., Kelty-Stephen, D.G., 2020. Multiplicative-cascade dynamics supports whole-body coordination for perception via effortful touch. *Hum. Mov. Sci.* 70, 102595. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2020.102595>
- Mansour, S., El-Said, M., Rude-Parkins, C., Nandigam, J., 2006. The interactive effect of avatar visual fidelity and behavioral fidelity in the collaborative virtual reality environment on the perception of social interaction, in: *Proceedings of the 10th WSEAS International Conference on Communications, ICCOM'06*. World Scientific and Engineering Academy and Society (WSEAS), Stevens Point, Wisconsin, USA, pp. 387–395.
- Marmelat, V., Delignières, D., 2012. Strong anticipation: complexity matching in interpersonal coordination. *Exp. Brain Res.* 222, 137–148. <https://doi.org/10.1007/s00221-012-3202-9>
- Marmelat, V., Meidinger, R.L., 2019. Fractal analysis of gait in people with Parkinson's disease: three minutes is not enough. *Gait Posture* 70, 229–234. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2019.02.023>
- Maselli, A., 2015. Allocentric and egocentric manipulations of the sense of self-location in full-body illusions and their relation with the sense of body ownership. *Cogn. Process.* 16 Suppl 1, 309–312. <https://doi.org/10.1007/s10339-015-0667-z>
- Maselli, A., Slater, M., 2013. The building blocks of the full body ownership illusion. *Front. Hum. Neurosci.* 7. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00083>
- Mast, F., Meissner, T., 2004. Mental Transformations of Perspective During Whole-Body Roll Rotation. *J. Vestib. Res.* 14, O041–O041.
- McIntire, J.P., Havig, P.R., Geiselman, E.E., 2012. What is 3D good for? A review of human performance on stereoscopic 3D displays, in: *Head- and Helmet-Mounted Displays XVII; and Display Technologies and Applications for Defense, Security, and Avionics VI*. Presented at the Head- and Helmet-Mounted Displays XVII; and Display Technologies and Applications for Defense, Security, and Avionics VI, International Society for Optics and Photonics, p. 83830X. <https://doi.org/10.1117/12.920017>
- Merleau-Ponty, M., 1962. *Phenomenology of Perception*. *Cogn. Sci.* 4, 17–20. <https://doi.org/10.1111/j.1468-0149.1963.tb00795.x>
- Milner, D., Goodale, M., 2006. *The visual brain in action*. OUP Oxford.
- Mori, M., MacDorman, K.F., Kageki, N., 2012. The Uncanny Valley [From the Field]. *IEEE Robot. Autom. Mag.* 19, 98–100. <https://doi.org/10.1109/MRA.2012.2192811>

- Mukli, P., Nagy, Z., Eke, A., 2015. Multifractal formalism by enforcing the universal behavior of scaling functions. *Phys. Stat. Mech. Its Appl.* 417, 150–167. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2014.09.002>
- Munafo, J., Diedrick, M., Stoffregen, T.A., 2017. The virtual reality head-mounted display Oculus Rift induces motion sickness and is sexist in its effects. *Exp. Brain Res.* 235, 889–901. <https://doi.org/10.1007/s00221-016-4846-7>
- Murphy, J., Catmur, C., Bird, G., 2019. Classifying individual differences in interoception: Implications for the measurement of interoceptive awareness. *Psychon. Bull. Rev.* 26, 1467–1471. <https://doi.org/10.3758/s13423-019-01632-7>
- Nagamine, S., Hayashi, Y., Yano, S., Kondo, T., 2016. An immersive virtual reality system for investigating human bodily self-consciousness, in: 2016 Fifth ICT International Student Project Conference (ICT-ISPC). Presented at the 2016 Fifth ICT International Student Project Conference (ICT-ISPC), pp. 97–100. <https://doi.org/10.1109/ICT-ISPC.2016.7519245>
- Nagy, Z., Mukli, P., Herman, P., Eke, A., 2017. Decomposing Multifractal Crossovers. *Front. Physiol.* 8. <https://doi.org/10.3389/fphys.2017.00533>
- Nakashima, R., Shioiri, S., 2014. Why Do We Move Our Head to Look at an Object in Our Peripheral Region? Lateral Viewing Interferes with Attentive Search. *PLoS ONE* 9, e92284. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0092284>
- Nakul, E., Lopez, C., 2017. Commentary: Out-of-Body Experience during Awake Craniotomy. *Front. Hum. Neurosci.* 11.
- Nakul, E., Orlando-Dessaints, N., Lenggenhager, B., Lopez, C., 2020. Measuring perceived self-location in virtual reality. *Sci. Rep.* 10, 6802. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-63643-y>
- Newen, A., De Bruin, L., Gallagher, S., 2018. *The Oxford handbook of 4E cognition.* Oxford University Press.
- Nie, L., Dotov, D., Chemero, A., 2011. Readiness-to-hand, extended cognition, and multifactuality. *Proc. Annu. Meet. Cogn. Sci. Soc.* 33.
- Niehorster, D.C., Li, L., Lappe, M., 2017. The Accuracy and Precision of Position and Orientation Tracking in the HTC Vive Virtual Reality System for Scientific Research. *Percept.* 8, 204166951770820. <https://doi.org/10.1177/2041669517708205>
- Noel, J.-P., Grivaz, P., Marmaroli, P., Lissek, H., Blanke, O., Serino, A., 2015a. Full body action remapping of peripersonal space: The case of walking. *Neuropsychologia* 70, 375–384. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2014.08.030>
- Noel, J.-P., Pfeiffer, C., Blanke, O., Serino, A., 2015b. Peripersonal space as the space of the bodily self. *Cognition* 144, 49–57. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2015.07.012>
- Noel, J.-P., Samad, M., Doxon, A., Clark, J., Keller, S., Di Luca, M., 2018. Peri-personal space as a prior in coupling visual and proprioceptive signals. *Sci. Rep.* 8, 15819. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-33961-3>

- Nonaka, T., Bril, B., 2014. Fractal dynamics in dexterous tool use: The case of hammering behavior of bead craftsmen. *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform.* 40, 218–231. <https://doi.org/10.1037/a0033277>
- Odermatt, I.A., Buetler, K.A., Wenk, N., Özen, Ö., Penalver-Andres, J., Nef, T., Mast, F.W., Marchal-Crespo, L., 2021. Congruency of Information Rather Than Body Ownership Enhances Motor Performance in Highly Embodied Virtual Reality. *Front. Neurosci.* 15.
- O’Kane, S.H., Ehrsson, H.H., 2021. The contribution of stimulating multiple body parts simultaneously to the illusion of owning an entire artificial body. *PLOS ONE* 16, e0233243. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0233243>
- Oldfield, R.C., 1971. The assessment and analysis of handedness: the Edinburgh inventory. *Neuropsychologia* 9, 97–113. [https://doi.org/10.1016/0028-3932\(71\)90067-4](https://doi.org/10.1016/0028-3932(71)90067-4)
- Ong, N.C.H., 2018. The use of Dynavision in sport and exercise research: A review. *Int. J. Sport Exerc. Psychol.* 1–20. <https://doi.org/10.1080/1612197X.2018.1549582>
- Orioli, G., Santoni, A., Dragovic, D., Farroni, T., 2019. Identifying peripersonal space boundaries in newborns. *Sci. Rep.* 9, 9370. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-45084-4>
- 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. *Sci. Rep.* 5, 13899. <https://doi.org/10.1038/srep13899>
- Pagé, C., Bernier, P.-M., Trempe, M., 2019. Using video simulations and virtual reality to improve decision-making skills in basketball. *J. Sports Sci.* 37, 2403–2410. <https://doi.org/10.1080/02640414.2019.1638193>
- Paillard, T., Costes-Salon, C., Lafont, C., Dupui, P., 2002. Are there differences in postural regulation according to the level of competition in judoists? *Br. J. Sports Med.* 36, 304–305. <https://doi.org/10.1136/bjism.36.4.304>
- Paillard, T., Lafont, C., Costes-Salon, M.C., Rivière, D., Dupui, P., 2004. Effects of Brisk Walking on Static and Dynamic Balance, Locomotion, Body Composition, and Aerobic Capacity in Ageing Healthy Active Men. *Int. J. Sports Med.* 25, 539–546. <https://doi.org/10.1055/s-2004-820948>
- Paillard, T., Noé, F., Rivière, T., Marion, V., Montoya, R., Dupui, P., 2006. Postural Performance and Strategy in the Unipedal Stance of Soccer Players at Different Levels of Competition. *J. Athl. Train.* 41, 172–176.
- Palatinus, Z., Dixon, J.A., Kelty-Stephen, D.G., 2013. Fractal fluctuations in quiet standing predict the use of mechanical information for haptic perception. *Ann. Biomed. Eng.* 41, 1625–1634. <https://doi.org/10.1007/s10439-012-0706-1>
- Pastel, S., Chen, C.-H., Petri, K., Witte, K., 2020. Effects of body visualization on performance in head-mounted display virtual reality. *PLOS ONE* 15, e0239226. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0239226>
- Pavan, A., Hobaek, M., Blurton, S.P., Contillo, A., Ghin, F., Greenlee, M.W., 2019. Visual short-term memory for coherent motion in video game players:

