



HAL
open science

Développement de techniques de navigation en immersion virtuelle

Jean-Rémy Chardonnet

► **To cite this version:**

Jean-Rémy Chardonnet. Développement de techniques de navigation en immersion virtuelle : vers la personnalisation de l'interaction. Synthèse d'image et réalité virtuelle [cs.GR]. Université Polytechnique des Hauts-de-France, 2020. tel-03318786

HAL Id: tel-03318786

<https://theses.hal.science/tel-03318786>

Submitted on 10 Aug 2021

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.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

Mémoire

Présenté à : **L'Université Polytechnique des Hauts-de-France**

Par : **Jean-Rémy CHARDONNET**

Pour l'obtention de : **l'Habilitation à Diriger des Recherches**

Spécialité : **Automatique**

Développement de techniques de navigation en immersion virtuelle : vers la personnalisation de l'interaction

SOUTENUE LE 16 DÉCEMBRE 2020 DEVANT LE JURY

Mme Betty LEMAIRE-SEMAIL	Professeure des Universités Polytech'Lille/Univ. de Lille 1	Présidente
M. Daniel MESTRE	Directeur de Recherche Inst. des Sciences du Mouvement	Rapporteur
M. Malik MALLEM	Professeur des Universités Univ. d'Evry-Val-d'Essonne	Rapporteur
Mme Jivka OVTCHAROVA	Professeure Karlsruhe Inst. of Technology	Rapportrice
M. Frédéric MERIENNE	Professeur des Universités Arts et Métiers	Examineur
M. Andras KEMENY	Professeur Arts et Métiers/Renault	Examineur
M. Jean-Christophe POPIEUL	Professeur des Universités Univ. Poly. des Hauts-de-France	Promoteur

Remerciements

L'Habilitation à Diriger des Recherches est une étape à franchir et son aboutissement est le résultat d'un cocktail de rencontres heureuses avec beaucoup de personnes.

Je veux citer en premier lieu Abderrahmane Kheddar, mon directeur de thèse, qui m'a donné le goût, la passion même, de la recherche scientifique. Merci de m'avoir montré cette voie si riche!

Puis viennent Marie-Paule Cani et Jean-Claude Léon qui m'ont accueilli à l'INRIA Grenoble comme post-doctorant et m'ont conforté dans mon objectif de poursuivre une carrière académique. Merci infiniment pour votre soutien!

Ensuite vient Frédéric Merienne, directeur délégué de l'Institut Image à Arts et Métiers, qui m'a accueilli comme maître de conférences. Merci de la confiance que tu me témoignes depuis le début, de tout ce que nous avons pu faire ensemble jusqu'à maintenant et de toutes les rencontres qui en ont découlées! L'aventure continue!

Enfin viennent tous les membres du jury de ma soutenance d'HDR. Merci Betty Lemaire-Semail d'avoir présidé le jury. Merci Daniel Mestre, Malik Mallem et Jivka Ovtcharova d'avoir bien voulu rapporter ce manuscrit. Merci Andras Kemeny d'avoir été présent à ce jury; j'apprécie véritablement de collaborer avec toi sur bien des sujets, et ce n'est pas fini! Et merci Jean-Christophe Popieul d'avoir accepté d'être le promoteur de mon HDR et de m'avoir encouragé jusqu'au bout. La soutenance s'est déroulée dans des conditions particulières en raison de la crise sanitaire, aussi n'avons-nous pas pu fêter cette HDR comme il se doit autour d'un verre, mais ce n'est que partie remise (le verre, pas la soutenance :))!

Dans ce cocktail, viennent s'ajouter une multitude de personnes qui ont contribué à tous ces travaux. Merci à tous mes doctorants : Mohammad Ali Mirzaei, Paul George, Carolina Rengifo-Cadavid, Cédric Di Loreto, José Luis Dorado Collazos, Yuyang Wang, Quentin Jacquemin, Théo Combe et Guillaume Klein. Merci à tous les post-doctorants que j'ai suivis : Jérémy Plouzeau, Baris Aykent et Eric Marsh. Merci à tous mes étudiants, ils sont trop nombreux pour les citer mais ils ont contribué à ce que j'aime enseigner.

Merci à tous les membres de l'Institut Image : Frédéric, Ruding, Christophe, Fakhreddine, Damien, Florence, Laurent, Jean-Luc, Julien, Jérémy, Rémy, Thomas, Florian, Tamou, l'ensemble des doctorants, pour le travail d'équipe et la bonne humeur au quotidien. Merci à Géraldine pour ton efficacité sans pareille et sans qui l'Institut Image fonctionnerait beaucoup moins bien.

Merci au personnel d'Arts et Métiers, mon établissement, et AMValor, sa filiale de valorisation, pour la joie quotidienne apportée d'y travailler, la bonne ambiance au sein du réseau, les opportunités de travailler ensemble dans un même établissement tout en étant sur des sites différents.

Merci à toutes les personnes que j'ai croisées, aussi bien dans le milieu académique que le milieu industriel. Grâce à vous, j'ai découvert d'innombrables choses et c'est ce que j'aime dans

mon métier : rencontrer, découvrir et apprendre toujours plus. Je pense en particulier à toutes les personnes du Karlsruher Institut für Technologie en Allemagne, où j'ai passé une année en congé de recherche formidable, dans une équipe juste géniale. Vielen Dank!

Voilà, une fois le cocktail réalisé, ce n'est pas tout à fait terminé, il manque la petite touche finale, la cerise sur le gâteau. Ici, il y en a deux. D'une part, Juliette qui partage ma vie : merci pour ta patience infinie alors que je travaille souvent jusque tard le soir, les week-ends et même en vacances, pour ton aide et ton soutien dans les moments plus difficiles, mais aussi ta joie communicative et ta complicité à chaque instant. Et enfin, ma famille et tout particulièrement ma mère, sans qui je ne serais tout simplement pas là. 心より感謝しております。

Version française

La réalité virtuelle connaît un essor important depuis plusieurs années grâce à l'arrivée sur le marché de dispositifs de plus en plus accessibles (casques de réalité virtuelle, outils de développement). Cet essor se traduit par des applications de plus en plus nombreuses dans des domaines variés, allant de l'industrie à l'éducation, en passant par la santé, le patrimoine ou encore la simulation de conduite, avec des bénéfices tangibles pour les utilisateurs.

Cet engouement pour ces technologies est cependant freiné par des verrous scientifiques importants et qui font toujours l'objet de recherches intenses. D'une part, il est bien connu que l'immersion dans un environnement virtuel induit un mal-être caractéristique appelé cybermalaise, et à plus forte raison lors d'une tâche de navigation. D'autre part, la spécificité de la réalité virtuelle étant de permettre une interaction entre l'utilisateur et l'environnement virtuel, des interfaces et des méthodes d'interaction doivent être développées; or celles-ci s'avèrent difficiles à appréhender pour un utilisateur non averti. Enfin, bien que la réalité virtuelle est sensée être centrée sur l'utilisateur, les méthodes d'interaction sont développées pour être uniformes, quel que soit l'utilisateur, son profil, ses caractéristiques propres.

Ce manuscrit présente les travaux de recherche effectués depuis 2011 pour traiter ces problématiques. L'objectif principal de mes travaux est de proposer des approches innovantes pour interagir, et plus spécifiquement naviguer, en environnement virtuel de manière abordable et ergonomique tout en considérant leur influence sur l'utilisateur, pour tendre vers une personnalisation de l'interaction et plus généralement de la réalité virtuelle, nécessaire pour une meilleure diffusion de ces technologies.

Pour répondre à cet objectif, je présente d'abord dans ce manuscrit les études que nous avons réalisées sur les facteurs humains intervenant lors d'une tâche de navigation : perception des distances, transfert d'une expérience entre dispositifs de réalité virtuelle. Nous nous sommes ensuite davantage intéressés au cybermalaise : nous avons étudié différentes métriques permettant d'estimer le cybermalaise et proposé des moyens pour prédire son occurrence. Je présente ensuite plusieurs méthodes de navigation que nous avons proposées à partir de ces informations prenant en compte les contraintes d'intuitivité et de réduction du cybermalaise : nous avons considéré des méthodes naturelles, des méthodes artificielles ou informatiques et une méthode qualifiée de semi-automatique. L'apport de la multi-sensorialité est également exposée, à travers le développement d'un dispositif d'interaction à main nue et d'un cas d'usage industriel. Je présente enfin une première approche d'adaptation des méthodes de navigation à l'utilisateur, prélude à une personnalisation poussée et à une intelligence de la réalité virtuelle.

Je conclus le manuscrit en proposant quatre axes de perspectives de recherche qui sont : (i)

de proposer un mode de navigation dans lequel la notion d'avatar est redéfinie pour devenir une entité partiellement autonome et devenir de fait un compagnon virtuel de l'utilisateur pour l'aider à naviguer en environnement virtuel (navigation collaborative), (ii) d'approfondir l'intégration de la multi-sensorialité dans l'interaction en explorant la plupart des sens humains (retour haptique/vestibulaire, retour auditif et olfactif), (iii) d'appliquer les travaux effectués à la simulation de conduite (en particulier de véhicules autonomes), cette dernière étant très liée à la réalité virtuelle en termes de verrous scientifiques, et (iv) d'envisager, de manière beaucoup plus exploratoire, un mode d'interaction dit subconscient dans lequel les signaux cérébraux sont analysés pour déterminer la manière d'activer en immersion virtuelle les mêmes zones cérébrales que dans un rêve (ce qui permettrait par exemple de s'affranchir des problématiques de cybermalaise).

English version

Virtual reality is witnessing great interest for a couple of years, thanks to the availability on the market of more and more accessible technologies (head-mounted displays, development tools). This rise is materialized by more and more applications in various fields, from industry to education, through healthcare, cultural heritage or driving simulation, with tangible benefits for users.

This enthusiasm for these technologies is however curbed by major scientific issues that are still being the object of intensive research. On one hand, it is well known that virtual immersion is prone to a characteristic sickness, called cybersickness, especially while navigating. On the other hand, the specificity of virtual reality being to allow interaction between users and virtual environments, interaction devices and methods must be developed; however these are often complex for novice users. Last, though virtual reality is supposed to be user-centered, interaction methods are developed to be used uniformly, whatever the user, his/her profile, his/her own specificities.

This manuscript presents research work done since 2011 to address these issues. The main goal of my work is to propose innovative approaches to interact, and specifically navigate, within virtual environments in an affordant and ergonomic way while considering their influence on users, with the aim to tend toward customizing interaction and more generally virtual reality, which is necessary for a better diffusion of these technologies.

To fulfill this goal, I first present in this manuscript studies that we performed on human factors occurring during a navigation task : distance perception, transfer of an experience between virtual reality facilities. We then focused on cybersickness : we studied different metrics to estimate cybersickness and proposed means to predict its occurrence. I present then several navigation methods that we proposed following these studies taking into account intuitivity and cybersickness reduction constraints : we considered natural methods, artificial or computer-based methods and a method that is qualified as semi-automatic. The contribution of multi-sensory feedback is also exposed, through the development of a hands-on interaction device and an industrial use-case. Finally I present a first approach of adaptation of navigation methods to users, as a first step toward advanced customized and smart virtual reality.

I conclude the manuscript by drawing four research perspective axes that are : (i) to propose a navigation mode in which the notion of avatar is redefined to become a partially autonomous entity and thus become a virtual companion that helps the user navigating in the virtual environment (collaborative navigation), (ii) to deepen the integration of multi-sensory feedback by exploring most of the human senses (haptic/vestibular feedback, auditory and olfactory feedback), (iii) to apply the research work to driving simulation (especially of autonomous vehicles), the latter being closely linked to virtual reality in terms of scientific issues, and (iv) to consider, on a much more exploratory basis, an interaction mode called subconscious in which brain signals are analyzed to determine the way to activate the same cerebral zones in virtual immersion as in dreams (which would allow for example to get rid of cybersickness issues).

Table des matières

1	Curriculum Vitæ étendu	15
1.1	Etat civil et coordonnées	15
1.2	Formation universitaire	15
1.3	Carrière professionnelle	16
1.4	Activités d'enseignement	17
1.4.1	Cursus ingénieur	17
1.4.2	Master	18
1.4.3	Projet ACCENS	19
1.5	Activités de recherche	20
1.5.1	Encadrement de la recherche	20
1.5.2	Projets et contrats de recherche	25
1.5.3	Publications scientifiques	28
1.6	Animation scientifique	34
1.6.1	Groupe SIMCO	34
1.6.2	Institut Franco-Allemand pour l'Industrie du Futur	34
1.7	Rayonnement	35
1.7.1	Au niveau national	35
1.7.2	Au niveau international	36
1.7.3	Organisation d'évènements	39
1.8	Prix et distinctions	39
1.9	Autres activités	39
2	Contexte et positionnement	41
2.1	Problématiques et défis	42
2.2	Définitions	43
2.3	Objectifs et approche	44
2.4	Travaux effectués	45
3	Perception en environnement virtuel	49
3.1	Distances	49
3.1.1	Rôle des limites physiques du CAVE	50
3.1.2	Rôle de la navigation	52
3.1.3	Rôle du dispositif de visualisation et des modalités sensorielles	55
3.1.4	Discussion	58

3.2	Cybermalaise	58
3.2.1	Equilibre postural et cybermalaise	59
3.2.2	Modélisation et simulation	61
3.2.3	Validation expérimentale	65
3.2.4	Discussion et prédiction	69
3.3	Publications associées à ce chapitre	71
4	Navigation en environnement virtuel	73
4.1	Interactions naturelles	75
4.1.1	Interaction gestuelle	75
4.1.2	Interaction vocale - Speak-to-VR	77
4.1.3	Evaluation et discussion	80
4.2	Interactions informatiques	82
4.2.1	Space Scrolling	82
4.2.2	Avatar Follow	83
4.2.3	Head Lock	83
4.2.4	Evaluation	85
4.2.5	Discussion	86
4.3	Navigation semi-automatique	86
4.3.1	Planification de trajectoires	87
4.3.2	Principe de la navigation semi-automatique	88
4.3.3	Validation expérimentale	90
4.3.4	Discussion	91
4.4	Conclusion	91
4.5	Publications associées à ce chapitre	94
5	Intégration de la multi-sensorialité	95
5.1	HandNavigator et HaptiHand	95
5.1.1	HandNavigator	95
5.1.2	HaptiHand	98
5.2	Cas d'usage industriel : simulateur de travaux en hauteur	99
5.3	Conclusion	103
5.4	Publications associées à ce chapitre	104
6	Vers une réalité virtuelle personnalisée	105
6.1	Navigation adaptative	106
6.1.1	Loi de commande	106
6.1.2	Validation expérimentale	107
6.1.3	Discussion	110
6.2	Conclusion	111
6.3	Publications associées à ce chapitre	111
7	Conclusion et perspectives	113
7.1	Bilan du travail effectué	113
7.2	Perspectives	115
7.2.1	Axe 1 : Navigation collaborative	116
7.2.2	Axe 2 : Interaction multi-sensorielle	118
7.2.3	Axe 3 : Application à la simulation de conduite	119
7.2.4	Axe 4 : Interaction subconsciente	120
Annexe		123

A Summary in English	125
A.1 Context and positioning	125
A.1.1 Issues and challenges	126
A.1.2 Definitions	127
A.1.3 Objectives and approach	127
A.1.4 Executed works	128
A.2 Summary of the executed works	130
A.2.1 Perception in virtual environments	131
A.2.2 Navigation in virtual environments	136
A.2.3 Integration of multi-sensory feedback	141
A.2.4 Towards personalized virtual reality	144
A.3 Perspectives	146
A.3.1 Axis 1 : Collaborative navigation	147
A.3.2 Axis 2 : Multi-sensory interaction	149
A.3.3 Axis 3 : Application to driving simulation	150
A.3.4 Axis 4 : Subconscious interaction	151
 Bibliographie	 153

Table des figures

2.1	D'une approche classique de la navigation vers l'approche proposée.	45
2.2	Frise chronologique des travaux effectués avec correspondances aux chapitres du manuscrit, avec les étudiants impliqués dans les différents travaux (encadrés en noir = thèses, encadrés en bleu = post-doctorats, encadrés en rouge = master recherche et projets de recherche). Les travaux encadrés en pointillés sont ceux non exposés dans ce manuscrit car soit en cours de dépôt de brevet, soit en cours de développement. A noter que les travaux sur la simulation de conduite ne sont pas mentionnés ici car laissés dans les perspectives de recherche.	47
3.1	Environnement virtuel utilisé pour l'estimation des distances.	50
3.2	Placement des cônes virtuels et des sujets par rapport aux faces du CAVE (vue de dessus).	51
3.3	Restitution des distances : l'expérimentateur place le second cône à la position indiquée par le sujet, (gauche) dans la direction horizontale et (droite) dans la direction verticale.	51
3.4	Erreur moyenne en pourcentage d'estimation des distances pour les six conditions positions-directions.	52
3.5	Erreur moyenne en pourcentage d'estimation des distances pour les six conditions interface-directions (à gauche) et en regroupant les deux conditions horizontale et profondeur en une seule condition dite horizontale (à droite).	53
3.6	Navigation collaborative.	54
3.7	Paradigme de la marche imaginée : le sujet à gauche navigue entre les deux cônes, le temps est chronométré; arrivé au cône de droite, le sujet s'imagine marcher jusqu'au cône de gauche en se chronométrant.	54
3.8	A gauche : rendu dans le CAVE du théâtre Piccolo (245767 polygones). A droite : rendu dans le GearVR du même théâtre (82869 polygones).	57
3.9	Préférence des sièges et changements de préférences effectués entre les deux dispositifs. Les flèches orange indiquent les changements du CAVE au GearVR, les flèches grises les changements du GearVR au CAVE.	57
3.10	(a) Modèle de cinétose proposé par Oman. (b) Modèle dynamique du corps, des organes sensoriels et leurs liens avec le système nerveux central	60
3.11	Modèle dynamique de l'équilibre postural.	61
3.12	Modèle du pendule inversé et schéma de contrôle de l'équilibre postural.	61

3.13	Courbes de simulation de stabilité posturale dans les plans sagittal et frontal dans un état (A) marginalement stable et (B) stable.	63
3.14	Courbes de simulation de stabilité posturale dans le plan XY dans un état (A) marginalement stable et (B) stable.	63
3.15	A gauche, signaux dans le plan sagittal dans le domaine temporel. A droite, les mêmes signaux dans le domaine fréquentiel. (a) Etat marginalement stable, (b) état stable.	64
3.16	(a) Sujet passant l'expérience dans le CAVE. (b) Environnement virtuel avec le parcours à suivre et le mur texturé.	65
3.17	Courbes d'équilibre postural pour un sujet dans le plan XY. Les cercles représentent les surfaces de projection du centre de gravité.	66
3.18	Corrélation entre le niveau de cybermalaise et la variation de la surface de projection du centre de gravité : (a) SSQ_1 et ΔA_1 , (b) SSQ_2 et ΔA_2 , (c) SSQ_3 et ΔA_3	67
3.19	Evolution de la surface de projection du centre de gravité pour deux sujets.	68
3.20	Corrélation entre la forme de la surface de projection du centre de gravité et le niveau de cybermalaise.	68
3.21	Spectre du signal d'équilibre postural pour un sujet dans le plan sagittal.	68
3.22	Corrélation entre le niveau de cybermalaise et la variation des composantes fréquentielles : (a) SSQ_1 et Δf_1 , (b) SSQ_2 et Δf_2 , (c) SSQ_3 et Δf_3	69
3.23	Prédiction du cybermalaise dans une application de réalité virtuelle.	70
4.1	Commande de navigation créée à partir de l'analyse du signal de marche.	76
4.2	Exemple de signaux de marche humaine avec un pas et une distance du capteur (a) variables et (b) constants.	77
4.3	Commande de mouvement (c) générée à partir de l'analyse multirésolution par ondelettes (b) du signal (a).	78
4.4	Architecture de <i>Speak-to-VR</i>	79
4.5	Comparaison des scores du SSQ entre la technique à base de gestes et <i>Speak-to-VR</i>	81
4.6	A gauche, problème de la précision des écrans tactiles. A droite, principe du verrouillage de la direction du geste sur l'écran (en pointillés, le déplacement réel du doigt, la flèche rouge représente la direction du déplacement retenue).	83
4.7	Principe de <i>Avatar Follow</i> . La sphère représente la position de l'avatar, la tige dans la sphère indique la direction de déplacement.	84
4.8	Principe de <i>Head Lock</i>	84
4.9	Principe de <i>Head Lock</i> semi-automatique. La tolérance des mouvements de la tête est représentée par la zone bleue.	85
4.10	Parcours dans l'environnement virtuel.	85
4.11	De gauche à droite, équilibre postural, SSQ, intuitivité et présence.	86
4.12	A gauche : la navigation classique, par exemple avec un joystick, engendre une trajectoire irrégulière avec des mouvements non naturels pouvant mener à un cybermalaise. A droite : la navigation semi-automatique permet de s'affranchir de mouvements superflus en proposant une trajectoire optimisée lissée.	88
4.13	Exemples d'utilisation de la navigation semi-automatique pour naviguer du point A (position initiale de l'utilisateur) au point C (objectif final). Les points B et D sont des points intermédiaires dans l'environnement virtuel.	89
4.14	De gauche à droite, temps de réalisation de la tâche et équilibre postural, cybermalaise mesuré par le SSQ, retours des utilisateurs.	90

5.1	Cinématique de la main virtuelle. A gauche, le modèle complet non contraint comporte 6 degrés de liberté pour la main dans l'espace et 4 par doigt (le pouce possède 5 degrés de liberté). A droite, le modèle avec les degrés de liberté contrôlés - indiqués en orange foncé - et les degrés de liberté internes non contrôlés - indiqués en orange clair.	96
5.2	Différents prototypes initiaux du HandNavigator, appelés de gauche à droite V2, V3t et V3s.	96
5.3	Principe de la nouvelle version du HandNavigator.	97
5.4	Prototype de la nouvelle version du HandNavigator.	97
5.5	Plusieurs exemples de configurations des doigts pour saisir le même objet, en réel et en virtuel. Les parties vertes des doigts correspondent aux parties en contact avec l'objet virtuel.	98
5.6	A gauche : niveaux d'accélération observés sous vibrations selon le type d'amortissement choisi. A droite : spectre du signal vibratoire.	99
5.7	Maquette numérique du HaptiHand. La vue du haut montre la localisation des différents modules. La vue du bas montre le prototype avec (A) la version réelle réalisée en impression 3D.	100
5.8	Simulation d'assemblage de pièces avec le HaptiHand.	100
5.9	Plateforme dynamique simulant la nacelle élévatrice.	102
5.10	A gauche, simulateur physique avec plateforme dynamique, échelle et harnais. A droite, environnement virtuel de simulation.	102
5.11	Pour chacune des modalités : A gauche, SSQ. A droite, scores de réalisme perçu.	102
5.12	A. Valeurs de l'électroconductivité dermale pour chaque modalité. B. Evolution pour un sujet non-acrophobique. C. Evolution pour les participants ayant indiqué être acrophobiques. Dans B et C, les vibrations n'étaient pas activées. Les différentes phases sont (a) la montée de la nacelle, (b) la montée sur l'échelle, (c) la saisie de l'objet, (d) la fin de l'expérimentation.	103
6.1	Principe de la navigation adaptative.	106
6.2	A gauche, l'environnement virtuel de test. A droite, le parcours à suivre avec le point de départ en bleu et un point intermédiaire en rose.	108
6.3	A gauche, distance parcourue. A droite, quantité de déplacement des joysticks. Les mesures se font sur chaque axe de déplacement.	109
6.4	De gauche à droite, électroconductivité de la peau, stabilité posturale et Motion Sickness Dose Value. Les mesures se font sur chaque axe de déplacement.	109
6.5	Cybermalaise mesuré par le SSQ.	109
7.1	Relation de leader-suiveur dans une collaboration	117
A.1	From a classical approach of navigation toward the proposed approach.	128
A.2	Timeline of the executed works with the corresponding chapters in the French version of the manuscript, with the students involved in the different works (framed in black = Ph.D. theses, framed in blue = post-docs, framed in red = M.Sc. and research projects). Works framed in dashed line are not exposed in the manuscript because either patent pending, or in progress. Note that the work on driving simulation is not mentioned neither, as being left as research perspectives.	130
A.3	Left : Virtual cones and participants positions with respect to the screens of the CAVE (top view). Right : Mean percentage error of distance estimation for the six conditions positions-directions.	132

A.4	Mean percentage error of distance estimation for the six conditions interface-directions (left) and by grouping both horizontal and depth conditions into a single condition called horizontal (right).	133
A.5	Seat preference and preference changes done between both devices. Orange arrows show the changes from the CAVE to the GearVR while gray arrows show the changes from the GearVR to the CAVE.	133
A.6	Postural sway for one participant in an XY plane. Circles represent projection areas of the center of gravity.	135
A.7	Postural sway spectrum for one participant in the sagittal plane.	136
A.8	Comparison of SSQ scores between gesture-based and Speak-to-VR interaction techniques.	138
A.9	The Avatar Follow technique. The sphere represents the avatar position, the rod in the sphere represents the motion direction.	139
A.10	The Head Lock technique.	139
A.11	From left to right, postural sway, SSQ scores, intuitivity and presence.	140
A.12	From left to right, task completion time and postural sway, cybersickness as measured by the SSQ, user feedback.	141
A.13	Left : The HandNavigator. Right : Several examples of finger configuration to grasp the same object, in the real world and in virtual reality. Green parts correspond to parts colliding with the virtual object.	143
A.14	Part assembly simulation with the HaptiHand.	143
A.15	Left : Simulator with the dynamic platform. Right : Virtual environment.	144
A.16	A. Skin conductance values for each modality. B. Evolution for a non-acrophobic participant. C. Evolution for acrophobic participants. The different phases are : (a) rise of the aerial device, (b) ladder climbing, (c) object catch, (d) end of the experiment.	145
A.17	From left to right, skin conductance, postural sway and Motion Sickness Dose Value. Measurements are done along each motion direction.	146
A.18	Leader-follower relationship in a collaborative task	148

1.1 Etat civil et coordonnées

Nom et prénom CHARDONNET Jean-Rémy
Date et lieu de naissance 24 mars 1983 à Suresnes (92)

Coordonnées professionnelles

Laboratoire d'Ingénierie des Systèmes Physiques et Numériques (LISPEN), EA 7515
Institut Image / Arts et Métiers
2 rue Thomas Dumorey, 71100 Chalon-sur-Saône, France
Téléphone : +33 3 85 90 98 73
Courriel : jean-remy.chardonnet@ensam.eu
Site Internet de l'Institut Image : <http://institutimage.ensam.eu/>
Site personnel : <http://okunimiyaki.pagesperso-orange.fr/>

1.2 Formation universitaire

Juin 2009 : Diplôme de Doctorat en Robotique

- Université de Montpellier II
- Laboratoire d'Informatique, de Robotique et de Microélectronique de Montpellier CNRS UMR5506
- French-Japanese Joint Robotics Laboratory CNRS UMI3219

Sujet : Modèle Dynamique Temps-Réel pour l'Animation d'Objets Poly-Articulés dans les Environnements Contraints, Prise en Compte des Contacts Frottants et des Déformations Locales : Application en Robotique Humanoïde et aux Avatars Virtuels

Jury :

Mme Marie-Paule CANI	Professeur à l'INPG, Grenoble	Présidente
M. François PIERROT	Directeur de recherche au CNRS	Directeur de thèse
M. Abderrahmane KHEDDAR	Directeur de recherche au CNRS	Directeur de thèse
M. Martin BUSS	Professeur à TUM, Munich, Allemagne	Rapporteur
M. Fethi BEN OUEZDOU	Professeur à l'Université de Versailles	Rapporteur
M. Eiichi YOSHIDA	Senior Researcher à l'AIST, Japon	Examineur
M. André CROSNIER	Professeur à l'Université de Montpellier II	Examineur

Juin 2005 : Diplôme de Master Recherche en Mécatronique et diplôme d'Ingénieur

- Ecole Nationale Supérieure de Mécanique et de Microtechnique, Besançon
- French-Japanese Joint Robotics Laboratory CNRS UMI3219, Tsukuba, Japon

Sujet : Simulateur dynamique temps réel pour la robotique humanoïde avec prise en compte des contacts frottants

1.3 Carrière professionnelle

Septembre 2019-Septembre 2020 : Congé de Recherche ou Conversion Thématique

- Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, Allemagne
- Institute for Information Management in Engineering (Institut für Informationsmanagement im Ingenieurwesen - IMI)

Depuis Septembre 2011 : Maître de conférences classe normale, 61e section

- Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers
- Institut Image, Chalon-sur-Saône
- Laboratoire d'Electronique, Informatique et Image (CNRS UMR6306, jusqu'en 2017) puis Laboratoire d'Ingénierie des Systèmes Physiques et Numériques (EA7515, depuis 2018)

Septembre 2010-Août 2011 : Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche

- Génie Industriel - Grenoble INP
- G-SCOP - Laboratoire des Sciences pour la Conception, l'Optimisation et la Production (CNRS UMR5272)

Mai-Août 2010 : Ingénieur de développement sur le projet ANR ROMMA

- UJF Filiale
- Laboratoire Jean Kuntzmann (CNRS UMR5224) - Equipe-projet Imagine

Avril 2009-Avril 2010 : Ingénieur expert sur le projet HandNavigator

- INRIA Rhône-Alpes
- Laboratoire Jean Kuntzmann (CNRS UMR5224) - Equipe-projet Imagine

1.4 Activités d'enseignement

Après ma thèse de doctorat en 2009 et durant ma période en tant qu'ingénieur expert à l'INRIA Rhône-Alpes, je suis intervenu en tant que vacataire à l'ENSE3 - Grenoble INP pour encadrer des projets d'étudiants. Je suis ensuite intervenu en tant que demi-ATER à Génie Industriel - Grenoble INP de 2010 à 2011 dans des TP de mécanique générale et dans des cours (CM, TD et TP) d'informatique industrielle en 1^e année du cursus ingénieur. Pour la partie informatique industrielle, j'ai eu la responsabilité du module d'enseignement (programme des cours, planification des séances, recrutement des intervenants).

Depuis mon arrivée à Arts et Métiers, j'interviens dans toutes les années du cursus ingénieur, ainsi qu'en master. Mes interventions se font principalement au campus Arts et Métiers de Cluny ainsi qu'à l'Institut Image, mais certaines interventions se font également dans d'autres campus Arts et Métiers de France. Lorsque cela n'est pas précisé, les enseignements sont réalisés au campus de Cluny.

1.4.1 Cursus ingénieur

Commande et modélisation de systèmes - depuis 2011

Je suis responsable de ce module de 2^e année qui compte 20h (12h de TD et 8h de TP) de face à face pédagogique par étudiant pour en moyenne 72 étudiants par semestre répartis en trois groupes. Ce module est décomposé en deux parties. La première partie (8h de TD et 8h de TP) concerne la commande de systèmes échantillonnés et s'intéresse au théorème de Shannon, la transformée en Z, le choix du pas d'échantillonnage, l'identification de paramètres par rapport à une fonction de transfert de référence, l'erreur statique/dynamique et la stabilité des systèmes, ainsi qu'à la synthèse de quelques correcteurs de base (PID numérique, méthode de Zdan et une courte introduction au correcteur RST). Une application est réalisée en TP sous Scilab autour de l'asservissement en position d'une bille sur un rail. La seconde partie (4h de TD) est une introduction à la représentation d'état avec quelques éléments sur les critères de stabilité, la gouvernabilité et l'observabilité.

Machines et systèmes de production, optimisation des machines et des systèmes énergétiques - 2011-2014

Ce module de 2^e année comptait 12h (4h de TD et 8h de TP) de face à face pédagogique par étudiant pour le même nombre total d'étudiants que dans le module précédent. Il s'agissait de faire une introduction aux automates programmables et aux réseaux. Les travaux pratiques mettaient en œuvre la reproduction du fonctionnement par automate d'une chaufferie.

Filière ingénierie numérique - 2014-2019

Ce module de 1^e année était une sensibilisation aux outils numériques de l'ingénieur et plus particulièrement aux outils de réalité virtuelle/réalité augmentée. Ce module était principalement constitué de projets encadrés et de visites d'entreprises. L'effectif était de 24 étudiants par année avec un volume horaire de 28h.

Expertise usine du futur - depuis 2017

Cette expertise de 3^e année du campus Arts et Métiers de Metz a pour objectif de spécialiser les étudiants aux problématiques de l'usine du futur. Dans ce cadre, j'interviens dans le module

réalité virtuelle avec un cours de 6h sur la numérisation 3D (concepts, technologies, application pratique). L'effectif est d'environ 6 étudiants.

Projets métiers - depuis 2011

J'encadre chaque année des projets de 2^e année avec pour objectif d'avoir un démonstrateur technologique. Les projets passés ont consisté au développement d'une interface de navigation en environnement virtuel, ainsi qu'une application de réalité augmentée pour l'aide à l'usinage (prise en main et maintenance des machines-outils à commande numérique).

1.4.2 Master

Master Management des Technologies Interactives 3D

Responsabilité - 2013-2019 et depuis 2020 J'ai été responsable du master Ingénierie Numérique-Maquette Numérique et Visualisation 3D (IN/MN-V3D), appelé Management des Technologies Interactives 3D (MTI3D) depuis 2016. A ce titre, j'ai eu en charge l'organisation de la maquette pédagogique, le recrutement des intervenants, celui des étudiants, sa promotion, les relations avec les entreprises et l'organisation des stages. Ce master, jusqu'en 2016, était un master 2 recherche formant les étudiants aux techniques et usages de l'immersion virtuelle. Depuis 2017, ce master se fait sur deux années, avec des étudiants en master 1 venant de cursus de licence, et en master 2 venant soit du master 1, soit de 2^e année du cursus ingénieur Arts et Métiers, soit d'autres formations de niveau master 1. La composante recherche n'est présente qu'en master 2, avec obligation pour les étudiants d'écrire et soumettre un article scientifique à l'issue de leur stage de fin d'études.

Numérisation 3D - depuis 2016 Ce cours de master 1 de 6h présente les concepts et les technologies de numérisation 3D. Une application pratique est réalisée par les étudiants pour appréhender la chaîne numérique depuis la numérisation jusqu'à la maquette virtuelle.

Systèmes interactifs - depuis 2011 Ce cours de master 2 de 6h a pour objectif de présenter l'interaction homme-machine sous un autre angle que celui de la réalité virtuelle, en s'appuyant sur la robotique. J'explique les enjeux scientifiques et technologies de l'interaction homme-machine.

Expérimentations scientifiques - depuis 2017 Ce cours de master 2 de 24h a pour objectif d'initier les étudiants au travail de recherche scientifique. Plusieurs sujets de recherche leur sont proposés. Les étudiants doivent traiter un sujet dans sa totalité (expression de la problématique scientifique, recherche bibliographique, proposition d'une approche et implantation, réalisation d'une expérimentation scientifique, analyse des résultats) et présenter les résultats sous forme de poster et oralement en anglais, en condition mini-conférence scientifique.

Défi Chal'enge - depuis 2014 J'ai créé en 2014 le défi Chal'enge¹, un défi lancé aux étudiants et aux entreprises de la région Bourgogne-Franche-Comté dont les objectifs sont multiples :

1. Promouvoir la réalité virtuelle/réalité augmentée aux entreprises de la région, quels que soient leur domaine et leur taille, par la réalisation d'une preuve de concept
2. Développer les partenariats entre l'Institut Image et les entreprises (partenariat public/privé)

1. <http://challengeam.institutimage.fr/>

3. Stimuler l'innovation des entreprises et créer des opportunités de marché pour les entreprises
4. Promouvoir l'excellence des étudiants du master
5. Initier les étudiants aux missions qui leur seront confiées dans le futur

Tous les étudiants du master (master 1 et master 2) sont impliqués dans ce défi. La particularité de ce défi réside en ce que les étudiants ont la charge complète du défi : démarchage des entreprises, visite de l'Institut Image et présentation des compétences et des moyens, définition du cahier des charges et réalisation d'une preuve de concept durant 2 semaines à temps plein. A la fin du défi, les étudiants présentent sous forme de pitch de deux minutes leur projet, en présence des élus locaux, des entreprises et des médias, avec démonstrations. Des prix sont attribués aux meilleurs projets. Chaque année, certains projets donnent lieu soit à des stages pour les étudiants, soit des embauches à l'issue du cursus, soit à des partenariats avec l'Institut Image ou encore la création de start-ups. Le défi Chal'enge se tient en partenariat avec Nicéphore Cité et le Grand Chalon. Depuis 2017, l'IUT de Chalon-sur-Saône et le lycée Mathias de Chalon-sur-Saône participent au défi au travers de la licence professionnelle TASI et le BTS SIO respectivement. Enfin, depuis 2019, le CFAI 21-71 de l'UIMM et le CNAM Bourgogne participent au défi au travers de la licence informatique du CNAM.

Depuis 2014, plus de 40 entreprises de la région Bourgogne-Franche-Comté ont participé au défi.

Master Knowledge Integration in Mechanical Production

Depuis 2011, j'interviens sur 3h de cours en anglais sur le campus Arts et Métiers de Paris auprès d'étudiants dont la plupart sont étrangers. Le cours porte sur l'utilisation de systèmes interactifs dans l'industrie.

1.4.3 Projet ACCENS

J'ai participé à un projet porté par l'Institut de Conseil et d'Innovation en Formations Technologiques (ICIFTech) d'Arts et Métiers sur l'accompagnement des enseignants à l'utilisation d'outils de réalité virtuelle pour l'enseignement (ACCENS)². L'objectif de ce projet (2017-2019), était la création d'espaces physiques dans différents campus d'Arts et Métiers permettant aux enseignants l'innovation pédagogique pour la formation ingénieur. Les moyens mis en œuvre ont été la mise à disposition de technologies de réalité virtuelle (casques immersifs, tables interactives), mais aussi la création de contenus pédagogiques associés immersifs permettant de faciliter l'apprentissage. Dans ce cadre, des applications de réalité virtuelle et de réalité augmentée ont été réalisées pour des cours de construction mécanique et testées auprès d'un panel d'une centaine d'étudiants volontaires d'Arts et Métiers pour valider l'intérêt de ces technologies pour l'apprentissage, avec des premiers résultats encourageants. Des modules de formation des enseignants à ces technologies ont également été réalisés. La finalité de ce projet est de positionner Arts et Métiers comme établissement d'enseignement innovant dans la pédagogie.

Période : 2017-2019

Type de projet : Ministère de l'Enseignement, la Recherche et l'Innovation

Budget : 70 000 Euros

Nombre de personnes impliquées Arts et Métiers : 25 réparties dans 4 campus et 2 instituts

2. <https://iciftech.ensam.eu/le-projet-pedagogique-accens>

1.5 Activités de recherche

Depuis la fin de ma thèse jusqu'à mon recrutement en tant que maître de conférences en 2011, ma thématique de recherche a évolué. Lors de ma thèse, j'ai développé un simulateur temps réel interactif pour objets poly-articulés dans lesquels j'ai implanté des modèles dynamiques et un dispositif d'interaction à retour d'efforts. L'objectif était alors d'obtenir une qualité de simulation permettant la validation interactive de lois de commande sur robots humanoïdes avant essais réels. En arrivant à l'INRIA Rhône-Alpes, ma tâche a consisté à concevoir un dispositif de préhension d'objets virtuels à main nue avec retour tactile. Se sont alors posées les questions d'ergonomie, d'interactions homme-machine. J'ai ensuite intégré en 2011 l'Institut Image d'Arts et Métiers en tant que maître de conférences, en orientant davantage ma recherche sur l'interaction en réalité virtuelle, avec des questions portant sur l'intuitivité de l'interaction, la réduction du cybermalaise et la personnalisation de l'interaction.

Ma thématique de recherche a ainsi varié de manière importante vers un domaine que je connaissais moins en arrivant à Arts et Métiers puisque les problématiques scientifiques dépassent largement l'ingénierie et couvrent des aspects liés à la psycho-neuro-physiologie. Cependant dès mon arrivée, j'ai pu co-encadrer une thèse de doctorat sur la problématique de la navigation, ce qui m'a permis de m'intégrer vite dans l'équipe.