- evidence from a memory-masking paradigm. *Sci. Rep.* 9, 6027. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-42593-0>
- Peck, T.C., Doan, M., Bourne, K.A., Good, J.J., 2018. The Effect of Gender Body-Swap Illusions on Working Memory and Stereotype Threat. *IEEE Trans. Vis. Comput. Graph.* 24, 1604–1612. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2018.2793598>
- Peck, T.C., Gonzalez-Franco, M., 2021. Avatar Embodiment. A Standardized Questionnaire. *Front. Virtual Real.* 1.
- Peck, T.C., Seinfeld, S., Aglioti, S.M., Slater, M., 2013. Putting yourself in the skin of a black avatar reduces implicit racial bias. *Conscious. Cogn.* 22, 779–787. <https://doi.org/10.1016/j.concog.2013.04.016>
- Peng, C.-K., Havlin, S., Stanley, H.E., Goldberger, A.L., 1995. Quantification of scaling exponents and crossover phenomena in nonstationary heartbeat time series. *Chaos Interdiscip. J. Nonlinear Sci.* 5, 82–87. <https://doi.org/10.1063/1.166141>
- Pennebaker, J.W., Lightner, J.M., 1980. Competition of internal and external information in an exercise setting. *J. Pers. Soc. Psychol.* 39, 165–174. <https://doi.org/10.1037/0022-3514.39.1.165>
- Penzel, T., Kantelhardt, J.W., Grote, L., Peter, J.H., Bunde, A., 2003. Comparison of detrended fluctuation analysis and spectral analysis for heart rate variability in sleep and sleep apnea. *IEEE Trans. Biomed. Eng.* 50, 1143–1151. <https://doi.org/10.1109/TBME.2003.817636>
- Pfeiffer, C., Grivaz, P., Herbelin, B., Serino, A., Blanke, O., 2016. Visual gravity contributes to subjective first-person perspective. *Neurosci. Conscious.* 2016, niw006. <https://doi.org/10.1093/nc/niw006>
- Pfeiffer, C., Lopez, C., Schmutz, V., Duenas, J.A., Martuzzi, R., Blanke, O., 2013. Multisensory Origin of the Subjective First-Person Perspective: Visual, Tactile, and Vestibular Mechanisms. *PLoS ONE* 8, e61751. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0061751>
- Pilgram, B., Kaplan, D.T., 1999. Nonstationarity and 1/f noise characteristics in heart rate. *Am. J. Physiol.-Regul. Integr. Comp. Physiol.* 276, R1–R9. <https://doi.org/10.1152/ajpregu.1999.276.1.R1>
- Pithers, R.T., 2002. Cognitive Learning Style: A Review of the Field Dependent-Field Independent Approach. *J. Vocat. Educ. Train.* 54, 117–32.
- Pomes, A., Slater, M., 2013. Drift and ownership toward a distant virtual body. *Front. Hum. Neurosci.* 7.
- Porras-Garcia, B., Serrano-Troncoso, E., Carulla-Roig, M., Soto-Usera, P., Ferrer-Garcia, M., Figueras-Puigderrajols, N., Yilmaz, L., Onur Sen, Y., Shojaeian, N., Gutiérrez-Maldonado, J., 2020. Virtual Reality Body Exposure Therapy for Anorexia Nervosa. A Case Report With Follow-Up Results. *Front. Psychol.* 11.
- Posada-Quintero, H.F., Bolkhovsky, J.B., 2019. Machine Learning models for the Identification of Cognitive Tasks using Autonomic Reactions from Heart Rate Variability and Electrodermal Activity. *Behav. Sci.* 9, 45. <https://doi.org/10.3390/bs9040045>

- Praetorius, A.S., Görlich, D., 2020. How Avatars Influence User Behavior: A Review on the Proteus Effect in Virtual Environments and Video Games, in: International Conference on the Foundations of Digital Games, FDG '20. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, pp. 1–9. <https://doi.org/10.1145/3402942.3403019>
- Preuss, N., Ehrsson, H.H., 2019. Full-body ownership illusion elicited by visuo-vestibular integration. *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform.* 45, 209–223. <https://doi.org/10.1037/xhp0000597>
- Previc, F.H., 1990. Functional specialization in the lower and upper visual fields in humans: Its ecological origins and neurophysiological implications. *Behav. Brain Sci.* 13, 519–542. <https://doi.org/10.1017/S0140525X00080018>
- R Core Team, 2020. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Racz, F.S., Mukli, P., Nagy, Z., Eke, A., 2018a. Multifractal dynamics of resting-state functional connectivity in the prefrontal cortex. *Physiol. Meas.* 39, 024003. <https://doi.org/10.1088/1361-6579/aaa916>
- Racz, F.S., Stylianou, O., Mukli, P., Eke, A., 2018b. Multifractal Dynamic Functional Connectivity in the Resting-State Brain. *Front. Physiol.* 9. <https://doi.org/10.3389/fphys.2018.01704>
- Ratan, R., Sah, Y.J., 2015. Leveling up on stereotype threat: The role of avatar customization and avatar embodiment. *Comput. Hum. Behav.* 50, 367–374. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2015.04.010>
- Rey-Robert, B., Temprado, J.-J., Berton, E., 2011. Aging and Changes in Complexity in the Neurobehavioral System. *Medicina (Mex.)* 47, 1–10. <https://doi.org/10.3390/medicina47010001>
- Richman, J.S., Moorman, J.R., 2000. Physiological time-series analysis using approximate entropy and sample entropy. *Am. J. Physiol.-Heart Circ. Physiol.* 278, H2039–H2049. <https://doi.org/10.1152/ajpheart.2000.278.6.H2039>
- Ring, C., Brener, J., 1992. The Temporal Locations of Heartbeat Sensations. *Psychophysiology* 29, 535–545. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.1992.tb02027.x>
- Rivu, R., Zhou, Y., Welsch, R., Mäkelä, V., Alt, F., 2021. When Friends Become Strangers: Understanding the Influence of Avatar Gender on Interpersonal Distance in Virtual Reality, in: Ardito, C., Lanzilotti, R., Malizia, A., Petrie, H., Piccinno, A., Desolda, G., Inkpen, K. (Eds.), *Human-Computer Interaction – INTERACT 2021, Lecture Notes in Computer Science*. Springer International Publishing, Cham, pp. 234–250. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85607-6_16
- Rodionov, V., Zislin, J., Elidan, J., 2004. Imagination of body rotation can induce eye movements. *Acta Otolaryngol. (Stockh.)* 124, 684–689. <https://doi.org/10.1080/00016480410017017>
- Ronchi, R., Bello-Ruiz, J., Lukowska, M., Herbelin, B., Cabrilo, I., Schaller, K., Blanke, O., 2015. Right insular damage decreases heartbeat awareness and alters