1.5.1 Encadrement de la recherche

Je présente ici les encadrements effectués depuis mon arrivée à Arts et Métiers.

Stages de niveau master

J'ai co-encadré 26 étudiants de niveau master : 3 en stage de fin d'études d'autres établissements et 23 en master, dont 2 issus de masters étrangers et 1 issu d'un autre établissement.

1. **Alexandre GANNIER**, stagiaire Master recherche SAR Arts et Métiers, 2019
Simulateur de cystoscopie en réalité virtuelle
Responsable : N. Mechbal (PIMM). Encadrement : J.-R. Chardonnet (encadrement : 50%), N. Mechbal (PIMM)
Partenariat : PIMM
2. **Baorui LUO**, stagiaire 5e année INSA Lyon, 2019
Simulateur coMtactS
Responsable : C. Bénézet (IFCE). Encadrement : J.-R. Chardonnet (encadrement : 50%), C. Bénézet (IFCE)
Partenariat : Institut Français du Cheval et de l'Equitation (IFCE)
3. **Damien MAZEAS**, stagiaire Master recherche MTI3D-IN Arts et Métiers, 2019
Réalité virtuelle pour l'aide à la conception de transports urbains autonomes
Responsable : S. Stadler (TUMCreate, Singapour). Encadrement : J.-R. Chardonnet (encadrement : 50%), S. Stadler (TUMCreate, Singapour)
Partenariat : TUMCreate (Singapour)
4. **Junhui HE**, stagiaire 3e année ENSEA, 2018
Interaction multi-sensorielle en réalité augmentée
Responsable : F. Ababsa. Encadrement : J.-R. Chardonnet (encadrement : 50%), F. Ababsa
5. **Louis JEANNIN**, stagiaire Master recherche MTI3D-IN Arts et Métiers, 2018
Réalité virtuelle/réalité augmentée pour l'enseignement

- Responsable : F. Danglade. Encadrement : J.-R. Chardonnet (encadrement : 20%), F. Danglade
6. **Jérémi BRUDER**, stagiaire Master recherche MTI3D-IN Arts et Métiers, 2018
Simulation pour l'étude des comportements de supporteurs de foot en réalité virtuelle
Responsable : R. Laurin (uB, Psy-DREPI). Encadrement : J.-R. Chardonnet (encadrement : 50%), R. Laurin (uB, Psy-DREPI)
Partenariat : Psy-DREPI
 7. **David GONCALVES**, stagiaire Master recherche MTI3D-IN Arts et Métiers, 2018
Simulateur d'apprentissages de gestes
Responsable : J.-R. Chardonnet. Encadrement : J.-R. Chardonnet (encadrement : 100%)
Partenariat : Virtuelis (Canada)
 8. **Gaëtan SALA**, stagiaire Master recherche MTI3D-IN Arts et Métiers, 2018
Comparaison réel/virtuel dans la simulation de travaux en hauteur
Responsable : J.-R. Chardonnet. Encadrement : J.-R. Chardonnet (encadrement : 60%), F. Merienne, A. Rousseau (Enedis Bourgogne)
Partenariat : Enedis Bourgogne
 9. **Julien BRISSONNET**, stagiaire Master Image et Intelligence Artificielle Université de Bourgogne, 2017
Complétion de modèles numériques 3D en immersion virtuelle
Responsable : F. Jaillet (LIRIS). Encadrement : J.-R. Chardonnet (encadrement : 50%), F. Jaillet (LIRIS)
Partenariat : LIRIS
 10. **Cédric DI LORETO**, stagiaire Master recherche MTI3D-IN Arts et Métiers, 2017
Simulateur de travail en hauteur
Responsable : J.-R. Chardonnet. Encadrement : J.-R. Chardonnet (encadrement : 80%), A. Rousseau (Enedis Bourgogne)
Partenariat : Enedis Bourgogne
 11. **Stefroy PINTO**, stagiaire Master recherche MTI3D-IN Arts et Métiers, 2017
Anorexie Mental et Corps : Evaluation et modification par la réalité virtuelle des représentations mentales corporelles
Responsable : R. M. Baños Rivera (LABPSITEC, Espagne). Encadrement : J.-R. Chardonnet (encadrement : 30%), R. M. Baños Rivera (LABPSITEC, Espagne)
Partenariat : LABPSITEC (Espagne)
 12. **Bornia NAKOUA**, stagiaire Master recherche IN (MN-V3D) Arts et Métiers, 2016
Visite virtuelle d'un site touristique
Responsable : J.-R. Chardonnet. Encadrement : J.-R. Chardonnet (encadrement : 100%)
 13. **Thibault PORSSUT**, stagiaire Master recherche IN (MN-V3D) Arts et Métiers, 2016
Tâche collaborative entre CAVE 2 et HTC Vive
Responsable : J.-R. Chardonnet. Encadrement : J.-R. Chardonnet (encadrement : 100%)
 14. **Jérôme DOLAT**, stagiaire 5e année UTBM, 2016
Modelage bi-manuel d'objets virtuels
Responsable : J.-R. Chardonnet. Encadrement : J.-R. Chardonnet (encadrement : 50%), F. Faure (UJF/INRIA)
Partenariat : INRIA Grenoble (équipe Imagine)

15. **Farzana ALIBAY**, stagiaire Master recherche IN (MN-V3D) Arts et Métiers, 2016
Développement d'une interface gestuelle pour la conception en réalité virtuelle
Responsable : M. Kavakli (Macquarie University). Encadrement : J.-R. Chardonnet (encadrement : 50%), M. Kavakli
Partenariat : Macquarie University (Australie)
16. **Cherif LAAGUIDI**, stagiaire Master recherche IN (MN-V3D) Arts et Métiers, 2016
Immersion virtuelle multi-sensorielle avec itérations autour d'une maquette numérique d'un système de direction automobile
Responsable : J.-R. Chardonnet. Encadrement : J.-R. Chardonnet (encadrement : 50%), J. Ray (JTEKT)
Partenariat : JTEKT
17. **Irwan SHOLEH**, stagiaire Master Université de Brawijaya (Indonésie), 2015
Visualisation de données géologiques en réalité virtuelle
Responsable : F. Merienne. Encadrement : J.-R. Chardonnet (encadrement : 50%), F. Merienne
18. **Duy Cuong HOANG**, stagiaire Master recherche IN (MN-V3D) Arts et Métiers, 2015
Toucher virtuel de patrimoine numérisé
Responsable : J.-R. Chardonnet. Encadrement : J.-R. Chardonnet (encadrement : 70%), J. Rollier, R. Lou
19. **Hamza MESSLAHA**, stagiaire Master recherche IN (MN-V3D) Arts et Métiers, 2015
Interface haptique pour un cockpit virtuel de véhicule
Responsable : J.-R. Chardonnet. Encadrement : J.-R. Chardonnet (encadrement : 50%), S. Garbaya
20. **Geoffroy CLOTEAUX**, stagiaire Master recherche IN (MN-V3D) Arts et Métiers, 2015
Apport du suivi de regard pour l'interaction 3D
Responsable : F. Merienne. Encadrement : J.-R. Chardonnet (encadrement : 40%), F. Merienne, S. Garbaya
Partenariat : Suricog
21. **Mathieu TOURNADRE**, stagiaire Master recherche IN (MN-V3D) Arts et Métiers, 2014
Simulateur d'attelage équestre
Responsable : J.-R. Chardonnet. Encadrement : J.-R. Chardonnet (encadrement : 50%), S. Garbaya, A. Mouret Lafage (IFCE)
Partenariat : Institut Français du Cheval et de l'Equitation (IFCE)
22. **Adrien FONNET**, stagiaire Master recherche IN (MN-V3D) Arts et Métiers, 2014
Visualisation collaborative
Responsable : J.-R. Chardonnet. Encadrement : J.-R. Chardonnet (encadrement : 70%), L. Pastor (URJC, Espagne)
Partenariat : Universidad Rey Juan Carlos (Espagne)
23. **Miguel RAMOS GARCIA**, stagiaire Master réalité virtuelle Universidad Rey Juan Carlos (Espagne), 2013
Inter-connexion de CAVEs distants
Responsable : L. Pastor (URJC, Espagne). Encadrement : J.-R. Chardonnet (encadrement : 40%), L. Pastor (URJC, Espagne)
Partenariat : Universidad Rey Juan Carlos (Espagne)

24. **Jean-Rémi GAUDIN**, stagiaire Master recherche IN (MN-V3D) Arts et Métiers, 2013
Modélisation numérique au service d'un chantier de construction et de restauration navale
 Responsable : J.-R. Chardonnet. Encadrement : J.-R. Chardonnet (100%)
 Partenariat : Les Charpentiers Réunis Méditerranée
25. **Fatima-Ezzahra DIRAA**, stagiaire Master recherche IN (MN-V3D) Arts et Métiers, 2013
Interface haptique pour un cockpit virtuel de véhicule
 Responsable : J.-R. Chardonnet. Encadrement : J.-R. Chardonnet (encadrement : 50%), F. Merienne
26. **Zhixiang Yu**, stagiaire Master recherche IN (MN-V3D) Arts et Métiers, 2012
Evaluation du HandNavigator
 Responsable : J.-R. Chardonnet. Encadrement : J.-R. Chardonnet (encadrement : 70%), J.-C. Léon (LJK)
 Partenariat : INRIA Grenoble, LJK, Gipsa-lab

Thèses de doctorat

J'ai co-encadré 3 thèses de doctorat soutenues et je co-encadre actuellement 6 thèses de doctorat.

Thèses soutenues

1. **Mohammad Ali MIRZAEI** (FUI Callisto, soutenu le 16 décembre 2014) (co-encadrement : 60%)

Sujet : Influence des techniques d'interactions sur le mal de simulateur dans les environnements virtuels : estimation et prédiction

Spécialité : Informatique-traitement du signal

Jury :

M. Luis PASTOR	Professeur URJC, Madrid, Espagne	Président
M. Daniel MESTRE	Directeur de recherche Univ. de la Méditerranée	Rapporteur
M. Guillaume MOREAU	Professeur des universités Ecole Centrale de Nantes	Rapporteur
M. Frédéric MERIENNE	Professeur des universités Arts et Métiers	Directeur (40%)
M. Jean-Rémy CHARDONNET	Maître de conférences Arts et Métiers	Co-encadrant
M. Trino BELTRAN	Directeur R&D Innovation Bouygues	Invité
M. Christian PERE		Invité

2. **Paul GEORGE** (CIFRE Renault, soutenu le 17 juin 2016) (co-encadrement : 30%)

Sujet : Interactions nomades en environnement virtuel immersif pour des applications de revue de projet numérique

Spécialité : Informatique

Jury :

M. Philippe FUCHS	Professeur Mines ParisTech	Président
M. Daniel MESTRE	Directeur de recherche Université de la Méditerranée	Rapporteur
M. Jean-Christophe POPIEUL	Professeur des universités Univ. de Valenciennes	Rapporteur
M. Florent COLOMBET	Docteur Theoris	Examineur
M. Frédéric MERIENNE	Professeur des universités Arts et Métiers	Directeur (25%)
M. Andras KEMENY	Professeur CRVSI, Renault	Co-directeur (25%)
Mme Indira THOUVENIN	Professeur Univ. de Technologie de Compiègne	Co-encadrante (20%)
M. Jean-Rémy CHARDONNET	Maître de conférences Arts et Métiers	Co-encadrant

3. **Carolina RENGIFO CADAVID** (CIFRE Renault, soutenu le 20 juin 2020) (co-encadrement : 40%)

Sujet : Contrôle plateforme pour la validation du véhicule autonome sur simulateur dynamique à hautes performances

Spécialité : Automatique

Jury :

M. Daniel MESTRE	Directeur de Recherche Institut des Sciences du Mouvement	Président
M. Jean-Christophe POPIEUL	Professeur des universités Univ. Poly. des Hauts-de-France	Rapporteur
M. Stéphane ESPIE	Directeur de recherche Université Gustave Eiffel	Rapporteur
M. Andras KEMENY	Professeur Renault	Directeur (30%)
M. Jean-Rémy CHARDONNET	Maître de conférences Arts et Métiers	Co-encadrant
M. Damien PAILLOT	Maître de conférences Université de Bourgogne	Co-encadrant (30%)
M. Hakim MOHELLEBI	Ingénieur de recherche Renault	Invité
M. Hans-Peter SCHOENER	Ingénieur de recherche Driving Simulation Association	Invité

Thèses en cours

1. **José Luis DORADO COLLAZOS** (co-tutelle avec Uni. Andes (Colombie), soutenance prévue en décembre 2020) (co-encadrement : 25%)

Sujet : Visualisation avancée pour les villes intelligentes

Encadrement : F. Merienne (directeur, 25%), J.-R. Chardonnet (co-encadrant, 25%), P. Figueroa (Uni. Andes, Colombie) (co-encadrant, 25%), T. Hernandez (Uni. Andes, Colombie) (co-encadrant, 25%)

2. **Yuyang WANG** (China Scholarship Council, soutenance prévue en septembre 2021) (co-encadrement : 70%)

Sujet : Navigation intelligente en environnement virtuel

Encadrement : F. Merienne (directeur, 30%), J.-R. Chardonnet (co-encadrant, 70%)

3. **Cédric DI LORETO** (Fondation A&M, soutenance prévue en décembre 2020) (co-encadrement : 35%)
Sujet : Evaluation cognitive personnalisée pour la sécurité des occupants d'un véhicule autonome, étude des interactions entre réalité virtuelle et sollicitation dynamique réelle
Encadrement : F. Merienne (directeur, 30%), J.-R. Chardonnet (co-encadrant, 35%), B. Sandoz (IBHGC, Arts et Métiers) (co-encadrant, 35%)
4. **Quentin JACQUEMIN** (réseau santé A&M, soutenance prévue en décembre 2020) (co-encadrement : 30%)
Sujet : Cystoscopie robotisée
Encadrement : N. Mechbal (PIMM, Arts et Métiers) (directeur, 40%), J.-R. Chardonnet (co-encadrant, 30%), L. Berthe (PIMM, CNRS) (co-encadrant, 30%)
5. **Théo COMBE** (co-tutelle avec KIT (Allemagne), soutenance prévue en septembre 2022) (co-encadrement : 30%)
Sujet : Expérience utilisateur en immersion virtuelle : étude de facteurs d'échelle pour une perception similaire dans un CAVE et un casque immersif
Encadrement : F. Merienne (directeur, 40%), J.-R. Chardonnet (co-encadrant, 30%), J. Ovtcharova (KIT, Allemagne) (co-encadrant, 30%)
6. **Guillaume KLEIN** (soutenance prévue en septembre 2023) (co-encadrement : 40%)
Sujet : Aide aux opérations de maintenance par la réalité augmentée
Encadrement : F. Merienne (directeur, 30%), J.-R. Chardonnet (co-encadrant, 40%), J. Plouzeau (AMValor) (co-encadrant, 30%)

Responsabilités de post-doctorants

J'ai eu la responsabilité de 3 post-doctorants.

1. **Jérémy PLOUZEAU**, 2017
Navigation pilotée par des indicateurs de mal de simulation en environnement virtuel
Cadre : Plan d'Actions Recherche et Innovation Région Bourgogne
2. **Baris AYKENT**, 2014
Interaction avec un cockpit virtuel en simulation de conduite avec prise en compte du mal de simulation
Cadre : FUI SI²M
3. **William Eric MARSH**, 2013-2014
Perception de l'échelle 1
Cadre : FUI Callisto

1.5.2 Projets et contrats de recherche

Depuis mon arrivée à Arts et Métiers, j'ai participé au montage et à la réalisation de 11 projets et contrats de recherche pour un budget total d'environ 1 500 000 Euros.

TEAM-sports (2020-)

Type de projet : ANR

Partenaires : Université de Bourgogne (porteur), Arts et Métiers, Université de Rouen Normandie, CEA List, Université de Californie Santa Barbara, Fédérations Françaises de Rugby, de Basket-Ball, de Handball et de Volleyball

Budget global : 1 119 000 Euros

Budget Arts et Métiers : 119 000 Euros

Rôle dans le projet : Responsable de projet Arts et Métiers

Nombre de personnes impliquées Arts et Métiers : 3

Objectifs : Le but de ce projet est d'améliorer les performances des joueurs sportifs professionnels, en particulier par l'utilisation de la réalité virtuelle; dans ce contexte, il s'agit d'étudier les paramètres en réalité virtuelle permettant d'optimiser la mise en situation de stress.

Co-simulation (2019-)

Type de projet : Projet structurant Carnot ARTS

Partenaires : LAMIH, Arts et Métiers

Budget global : 100 000 Euros

Budget Arts et Métiers : 50 000 Euros

Rôle dans le projet : Co-porteur du projet

Nombre de personnes impliquées Arts et Métiers : 3

Objectifs : Le but de ce projet est de mettre en réseau le simulateur de conduite SAAM de l'Institut Image et le simulateur de conduite SHERPA du LAMIH pour réaliser de la co-simulation de conduite dans des situations variées.

ARPAN (Approche Responsable aux Passages à Niveau) (2018-2019)

Type de projet : Contrat direct avec SNCF

Partenaires : SNCF, Arts et Métiers, ECF

Budget Arts et Métiers : 240 000 Euros

Rôle dans le projet : Responsable de projet Arts et Métiers

Nombre de personnes impliquées Arts et Métiers : 4

Objectifs : Le but de ce projet est d'étudier le comportement des conducteurs de véhicules dans des situations de franchissement de passages à niveau.

coMtactS (Simulateur interactif de communication par les guides) (2016-2018)

Type de projet : Conseil scientifique IFCE

Partenaires : IFCE (porteur), Arts et Métiers (co-porteur), LIRDEF

Budget Arts et Métiers : 50 000 Euros

Rôle dans le projet : Co-porteur du projet et responsable scientifique

Nombre de personnes impliquées Arts et Métiers : 3

Nombre de publications : 1

Objectifs : Le but de ce projet est de réaliser un simulateur multi-sensoriel d'apprentissage des gestes de conduite d'attelage équestre.

Défi CVC (Conception Virtuelle et Collaborative) (2015-)

Type de projet : Institut Carnot

Partenaires : Carnot ARTS, Carnot MICA, Carnot Cetim, Carnot LSI, Carnot TN@UPSaclay

Rôle dans le projet : Participant

Nombre de personnes impliquées Arts et Métiers : 5

Objectifs : Le but de ce projet est de promouvoir et développer le marché de la réalité virtuelle et réalité augmentée auprès des entreprises, à travers la réalisation de démonstrateurs technologiques.

heSam pédagogie Usine numérique et collaborative (2016)

Type de projet : heSam Paris Nouveaux Mondes

Partenaires : Arts et Métiers (porteur), ENSCI

Budget Arts et Métiers : 10 000 Euros

Rôle dans le projet : Porteur de projet

Nombre de personnes impliquées Arts et Métiers : 6

Nombre de publications : 1

Objectifs : L'objectif de ce projet est de proposer un module de formation innovant autour de l'usine numérique. Le module porte principalement sur les outils de réalité augmentée pour l'usine, avec une preuve de concept liée à l'usinage.

Instrumentation et systèmes intelligents (2014-2017)

Type de projet : Plan d'Actions Recherche et Innovation Région Bourgogne

Partenaires : Université de Bourgogne, Arts et Métiers

Budget Arts et Métiers : 70 000 Euros

Rôle dans le projet : Responsable d'un axe scientifique et responsable du post-doctorat de J. Plouzeau

Nombre de personnes impliquées Arts et Métiers : 5 dont 1 post-doctorant

Nombre de publications effectuées : 2

Objectifs : L'objectif de ce projet est de travailler sur les problématiques de navigation en environnement virtuel pour rendre la navigation plus intuitive tout en diminuant le cybermalaise.

SI²M (SIMulation IHM & Interaction) (2012-2015)

Type de projet : FUI 14

Partenaires : Oktal (porteur), Renault, Techviz, Axtrid, Armines, Arts et Métiers

Labels : System@tic, Moveo

Budget global : 3 000 000 Euros

Budget Arts et Métiers : 394 000 Euros

Rôle dans le projet : Responsable scientifique Arts et Métiers et responsable du post-doctorat de B. Aykent

Nombre de personnes impliquées Arts et Métiers : 4 dont 1 post-doctorant

Nombre de publications effectuées : 2

Objectifs : L'objectif de ce projet est de travailler sur les outils de validation de la conception de systèmes d'aide à la conduite en situation de conduite. Les problématiques concernent l'interaction dans un cockpit virtuel de véhicule et la réduction du cybermalaise en situation de conduite.

Visionair (terminé en décembre 2014)

Type de projet : Projet européen FP7

Partenaires : Grenoble INP (porteur), 23 partenaires européens dont Arts et Métiers

Budget global : 6 500 000 Euros

Rôle dans le projet : Participant

Nombre de personnes impliquées Arts et Métiers : 6

Objectifs : L'objectif de ce projet est de proposer un réseau de moyens de réalité virtuelle à travers l'Europe à disposition de laboratoires de recherche pour la visualisation de données, la télécollaboration. Au sein de ce projet, des mini-projets de collaboration entre laboratoires sont mis en place pour travailler sur des problématiques scientifiques liées à la réalité virtuelle et l'utilisation d'outils de réalité virtuelle.

Callisto (terminé en mars 2014)

Type de projet : FUI 9

Partenaires : Bouygues Construction (porteur), Immersion, Art Graphique et Patrimoine, Université, CSTB, Ecole Centrale de Paris, Lutin Userlab, Arts et Métiers

Labels : Advancity, Cap Digital

Budget global : 5 200 000 Euros

Budget Arts et Métiers : 531 000 Euros

Rôle dans le projet : Co-responsable scientifique Arts et Métiers, co-encadrant de la thèse de M. A. Mirzaei et responsable du post-doctorat de W. E. Marsh

Nombre de personnes impliquées Arts et Métiers : 6 dont 1 doctorant et 1 post-doctorant

Nombre de publications effectuées : 12

Objectifs : L'objectif de ce projet est la construction d'une salle immersive à la Cité de la Science et de l'Industrie à Paris pour de la revue de projets architecturaux mais aussi la médiation scientifique. Dans ce contexte, les problématiques concernent les méthodes de navigation et d'interaction dans des environnements architecturaux, la perception des distances et des échelles, la réduction du cybermalaise.

HaptiHand (2012-2014)

Type de projet : Transfert technologique INRIA

Partenaires : INRIA (porteur), Haption, Arts et Métiers

Budget Arts et Métiers : 2 500 Euros

Rôle dans le projet : Responsable scientifique Arts et Métiers

Nombre de personnes impliquées Arts et Métiers : 2

Nombre de publications effectuées : 2

Objectifs : L'objectif de ce projet est le transfert technologique du dispositif breveté HandNavigator, développé lorsque j'étais ingénieur expert à l'INRIA Grenoble, vers la société Haption, pour le proposer comme add-on du bras haptique Virtuose 6D.

1.5.3 Publications scientifiques

Cette partie présente les publications effectuées depuis mon intégration en tant que maître de conférences à Arts et Métiers.

Articles de journaux internationaux à comité de lecture

1. **J.-R. Chardonnet**, *M.-A. Mirzaei*, and *F. Merienne*, Influence of Navigation Parameters on Cybersickness in Virtual Reality, **Virtual Reality** (JCR impact factor : 3.634), Springer, accepté pour publication.
2. *C. Rengifo*, **J.-R. Chardonnet**, *H. Mohellebi*, and *A. Kemeny*, Impact of Human-Centered Perception Models for Motion Control in a Driving Simulator, **IEEE Transactions on Human-Machine Systems** (JCR impact factor : 3.374), acceptation conditionnelle avec révision mineure.
3. *B. Aykent*, **J.-R. Chardonnet**, *F. Merienne*, and *A. Kemeny*, Angular Velocity Perception Threshold and Sense of Presence for a Three Degrees of Freedom (DOF) Driving Simulator in Virtual Environment, **SAE Technical Papers**³, no. 2018-01-5043, SAE, 2018.
4. **J.-R. Chardonnet**, *M.-A. Mirzaei*, and *F. Merienne*, Features of the Postural Sway Signal as Indicators to Estimate and Predict Visually Induced Motion Sickness in Virtual Reality, **International Journal of Human-Computer Interaction** (JCR impact factor : 1.713), vol. 33, no. 10, pp. 771-785, Taylor & Francis, 2017.

3. Cet article n'a pas été publié dans une revue indexée JCR car il s'agissait de valoriser un travail plus technique réalisé par un post-doctorant qui travaille maintenant en entreprise. Le travail était tout à fait approprié pour être publié comme SAE Technical Paper.

5. *J.-C. Léon, T. Dupeux, J.-R. Chardonnet, and J. Perret*, Dexterous grasping tasks generated with an add-on end-effector of a haptic feedback system, **Journal of Computing and Information Science in Engineering** (JCR impact factor : 1.431), vol. 16, no. 3, pp. 030903-1,030903-10, ASME, 2016.
6. *M. Pedrotti, M. A. Mirzaei, A. Tedesco, J.-R. Chardonnet, F. Merienne, S. Benedetto, T. Baccino*, Automatic Stress Classification With Pupil Diameter Analysis, **International Journal of Human-Computer Interaction** (JCR impact factor : 1.713), vol. 30, no. 3, pp. 220–236, Taylor & Francis, 2014.
7. *M. A. Mirzaei, F. Merienne, J. H. Oliver, and J.-R. Chardonnet*, New wireless connection between user and VE using speech processing, **Virtual Reality** (JCR impact factor : 3.634), vol. 18, no. 4, pp. 235–243, Springer, 2014.
8. *J.-R. Chardonnet*, Interactive Dynamic Simulator for Multibody Systems, **International Journal of Humanoid Robotics** (JCR impact factor : 1.394), vol. 9, no. 3, pp. 1250021-1,1250021-24, World Scientific, 2012.

Ouvrage

9. *A. Kemeny, J.-R. Chardonnet and F. Colombet*, Getting Rid of Cybersickness In Virtual Reality, Augmented Reality and Simulators, Springer International Publishing, 2020.

Brevet

10. *J.-R. Chardonnet and J.-C. Léon*, Périphérique d'interaction apte à contrôler un élément de toucher et de préhension d'objets virtuels multidimensionnels, FR2986342A1, 02-Aug-2013.

Articles de conférences internationales avec publication des actes

11. *S. Stadler, H. Cornet, D. Mazéas, J.-R. Chardonnet, and F. Frenkler*, ImPro : Immersive Prototyping in Virtual Environments for Industrial Designers, in **16th International Design Conference - DESIGN 2020**, Dubrovnik, Croatia, 2020, pp. 1375-1384.
12. *F. Ababsa, J. He, and J.-R. Chardonnet*, Combining HoloLens and Leap-Motion for Free Hand-Based 3D Interaction in MR Environments, in **7th International Conference on Augmented Reality, Virtual Reality, and Computer Graphics**, Lecce, Italy, 2020, vol. 12242, pp. 315-327.
13. *C. Di Loreto, J.-R. Chardonnet, J. Mackenzie, J. Dutschke, A. Van Den Berg, M. Forrest, F. Merienne, and B. Sandoz*, Real car versus driving simulator comparison of head dynamics in emergency braking events, in **Driving Simulation Conference**, Strasbourg, France, 2019, pp. 51-55.
14. *C. Rengifo, J.-R. Chardonnet, D. Paillot, H. Mohellebi, and A. Kemeny*, Feasibility Analysis For Constrained Model Predictive Control Based Motion Cueing Algorithm, in **2019 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)**, Montréal, Canada, 2019, pp. 2076-2082.
15. *J. L. Dorado, P. Figueroa, J.-R. Chardonnet, F. Merienne, and T. Hernandez*, Homing by triangle completion in consumer-oriented virtual reality environments, in **2nd IEEE VR Workshop on Neuroscience and Virtuality (IEEE Virtual Reality)**, Osaka, Japan, 2019, pp. 1652-1657.

16. *Y. Wang, J.-R. Chardonnet, and F. Merienne*, VR Sickness Prediction for Navigation in Immersive Virtual Environments using Deep Long Short Term Memory Model, in **1st IEEE VR Workshop on Immersive Sickness Prevention (IEEE Virtual Reality)**, Osaka, Japan, 2019, pp. 1874-1881.
17. *J. L. Dorado, P. Figueroa, J.-R. Chardonnet, F. Merienne, and T. Hernandez*, Perceived space and spatial performance during path-integration tasks in consumer-oriented virtual environments, in **IEEE Virtual Reality (VR)**, Osaka, Japan, 2019, pp. 896-897.
18. *Y. Wang, J.-R. Chardonnet, and F. Merienne*, Design of a Semiautomatic Travel Technique in VR Environments, in **IEEE Virtual Reality (VR)**, Osaka, Japan, 2019, pp. 1223-1224.
19. *R. Lou and J.-R. Chardonnet*, Reducing Cybersickness by Geometry Deformation, in **IEEE Virtual Reality (VR)**, Osaka, Japan, 2019, pp. 1058-1059.
20. *Y. Wang, J.-R. Chardonnet, F. Merienne*, Speed Profile Optimization for Enhanced Passenger Comfort : An Optimal Control Approach, in **21st IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems**, Hawaii, USA, 2018, pp. 723-728.
21. *F. Ababsa, J. He, and J.-R. Chardonnet*, Free Hand-Based 3D Interaction in Optical See-Through Augmented Reality Using Leap Motion, in **EuroVR**, London, UK, 2018.
22. *M. A. Mirzaei, J.-R. Chardonnet, F. Merienne*, Comparing Real and Virtual Object Manipulation by Physiological Signals Analysis : a first study, in **2nd International Conference on Computer-Human Interaction Research and Applications**, Sevilla, Spain, 2018, pp. 108-115.
23. *M. Ghinea, D. Frunza, J.-R. Chardonnet, F. Merienne, and A. Kemeny*, Perception of Absolute Distances within Different Visualization Systems : HMD and CAVE, in **5th International Conference on Augmented Reality, Virtual Reality, and Computer Graphics**, Otranto, Italy, 2018, vol. 10850, pp. 148-161.
24. *C. Rengifo, J.-R. Chardonnet, D. Paillot, H. Mohellebi, and A. Kemeny*, Solving the Constrained Problem in Model Predictive Control based Motion Cueing Algorithm with a Neural Network Approach, in **Driving Simulation Conference**, Antibes, France, 2018, pp. 63-69.
25. *A. Kemeny, E. Icart, A. Sepchat, F. Colombet, S. Espié, and J.-R. Chardonnet*, Large scale collaborative autonomous vehicle simulation and analysis using smartphones, in **Driving Simulation Conference**, Antibes, France, 2018, pp. 157-161.
26. *J. Plouzeau, J.-R. Chardonnet, and F. Merienne*, Using cybersickness indicators to adapt navigation in virtual reality : a pre-study (**Best Poster Award**), in **IEEE Virtual Reality (VR)**, Reutlingen, Germany, 2018, pp. 661-662.
27. *C. Di Loreto, J.-R. Chardonnet, J. Ryard, and A. Rousseau*, WoaH : A Virtual Reality Work-at-height Simulator, in **IEEE Virtual Reality (VR)**, Reutlingen, Germany, 2018, pp. 281-288.
28. *J.-R. Chardonnet, C. Di Loreto, J. Ryard, and A. Rousseau*, A Virtual Reality Simulator to Detect Acrophobia in Work-at-Height Situations, in **IEEE Virtual Reality (VR)**, Reutlingen, Germany, 2018, pp. 747-748.
29. *P. Figueroa, T. Hernández, F. Merienne, J.-R. Chardonnet, J. L. Dorado, and J. S. López Pacheco*, Heterogeneous, Distributed Mixed Reality Applications. A Concept, in **IEEE Virtual Reality (VR)**, Reutlingen, Germany, 2018, pp. 549-550.

30. *J. Plouzeau, J.-R. Chardonnet, and F. Merienne*, Dynamic Platform for Virtual Reality Applications, in **EuroVR**, Laval, France, 2017, pp. 2–5.
31. *J. L. Dorado, P. Figueroa, J.-R. Chardonnet, F. Merienne, and T. Hernandez*, Comparing VR Environments for Seat Selection in an Opera Theater, in **IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)**, Los Angeles, USA, 2017, pp. 221–222.
32. *F. Alibay, M. Kavakli, J.-R. Chardonnet, and M. Z. Baig*, The Usability of Speech and/or Gestures in Multi-Modal Interface Systems, in **International Conference on Computer and Automation Engineering**, Sydney, Australia, 2017, pp. 73–77.
33. *T. Porssut and J.-R. Chardonnet*, Asymmetric Telecollaboration in Virtual Reality, in **IEEE Virtual Reality (VR)**, Los Angeles, USA, 2017, pp. 289–290.
34. *J. Plouzeau, D. Paillot, J.-R. Chardonnet, and F. Merienne*, Effect of proprioceptive vibrations on simulator sickness during navigation task in virtual environment, in **ICAT EGVE**, Kyoto, Japan, 2015, pp. 1–6.
35. *W. E. Marsh, J.-R. Chardonnet, and F. Merienne*, Distance Perception During Cooperative Virtual Locomotion, in **IEEE Symposium on 3D User Interfaces**, Arles, France, 2015, pp. 173–174.
36. *J.-C. Léon, T. Dupeux, J.-R. Chardonnet, and J. Perret*, An add-on device to perform dexterous grasping tasks with a haptic feedback system, in **DETC2015 - ASME 2015 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference**, Boston, USA, 2015.
37. *J.-R. Chardonnet, M.-A. Mirzaei, and F. Merienne*, Visually Induced Motion Sickness Estimation and Prediction in Virtual Reality using Frequency Components Analysis of Postural Sway Signal, in **ICAT EGVE**, Kyoto, Japan, 2015, pp. 9–16.
38. *M. A. Mirzaei, J.-R. Chardonnet, F. Merienne, and A. Genty*, Navigation and interaction in a real-scale digital mock-up using natural language and user gesture, in **Laval Virtual VRIC'14**, Laval, France, 2014, pp. 1–4.
39. *W. E. Marsh, J.-R. Chardonnet, and F. Merienne*, Virtual Distance Estimation in a CAVE, in **Spatial Cognition IX**, 2014, vol. 8684, pp. 354–369.
40. *P. George, A. Kemeny, F. Colombet, F. Merienne, J.-R. Chardonnet, and I. Mouttapa Thouvenin*, Evaluation of Smartphone-based interaction techniques in a CAVE in the context of immersive digital project review, in **IS&T/SPIE Electronic Imaging, The Engineering Reality of Virtual Reality**, San Francisco, USA, 2014, vol. 9012, pp. 901203-1,901203-7.
41. *M. A. Mirzaei, S. Prianto, J.-R. Chardonnet, C. Père, and F. Merienne*, New motherwavelet for pattern detection in IR image, in **IEEE Video Communication and Image Processing**, Kuching, Malaysia, 2013, pp. 1–6.
42. *M. A. Mirzaei, J.-R. Chardonnet, C. Père, and F. Merienne*, Sensor fusion for interactive real-scale modeling and simulation systems, in **18th International Conference on Computer Games (CGAMES USA)**, Louisville, USA, 2013, pp. 149–153.
43. *M. A. Mirzaei, J.-R. Chardonnet, C. Père, and F. Merienne*, Improvement of the real-time gesture analysis by a new mother wavelet and the application for the navigation inside a scale-one 3D system, in **IEEE International Conference on Advanced Video and Signal-Based Surveillance**, Krakow, Poland, 2013, pp. 270–275.

44. P. George, A. Kemeny, F. Merienne, **J.-R. Chardonnet**, I. Mouttapa Thouvenin, J. Posselt, and E. Icart, Nomad Devices for Interactions in Immersive Virtual Environments, in **IS&T/SPIE Electronic Imaging, The Engineering Reality of Virtual Reality**, Burlingame, USA, 2013, vol. 8649, pp. 86490I-1,86490I-7.
45. **J.-R. Chardonnet** and J.-C. Léon, Monitoring a Realistic Virtual Hand using a Passive Haptic Device to Interact with Virtual Worlds, in **Joint Virtual Reality Conference**, Madrid, Spain, 2012.
46. **J.-R. Chardonnet** and J.-C. Léon, Designing Interaction in Virtual Worlds through a Passive Haptic Peripheral, in **RO-MAN'2012 : 21th International Symposium on Robot and Human Interactive Communication**, Paris, France, 2012, pp. 284–289.

Articles de conférences nationales

47. C. Di Loreto, J. Dutschke, M. Forrest, A. Van Den Berg, **J.-R. Chardonnet**, F. Merienne, J. Mackenzie, and B. Sandoz, Head dynamics during emergency braking events, in **44ème congrès de la société de Biomecanique**⁴, Poitiers, France, 2019.
48. C. Bénézet, **J.-R. Chardonnet**, M. Secheppet, G. Azéma, J. Ryard, S. Leblanc, L. Basty, M. Heureau, and R. Vinck, Apprendre à conduire un attelage avec le simulateur interactif coMtactS", in **Journées sciences et innovations équine**s, Saumur, France, 2019, p. 1-4.
49. Y. Wang, **J.-R. Chardonnet**, and F. Merienne, A Semiautomatic Navigation Interface to Reduce Visually Induced Motion Sickness in Virtual Reality, in **Journées de la Réalité Virtuelle**, Evry, France, 2018, pp. 47–52.
50. J. L. Dorado, **J.-R. Chardonnet**, P. Figueroa, F. Merienne, and T. Hernández, A perceptual calibration method to ameliorate the phenomenon of non-size-constancy in heterogeneous VR displays, in **1^{er} Workshop CATAI France-Colombie**, Lyon, France, 2018.
51. C. Di Loreto, **J.-R. Chardonnet**, J. Ryard, and A. Rousseau, Simulation de travail en hauteur en réalité mixte : étude de la présence et de l'anxiété, in **Journées de l'Association Française de Réalité Virtuelle**, Rennes, France, 2017, pp. 99–104.
52. T. Porssut and **J.-R. Chardonnet**, Télécollaboration asymétrique en réalité virtuelle, in **Journées Françaises d'Informatique Graphique**, Grenoble, France, 2016, pp. 1–4.
53. G. Hattar, M. A. Mirzaei, S. Garbaya, F. Merienne, and **J.-R. Chardonnet**, Joint Platform for the Real-Scale 3D Visualization of Conceptual Design Incorporating Semantic, in **Journées de l'Association Française de Réalité Virtuelle**, Laval, France, 2013, pp. 29–34.
54. F.-E. Diraa, **J.-R. Chardonnet**, F. Merienne, and H. Hrimech, Haptic Interface to Interact with a Virtual Vehicle Cockpit, in **Confere**, Biarritz, France, 2013.
55. M. A. Mirzaei, **J.-R. Chardonnet**, C. Père, and F. Merienne, Test-bench for evaluating navigation and interaction in large virtual databases, in **Confere**, Venice, Italy, 2012.
56. M. A. Mirzaei, **J.-R. Chardonnet**, C. Père, and F. Merienne, Designing a 3D Navigation System Using Cognitive Factors, in **Journées de l'Association Française de Réalité Virtuelle**, Strasbourg, France, 2012.

4. Publié également dans *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, vol. 22, no. sup1, pp. S224-S226, Taylor & Francis, 2019.

Présentations invitées et keynotes

57. L'humain dans le véhicule ou l'importance de la simulation, presented at the Journée Véhicule du futur, mobilité intelligente, un virage à prendre?, Chalon-sur-Saône, France, 19-Sept-2019.
58. Study of the autonomous vehicle users' behaviour in driving simulation, presented at the 3rd Driving Simulation Association Seminar, Lyon, France, 20-June-2019.
59. La réalité virtuelle/réalité augmentée : du concept au déploiement, presented at the workshop Réalité Virtuelle et Réalité Augmentée : de nouveaux outils pour l'Industrie (CSM, ME-DEF), 29-Jan-2019.
60. Interaction en réalité virtuelle : enjeux technologiques et humains, presented at the Rendez-vous CARNOT, Lyon, France, 17-Oct-2018.
61. Towards customized virtual reality : the case of navigation, presented at the 2nd Driving Simulation Association Seminar, Chalon-sur-Saône, France, 15-May-2018.
62. Joint collaboration in VR/AR between ENSAM and industry - The example of LiV, presented at the Conference for Industry of the Future, Karlsruhe, Germany, 06-Oct-2017.
63. Les technologies de la réalité virtuelle et augmentée au service de la maintenance, presented at the INNOVA-MAINTENANCE, Chalon-sur-Saône, France, 13-Oct-2016.
64. Multi-sensory simulation in immersive virtual reality, **Keynote**, VRIPHYS, Lyon, France, 04-Nov-2015.
65. Immersion, perception, interaction, navigation, presented at the Atelier Bâtiments durables et environnements virtuels, Laval, France, 09-Apr-2014.