- cardio-visual effects on bodily self-consciousness. *Neuropsychologia* 70, 11–20. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2015.02.010>
- Rossit, S., McAdam, T., Mclean, D.A., Goodale, M.A., Culham, J.C., 2013. fMRI reveals a lower visual field preference for hand actions in human superior parieto-occipital cortex (SPOC) and precuneus. *Cortex* 49, 2525–2541. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2012.12.014>
- Rubo, M., Gamer, M., 2019. Visuo-tactile congruency influences the body schema during full body ownership illusion. *Conscious. Cogn.* 73, 102758. <https://doi.org/10.1016/j.concog.2019.05.006>
- Sah, Y.J., Rheu, M., Ratan, R., 2021. Avatar-User Bond as Meta-Cognitive Experience: Explicating Identification and Embodiment as Cognitive Fluency. *Front. Psychol.* 12.
- Sainburg, R.L., Kalakanis, D., 2000. Differences in control of limb dynamics during dominant and nondominant arm reaching. *J. Neurophysiol.* 83, 2661–2675. <https://doi.org/10.1152/jn.2000.83.5.2661>
- Salamin, P., Tadi, T., Blanke, O., Vexo, F., Thalmann, D., 2010. Quantifying Effects of Exposure to the Third and First-Person Perspectives in Virtual-Reality-Based Training. *IEEE Trans. Learn. Technol.* 3, 272–276. <https://doi.org/10.1109/TLT.2010.13>
- Salarian, A., 2020. Intraclass Correlation Coefficient (ICC) [WWW Document]. URL <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/22099-intra-class-correlation-coefficient-icc> (accessed 6.26.20).
- Salomon, R., Noel, J.-P., Łukowska, M., Faivre, N., Metzinger, T., Serino, A., Blanke, O., 2017. Unconscious integration of multisensory bodily inputs in the peripersonal space shapes bodily self-consciousness. *Cognition* 166, 174–183. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2017.05.028>
- Scarpina, F., Serino, S., Keizer, A., Chirico, A., Scacchi, M., Castelnovo, G., Mauro, A., Riva, G., 2019. The Effect of a Virtual-Reality Full-Body Illusion on Body Representation in Obesity. *J. Clin. Med.* 8, 1330. <https://doi.org/10.3390/jcm8091330>
- Schandry, R., 1981. Heart Beat Perception and Emotional Experience. *Psychophysiology* 18, 483–488. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.1981.tb02486.x>
- Schandry, R., Sparrer, B., Weitkunat, R., 1986. From the heart to the brain: A study of heartbeat contingent scalp potentials. *Int. J. Neurosci.* 30, 261–275. <https://doi.org/10.3109/00207458608985677>
- Schertzer, D., Lovejoy, S., 2004. Uncertainty and predictability in geophysics: Chaos and multifractal insights. *Wash. DC Am. Geophys. Union Geophys. Monogr. Ser.* 150, 317–334. <https://doi.org/10.1029/150GM25>
- Schettler, A., Raja, V., Anderson, M.L., 2019. The Embodiment of Objects: Review, Analysis, and Future Directions. *Front. Neurosci.* 13, 1332. <https://doi.org/10.3389/fnins.2019.01332>

- Schreiber, T., Schmitz, A., 1996. Improved Surrogate Data for Nonlinearity Tests. *Phys. Rev. Lett.* 77, 635–638. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.77.635>
- Schubert, T., Friedmann, F., Regenbrecht, H., 2001. The Experience of Presence: Factor Analytic Insights. *Presence Teleoperators Virtual Environ.* 10, 266–281. <https://doi.org/10.1162/105474601300343603>
- Schwab, S., Memmert, D., 2012. The impact of a sports vision training program in youth field hockey players. *J. Sports Sci. Med.* 11, 624–631.
- Schwind, V., Knierim, P., Tasci, C., Franczak, P., Haas, N., Henze, N., 2017. “These are not my hands!”: Effect of Gender on the Perception of Avatar Hands in Virtual Reality, in: *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '17*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, pp. 1577–1582. <https://doi.org/10.1145/3025453.3025602>
- Seifert, L., Komar, J., Crettenand, F., Millet, G., 2014. Coordination Pattern Adaptability: Energy Cost of Degenerate Behaviors. *PLOS ONE* 9, e107839. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0107839>
- Seiryte, A., Rusconi, E., 2015. The Empathy Quotient (EQ) predicts perceived strength of bodily illusions and illusion-related sensations of pain. *Personal. Individ. Differ.* 77, 112–117. <https://doi.org/10.1016/j.paid.2014.12.048>
- Serino, A., 2019. Peripersonal space (PPS) as a multisensory interface between the individual and the environment, defining the space of the self. *Neurosci. Biobehav. Rev.* 99, 138–159. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2019.01.016>
- Serino, A., Alsmith, A., Costantini, M., Mandrigin, A., Tajadura-Jimenez, A., Lopez, C., 2013. Bodily ownership and self-location: Components of bodily self-consciousness. *Conscious. Cogn.* 22, 1239–1252. <https://doi.org/10.1016/j.concog.2013.08.013>
- Serino, A., Annella, L., Avenanti, A., 2009. Motor Properties of Peripersonal Space in Humans. *PLOS ONE* 4, e6582. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0006582>
- Serino, A., Bassolino, M., Farnè, A., Làdavas, E., 2007. Extended Multisensory Space in Blind Cane Users. *Psychol. Sci.* 18, 642–648. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.2007.01952.x>
- Serino, S., Polli, N., Riva, G., 2019. From avatars to body swapping: The use of virtual reality for assessing and treating body-size distortion in individuals with anorexia. *J. Clin. Psychol.* 75, 313–322. <https://doi.org/10.1002/jclp.22724>
- Sevinc, V., Berkman, M.I., 2020. Psychometric evaluation of Simulator Sickness Questionnaire and its variants as a measure of cybersickness in consumer virtual environments. *Appl. Ergon.* 82, 102958. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2019.102958>
- Shepard, R.N., Metzler, J., 1971. Mental rotation of three-dimensional objects. *Science* 171, 701–703. <https://doi.org/10.1126/science.171.3972.701>
- Shimizu, S., Sumi, K., 2019. Sports Training System for Visualizing Bird’s-Eye View from First-Person View, in: *2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*. Presented at the 2019 IEEE Conference on Virtual Reality

- and 3D User Interfaces (VR), pp. 1156–1158.
<https://doi.org/10.1109/VR.2019.8798227>
- Shimizu, Y., Thurner, S., Ehrenberger, K., 2002. Multifractal spectra as a measure of complexity in human posture. *Fractals* 10, 103–116.
<https://doi.org/10.1142/S0218348X02001130>
- Slater, M., 2018. Immersion and the illusion of presence in virtual reality. *Br. J. Psychol. Lond. Engl.* 1953 109, 431–433. <https://doi.org/10.1111/bjop.12305>
- Slater, M., Navarro, X., Valenzuela, J., Oliva, R., Beacco, A., Thorn, J., Watson, Z., 2018. Virtually Being Lenin Enhances Presence and Engagement in a Scene From the Russian Revolution. *Front. Robot. AI* 5.
- Slater, M., Spanlang, B., Sanchez-Vives, M.V., Blanke, O., 2010. First Person Experience of Body Transfer in Virtual Reality. *PLoS ONE* 5, e10564.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0010564>
- Sleimen-Malkoun, R., Temprado, J.-J., Hong, S.L., 2014. Aging induced loss of complexity and dedifferentiation: consequences for coordination dynamics within and between brain, muscular and behavioral levels. *Front. Aging Neurosci.* 6.
- Smitsman, A.W., 1997. The development of tool use: Changing boundaries between organism and environment, in: *Evolving Explanations of Development: Ecological Approaches to Organism–Environment Systems*. American Psychological Association, Washington, DC, US, pp. 301–329.
<https://doi.org/10.1037/10265-008>
- Spanlang, B., Normand, J.-M., Borland, D., Kilteni, K., Giannopoulos, E., Pomés, A., González-Franco, M., Perez-Marcos, D., Arroyo-Palacios, J., Muncunill, X.N., Slater, M., 2014. How to Build an Embodiment Lab: Achieving Body Representation Illusions in Virtual Reality. *Front. Robot. AI* 1.
- Stanney, K., Fidopiastis, C., Foster, L., 2020. Virtual Reality Is Sexist: But It Does Not Have to Be. *Front. Robot. AI* 7.
- Stanney, K.M., Kennedy, R.S., Kingdon, K.S., 2002. Virtual environment usage protocols, in: *Handbook of Virtual Environment : Design, Implementation, and Applications*. CRC Press, pp. 773–790.
- Stephen, D.G., Mirman, D., 2010. Interactions dominate the dynamics of visual cognition. *Cognition* 115, 154–165.
<https://doi.org/10.1016/j.cognition.2009.12.010>
- Stone, S.A., Baker, J., Olsen, R., Gibb, R., Doan, J., Hoetmer, J., Gonzalez, C.L.R., 2019. Visual Field Advantage: Redefined by Training? *Front. Psychol.* 9, 2764.
<https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.02764>
- Surtees, A., Apperly, I., Samson, D., 2013. Similarities and differences in visual and spatial perspective-taking processes. *Cognition* 129, 426–438.
<https://doi.org/10.1016/j.cognition.2013.06.008>
- Suzuki, K., Garfinkel, S.N., Critchley, H.D., Seth, A.K., 2013. Multisensory integration across exteroceptive and interoceptive domains modulates self-experience in