Logiciel

66. *T. Dupeux, J.-R. Chardonnet, and J.-C. Léon*, HaptiHand-API, HaptiHand-App. INRIA, Arts et Métiers Paris Tech, Université Grenoble Alpes, 2014.

Rapports de projets

67. *C. Bénézet, J.-R. Chardonnet, and G. Azéma*, Rapport final projet coMtactS, 2018.
68. *J. Plouzeau, J.-R. Chardonnet, and F. Merienne*, Rapport final projet NAVII : NAVigation pilotée par des Indicateurs de mal de simulation en environnement virtuel, Instrumentation et systèmes intelligents, 2018.
69. *T. Nguyen-That, H. Mohellebi, A. Kemeny, J.-R. Chardonnet, J. Vedrenne, P. Fuchs, B. Bayart, A. Vartanian, and S. Dos Santos*, Rapport final projet FUI SI²M, 2014.

Autres publications

70. *J.-R. Chardonnet, G. Fromentin, and J. Outeiro*, Augmented reality as an aid for the use of machine tools, **Research and Science Today**, vol. Supplement No. 2, pp. 25–31, 2017.

1.6 Animation scientifique

1.6.1 Groupe SIMCO

L'Institut Image/Arts et Métiers possède un laboratoire commun avec Renault, le Laboratoire d'Immersion Virtuelle (LiV). Dans ce contexte, l'Institut Image a développé un certain nombre de travaux autour en particulier de la simulation de conduite depuis 2008. En 2017 est né le groupe SIMCO (SIMulation de CONduite), avec la volonté impulsée en particulier par Prof. Andras Kemeny, expert leader Simulation Immersive et Réalité virtuelle chez Renault et professeur associé à Arts et Métiers, de faire apparaître l'Institut Image comme un acteur académique important dans le domaine de la simulation de conduite. Avec la collaboration de Prof. Frédéric Merienne, directeur de l'Institut Image, j'ai la charge d'animer cette activité. Les premiers travaux ont consisté à remettre à niveau les simulateurs de conduite présents à l'Institut Image (simulateur dynamique à 6 degrés de liberté SAAM et simulateur dynamique à 3 degrés de liberté S²M). Actuellement 2 thèses de doctorat sont en cours dans cette activité (dont la thèse de Cédric Di Loreto que je co-encadre). Par ailleurs un important projet de recherche autour de l'étude comportementale des conducteurs aux passages à niveau a été réalisé avec la SNCF et ECF (projet ARPAN dont j'ai été responsable).

Le groupe SIMCO est structuré autour de trois axes : le premier, appelé Intelligence Artificielle, regroupe l'interaction homme-véhicule-environnement, le second, appelé Simulation, que j'anime plus particulièrement, regroupe le contrôle-commande, l'étude des facteurs humains et la validation des systèmes d'aide à la conduite (ADAS) et véhicules autonomes, et le dernier, appelé Analyse de Données, regroupe la visualisation des données véhicules et l'analyse de ces données.

Actuellement, quatre enseignants-chercheurs interviennent dans l'activité.

Le groupe SIMCO est également impliqué dans la co-organisation de la conférence internationale Driving Simulation Conference (DSC), organisée annuellement par l'association Driving Simulation Association en alternance entre la France et l'Allemagne. A ce titre, je suis co-program chair et membre du comité d'organisation et du comité scientifique de la conférence DSC depuis 2016.

1.6.2 Institut Franco-Allemand pour l'Industrie du Futur

Arts et Métiers a signé en 2016 un accord bi-latéral avec Karlsruher Institut für Technologie (KIT) en Allemagne pour renforcer les liens au niveau de la recherche, les liens au niveau de l'enseignement étant déjà présents sur un des campus d'Arts et Métiers. Cet accord s'est traduit par la création de l'Institut Franco-Allemand pour l'Industrie du Futur, dont la mission est de développer la recherche scientifique appliquée autour de quatre thèmes de l'industrie du futur (Industrie 4.0) : systèmes de production, robotique, process de fabrication avancés, et réalité virtuelle/réalité augmentée. Chaque thème est porté par un enseignant-chercheur Arts et Métiers et un enseignant-chercheur KIT. Il m'a été confié la responsabilité du thème réalité virtuelle/réalité augmentée pour la partie Arts et Métiers, en collaboration avec Prof. Jivka Ovtcharova de l'institut IMI (Institut für Informationsmanagement im Ingenieurwesen) pour la partie KIT.

Plusieurs rencontres ont été organisées pour découvrir les activités respectives des deux laboratoires en réalité virtuelle Institut Image et IMI, ainsi que pour initier le montage de projets de recherche communs et de séminaires communs. Plusieurs projets incluant le KIT ont été soumis depuis le début de l'année 2018 dont trois projets H2020 et un projet ANR/DFG. Une thèse en co-tutelle Arts et Métiers/KIT (Théo Combe) a démarré en 2019. Un des doctorants que je co-encadre (Yuyang Wang) est enfin en échange avec le KIT pendant un an (2019-2020).

Dans le cadre de cette collaboration, j'ai également effectué un CRCT d'un an de 2019 à 2020 à IMI sur le développement d'interactions intelligentes personnalisées en réalité virtuelle.

1.7 Rayonnement

1.7.1 Au niveau national

Collaborations

Académiques

- Laboratoire LCPI - Arts et Métiers (contacts : Vincent Meyrueis et Camille Jean) depuis 2019 : montage de projets H2020
- Laboratoire LAMIH (contact : Simon Enjalbert) depuis 2019 : projet Co-simulation
- ISEN-Yncrea (contact : Alena Siarheyeva) 2018-2019 : montage d'un projet H2020 et montage d'une session à la conférence ISD2019
- Laboratoire Psy-DREPI - Université de Bourgogne (contacts : Raphaël Laurin et Mickaël Campo) depuis 2017 : stage de J. Bruder et projet TEAM-sports
- Institut de Biomécanique Humaine Georges Charpak - Arts et Métiers (contact : Baptiste Sandoz) depuis 2017 : thèse de C. Di Loreto
- Laboratoire PIMM - Arts et Métiers (contacts : Nazih Mechbal et Francisco Chinesta) depuis 2017 : thèse de Q. Jacquemin, stage de A. Gannier et montage de projets H2020
- LIRDEF - Université de Montpellier (contact : Guillaume Azéma) 2016-2018 : projet coMtactS
- LIRIS - Université de Lyon (contact : Fabrice Jaillet) en 2017 : stage de J. Brissonnet
- Gipsa-lab - Université Grenoble Alpes (contact : Franck Quaine) 2010-2014 : projet HandNavigator
- Laboratoire LJK – Grenoble INP (contact : Jean-Claude Léon) 2010-2014 : projets HandNavigator et HaptiHand
- Laboratoire G-SCOP – Grenoble INP (contact : Frédéric Noël) 2011-2014 : projet Visionair et défi CVC
- Lutin Userlab (LIVING LAB européen Paris 8, Paris 6, UTCompiègne, Universcience) 2011-2014 : projet Callisto
- Heudiasyc - UTCompiègne (contact : Indira Mouttapa Thouvenin) 2012-2016 : thèse de P. George
- INRIA Grenoble 2010-2016 (équipe Imagine) : projets HandNavigator et HaptiHand
- Laboratoire LJK – INRIA Grenoble (contact : François Faure, maintenant PDG d'AnatoScope) en 2016 : stage de J. Dolat

Industriels

- Suez (contact : Emilie Le Goff) : thèse de G. Klein
- ESI Group (contact : Anne Chambard) : montage de projets H2020
- SNCF (contact : Virginie Taillandier) : projet ARPAN
- ECF (contact : Gérard Hernja) : projet ARPAN
- Enedis Bourgogne (contact : Alain Rousseau) : stages de C. Di Loreto et G. Sala
- Institut Français du Cheval et de l'Équitation (contact : Clémence Bénézet) : projet coMtactS
- Haption (contact : Jérôme Perret) : projet Haptihand
- Renault (contact : Andras Kemeny) : groupe SIMCO, projet SI²M, thèses de P. George et C. Rengifo Cadavid
- JTEKT (contact : Jean Ray) : stage de C. Laaguidi
- Suricog (contact : Kristen Le Liboux) : stage de G. Cloteaux

Invitations aux séminaires et conférences

- L'humain dans le véhicule ou l'importance de la simulation, presented at the Journée Véhicule du futur, mobilité intelligente, un virage à prendre?, Chalon-sur-Saône, France, 19-Sept-2019.
- La réalité virtuelle/réalité augmentée : du concept au déploiement, presented at the workshop Réalité Virtuelle et Réalité Augmentée : de nouveaux outils pour l'Industrie (CSM, ME-DEF), 29-Jan-2019.
- Interaction en réalité virtuelle : enjeux technologiques et humains, presented at the Rendez-vous CARNOT, Lyon, France, 17-Oct-2018.
- Les technologies de la réalité virtuelle et augmentée au service de la maintenance, presented at INNOVA-MAINTENANCE, Chalon-sur-Saône, France, 13-Oct-2016.
- Immersion, perception, interaction, navigation, presented at the Atelier Bâtiments durables et environnements virtuels, Laval, France, 09-Apr-2014.

Autres

J'ai expertisé un dossier de thèse CIFRE pour l'ANRT en 2017.

1.7.2 Au niveau international

Collaborations

- Elias Cueto (Professeur, Universidad de Zaragoza - Espagne) : montage de projets H2020
- Katarzyna Wac (Professeur, Université de Genève - Suisse) : montage de projets H2020
- Teresa Bajo (Professeur, Universidad de Granada - Espagne) : montage de projets H2020

- Henriette Cornet (Principal Investigator, TUMCreate - Singapour) et Sebastian Stadler (Research Associate, TUMCreate - Singapour) : stage de master recherche (D. Mazéas)
- Jivka Ovtcharova (Professeur, Karlsruher Institut für Technologie - Allemagne) : collaborations de recherche à travers l'Institut Franco-Allemand pour l'Industrie du Futur
- Mihai Ghinea (Associate Professor, Université Polytechnique de Bucarest - Roumanie) : aide au montage d'une formation de master et d'une activité de recherche en réalité virtuelle/réalité augmentée à Bucarest, invité à l'Institut Image pendant deux mois
- Pablo Figueroa (Associate Professor, Uni. Andes - Bogota, Colombie) et Tiberio Hernandez (Professeur, Uni. Andes - Bogota, Colombie) : thèse en co-tutelle (J. L. Dorado)
- Luis Pastor (Professeur, Universidad Rey Juan Carlos - Madrid, Espagne) : projet Visionair (projet Trans National Access sur la visualisation collaborative à distance, échange d'étudiants de master recherche - M. Ramos Garcia, A. Fonnet), mobilité ERASMUS+ réalisée en 2016 pour réaliser de l'enseignement et développer des partenariats de recherche
- Manolya Kavakli (Honorary Professor, Macquarie University - Sydney, Australie) : stage de master recherche (F. Alibay)

Membre dans des comités et évaluateur

Edition de revues scientifiques

- Co-éditeur invité du *special issue* "Driving Simulation & Virtual Reality" de la revue scientifique "Transportation Research Part F", Elsevier, 2019

Edition d'actes de conférences

- Co-éditeur de "Driving Simulation & Virtual Reality Conference & Exhibition", Antibes, France, ISBN 978-2-9573777-0-1, 2020

Comités de programme et d'organisation

- ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology (VRST) : membre du comité de programme en 2020 (Ottawa, Canada - conférence virtualisée)
- International Joint Conference on Mechanics, Design Engineering and Advanced Manufacturing (JCM) : membre du comité d'organisation en 2020 (Aix-en-Provence, France - conférence virtualisée)
- Driving Simulation Conference (DSC) : program co-chair, membre du comité d'organisation et du comité scientifique depuis 2016 (Paris - 2016, Stuttgart - 2017, Antibes - 2018, Strasbourg - 2019, Antibes - 2020)
- 28th International Conference on Information Systems Development (ISD2019) : membre du comité de programme et track co-chair du track "Exploring New Media in ISD" en 2019 (Toulon, France)
- VRIC : membre du comité de programme en 2015 et 2019 (Laval)
- Management and Innovative Technologies : membre du comité scientifique en 2017 (Sinaia, Roumanie)

Président/Chairman des sessions de conférences

- Session “CAD & Interaction User-centered design”, de la conférence “International Joint Conference on Mechanics, Design Engineering and Advanced Manufacturing”, Aix-en-Provence, France, 2020 (session virtualisée)
- Animateur de la table ronde “VR & AR – HMD vs. CAVE for automobile HMI engineering design”, de la conférence “18th Driving Simulation & Virtual Reality Conference Europe”, Strasbourg, France, 2019
- Track “Exploring New Media in ISD”, de la conférence “International Conference on Information Systems Development”, Toulon, France, 2019
- Session “Autonomous Driving Simulation and Design”, de la conférence “17th Driving Simulation & Virtual Reality Conference Europe”, Antibes, France, 2018
- Animateur de la table ronde “Interactions in VR environments”, conférence “17th Driving Simulation & Virtual Reality Conference Europe”, Antibes, France, 2018
- Session “Virtual Reality”, de la conférence “16th Driving Simulation & Virtual Reality Conference Europe”, Stuttgart, Allemagne, 2017

Evaluation J’indique ici mes activités en tant que relecteur depuis mon arrivée à Arts et Métiers.

- Relecteur des conférences IEEE ICRA (2011, 2012, 2013, 2016, 2018), IEEE IROS (2011, 2012, 2013, 2018, 2019), IEEE World Haptics Conference (2013 - 5th Joint Eurohaptics Conference and IEEE Haptics Symposium), IEEE/ASME AIM (2014), IEEE ROMAN (2012, 2016), VRIC (2015, 2019), ACM VRST (2017, 2020), TMCE (2016), CAD (2016, 2017), IEEE VR (depuis 2017), DSC (depuis 2016), IEEE ITSC (2018, 2019, 2020)
- Relecteur des revues IEEE Transactions on Robotics (2014), Simulation Modeling Practice and Theory (2015), Transportation Research Part F (2017, 2018, 2019), The Journal of Visualized Experiments (2018), International Journal of Virtual Reality (2018), IEEE Virtual Reality journal track (special issue in IEEE Transactions on Visualisation and Computer Graphics) (2018, 2019, 2020, 2021), Virtual Reality (2019, 2020), IEEE Transactions on Control Systems Technology (2019), International Journal of Human-Computer Interaction (2020), Behaviour & Information Technology (2020), IEEE Transactions on Image Processing (2020)
- Expert-évaluateur pour la Commission Européenne pour les projets soumis à l’appel H2020 ICT-55 (décembre 2019-janvier 2020)

Jurys de thèse

- *Korreferent* de la thèse de Polina Häfner “Holistic Approach for Authoring Immersive and Smart Environments for the Integration in Engineering Education”, KIT (Allemagne), Septembre 2020

Invitations aux séminaires et conférences

- Study of the Autonomous Vehicle Users’ Behaviour in Driving Simulation, presented at the 3rd Driving Simulation Association Seminar, Lyon, France, 20-June-2019.
- Towards customized virtual reality : the case of navigation, presented at the 2nd Driving Simulation Association Seminar, Chalon-sur-Saône, France, 15-May-2018.

- Joint collaboration in VR/AR between ENSAM and industry - The example of LiV, presented at the Conference for Industry of the Future, Karlsruhe, Germany, 06-Oct-2017.
- Multi-sensory simulation in immersive virtual reality, **Keynote**, VRIPHYS, Lyon, France, 04-Nov-2015.

1.7.3 Organisation d'évènements

- Organisation de l'école d'été franco-allemande "Formation pratique dans la recherche et l'industrie pour la formation des talents de l'IA / Praktische Ausbildung in Forschung und Industrie für die Ausbildung von KI Talenten" avec le KIT, dans le cadre de l'Université Franco-Allemande, 19-23 octobre 2020, Karlsruhe, Allemagne

1.8 Prix et distinctions

- Prime d'encadrement doctoral et de recherche (PEDR) depuis 2016
- Best Poster Award à la conférence 2018 IEEE Virtual Reality, Reutlingen, Allemagne, 2018
- Technical Committee Best Paper Award à la conférence DETC2010 - ASME 2010 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference, Montréal, Canada, 2010
- Best Paper Award à la conférence ACM VRIC 2010 - Virtual Reality International Conference, Laval, France, 2010

1.9 Autres activités

- Membre du conseil de perfectionnement de l'Institut Supérieur de l'Automobile et des Transports (ISAT) depuis 2019
- Représentant de l'Institut Image au conseil scientifique du Pôle Nucléaire de Bourgogne (devenu Nuclear Valley) entre 2014 et 2018
- Membre de l'Association Française de Réalité Virtuelle (maintenant AF-XR) depuis 2012
- Membre de IEEE depuis 2012

Contexte et positionnement

La réalité virtuelle, bien que développée depuis les années 60, connaît un essor important depuis 2013, année où sont sortis les premiers casques de réalité virtuelle bon marché avec kits de développement inclus tels que l'Oculus Rift DK1. La disponibilité de technologies de réalité virtuelle accessibles financièrement a permis une diffusion de ces technologies dans de nombreux domaines, à commencer par les jeux vidéo, mais aussi l'industrie [Berg and Vance, 2017], la santé [Ruthenbeck and Reynolds, 2015; Bourrelief *et al.*, 2016], le bâtiment [Genty, 2015; Paes and Iri-zarry, 2018] et le patrimoine [Bekele *et al.*, 2018], la formation [Prasolova-Førland *et al.*, 2017] et l'éducation [Merchant *et al.*, 2014], et bien d'autres domaines encore. Selon le cabinet Gartner qui publie régulièrement une courbe d'évolution d'intérêt pour les nouvelles technologies (*hype cycle*), en 2016, la réalité virtuelle a passé l'étape du "gouffre de désillusion", en 2017, elle se situait dans la "pente de l'illumination" (pente de l'appropriation) et en 2018, elle est sortie du cycle¹, ouvrant la voie à un développement progressif du marché. En 2016, différents cabinets estimaient le marché de la réalité virtuelle à environ 5 milliards de dollars, avec une prédiction de croissance exponentielle d'ici à 2022 (entre 25 et 50 milliards de dollars - certaines prédictions montent à plus de 100 milliards de dollars - pour 2022) et une offre de contenus de plus en plus développée^{2,3}. Ce développement de la réalité virtuelle tient aussi de l'intérêt de plus en plus croissant de la part en particulier des industriels : selon un rapport de Capgemini paru en 2018, près des trois-quarts des entreprises tirent plus de 10% de bénéfices opérationnels du fait de l'utilisation de la réalité virtuelle⁴.

Selon le *Traité de la Réalité Virtuelle*, "la finalité de la réalité virtuelle est de permettre à une personne (ou à plusieurs) une activité sensori-motrice dans un monde artificiel" ([Fuchs and Moreau, 2003], p. 6).

La spécificité de la réalité virtuelle réside dans la possibilité pour un utilisateur d'être immergé pleinement dans un environnement virtuel et d'interagir avec celui-ci [Sherman and Craig, 2003], autrement dit de permettre une action dans les deux sens, de l'utilisateur sur l'environnement, et inversement. Dans l'interaction, nous considérons ici deux tâches principales : la navigation dans un environnement et la manipulation d'objets. Ainsi l'utilisateur devient pleinement acteur dans le monde virtuel, contrairement au cinéma dit 3D où un utilisateur reste spectateur : la réalité

1. Gartner, *Hype Cycle for Emerging Technologies*, 2018

2. Deloitte, *Virtual reality (VR): a billion dollar niche*, 2016

3. Crédit Suisse, *Investing in the Matrix? Augmented and Virtual Reality Show High Investment Potential*, 2016

4. Capgemini, *Augmented and Virtual Reality in Operations: A guide for investment*, 2018

virtuelle est et se doit d'être centrée sur l'utilisateur.