- the rubber-hand illusion. *Neuropsychologia* 51, 2909–2917. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2013.08.014>
- Swinkels, L.M.J., Veling, H., Dijksterhuis, A., van Schie, H.T., 2021. Availability of synchronous information in an additional sensory modality does not enhance the full body illusion. *Psychol. Res.* 85, 2291–2312. <https://doi.org/10.1007/s00426-020-01396-z>
- Tajadura-Jiménez, A., Grehl, S., Tsakiris, M., 2012. The Other in Me: Interpersonal Multisensory Stimulation Changes the Mental Representation of the Self. *PLOS ONE* 7, e40682. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0040682>
- Terenzi, L., Zaal, P., 2020. Rotational and Translational Velocity and Acceleration Thresholds for the Onset of Cybersickness in Virtual Reality, in: *AIAA Scitech 2020 Forum*, AIAA SciTech Forum. American Institute of Aeronautics and Astronautics. <https://doi.org/10.2514/6.2020-0171>
- Terhaar, J., Viola, F.C., Bär, K.-J., Debener, S., 2012. Heartbeat evoked potentials mirror altered body perception in depressed patients. *Clin. Neurophysiol.* 123, 1950–1957. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2012.02.086>
- Thornton, T.L., Gilden, D.L., 2005. Provenance of correlations in psychological data. *Psychon. Bull. Rev.* 12, 409–441. <https://doi.org/10.3758/BF03193785>
- Tononi, G., Sporns, O., Edelman, G.M., 1999. Measures of degeneracy and redundancy in biological networks. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 96, 3257–3262. <https://doi.org/10.1073/pnas.96.6.3257>
- Torre, K., Delignières, D., Lemoine, L., 2007. Detection of long-range dependence and estimation of fractal exponents through ARFIMA modelling. *Br. J. Math. Stat. Psychol.* 60, 85–106. <https://doi.org/10.1348/000711005X89513>
- Torre, K., Vergotte, G., Viel, É., Perrey, S., Dupeyron, A., 2019. Fractal properties in sensorimotor variability unveil internal adaptations of the organism before symptomatic functional decline. *Sci. Rep.* 9, 15736. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-52091-y>
- Torre, K., Wagenmakers, E.-J., 2009. Theories and models for $1/f\beta$ noise in human movement science. *Hum. Mov. Sci., Third European Workshop on Human Movement Science* 28, 297–318. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2009.01.001>
- Trombetta, M., Bazzanello Henrique, P.P., Brum, M.R., Colussi, E.L., De Marchi, A.C.B., Rieder, R., 2017. Motion Rehab AVE 3D: A VR-based exergame for post-stroke rehabilitation. *Comput. Methods Programs Biomed.* 151, 15–20. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2017.08.008>
- Tsai, W.-L., 2018. Personal Basketball Coach: Tactic Training through Wireless Virtual Reality, in: *Proceedings of the 2018 ACM on International Conference on Multimedia Retrieval, ICMR '18*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, pp. 481–484. <https://doi.org/10.1145/3206025.3206084>
- Tsakiris, M., 2010. My body in the brain: A neurocognitive model of body-ownership. *Neuropsychologia* 48, 703–712. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2009.09.034>

- Tsakiris, M., Costantini, M., Haggard, P., 2008. The role of the right temporo-parietal junction in maintaining a coherent sense of one's body. *Neuropsychologia* 46, 3014–3018. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2008.06.004>
- Tsakiris, M., Haggard, P., 2005. The Rubber Hand Illusion Revisited: Visuotactile Integration and Self-Attribution. *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform.* 31, 80–91. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.31.1.80>
- Tsakiris, M., Jiménez, A.T., Costantini, M., 2011. Just a heartbeat away from one's body: interoceptive sensitivity predicts malleability of body-representations. *Proc. R. Soc. B Biol. Sci.* 278, 2470–2476. <https://doi.org/10.1098/rspb.2010.2547>
- Tsakiris, M., Schütz-Bosbach, S., Gallagher, S., 2007. On agency and body-ownership: Phenomenological and neurocognitive reflections. *Conscious. Cogn., Subjectivity and the Body* 16, 645–660. <https://doi.org/10.1016/j.concog.2007.05.012>
- Tumialis, A., Smirnov, A., Fadeev, K., Alikovskaia, T., Khoroshikh, P., Sergievich, A., Golokhvast, K., 2020. Motor Program Transformation of Throwing Dart from the Third-Person Perspective. *Brain Sci.* 10, 55. <https://doi.org/10.3390/brainsci10010055>
- Turbyne, C., Goedhart, A., de Koning, P., Schirmbeck, F., Denys, D., 2021. Systematic Review and Meta-Analysis of Virtual Reality in Mental Healthcare: Effects of Full Body Illusions on Body Image Disturbance. *Front. Virtual Real.* 2.
- Ustinova, K.I., Perkins, J., Szostakowski, L., Tamkei, L.S., Leonard, W.A., 2010. Effect of viewing angle on arm reaching while standing in a virtual environment: Potential for virtual rehabilitation. *Acta Psychol. (Amst.)* 133, 180–190. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2009.11.006>
- van Elk, M., Blanke, O., 2014. Imagined own-body transformations during passive self-motion. *Psychol. Res.* 78, 18–27. <https://doi.org/10.1007/s00426-013-0486-8>
- Van Orden, G.C., Holden, J.G., Turvey, M.T., 2005. Human Cognition and 1/f Scaling. *J. Exp. Psychol. Gen.* 134, 117–123. <https://doi.org/10.1037/0096-3445.134.1.117>
- Van Orden, G.C., Holden, J.G., Turvey, M.T., 2003. Self-organization of cognitive performance. *J. Exp. Psychol. Gen.* 132, 331–350. <https://doi.org/10.1037/0096-3445.132.3.331>
- Verdonk, C., Trousselard, M., Di Bernardi Luft, C., Medani, T., Billaud, J.-B., Ramdani, C., Canini, F., Claverie, D., Jaumard-Hakoun, A., Vialatte, F., 2021. The heartbeat evoked potential does not support strong interoceptive sensibility in trait mindfulness. *Psychophysiology* 58, e13891. <https://doi.org/10.1111/psyp.13891>
- Waller, D., 2000. Individual differences in spatial learning from computer-simulated environments. *J. Exp. Psychol. Appl.* 6, 307–321. <https://doi.org/10.1037/1076-898X.6.4.307>
- Warlop, T., Detrembleur, C., Bollens, B., Stoquart, G., Crevecoeur, F., Jeanjean, A., Lejeune, T.M., 2016. Temporal organization of stride duration variability as a marker of gait instability in Parkinson's disease. *J. Rehabil. Med.* 48, 865–871. <https://doi.org/10.2340/16501977-2158>