2.1 Problématiques et défis

Le développement rapide de la réalité virtuelle et son déploiement dans divers domaines d'application imposent une acceptation de ces technologies de la part du public. Or, les problématiques scientifiques liées à l'interaction en réalité virtuelle restent nombreuses. Le développement de la réalité virtuelle pose donc un défi important pour une diffusion et une utilisation à tous les niveaux. Parmi les problématiques, nous pouvons citer :

1. **la perception de l'environnement et le cybermalaise.** La réalité virtuelle permettant d'immerger pleinement un utilisateur, il est important que l'expérience vécue par celui-ci soit conforme et cohérente par rapport à une situation qui pourrait être réelle. Ce sentiment, généralement appelé la présence, reste un vaste sujet de recherche. En effet, un nombre important de paramètres est à prendre en compte pour une immersion réussie, parmi lesquels nous pouvons citer : la distance inter-pupillaire, le réglage des dispositifs de projection d'images en termes de colorimétrie, de contraste, la latence du système, le champ de vision, ou encore le suivi en position de l'utilisateur. Ces paramètres peuvent induire des incohérences qui sont ensuite difficiles à diagnostiquer et à régler, pouvant mener à une perte d'immersion et plus largement à un rejet de la technologie. Parmi les phénomènes encore difficiles à maîtriser, nous pouvons citer la perception des échelles, des distances, des vitesses, ou encore le réalisme perçu.

Par ailleurs, il est bien connu que la réalité virtuelle provoque un mal-être caractéristique, appelé cybermalaise, et à plus forte raison lors d'une tâche de navigation. Si un certain nombre de travaux s'accordent sur les raisons d'un tel phénomène, les mécanismes internes restent un sujet actif de recherche au sein de la communauté de la réalité virtuelle et qui dépasse largement cette communauté puisqu'ils font appel à des connaissances sur la constitution et le fonctionnement neuro-psycho-physiologique d'un être humain. Or ce cybermalaise est souvent source de rejet ou d'appréhension de la technologie de la réalité virtuelle par les utilisateurs finaux.

Dans ce cadre, les questions de recherche sont les suivantes :

- Quels sont les paramètres influant sur la perception de l'environnement ?
- Comment assurer une immersion pertinente pour les utilisateurs ?
- Comment estimer et prédire l'occurrence du cybermalaise ?
- Comment limiter au maximum le cybermalaise ?

2. **l'intuitivité de l'interaction.** L'interaction en réalité virtuelle nécessite l'utilisation d'interfaces et de méthodes, y compris pour des tâches apparemment les plus élémentaires. Par exemple, pour naviguer dans un environnement virtuel, la manière la plus naturelle est de marcher. Mais les technologies de réalité virtuelle telles qu'une salle immersive de type CAVE[®] ou les casques de réalité virtuelle ne permettent pas une marche naturelle du fait de contraintes physiques : typiquement, dans le cas du CAVE, taille des écrans et donc de la surface de mouvements, dans le cas du casque, placement limité de caméras de suivi de position, présence de fils reliés à un ordinateur. De fait, il est nécessaire d'utiliser des stratagèmes, soit en fournissant un dispositif physique permettant une marche naturelle, par exemple un tapis roulant omnidirectionnel, soit en fournissant une technique simulant un déplacement, par exemple la téléportation. Dans les deux cas, un utilisateur non averti peut

avoir besoin d'instructions pour utiliser ces moyens et donc nécessiter un apprentissage. L'intuitivité sera alors un élément important d'utilisabilité et de diffusion de la réalité virtuelle.

Dans ce cadre, les questions de recherche sont les suivantes :

- Comment définir des méthodes d'interaction intuitives?
- Le multi-sensoriel peut-il améliorer l'interaction?

3. **la prise en compte des caractéristiques des utilisateurs.** Bien que la réalité virtuelle est sensée être centrée sur l'utilisateur, les interfaces et les techniques d'interaction sont développées pour être uniformes, quel que soit l'utilisateur, son profil, ses caractéristiques propres. Autrement dit, elles ne prennent pas en compte les spécificités des utilisateurs alors que chaque utilisateur est unique. En cela, les développements en réalité virtuelle semblent pensés avec une approche trop informatique, à l'image des interfaces classiques homme-ordinateur (clavier, souris). D'ailleurs, une partie des travaux effectués dans le développement d'interfaces homme-machine en réalité virtuelle se réfère à des résultats qui relèvent purement de l'informatique. Or, la différence majeure entre la réalité virtuelle et l'informatique est que la réalité virtuelle inclut pleinement l'utilisateur dans l'interaction, en sollicitant des mécanismes neuro-psycho-physiologiques. Il y a donc nécessité de mieux prendre en considération les caractéristiques propres des utilisateurs et de définir une réalité virtuelle que nous pourrions qualifier d'intelligente en ce qu'elle devient personnalisée.

Dans ce cadre, les questions de recherche sont les suivantes :

- Quels sont les paramètres importants des utilisateurs à prendre en compte?
- Comment intégrer au mieux les caractéristiques des utilisateurs pour améliorer leur expérience d'interaction?

2.2 Définitions

Avant d'exposer les travaux, je donne ici la définition de quelques termes et concepts qui seront utilisés tout au long de ce manuscrit.

Affordance : capacité d'un objet à suggérer son usage et ses possibilités d'action [Gibson, 1977]. Par exemple une chaise est affordante en ce qu'elle suggère de s'asseoir dessus. L'affordance s'apparente alors à une forme d'intuitivité. En réalité virtuelle, une technique d'interaction sera affordante si elle suggère son usage de manière facile et instantanée.

Ergonomie : *“ensemble des connaissances scientifiques relatives à l'Homme, et nécessaire pour concevoir des outils, des machines, et des dispositifs qui puissent être utilisés avec le maximum de confort, de sécurité et d'efficacité”* [Wisner, 1995]. En réalité virtuelle, une technique d'interaction sera ergonomique si elle est performante et confortable pour permettre un usage prolongé.

Intuitivité : aptitude à l'intuition, c'est-à-dire à *“deviner, [...] comprendre [...] quelque chose d'emblée, sans parcourir les étapes de l'analyse, du raisonnement ou de la réflexion”*⁵. Dans l'intuitivité, il est possible de distinguer ce qui relève de la perception telle que l'affordance ou ce qui

5. ATILF - CNRS & Université de Lorraine, TLFi : Trésor de la langue Française informatisé, 2002

relève de la cognition telle que la familiarité, la mémoire des situations et des procédures [Bacino and Draï-Zerbib, 2012]. En réalité virtuelle, une technique d'interaction sera intuitive si elle ne nécessite pas un apprentissage de la part de l'utilisateur et permet d'être performant.

Présence : sens d'être là dans l'environnement virtuel [Slater and Wilbur, 1997]. Le sentiment de présence est atteint lorsque l'utilisateur se comporte et se sent dans l'environnement virtuel comme dans la réalité.

2.3 Objectifs et approche

L'objectif principal de mes travaux est de proposer des approches innovantes pour interagir en environnement virtuel, de manière accessible et ergonomique, tout en considérant leur influence sur l'utilisateur, et donc permettre une expérience utilisateur améliorée, nécessaire pour une meilleure diffusion de ces technologies. Dans tout le reste du manuscrit, je restreindrai l'interaction à la navigation en environnement virtuel principalement, la manipulation d'objets pouvant être vue ici comme une extension. A la suite des questions de recherche posées précédemment, nous pouvons identifier plusieurs critères pour une interaction réussie :

1. **Cohérence** : interaction assurant une perception vue de l'utilisateur cohérente avec son expérience passée et pas seulement avec la réalité
2. **Intuitivité** : interaction accessible, ergonomique
3. **Personnalisation** : interaction adaptée aux caractéristiques propres de l'utilisateur

La méthodologie générale de notre approche est représentée dans la figure 2.1. Nous partons du constat que l'interaction avec un environnement virtuel se fait de manière uniforme, quel que soit le profil de l'utilisateur, ce qui peut engendrer de la frustration et, dans le cas de la navigation, un cybermalaise. Notre approche consiste d'une part à mieux caractériser l'utilisateur en termes de perception par rapport à son profil et à son état. Ensuite, il s'agit d'utiliser ces informations pour définir des techniques de navigation qui améliorent l'expérience utilisateur. Enfin, il s'agit de rendre l'interaction intelligente, en la personnalisant, c'est-à-dire en prenant en compte les caractéristiques des utilisateurs dans les paradigmes d'interaction.

Dans le contexte de la navigation, nous avons d'abord étudié les facteurs humains intervenant lors d'une tâche de navigation afin de mieux comprendre comment un être humain réagit lorsqu'il interagit en immersion virtuelle : perception des distances, transfert d'une expérience entre dispositifs de réalité virtuelle (chap. 3.1). Nous nous sommes ensuite davantage intéressés au cybermalaise, caractéristique dans une tâche de navigation : nous avons étudié différentes métriques permettant d'estimer le cybermalaise et proposé des moyens pour prédire son occurrence (chap. 3.2). A partir de ces informations, nous avons proposé plusieurs méthodes de navigation prenant en compte les contraintes d'intuitivité et de réduction du cybermalaise : nous avons considéré des méthodes naturelles (chap. 4.1), des méthodes artificielles ou informatiques (chap. 4.2) et une méthode qualifiée de semi-automatique (chap. 4.3). L'apport de la multi-sensorialité a également été explorée à travers le développement d'un dispositif d'interaction à main nue (chap. 5.1) et d'un cas d'usage industriel (chap. 5.2). Nous avons ensuite proposé une première approche d'adaptation des méthodes de navigation à l'utilisateur, prélude à une personnalisation poussée et une intelligence de la réalité virtuelle (chap. 6).

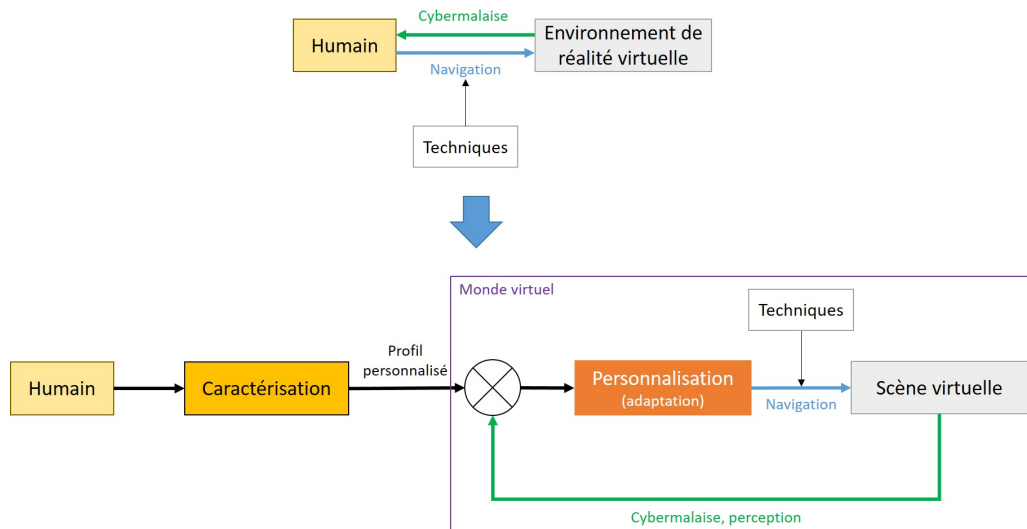


FIGURE 2.1 – D’une approche classique de la navigation vers l’approche proposée.

2.4 Travaux effectués

Les travaux présentés ici ont été réalisés entre 2011 et 2019. Durant cette période, j’ai co-encadré trois thèses de doctorat soutenues en 2014 (Mohammad Ali Mirzaei), 2016 (Paul George) et 2020 (Carolina Rengifo Cadavid), et six thèses de doctorat sont en cours de réalisation (José Luis Dorado, Yuyang Wang, Cédric Di Loreto, Quentin Jacquemin, Théo Combe et Guillaume Klein). J’ai également encadré de nombreux stages de master recherche et ai suivi trois post-doctorants (Eric Marsh, Baris Aykent et Jérémy Plouzeau).

Le post-doctorat d’Eric Marsh en 2014 et le doctorat de José Luis Dorado, co-encadré depuis 2016 avec Frédéric Merienne, Pablo Figueroa et Tiberio Hernandez (co-tutelle avec Los Andes Universidad, Colombie), s’intéressent à la perception en environnement virtuel, telle que la perception des distances, que ce soit en statique ou lors d’une tâche de navigation (post-doctorat d’Eric Marsh). En particulier, avec José Luis Dorado, il s’agit de rendre l’expérience utilisateur semblable quel que soit le dispositif d’immersion (CAVE ou casque), en définissant une fonction de transfert applicable à tous types de tâches dont la navigation. Ces travaux seront exposés dans le chapitre 3.1. Il est à noter que les travaux de Théo Combe, dont la thèse a démarré en 2019, traitent également de ce sujet, mais ceux-ci ne seront pas présentés dans ce manuscrit.

Avec Mohammad Ali Mirzaei, co-encadré avec Frédéric Merienne entre 2011 et 2014, nous avons travaillé sur les mécanismes internes du cybermalaise. Nous avons mis en place des méthodes d’estimation et de prédiction du cybermalaise dans une tâche de navigation en environnement virtuel (chap. 3.2). Nous avons également proposé des méthodes d’interaction pour la navigation utilisant le geste et le langage (chap. 4.1). Les travaux sur le cybermalaise se sont poursuivis durant le post-doctorat de Jérémy Plouzeau durant lequel nous avons proposé une méthode permettant d’adapter la navigation en fonction du niveau de cybermalaise ressenti en temps réel par l’utilisateur, ouvrant la voie à une intelligence dans l’interaction (chap. 6).

Avec Paul George, co-encadré avec Frédéric Merienne et Indira Thouvenin (UTCompiègne), en thèse CIFRE avec Renault sous la direction d’Andras Kemeny entre 2012 et 2016, nous avons travaillé sur le développement de nouvelles techniques d’interaction privilégiant l’intuitivité tout en cherchant à réduire le cybermalaise. Ces techniques ont davantage été développées pour une utilisation dans un CAVE (chap. 4.2).

Avec Yuyang Wang, co-encadré avec Frédéric Merienne depuis 2017, nous avons travaillé sur le développement de techniques de navigation semi-automatique inspirées de la robotique huma-

noïde (chap. 4.3). Les objectifs à terme sont de poursuivre les travaux engagés sur la personnalisation de l'interaction et de développer de nouveaux outils de prédiction du cybermalaise pour la navigation.

Nous avons également travaillé sur le développement de périphériques d'interaction à main nue, HandNavigator et HaptiHand, en partenariat avec INRIA Grenoble, sur la base d'un développement initié en 2009 (chap. 5.1).

D'autres projets ont été développés avec des étudiants de master recherche. Nous avons développé plusieurs simulateurs pour des besoins industriels. Le premier concerne un simulateur d'attelage équestre, pour lequel la problématique concerne la restitution de gestes pour apprendre à conduire un attelage équestre. Nous avons pour cela développé un dispositif multi-sensoriel permettant de guider un cheval virtuel de manière conforme à une situation réelle. Ce simulateur a été développé pour l'Institut Français du Cheval et de l'Equitation (IFCE). Il fait l'objet actuellement d'une demande de dépôt de brevet et ne peut donc être exposé dans ce manuscrit. Le deuxième simulateur est un simulateur de travaux en hauteur, pour lequel la problématique concerne le déplacement vertical en réalité virtuelle et le sentiment de présence et d'anxiété en hauteur. Nous avons également utilisé la multi-sensorialité en montrant qu'elle avait un impact positif sur l'anxiété. Ce simulateur a été développé pour Enedis (chap. 5.2). Le troisième simulateur enfin est un simulateur de cystoscopie robotisé, en cours de développement par Quentin Jacquemin, co-encadré avec Nazih Mechbal et Laurent Berthe (PIMM). Ce simulateur permettra de former les médecins à l'utilisation d'un cystoscope et intégrera un système à retour d'effort. Les travaux étant encore en cours, ils ne seront pas exposés dans ce manuscrit.

Enfin, nous avons initié en 2017 plusieurs thèses de doctorat sur une extension des travaux en réalité virtuelle à la simulation de conduite, avec Cédric Di Loreto, co-encadré avec Frédéric Merienne et Baptiste Sandoz (IBHGC), et Carolina Rengifo Cadavid, co-encadrée avec Andras Kemeny (thèse CIFRE Renault) et Damien Paillot (université de Bourgogne), en sachant qu'en 2014, nous avons réalisé un premier travail sur la perception des accélérations en simulation de conduite avec le post-doctorat de Baris Aykent. Ce manuscrit se concentrant sur l'interaction en réalité virtuelle, nous ne présenterons pas ces travaux dans ce manuscrit et les laissons dans les perspectives de recherche.

La figure 2.2 résume sous forme de frise chronologique les différents travaux présentés dans ce manuscrit avec la correspondance par chapitre.

Certains des travaux exposés ici ont été réalisés en collaboration avec des partenaires nationaux et internationaux. Les principales collaborations avec des partenaires académiques ont été les suivantes :

- Pablo Figueroa et Tiberio Hernandez, professeurs à Los Andes Universidad, Colombie : collaboration sur la perception en réalité virtuelle et sur l'élaboration de fonctions de transfert entre systèmes de visualisation
- Manolya Kavakli, professeur à Macquarie University, Australie : collaboration sur l'interaction vocale avec des objets virtuels
- Andras Kemeny, expert leader Simulation Immersive et Réalité Virtuelle (Renault), directeur du Laboratoire d'Immersion Virtuelle (Arts et Métiers / Renault) : collaboration sur le développement de méthodes de navigation et la simulation de conduite
- Jean-Claude Léon, professeur à Grenoble INP : collaboration sur le développement de périphériques d'interaction à main nue
- Indira Thouvenin, professeur à UTCompiègne : collaboration sur le développement de méthodes de navigation

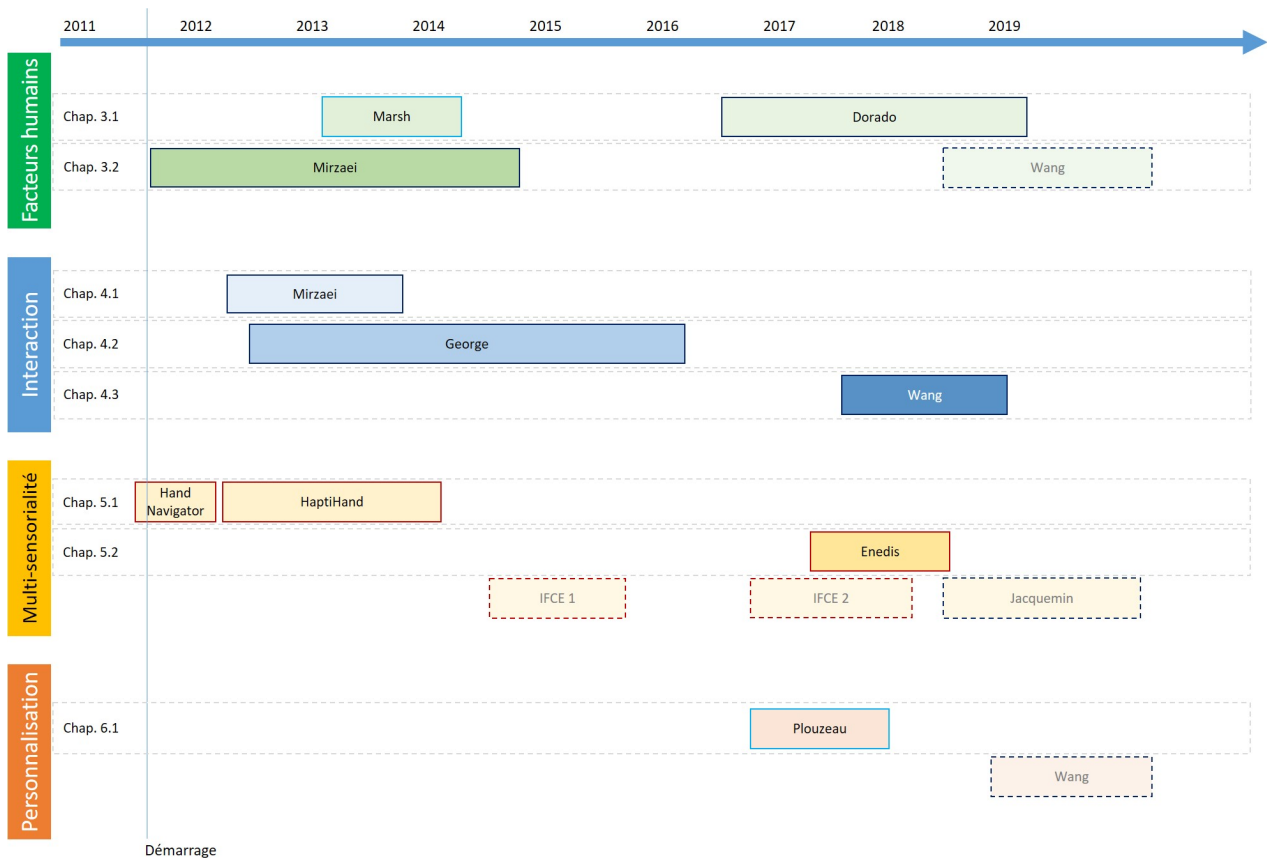


FIGURE 2.2 – Frise chronologique des travaux effectués avec correspondances aux chapitres du manuscrit, avec les étudiants impliqués dans les différents travaux (encadrés en noir = thèses, encadrés en bleu = post-doctorats, encadrés en rouge = master recherche et projets de recherche). Les travaux encadrés en pointillés sont ceux non exposés dans ce manuscrit car soit en cours de dépôt de brevet, soit en cours de développement. A noter que les travaux sur la simulation de conduite ne sont pas mentionnés ici car laissés dans les perspectives de recherche.