- Weech, S., Kenny, S., Barnett-Cowan, M., 2019. Presence and Cybersickness in Virtual Reality Are Negatively Related: A Review. *Front. Psychol.* 10.
- Wegner, D.M., Wheatley, T., 1999. Apparent mental causation: Sources of the experience of will. *Am. Psychol.* 54, 480–492. <https://doi.org/10.1037/0003-066X.54.7.480>
- Weibel, D., Wissmath, B., 2011. Immersion in computer games: the role of spatial presence and flow. *Int. J. Comput. Games Technol.* 2011, 6:6. <https://doi.org/10.1155/2011/282345>
- Weir, J.P., 2005. Quantifying test-retest reliability using the intraclass correlation coefficient and the SEM. *J. Strength Cond. Res.* 19, 231–240. <https://doi.org/10.1519/15184.1>
- Wells, A.J., Hoffman, J.R., Beyer, K.S., Jajtner, A.R., Gonzalez, A.M., Townsend, J.R., Mangine, G.T., Robinson, E.H., McCormack, W.P., Fragala, M.S., Stout, J.R., 2014. Reliability of the dynavision™ d2 for assessing reaction time performance. *J. Sports Sci. Med.* 13, 145–150.
- Wells, A.J., Hoffman, J.R., Gonzalez, A.M., Stout, J.R., Fragala, M.S., Mangine, G.T., McCormack, W.P., Jajtner, A.R., Townsend, J.R., Robinson, E.H., 2013. Phosphatidylserine and caffeine attenuate postexercise mood disturbance and perception of fatigue in humans. *Nutr. Res.* 33, 464–472. <https://doi.org/10.1016/j.nutres.2013.03.009>
- Werner, N.S., Jung, K., Duschek, S., Schandry, R., 2009. Enhanced cardiac perception is associated with benefits in decision-making. *Psychophysiology* 46, 1123–1129. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.2009.00855.x>
- Weser, V., Proffitt, D.R., 2019. Tool Embodiment: The Tool’s Output Must Match the User’s Input. *Front. Hum. Neurosci.* 12.
- Weser, V.U., Proffitt, D.R., 2021. Expertise in Tool Use Promotes Tool Embodiment. *Top. Cogn. Sci.* 13, 597–609. <https://doi.org/10.1111/tops.12538>
- Wijnants, M., Cox, R., Hasselman, F., Bosman, A., Van Orden, G., 2012. A Trade-Off Study Revealing Nested Timescales of Constraint. *Front. Physiol.* 3. <https://doi.org/10.3389/fphys.2012.00116>
- Wijnants, M.L., 2014. A review of theoretical perspectives in cognitive science on the presence of scaling in coordinated physiological and cognitive processes. *J. Nonlinear Dyn.* 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/962043>
- Witkin, H.A., Asch, S.E., 1948. Studies in space orientation; further experiments on perception of the upright with displaced visual fields. *J. Exp. Psychol.* 38, 762–782. <https://doi.org/10.1037/h0053671>
- Witkin, H.A., Dyk, R.B., Fattuson, H.F., Goodenough, D.R., Karp, S.A., 1962. Psychological differentiation: Studies of development, Psychological differentiation: Studies of development. Wiley, Oxford, England.
- Wraga, M., Proffitt, D.R., 2000. Mapping the Zone of Eye-Height Utility for Seated and Standing Observers. *Perception* 29, 1361–1383. <https://doi.org/10.1068/p2837>
- Yan, S., Ding, G., Guan, Z., Sun, N., Li, H., Zhang, L., 2015. OutsideMe: Augmenting Dancer’s External Self-Image by Using A Mixed Reality System, in:

- Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, CHI EA '15. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, pp. 965–970. <https://doi.org/10.1145/2702613.2732759>
- Yates, A.J., Jones, K.E., Marie, G.V., Hogben, J.H., 1985. Detection of the Heartbeat and Events in the Cardiac Cycle. *Psychophysiology* 22, 561–567. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.1985.tb01651.x>
- Yee, N., Bailenson, J., 2007. The Proteus Effect: The Effect of Transformed Self-Representation on Behavior. *Hum. Commun. Res.* 33, 271–290. <https://doi.org/10.1111/j.1468-2958.2007.00299.x>
- Yoshinaga, H., Miyazima, S., Mitake, S., 2000. Fluctuation of biological rhythm in finger tapping. *Phys. Stat. Mech. Its Appl.* 280, 582–586. [https://doi.org/10.1016/S0378-4371\(99\)00594-4](https://doi.org/10.1016/S0378-4371(99)00594-4)

Annexes

Annexe 1 – Simulator Sickness Questionnaire (SSQ)

Annexe 2 – Igroup Presence Questionnaire (IPQ)

Annexe 3 – Empathy Quotient (EQ)

Annexe 4 – Interoceptive Accuracy Scale (IAS)

Annexe 5 – Liens entre IAS et IAcc

Annexe 6 – Caractéristiques test-retest du Rod and Frame Test en réalité virtuelle

Annexe 7 – Caractéristiques test-retest de la tâche de rotations mentales en réalité virtuelle

Annexe 1 – Simulator Sickness Questionnaire (SSQ)

Kennedy, R.S., Lane, N.E., Berbaum, K.S., Lilienthal, M.G., 1993. Simulator Sickness Questionnaire: An Enhanced Method for Quantifying Simulator Sickness. *Int. J. Aviat. Psychol.* 3, 203–220

Bouchard, S., St-Jacques, J., Renaud, P., Wiederhold, B.K., 2009. Side effects of immersions in virtual reality for people suffering from anxiety disorders. *J. CyberTherapy Rehabil.* 2, 127–138.

Consigne :

Ce questionnaire a pour objectif de mesurer votre état d'inconfort. Pour chaque symptôme, veuillez cocher la case appropriée correspondant à votre état actuel.

À quel point ressentez-vous les symptômes suivants ?

N°	Question
1	Inconfort général
2	Fatigue
3	Mal de tête
4	Fatigue visuelle (effort à faire pour voir clair)
5	Difficulté d'accommodation (pour rendre l'image claire)
6	Hyper salivation
7	Sudation
8	Nausée
9	Difficulté à se concentrer
10	Tête pleine, difficulté à clarifier ses idées
11	Vision floue
12	Impression que ça tourne (soi ou environnement) lorsque les yeux sont ouverts
13	Impression que ça tourne lorsque les yeux sont fermés
14	Impression d'instabilité, vertige
15	Conscience de son estomac, réveil de la zone gastrique
16	Remontée gastrique

Quotation :

Échelle de Likert en 4 points : Aucun / Négligeable / Modéré / Sévère.

Le score total est calculé en additionnant les réponses à chacune des questions (« Aucun » = 0, « Négligeable » = 1, « Modéré » = 2, « Sévère » = 3). Des scores pour chacune des sous-échelles « Nausée » (questions 1, 6, 7, 8, 12, 13, 14, 15, 16) et « Oculo-moteur » (questions 2, 3, 4, 5, 9, 10, 11) peuvent être calculés.

Le score final est compris entre 0 et 48.

Annexe 2 – Igroup Presence Questionnaire (IPQ)

Schubert, T., Friedmann, F., Regenbrecht, H., 2001. *The Experience of Presence: Factor Analytic Insights. Presence Teleoperators Virtual Environ.* 10, 266–281.

Consigne :

Voici plusieurs propositions qui peuvent s'appliquer à l'expérience que vous venez d'avoir.

Indiquez, s'il vous plaît, si chacune de ces propositions s'applique ou non à votre expérience.

Veillez noter qu'il n'y a pas de bonne ou de mauvaise réponse.

N°	Item	Question	Valeur basse	Valeur haute
1	INV	À quel point étiez-vous conscient du monde réel environnant alors que vous étiez en train de naviguer dans le monde virtuel ? (par exemple : sons, température de la pièce, présence d'autres gens, etc.) ?	Extrêmement conscient	Pas conscient du tout
2	REAL	Comment le monde virtuel vous a-t-il semblé ?	Pas du tout réel	Complètement réel
3	SP	J'ai eu la sensation d'agir dans l'espace virtuel plutôt que d'agir sur un quelconque mécanisme à l'extérieur de celui-ci.	Pas du tout d'accord	Complètement d'accord
4	REAL	À quel point votre expérience dans l'environnement virtuel vous a-t-elle semblée cohérente avec votre expérience dans le monde réel ?	Pas cohérente	Très cohérente
5	REAL	À quel point le monde virtuel vous a-t-il semblé réel ?	À peu près aussi réel qu'un monde imaginaire	Indistinguable du monde réel
6	SP	Je ne me suis pas senti présent dans l'espace virtuel.	Pas senti présent	Senti présent
7	INV	Je n'étais pas conscient de mon environnement réel.	Pas du tout d'accord	Tout à fait d'accord
8	G	Dans le monde généré par l'ordinateur, j'ai eu le sentiment "d'y être".	Pas du tout	Beaucoup
9	SP	D'une certaine façon, j'ai eu l'impression que le monde virtuel m'entourait.	Pas du tout d'accord	Tout à fait d'accord

10	SP	Je me suis senti présent dans l'espace virtuel.	Pas du tout d'accord	Tout à fait d'accord
11	INV	Je faisais toujours attention à l'environnement réel.	Pas du tout d'accord	Tout à fait d'accord
12	REAL	Le monde virtuel semblait plus réaliste que le monde réel.	Pas du tout d'accord	Tout à fait d'accord
13	SP	J'avais l'impression que j'étais juste en train de percevoir des images.	Pas du tout d'accord	Tout à fait d'accord
14	INV	J'étais complètement captivé par le monde virtuel.	Pas du tout d'accord	Tout à fait d'accord

Quotation :

Échelle de Likert allant de 1 à 7.

Le score total est calculé en additionnant les réponses à chaque question (1 point pour la valeur basse, 7 points pour la valeur haute). Des scores peuvent être calculés pour chacune des sous-échelles (INV – involvement, REAL – realism, SP – spatial presence, G – general presence).

Le score final est compris entre 7 et 98.

Annexe 3 – Empathy Quotient (EQ)

Baron-Cohen, S., Wheelwright, S., 2004. *The Empathy Quotient: An Investigation of Adults with Asperger Syndrome or High Functioning Autism, and Normal Sex Differences*. *J. Autism Dev. Disord.* 34, 163–175.

Consigne :

Il vous sera présenté une liste d'affirmations. Veuillez lire attentivement chaque affirmation et indiquez dans quelle mesure vous êtes d'accord ou non avec elle en cochant votre réponse.

Il n'y a pas de bonnes ou de mauvaises réponses, ni de questions pièges.

N°	Item	Question
1		Je peux facilement comprendre si quelqu'un souhaite participer à une conversation.
2	R	Je préfère les animaux aux humains.
3	R	J'essaie de suivre les tendances et les modes actuelles.
4		Je trouve difficile d'expliquer des choses que je comprends facilement à d'autres personnes qui ne les ont pas comprises du premier coup
5	R	Je rêve presque toutes les nuits.
6		J'aime beaucoup prendre soin des autres.
7	R	J'essaie de résoudre mes propres problèmes plutôt que d'en discuter avec les autres.
8		J'ai du mal à savoir quoi faire dans un contexte social (en présence d'autres personnes)
9	R	Je suis au meilleur de ma forme le matin.
10		Les gens me disent souvent que je vais trop loin pour faire valoir mon point de vue dans une conversation.
11		Cela ne me dérange pas tellement d'être en retard à un rendez-vous avec un ami.
12		Les amitiés et les relations sont juste trop difficiles, alors je ne m'en préoccupe pas.
13	R	Je n'enfreindrai jamais une loi, aussi minime soit-elle.
14		Je trouve souvent difficile de juger si quelque chose est poli ou malpoli.
15		Dans une conversation, j'ai tendance à me concentrer sur mes propres idées plutôt que sur ce que mon interlocuteur pourrait penser.
16	R	Je préfère les blagues aux jeux de mots.
17	R	Je vis la vie pour le présent plutôt que pour l'avenir.
18		Quand j'étais enfant, j'aimais couper des vers de terre en morceaux pour voir ce qui allait se passer.
19		Je peux rapidement comprendre si quelqu'un fait un sous-entendu

20	R	J'ai tendance à avoir des opinions très fortes sur la moralité.
21		C'est difficile pour moi de comprendre pourquoi certaines choses contrarient autant les gens.
22		Je peux facilement me mettre à la place de quelqu'un
23	R	Je pense que les bonnes manières sont la chose la plus importante qu'un parent puisse enseigner à son enfant.
24	R	J'aime faire les choses sur un coup de tête.
25		Je suis doué(e) pour prédire comment quelqu'un va se sentir.
26		Je repère rapidement quand quelqu'un dans un groupe se sent gêné ou mal à l'aise
27		Si je dis quelque chose et que quelqu'un s'en trouve offensé, je pense que c'est le problème de l'autre, pas le mien.
28		Si quelqu'un me demandait si j'aime sa coupe de cheveux, je répondrais sincèrement, même si je ne l'aime pas.
29		Je ne vois pas toujours pourquoi quelqu'un aurait dû se sentir offensé par une remarque.
30	R	Les gens me disent souvent que je suis très imprévisible.
31	R	J'aime être le centre de l'attention dans tout rassemblement social.
32		Voir les gens pleurer ne me dérange pas vraiment.
33	R	J'aime avoir des discussions politiques.
34		Je suis très direct(e), ce que certains prennent pour de la grossièreté, alors que ce n'est pas intentionnel.
35		Je n'ai pas tendance à trouver les situations sociales difficiles à comprendre.
36		Les gens me disent que je suis doué(e) pour comprendre ce qu'ils ressentent et ce qu'ils pensent.
37		Quand je parle aux gens, j'ai tendance à parler de leurs expériences plutôt que des miennes.
38		Cela me dérange de voir un animal souffrir.
39		Je suis capable de prendre des décisions sans être influencé(e) par les sentiments des gens.
40	R	Je ne peux pas me détendre tant que je n'ai pas fait tout ce que j'avais prévu de faire ce jour-là.
41		Je peux facilement dire si quelqu'un d'autre est intéressé ou ennuyé par ce que je dis.
42		Cela me dérange de voir des gens souffrir dans un journal télévisé.
43		Mes amis me parlent généralement de leurs problèmes, car ils disent que je suis très compréhensif(ve).
44		Je peux sentir que je dérange ou que je "m'incruste", même si on ne me le dit pas.
45	R	Je commence souvent de nouveaux passe-temps, mais je m'en ennuie rapidement et je passe à autre chose.

46		Les gens me disent que je vais parfois trop loin avec les taquineries.
47	R	Je serais trop nerveux(se) pour aller sur une grande montagne russe.
48		Les autres personnes disent souvent que je manque de tact, même si je ne vois pas toujours pourquoi.
49		Si je vois un inconnu dans un groupe, je pense que c'est à lui de faire l'effort de s'intégrer au groupe.
50		Je reste généralement émotionnellement détaché(e) quand je regarde un film.
51	R	J'aime être très organisé(e) dans la vie de tous les jours. Je fais souvent des listes de tâches à accomplir.
52		Je peux m'ajuster rapidement et intuitivement à l'état émotionnel d'une autre personne.
53	R	Je n'aime pas prendre de risques.
54		Je peux facilement me faire une idée de ce dont une autre personne pourrait vouloir parler.
55		Je peux dire si quelqu'un dissimule ses vraies émotions.
56	R	Avant de prendre une décision je pèse toujours le pour et le contre.
57		Je ne décrypte pas de façon explicite les règles de la vie en société.
58		Je suis plutôt doué(e) pour prédire ce que quelqu'un va faire.
59		J'ai tendance à m'impliquer émotionnellement dans les problèmes d'un ami.
60		Je peux généralement tenir compte du point de vue des autres même si je ne suis pas d'accord.

Quotation :

Échelle de Likert en 4 points allant de « Tout à fait d'accord » à « Pas du tout d'accord ».

Le score est calculé pour les 40 questions n'étant pas des items de remplissage (R).

Pour les questions 1, 6, 19, 22, 25, 26, 35, 36, 37, 38, 41, 42, 43, 44, 52, 54, 55, 57, 58, 59, 60 : +1 si « D'accord », +2 si « Tout à fait d'accord ».

Pour les questions 4, 8, 10, 11, 12, 14, 15, 18, 21, 27, 28, 29, 32, 34, 39, 46, 48, 49, 50 : +1 si « Pas d'accord », +2 si « Pas du tout d'accord ».

Le score final est compris entre 0 et 80.

Annexe 4 – Interoceptive Accuracy Scale (IAS)

Murphy, J., Catmur, C., Bird, G., 2019. *Classifying individual differences in interoception: Implications for the measurement of interoceptive awareness. Psychon. Bull. Rev.* 26, 1467–1471

Consigne :

Vous trouvez ci-dessous plusieurs phrases concernant la précision avec laquelle vous pouvez percevoir des sensations corporelles spécifiques. Veuillez évaluer sur l'échelle à quel point vous croyez pouvoir percevoir chacun des signaux spécifiques. Par exemple, si vous avez souvent la sensation d'avoir besoin d'uriner, mais qu'une fois aux toilettes vous réalisez que vous n'en avez pas besoin, alors vous évaluez que votre précision à percevoir ce signal corporel est faible.

Veuillez évaluer à quel point vous pouvez percevoir ces signaux sans l'utilisation de repères externes. Par exemple si vous pouvez percevoir à quelle vitesse votre cœur bat seulement dans le cas où vous le mesurez en prenant votre pouls, alors cela ne compte pas comme une perception interne précise.