Perception en environnement virtuel

Dans ce chapitre, nous posons les bases pour améliorer l'interaction en environnement virtuel, en nous intéressant aux facteurs humains. Nous considérons en particulier la perception des distances et le cybermalaise, problème récurrent et inévitable en réalité virtuelle. Ces deux facteurs sont loin d'être exclusifs, mais représentent ceux parmi les plus étudiés dans la littérature scientifique.

3.1 Distances

Il est courant qu'en réalité virtuelle la perception des tailles et des distances semble fautive. Plus particulièrement, la littérature montre que les distances sont généralement sous-estimées en environnements virtuels par rapport à la réalité jusqu'à 50% [Renner *et al.*, 2013; Messing and Durgin, 2005]. Ce phénomène, difficilement expliqué, est particulièrement gênant lorsque l'on souhaite se déplacer dans un environnement virtuel pour par exemple effectuer une revue de projet architectural. La sous-estimation des distances peuvent être dus à des combinaisons de facteurs tels que des contraintes liées aux systèmes de réalité virtuelle (poids d'un casque immersif, d'une interface de navigation), l'utilisation d'interfaces non naturelles, la qualité graphique de l'environnement virtuel (bien que ce dernier ne semble pas avoir d'impact sur la perception des distances [Thompson *et al.*, 2004]), le réglage des caméras virtuelles par rapport à la distance inter-pupillaire des utilisateurs, la parallaxe, la distance à l'écran [Bruder *et al.*, 2016], ou encore le profil cognitif des utilisateurs [Boustila *et al.*, 2015]. Ces différents facteurs peuvent provoquer un manque de présence dans l'environnement virtuel qui peut alors avoir un effet sur l'interprétation des distances perçues [Interrante *et al.*, 2006].

Cependant, la littérature a montré que le simple fait de se mouvoir dans un environnement virtuel permettait de construire une représentation spatiale précise [Ruddle *et al.*, 2011]. Plus généralement, la réalisation (ou son intention) d'un effort pour interagir dans un environnement virtuel, que ce soit pour naviguer ou pour manipuler un objet virtuel, a une influence positive sur l'estimation des distances [Witt *et al.*, 2004; Waller and Richardson, 2008]. En revanche, pour des distances supérieures à 100 mètres, les distances sont fortement sous-estimées, que l'utilisateur soit actif ou passif [Hecht *et al.*, 2018]. Dans notre cas, nous ne considérerons pas des espaces de cette taille. Quoi qu'il en soit, il semble important d'effectuer une action, comme la navigation, et donc d'avoir à disposition des méthodes d'interaction appropriées pour une meilleure expérience en immersion. La littérature a à ce propos montré que pour une revue de projet architectural par exemple,

une vitesse de navigation faible permettait une meilleure perception des distances [Boustila *et al.*, 2015].

Nous avons souhaité nous intéresser à la perception des distances, sans trop entrer dans les détails non plus car il s'agit d'un domaine de recherche très vaste et très complexe qui si l'on n'y prend pas garde, nous fait sortir très vite du fil conducteur de mes travaux.

Nous avons effectué plusieurs études autour de l'estimation des distances, la première pour identifier plus clairement les paramètres susceptibles de favoriser une meilleure estimation (plus particulièrement le rôle des limites physiques d'un CAVE) (partie 3.1.1), la deuxième pour identifier plus clairement le rôle de la navigation dans un environnement virtuel (partie 3.1.2), et la troisième pour identifier le rôle du dispositif de visualisation (partie 3.1.3). Pour les deux premières études, nous nous sommes restreints à l'utilisation d'un CAVE à quatre faces (3 m de côté, résolution de 1400 px x 1050 px par face et système de tracking ART). Pour la dernière étude, nous avons utilisé deux systèmes de visualisation, le même CAVE et un casque de réalité virtuelle. Il est à noter que la plupart des études de la littérature sont réalisées en utilisant un casque de réalité virtuelle qui procure une immersion complète, mais qui coupe totalement l'utilisateur du monde réel.

3.1.1 Rôle des limites physiques du CAVE

Pour cette étude, nous avons émis l'hypothèse que l'estimation des distances est meilleure lorsque l'utilisateur se base sur des éléments physiques du CAVE (les faces, les arêtes) qu'en utilisant des éléments purement virtuels de l'environnement immersif.

Nous avons demandé à 14 sujets (7 hommes et 7 femmes) d'estimer la distance entre deux cônes virtuels placés aléatoirement dans un environnement virtuel représentant un étage de bureaux (un environnement avec un certain nombre d'indices visuels en termes de tailles des objets présents) (voir Fig. 3.1). Les sujets devaient réaliser l'estimation dans deux directions : horizontale et verticale, en restant statiques à des positions définies dans la figure 3.2. Pour l'estimation horizontale, la paire de cônes virtuels était toujours placée parallèlement à la face frontale du CAVE en trois positions indiquées dans la figure 3.2. Pour l'estimation verticale, la paire de cônes était toujours placée sur le plan formé par la face de droite du CAVE aux trois positions de la figure 3.2, les cônes étant alors couchés. La distance entre les cônes était fixée de manière aléatoire entre 167 et 267 cm avec une moyenne à 217 cm, quelle que soit la direction. Chaque sujet devait réaliser les estimations douze fois (6 estimations x 2 directions).



FIGURE 3.1 – Environnement virtuel utilisé pour l'estimation des distances.

Pour restituer les estimations faites par les sujets, il leur était demandé de se placer dans un espace physique dans lequel se trouvaient les modèles réels des cônes virtuels. Un des cônes était fixé au sol pour la direction horizontale, et en haut d'un panneau pour la direction verticale. Les

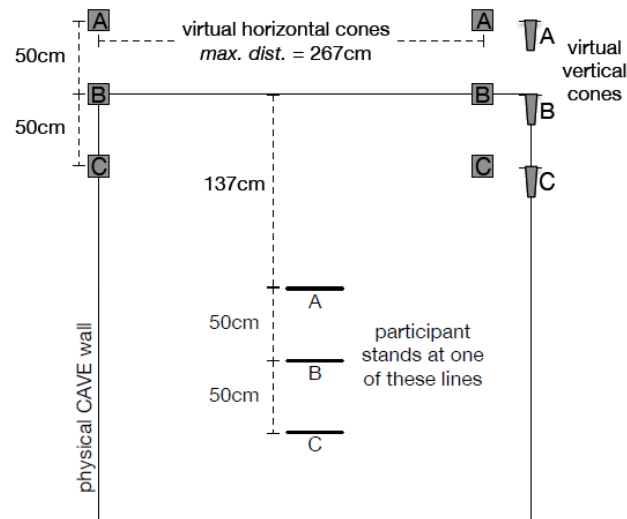


FIGURE 3.2 – Placement des cônes virtuels et des sujets par rapport aux faces du CAVE (vue de dessus).

sujets devaient indiquer à l'expérimentateur où placer le second cône pour correspondre aux distances virtuelles visualisées dans le CAVE. La mesure de la distance physique entre les deux cônes était ensuite réalisée à l'aide d'un mètre.



FIGURE 3.3 – Restitution des distances : l'expérimentateur place le second cône à la position indiquée par le sujet, (gauche) dans la direction horizontale et (droite) dans la direction verticale.

Les résultats sont donnés dans la figure 3.4.

Les distances sont sous-estimées quelle que soit la position des cônes, ce qui confirme les résultats de la littérature. Les distances sont cependant mieux estimées lorsque les cônes virtuels sont placés en position B, c'est-à-dire lorsqu'un des cônes virtuels est placé à l'intersection de deux faces du CAVE, ce qui n'est pas tout à fait l'hypothèse que nous avons faite. En demandant aux sujets d'exprimer leur stratégie pour estimer les distances, aucun n'a mentionné s'être servi d'éléments physiques (en l'occurrence les faces du CAVE). Au contraire certains sujets ont utilisé les éléments virtuels présents dans l'environnement virtuel pour ajuster leurs estimations. D'autres ont indiqué estimer les distances horizontales en comptant dans leur tête le nombre de

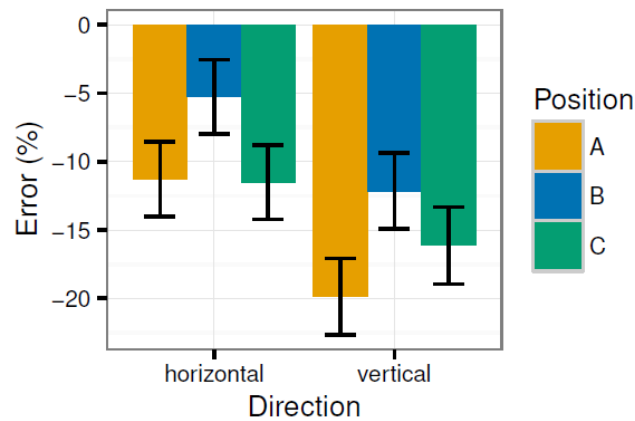


FIGURE 3.4 – Erreur moyenne en pourcentage d’estimation des distances pour les six conditions positions-directions.

pas nécessaires pour aller d’un cône à l’autre, et les distances verticales par rapport à leur taille. Le fait que les résultats soient cependant meilleurs lorsque les cônes sont dans la position B indique que les sujets ont pu malgré tout se servir des faces du CAVE mais de manière peut-être inconsciente. Nous pouvons supposer dans ce cas que les sujets n’étaient pas très présents dans l’environnement virtuel, ce que nous n’avons pas mesuré ici.

3.1.2 Rôle de la navigation

Dans l’expérience précédente, nous avons demandé aux sujets de rester en position statique aussi bien dans le CAVE que dans l’environnement virtuel. Ici nous étudions l’influence de la navigation sur l’estimation des distances. Si comme nous l’avons indiqué plus haut, la littérature a montré un rôle positif du mouvement, cette expérience a été menée pour donner des pistes quant à la conception de systèmes de réalité virtuelle dédiés à la revue de projets architecturaux, pour lesquels la navigation est requise.

Les hypothèses que nous avons faites sont les suivantes : d’une part la possibilité de naviguer peut aider les utilisateurs dans l’estimation des distances en se déplaçant à des points d’observation judicieux; d’autre part l’utilisation d’un dispositif de navigation peut engendrer une plus grande sous-estimation des distances, en particulier pour des distances verticales, en raison de la difficulté à naviguer de manière verticale.

Nous avons demandé à 12 sujets (8 hommes et 4 femmes) d’estimer la distance entre les deux mêmes cônes virtuels placés aléatoirement dans le même environnement virtuel que dans l’expérience précédente. Les sujets devaient réaliser l’estimation dans trois directions : horizontale, verticale et en profondeur. La distance entre les cônes était fixée de manière aléatoire entre 185 et 285 cm avec une moyenne à 235 cm, quelle que soit la direction. Chaque sujet devait réaliser deux sessions, l’une avec un dispositif de navigation de type joystick avec possibilité de naviguer horizontalement et verticalement à une vitesse maximale de 2 m/s, l’autre sans possibilité de naviguer dans l’environnement virtuel. Dans les deux cas, les sujets devaient rester physiquement statiques dans le CAVE. Les estimations devaient être réalisées neuf fois par session (3 estimations x 3 directions).

La restitution des estimations s’est faite de la même manière que dans l’expérience précédente. Les résultats sont donnés dans la figure 3.5.

Dans le cas sans interface de navigation, en profondeur ou dans la direction horizontale, les estimations restent identiques et meilleures (mais de manière marginalement significative) que

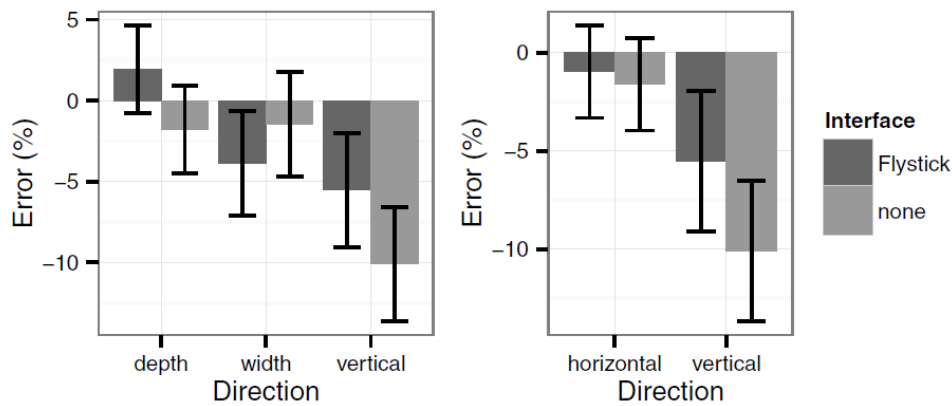


FIGURE 3.5 – Erreur moyenne en pourcentage d'estimation des distances pour les six conditions interface-directions (à gauche) et en regroupant les deux conditions horizontale et profondeur en une seule condition dite horizontale (à droite).

dans la direction verticale (Fig. 3.5 gauche). Dans le cas avec interface de navigation, comme les sujets pouvaient se mouvoir horizontalement dans l'environnement virtuel comme ils le souhaitent, nous avons regroupé les deux conditions horizontale et profondeur en une seule condition, d'autant plus que la différence entre ces deux conditions n'était pas significative. Les estimations semblent meilleures avec navigation autorisée, bien que pour la condition horizontale, la différence ne soit pas significative (Fig. 3.5 droite). De manière intéressante, nous avons observé que dans le cas avec navigation, les sujets tâchaient de se placer dans l'environnement virtuel de sorte que l'un des cônes était placé à l'intersection physique de deux faces du CAVE. Cela montre, comme dans la précédente expérience, que les sujets ont utilisé des éléments physiques du CAVE pour réaliser leurs estimations. De la même manière que dans l'expérience précédente, nous pouvons supposer que les sujets n'étaient alors pas très présents dans l'environnement virtuel.

Nous avons étendu ce travail en nous intéressant au rôle de la coopération sur la perception des distances. Le mode coopératif est important lors de sessions de revue de projets. L'idée a été donc de déterminer si deux utilisateurs naviguant ensemble dans un environnement virtuel réalisaient une meilleure estimation des distances, hypothèse que nous avons formulée pour cette étude. Nous avons appelé ce mode de navigation la navigation coopérative. Nous avons demandé à 8 sujets masculins de se positionner dans le CAVE et de naviguer en binôme selon une seule direction dans un environnement virtuel de grande dimension dans lequel étaient positionnés deux cônes distants de 6, 8 et 10 mètres. La difficulté ici est que le CAVE que nous avons utilisé est mono-utilisateur. Aussi, le point de vue n'est-il adapté qu'à une seule personne. Pour éviter des effets indésirables sur la perception des distances liés à un mauvais point de vue [Pollock *et al.*, 2012], nous avons demandé aux deux sujets d'être proches l'un de l'autre. Cette contrainte de proximité a pu être satisfaite en partageant le même dispositif de navigation, ici une manette de jeux à deux joysticks, l'un utilisé par un utilisateur pour effectuer un pas (par exemple le pas gauche), l'autre utilisé par le second utilisateur pour effectuer l'autre pas (par exemple le pas droite) (Fig. 3.6). Nous avons utilisé le paradigme de la marche imaginée [Klein *et al.*, 2009] pour mesurer la perception des distances. Nous avons demandé aux binômes d'aller d'un cône à l'autre, puis arrivés au second cône, de se retourner, de fermer leurs yeux et de s'imaginer revenir au premier cône, la marche imaginée étant chronométrée à l'aide d'un chronomètre que les sujets maniaient eux-mêmes (Fig. 3.7). Ce mode coopératif a été comparé à un mode dans lequel un sujet réalise seul l'expérimentation dans le monde virtuel et dans le monde physique (mode solo).

Les résultats ont montré qu'entre le réel et le virtuel, en mode solo, il n'existait aucune différence significative dans la perception des distances : dans les deux cas, les sujets ont sur-estimé



FIGURE 3.6 – Navigation collaborative.

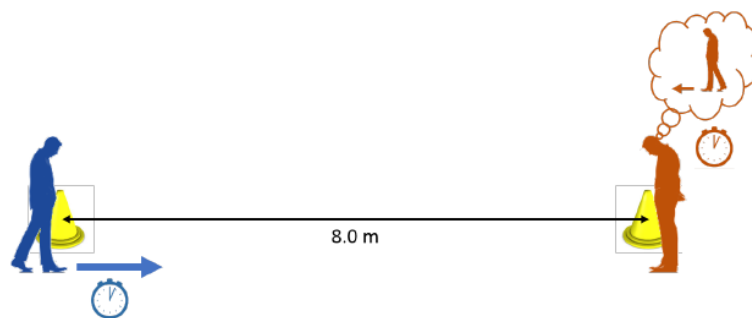


FIGURE 3.7 – Paradigme de la marche imaginée : le sujet à gauche navigue entre les deux cônes, le temps est chronométré; arrivé au cône de droite, le sujet s'imagine marcher jusqu'au cône de gauche en se chronométrant.

les distances de 73,4% en moyenne. Entre le mode solo et le mode coopératif, nous n'avons pas non plus observé de différence significative, avec une sur-estimation de 66,1% en moyenne dans le mode coopératif et de 69,0% en moyenne dans le mode solo. Ce dernier résultat est plutôt étonnant car nous avons fait l'hypothèse d'une différence significative entre le mode coopératif et le mode solo avec une estimation des distances plus faible dans le mode coopératif du fait que près de la moitié des mouvements effectués était réalisé de manière passive. Cependant, le nombre de sujets étant assez faible, il est nécessaire d'effectuer davantage de tests pour avoir des résultats plus significatifs. Nous avons par ailleurs évalué l'effet du suivi en position (tracking) des sujets sur la perception des distances, en comparant dans le mode coopératif une situation avec suivi en position de l'un des sujets et une situation sans. Les résultats ont montré que l'absence de suivi en position avait un effet significatif sur la perception des distances avec une sur-estimation de 89,3% en moyenne, ce qui est étonnant alors que les sujets étaient proches entre eux, que les mouvements étaient uni-directionnels et que la quantité de flux optique était *a priori* la même quel que soit le point de vue. Ces tests restent préliminaires et davantage de tests sont à effectuer pour confirmer ces observations, en particulier dans une configuration où les deux sujets sont suivis en position.