N°	Question
1	Je peux toujours percevoir de façon précise quand mon cœur bat rapidement
2	Je peux toujours percevoir de façon précise quand j'ai faim
3	Je peux toujours percevoir de façon précise quand je respire rapidement
4	Je peux toujours percevoir de façon précise quand j'ai soif
5	Je peux toujours percevoir de façon précise quand j'ai besoin d'uriner
6	Je peux toujours percevoir de façon précise quand j'ai besoin de déféquer
7	Je peux toujours percevoir de façon précise quand je goûte des saveurs différentes
8	Je peux toujours percevoir de façon précise quand je vais vomir
9	Je peux toujours percevoir de façon précise quand je vais éternuer
10	Je peux toujours percevoir de façon précise quand je vais tousser
11	Je peux toujours percevoir de façon précise quand j'ai chaud/froid
12	Je peux toujours percevoir de façon précise quand je suis excité sexuellement
13	Je peux toujours percevoir de façon précise quand je vais émettre des flatulences
14	Je peux toujours percevoir de façon précise quand je vais produire un rot
15	Je peux toujours percevoir de façon précise quand mes muscles sont endoloris
16	Je peux toujours percevoir de façon précise quand je vais avoir un bleu
17	Je peux toujours percevoir de façon précise quand je souffre

18	Je peux toujours percevoir de façon précise quand ma glycémie est basse
19	Je peux toujours percevoir de façon précise quand quelqu'un me touche avec affection plutôt que sans affection
20	Je peux toujours percevoir de façon précise quand quelque chose va me chatouiller
21	Je peux toujours percevoir de façon précise quand quelque chose va me démanger

Quotation :

Échelle : Tout à fait d'accord (5) / D'accord (4) / Ni d'accord ni en désaccord (3) / Pas d'accord (2) / Pas du tout d'accord (1).

Le score est calculé en additionnant les réponses à chaque question, d'une valeur de 1 (« Pas du tout d'accord ») à 5 (« Tout à fait d'accord ») points.

Le score final est compris entre 21 et 105.

Annexe 5 – Liens entre IAS et IAcc

Des mesures de la précision intéroceptive (tâche de comptage de battements cardiaque) et de la sensibilité intéroceptive (questionnaire IAS) ont été réalisées dans deux expériences : l'étude 4 (« Les illusions visuo-tactiles et cardio-visuelles en réalité virtuelle provoquent des modifications similaires de la conscience de soi corporelle ») et une étude portant sur les potentiels prédicteurs de l'apparition du cybermalaise à l'aide d'un simulateur de conduite (présentée dans la partie Transfert et Valorisation).

La précision intéroceptive (IAcc) est calculée à l'aide de deux indicateurs : le md Index (de la Fuente et al., 2019; Fittipaldi et al., 2020) et l'indice de Schandy modifié (modified Schandry Index, mSI) (Schandry, 1981).

1) Calcul du md

Le md est calculé à partir de la distance absolue entre la fréquence de réponse du participant et sa fréquence cardiaque. Cette distance est calculée sur des fenêtres glissantes démarrant à chaque battement, et s'étendant sur 10 secondes :

$$md = \frac{\sum_{w=1}^N |fc_w - fr_w|}{N}$$

w représente la fenêtre glissante considérée, N est le nombre de fenêtres dans le signal, fc est la fréquence cardiaque et fr la fréquence de réponse.

Plus le score est proche de 0, meilleure est la performance.

2) Calcul du mSI

Le mSI est calculé à partir du nombre total de battements mesurés et du nombre total de réponses renseignées par le participant. Le score final est compris entre 0 et 1 : plus le score est proche de 1, plus le participant a été performant lors de la tâche.

$$mSI = 1 - \frac{(\text{Battements enregistrés} - \text{Nombre de réponses})}{\text{Battements enregistrés}}$$

En tout, les données de 74 participants ont été traitées (45 pour l'étude avec le simulateur de conduite, 29 pour l'étude 4). Les valeurs des indicateurs obtenus (md Index, mSI et IAS) n'étant pas statistiquement différentes entre les deux études, les données ont été regroupées. Dans chacune des deux études, la tâche de comptage de battement cardiaque est effectuée deux fois.

Dans un premier temps, les propriétés test-retest des deux indicateurs (md et mSI) sont évaluées en comparant les résultats des deux essais.

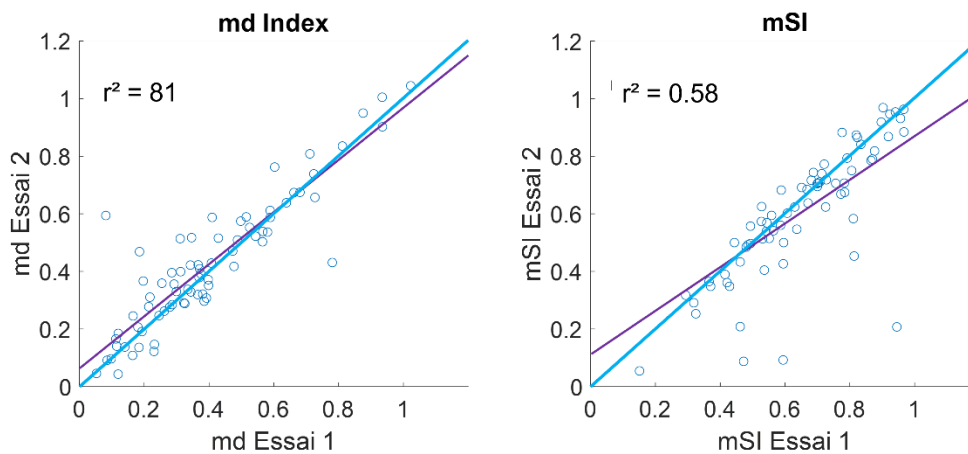


Figure 63 – Corrélations entre deux essais successifs pour la tâche de comptage de battement cardiaque pour les indicateurs md et mSI. La droite de corrélation est en violet. La droite d'identité est en bleu clair.

Les deux indicateurs présentent des propriétés test-retest correctes (md : $r^2 = 0.81$; mSI : $r^2 = 0.58$). De façon générale, les points semblent correctement répartis autour de la droite d'identité, ce qui suggère que les deux essais (à l'exception des scores de quelques participants) donnent des résultats similaires. Dans la suite de l'analyse, les scores md et mSI seront calculés comme la moyenne des scores obtenus aux deux essais.

Les indicateurs md et mSI semblent être assez bien corrélés ($r^2 = 0.56$), mais on observe de l'hétéroscédasticité. Les valeurs sont bien corrélées chez les participants ayant de bonnes performances en tâche (mSI proche de 1, md proche de 0), mais la relation est plus aléatoire lorsque la performance diminue.

Aucune corrélation n'est observée entre les indicateurs de la précision intéroceptive (md, mSI) et celui de la sensibilité intéroceptive (IAS).

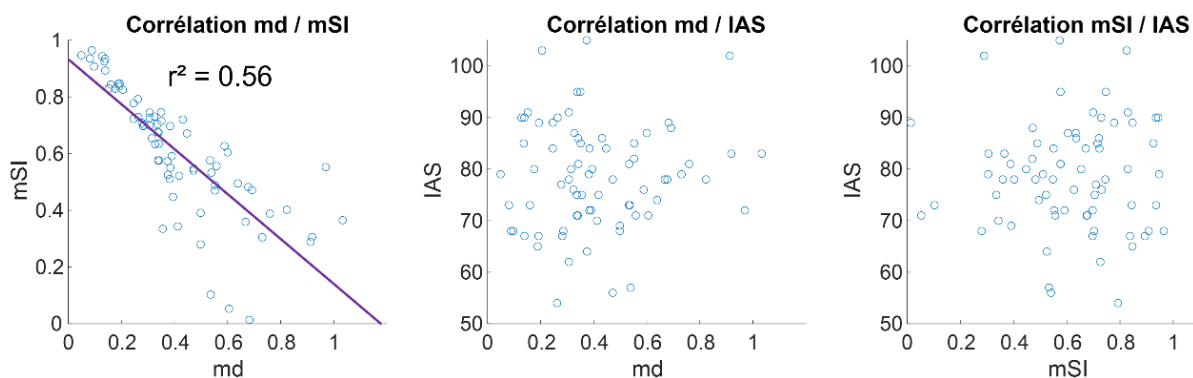


Figure 64 – Corrélations entre les indicateurs md, mSI et IAS.

Annexe 6 – Caractéristiques test-retest du Rod and Frame Test en réalité virtuelle

Le Rod and Frame Test en réalité virtuelle a été effectuée deux fois par les participants de l'étude 4, avec un minimum de deux jours d'intervalle entre les deux passages. Pour donner une indication sur les propriétés test-retest du RFT en réalité virtuelle, nous comparons les résultats obtenus par les 29 participants lors des essais 1 et 2.

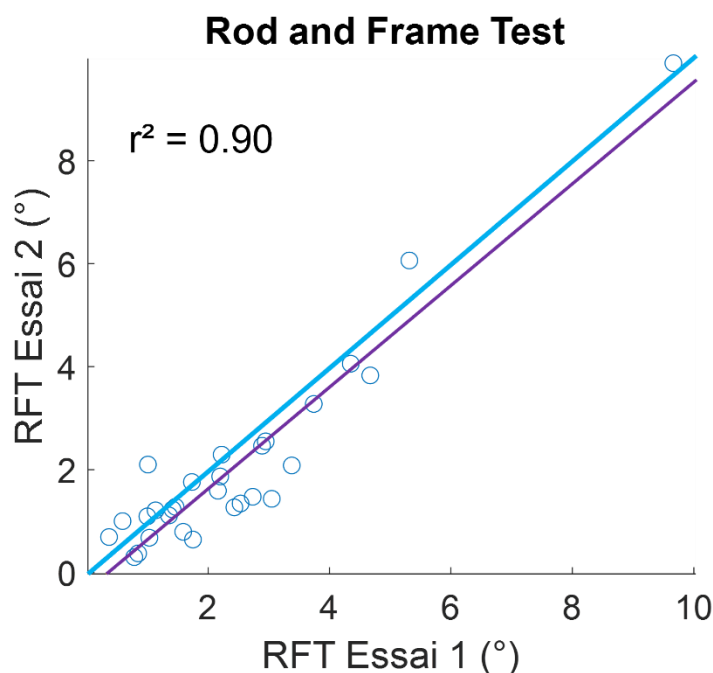


Figure 65 – Corrélation entre deux essais du Rod and Frame Test, passés avec un minimum de deux jours d'intervalle. La droite de corrélation est en violet. La droite d'identité est en bleu clair.

Les résultats des deux essais sont bien corrélés ($r^2 = 0.90$), les points obtenus sont proches de la droite d'identité, et il ne semble pas y avoir de tendance particulière. Pour limiter le poids du point situé aux alentours de 9° , nous avons calculé la corrélation entre les essais 1 et 2 pour les 28 sujets restants. Cette dernière reste élevée ($r^2 = 0.88$).

Il est intéressant de noter qu'il ne semble pas y avoir d'effet d'apprentissage, l'angle moyen de rotation restant sensiblement le même au cours des deux essais.

Annexe 7 – Caractéristiques test-retest de la tâche de rotations mentales en réalité virtuelle

La tâche de rotations mentales a quant à elle été effectuée deux fois par les participants de l'étude 4, avec un minimum de deux jours d'intervalle entre les deux passages. Pour étudier les propriétés test-retest de cette tâche, et déterminer s'il existe un effet d'apprentissage, les temps de réponse moyens obtenus pendant les 1^{ères} et 2^{èmes} moitiés des essais 1 et 2 sont comparés.

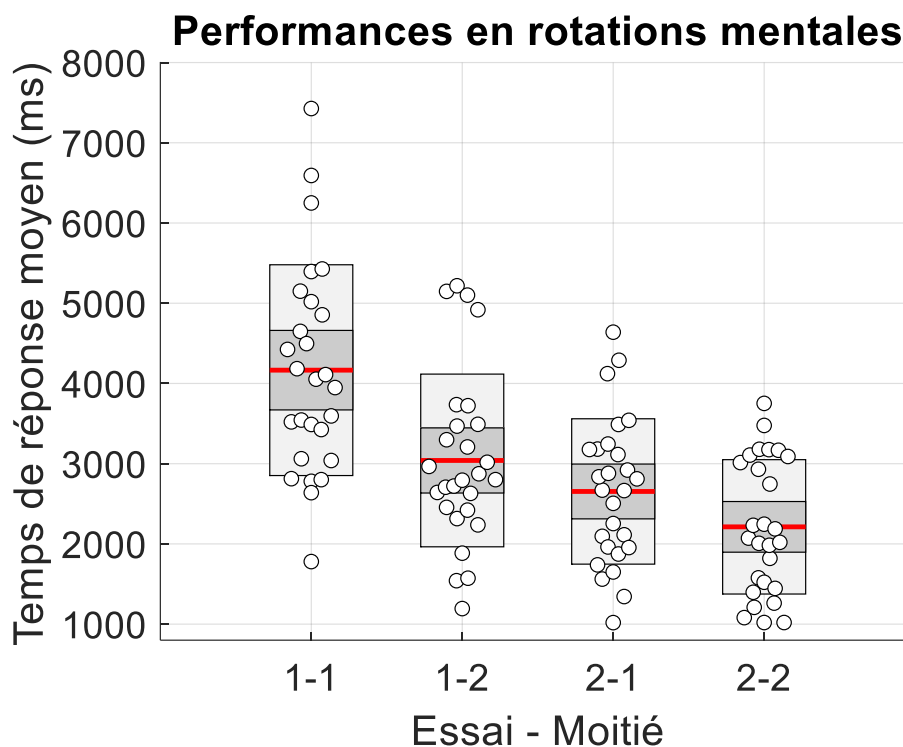


Figure 66 – Évolution des performances en rotations mentales lors des premières et deuxièmes moitiés des essais 1 et 2. La ligne rouge indique la moyenne, le gris foncé indique $\pm 1SD$ et le gris clair l'intervalle de confiance à 95%.

Deux outliers, répondant de façon significativement plus lente que le reste de la population, ont été identifiés et retirés de l'analyse. Une ANOVA à deux facteurs (Essai et Moitié) révèle un effet de l'essai ($F(1,107) = 33.54, p = 7.5 \times 10^{-8}$) et un effet de la moitié ($F(1,107) = 15.04, p = 1.8 \times 10^{-4}$), mais une absence d'effet d'interaction ($F(1,107) = 1.84, p = 0.09$).

Tout comme pour les temps de réponse mesurés lors des tâches d'Own Body Transformation (études 4 et 5), il existe un effet d'apprentissage dans la tâche des rotations mentales.

Dans un deuxième temps, nous avons calculé la corrélation entre les résultats obtenus lors des essais 1 et 2, pour déterminer si ces deux mesures sont corrélées ou si l'effet d'apprentissage est largement différent d'un participant à l'autre.

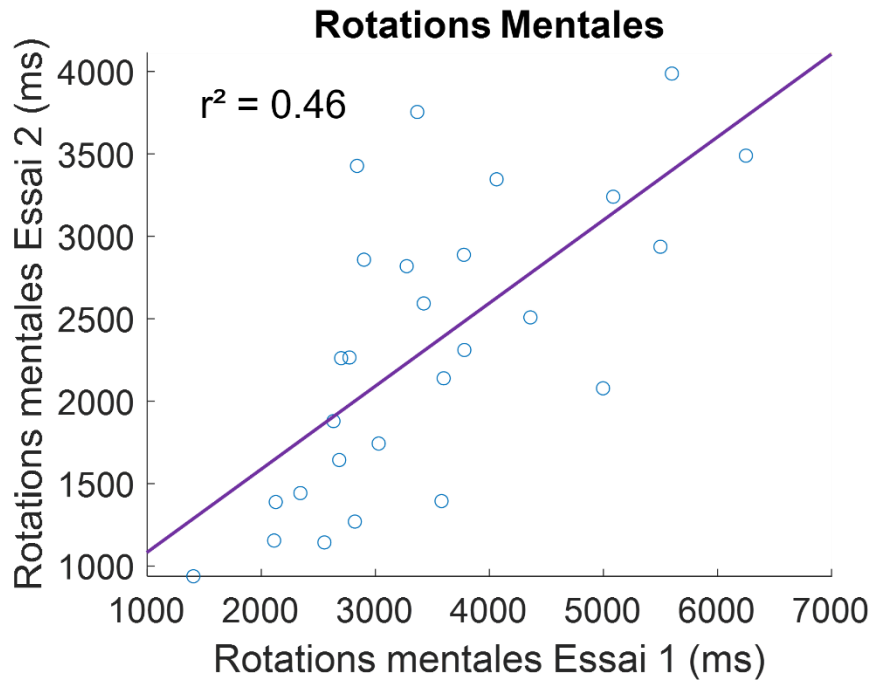


Figure 67 – Corrélations entre deux essais de la tâche de rotations mentales.

Les résultats obtenus sont moins convaincants que ceux du RFT. Même si la corrélation est clairement identifiable, le coefficient de corrélation est assez faible ($r^2 = 0.46$). Cependant, on ne note pas d'hétéroscédasticité particulière.