3.1.3 Rôle du dispositif de visualisation et des modalités sensorielles

Dans les deux études précédentes, nous nous sommes restreints à une visualisation dans un CAVE. Or la diffusion rapide des dispositifs portatifs tels que les casques de réalité virtuelle impose de s'intéresser au rôle des dispositifs de visualisation sur la perception des distances. En particulier, un des objectifs est d'assurer une expérience de réalité virtuelle semblable, quel que soit le dispositif de visualisation, CAVE ou casque, malgré leurs caractéristiques techniques très différentes. Concernant la perception des distances, la littérature a clairement montré des différences selon le dispositif de visualisation utilisé. Le tableau 3.1 montre un rapide aperçu des différents travaux à ce sujet avec les méthodes d'évaluation utilisées¹. Si généralement avec un casque les distances sont sous-estimées, avec un CAVE les distances peuvent être soit sous-estimées, soit sur-estimées en fonction des paramètres expérimentaux.

Dans cette partie, nous nous intéressons à évaluer les différences entre systèmes de visualisation vis-à-vis de l'utilisateur en associant également d'autres modalités sensorielles, telles que l'ouïe. Le cas d'application de notre démarche consiste pour l'utilisateur à choisir la meilleure place dans un théâtre.

Nous avons choisi de considérer deux systèmes de visualisation diamétralement opposés dans leurs caractéristiques : le CAVE précédemment utilisé et le casque immersif GearVR qui possède une capacité de calcul de rendu très inférieure à celle du CAVE. Ces deux systèmes de visualisation offrent des méthodes d'interaction également différentes : dans le CAVE, il est possible d'utiliser des dispositifs d'interaction de type Wand, tandis qu'avec le GearVR, l'interaction avec l'environnement virtuel se fait soit par des boutons situés sur le casque, soit par lancers de rayons dans la direction du regard.

L'environnement virtuel choisi est une reproduction virtuelle d'un théâtre à l'italienne situé à Chalon-sur-Saône, le théâtre Piccolo. Parce que les capacités en termes de rendu ne sont pas les mêmes avec le CAVE et le GearVR et qu'un grand nombre de polygones sont présents dans cet environnement, nous avons effectué des optimisations pour que l'affichage soit fluide avec le GearVR mais reste proche de celui dans le CAVE en termes de rendu : simplification du modèle, méthode de rendu différente (utilisation d'aliasing, shader différent). La figure 3.8 montre le rendu dans le CAVE et dans le GearVR.

1. Renner et al. passent en revue les différentes méthodes de mesure de la perception des distances avec leurs avantages et inconvénients [Renner *et al.*, 2013].

TABLE 3.1 – Comparaison de différents travaux sur la perception des distances utilisant divers dispositifs de visualisation. La couleur rouge correspond à une sous-estimation, la couleur bleue à une sur-estimation.

Dispositif	Méthode d'évaluation	Estimation	
HTC Vive	Orale		[Kelly <i>et al.</i> , 2017]
	Marche imaginée		
Oculus Rift	Marche imaginée		[Creem-Regehr <i>et al.</i> , 2015]
HTC Vive	Pointage triangulé		[Peer and Ponto, 2017]
Oculus Rift	Jet imaginé		[Peer and Ponto, 2017]
VRS V8	Marche imaginée		[Messing and Durgin, 2005]
nVisor ST60	Marche imaginée		[Kellner <i>et al.</i> , 2012]
NVision	Pointage triangulé		[Willemsen <i>et al.</i> , 2008]
nVisor SX	Marche imaginée		[Sahm <i>et al.</i> , 2005]
	Jet imaginé		
Mur immersif	Correspondance perceptive		[Naceri <i>et al.</i> , 2010]
Cybermind	Correspondance perceptive		[Naceri <i>et al.</i> , 2010]
CAVE	Correspondance perceptive		[Murgia and Sharkey, 2009]
CAVE	Correspondance perceptive		[Marsh <i>et al.</i> , 2014]
CAVE	Correspondance perceptive		Voir partie 3.1.1
		[Bruder <i>et al.</i> , 2016]	

Nous avons intégré dans l'environnement virtuel un chanteur virtuel statique présent sur la scène du théâtre et qui chante une mélodie. La spatialisation du son et sa réverbération ont été pré-calculées en utilisant Steam Audio (anciennement Impulsonic Phonon 3D).

Nous avons demandé à 14 sujets (12 hommes, 2 femmes) de réaliser deux tâches, en étant assis tantôt dans le CAVE, tantôt avec le GearVR. La première tâche avait pour objectif d'évaluer les méthodes d'interaction en termes d'ergonomie et consistait à se placer sur cinq sièges du théâtre définis aléatoirement par le système. Pour cela, les sujets dans le CAVE devaient pointer avec une manette de type Wand le siège à atteindre pour s'y téléporter, et avec le GearVR regarder dans la direction du siège à atteindre pour s'y téléporter. La seconde tâche consistait à choisir le meilleur emplacement dans le théâtre pour les sujets pour écouter et voir le musicien virtuel sur scène. Les déplacements dans le théâtre virtuel s'effectuaient de la même manière que dans la première tâche. Pour mesurer la qualité perçue de l'emplacement, nous nous sommes basés sur le questionnaire de [Jeon *et al.*, 2008] qui contient des questions relatives par exemple à la perception des distances, le confort visuel et le confort auditif.

Nous avons fait l'hypothèse que le dispositif de visualisation a un effet significatif sur le choix du siège dans le théâtre du fait de la qualité visuelle et des caractéristiques de chacun des dispositifs.

Les résultats montrent que pour la première tâche l'utilisation du regard avec le casque GearVR est significativement plus efficace que la manette Wand dans le CAVE. Nous avons en particulier observé que dans le CAVE, d'une part les sujets gardaient leur tête en position statique pour sé-



FIGURE 3.8 – À gauche : rendu dans le CAVE du théâtre Piccolo (245767 polygones). À droite : rendu dans le GearVR du même théâtre (82869 polygones).

lectionner les sièges à atteindre, même si ces derniers étaient situés derrière eux, rendant plus difficile la sélection; d'autre part, l'utilisation de la manette n'était pas évidente pour tous les sujets car moins précise que le regard. Tandis qu'avec le GearVR, les utilisateurs devaient utiliser le regard pour pointer les sièges à atteindre, les forçant à adopter un comportement plus dynamique de leur tête et facilitant l'interaction dans l'environnement virtuel.

Pour la seconde tâche, 10 des 14 sujets ont choisi un siège différent entre les deux dispositifs de visualisation (Fig. 3.9). Cependant, les sièges les plus choisis se situaient soit près de la scène, soit sur le devant du balcon. Les résultats du questionnaire n'ont montré aucune différence significative entre les deux dispositifs en termes de réalisme visuel. En revanche, les sujets ont indiqué que la perception de la taille de la scène paraissait plus conforme à la réalité dans le CAVE qu'avec le GearVR et que le son leur paraissait davantage réaliste dans le CAVE qu'avec le GearVR.

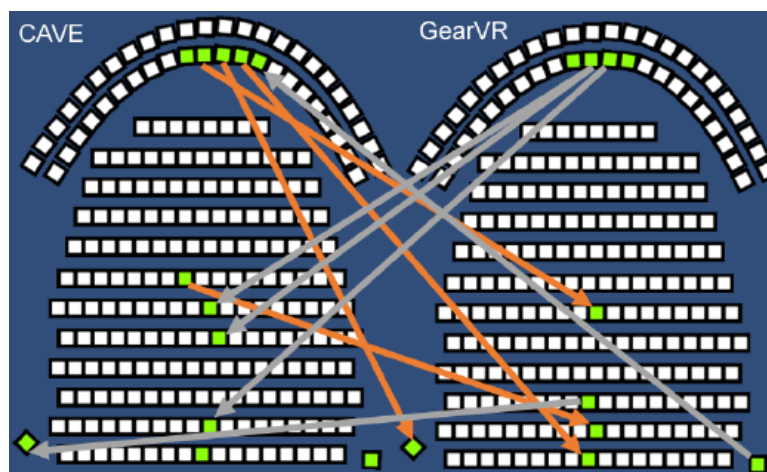


FIGURE 3.9 – Préférence des sièges et changements de préférences effectués entre les deux dispositifs. Les flèches orange indiquent les changements du CAVE au GearVR, les flèches grises les changements du GearVR au CAVE.

Le dispositif de visualisation ne semble ainsi pas avoir d'influence sur certains paramètres tels que le réalisme perçu. En revanche, la préférence des sujets change en fonction du dispositif de visualisation, ce qui montre que la perception de l'environnement virtuel est impactée par le type de dispositif. Dans un CAVE, il est possible de se voir, contrairement au casque immersif. En revanche, le CAVE n'étant pas totalement fermé, il est aisé de perdre l'immersion, contrairement au casque

immersif qui permet une immersion totale. Enfin, les casques immersifs intègrent des lentilles qui déforment l'image et donc affectent la perception de l'environnement virtuel, contrairement au CAVE. Ces résultats nous montrent que le CAVE semble permettre une meilleure perception des distances par rapport au casque, et nous avons observé que non seulement la perception visuelle, mais aussi la perception auditive est meilleure dans un CAVE qu'avec un casque immersif. Ces travaux sont préliminaires à la définition d'une méthode permettant à un utilisateur de bénéficier d'une expérience similaire quel que soit le dispositif de visualisation de réalité virtuelle. C'est tout le travail actuellement réalisé par José Luis Dorado et Théo Combe, deux des doctorants que je co-encadre actuellement.

3.1.4 Discussion

La perception des distances est un domaine de recherche à part entière très complexe à comprendre et à traiter. En particulier l'une des difficultés est que la perception repose sur une appréciation purement subjective et personnelle. Ces quelques travaux nous ont permis de mieux saisir les enjeux pour une meilleure expérience utilisateur en réalité virtuelle. Il est intéressant de voir comment un utilisateur perçoit un environnement virtuel par rapport au monde réel et donc de voir comment il est possible d'essayer de transcrire cette perception en réalité virtuelle. Cela nous conforte également dans l'idée qu'il est important d'envisager de personnaliser davantage les expériences de réalité virtuelle, la perception étant purement personnelle.

L'objectif de ces quelques travaux a été de préparer le terrain pour la définition de meilleures techniques d'interaction en réalité virtuelle. La perception des distances a été l'un des facteurs nous ayant intéressés, mais il existe d'autres facteurs qui doivent tout autant être étudiés. Malheureusement les facteurs sont nombreux et pour traiter la problématique initiale présentée dans le chapitre précédent, il faudrait considérer une combinaison de plusieurs facteurs. Ne reste qu'à savoir laquelle des combinaisons est plus pertinente que d'autres, si tant est qu'il existe une telle combinaison. Dans la partie suivante, nous allons étudier un autre des facteurs prépondérants en réalité virtuelle, le cybermalaise.

3.2 Cybermalaise

Il est couramment admis qu'une exposition au mouvement est susceptible d'engendrer un mal-être, par exemple dans une voiture ou un train en mouvement, ou bien en observant un mouvement sans bouger. La littérature qualifie la première situation de mal des transports ou cinétose induite par un mouvement ressenti (*motion sickness*) et la seconde de cinétose induite par un mouvement vu (*visually-induced motion sickness*) [Bos *et al.*, 2008; Oman, 1990]. Quelles qu'en soient les raisons, les signes cliniques de ce mal-être se manifestent par des malaises, des sueurs froides, des pâleurs, des étourdissements, des vomissements, un rythme cardiaque accéléré, des maux de tête, etc.

La littérature a montré que ce mal-être pouvait se manifester à des degrés divers selon les personnes et que plusieurs paramètres pouvaient influencer sur son occurrence. Par exemple, une exposition répétée peut limiter les effets de ce mal-être par un phénomène d'habituation [Rine *et al.*, 1999]. De même, des personnes dont l'oreille interne est déficiente ne souffrent jamais de cinétose [Cheung *et al.*, 1991; Johnson *et al.*, 1999]. Le fait de rester statique favorise ce mal-être par rapport au fait de bouger [Guo *et al.*, 2013]. Enfin, les femmes semblent généralement plus sujettes à la cinétose que les hommes [Koslucher *et al.*, 2016].

En réalité virtuelle, si des symptômes similaires peuvent souvent apparaître, en particulier lors d'un déplacement en environnement virtuel, les raisons de ce phénomène, communément appelé

le cybermalaise (ou mal de simulateur), peuvent être expliquées selon plusieurs théories [Keshavarz *et al.*, 2014] dont les trois les plus couramment citées sont les suivantes :

- **le conflit sensoriel.** Il s'agit de la théorie la plus communément admise. Le cybermalaise provient d'un conflit entre les stimulations sensorielles et les sensations attendues par la personne [Reason and Brand, 1975]. Typiquement, l'œil perçoit un mouvement alors que le corps ne bouge pas et que le système vestibulaire n'est pas excité.
- **l'instabilité posturale.** Durant un déplacement, une instabilité posturale prolongée précède le mal de simulateur, cette instabilité provenant d'une perturbation de la boucle sensori-motrice [Riccio and Stoffregen, 1991].
- **l'intoxication.** Le mouvement est vu comme une intoxication. Ainsi, le cybermalaise provient de mécanismes corporels ayant pour objectif d'évacuer les toxines présentes dans le corps [Treisman, 1977]. Cette théorie demeure cependant critiquée pour des questions de temps entre le moment où la toxine agit et celui où les symptômes apparaissent (par exemple vomissements).

Nous n'entrerons pas dans les détails des facteurs pouvant influencer l'apparition du cybermalaise car la littérature est déjà très riche à ce sujet, nous indiquerons simplement que ces facteurs peuvent être d'ordre matériel (par exemple, dispositif d'affichage, latence inhérente, champ de vision), du contenu (par exemple, flux optique, durée d'exposition, contrôlabilité de l'application) et humain (par exemple, âge, genre, expérience passée) [Chang *et al.*, 2020].

Le cybermalaise est généralement mesuré soit de manière psychologique, soit de manière physiologique, ou comportementale. La méthode la plus utilisée est le Simulator Sickness Questionnaire (SSQ) [Kennedy *et al.*, 1993], utilisé initialement dans l'aviation, et revisité à plusieurs reprises [Bouchard *et al.*, 2007; Kim *et al.*, 2018]. Ce questionnaire ne se base que sur le ressenti de l'utilisateur à l'instant où il le remplit et peut ainsi ne pas faire ressortir des signes pourtant caractéristiques du cybermalaise. C'est pourquoi des mesures complémentaires sont généralement effectuées, physiologiques ou comportementales, qui ont vocation à donner une mesure davantage quantitative et à apporter une cohérence aux résultats, telles que : la variation du rythme cardiaque, la tension artérielle [Holmes and Griffin, 2001], l'électrogastrographie [Himi *et al.*, 2004], l'électroconductivité de la peau [Yokota *et al.*, 2005] ou l'équilibre postural [Takada *et al.*, 2007].

C'est cette dernière possibilité - l'équilibre postural - qui nous intéresse dans cette partie. Rappelons que nous souhaitons améliorer la navigation en environnement virtuel en prenant davantage en compte l'utilisateur dans la boucle de contrôle. Un des points-clés est de correctement estimer l'occurrence du cybermalaise et de l'anticiper afin d'agir en conséquence pour minimiser la gêne auprès de l'utilisateur. Surtout, il a été montré que le cybermalaise est un moyen de déterminer la validité psychologique d'une application de réalité virtuelle [Pinto *et al.*, 2008]. Nous avons choisi l'équilibre postural comme outil d'estimation et de prédiction du cybermalaise. Avant de montrer comment nous avons utilisé cette mesure, expliquons d'abord pourquoi.

3.2.1 Equilibre postural et cybermalaise

L'équilibre postural repose sur la préservation de l'équilibre par un mécanisme d'ajustement involontaire qui dépend des stimuli (visuels, auditifs, etc.) [Okawa *et al.*, 1995]. Parmi les différentes mesures citées précédemment, la mesure de l'équilibre postural représente une mesure intéressante du cybermalaise. D'une part elle est moins contraignante pour les utilisateurs (pas de capteurs à porter) et réagit à toutes les personnes et de manière instantanée (contrairement par exemple à l'électroconductivité de la peau qui varie beaucoup d'une personne à l'autre). D'autre part, les travaux passés ont montré que l'équilibre postural pouvait être affecté en présence de

stimuli visuels [Takada *et al.*, 2007], que l'occurrence du cybermalaise était précédée d'une augmentation significative d'instabilité posturale [Stoffregen *et al.*, 2000] et que l'équilibre postural pouvait permettre de diagnostiquer la susceptibilité au cybermalaise en particulier auprès d'utilisateurs de casques immersifs [Arcioni *et al.*, 2018].

Pour comprendre ce lien, nous rappelons brièvement le process cognitif en jeu en partant d'une modélisation bayésienne proposée par [Oman, 1990], basée sur la théorie du conflit sensoriel, et représentée dans la figure 3.10a. **A**, **B** et **S** représentent les matrices des équations d'état

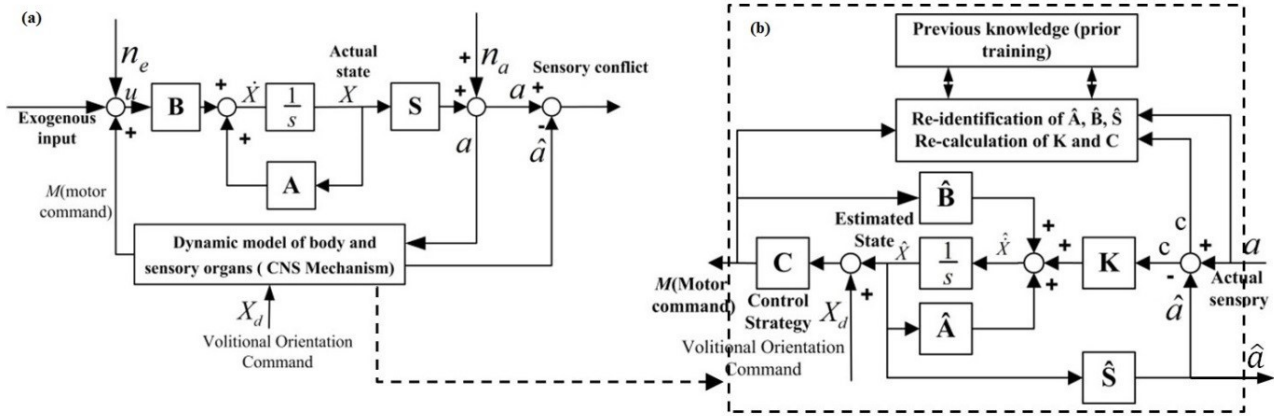


FIGURE 3.10 – (a) Modèle de cinétose proposé par Oman. (b) Modèle dynamique du corps, des organes sensoriels et leurs liens avec le système nerveux central (adapté de [Oman, 1990]).

régissant la dynamique du corps et des organes sensoriels, n_e représentent des entrées autres que des stimuli de mouvement et n_a représentent des perturbations sensorielles. Le système nerveux central, qui joue ici le rôle d'un observateur au sens automatique du terme, estime et prédit continuellement la dynamique du corps en fonction de son état et de celui sensoriel a , et en se basant sur la connaissance *a priori* de la dynamique du corps (représentée par \hat{A} , \hat{B} et \hat{S} dans la figure 3.10b) [Reason, 1978]. L'estimation est corrigée *a posteriori* par un gain de Kalman K , \hat{A} , \hat{B} et \hat{S} sont ensuite ré-identifiés, mettant à jour la stratégie de contrôle de la dynamique du corps C , qui est ensuite injectée dans la dynamique du corps. Ce processus est répété continuellement. Si une différence entre l'état sensoriel actuel a et celui prédit \hat{a} apparaît, un conflit c apparaît, aboutissant à un malaise. Cette différence, en réalité virtuelle, est inévitable en particulier pour des utilisateurs novices, car le système nerveux central se base sur de la connaissance *a priori* qui est absente (l'interaction est réalisée dans un environnement artificiel où les propriétés physiques et sensorielles sont déformées). Cela produit une mauvaise évaluation du gain K nécessaire à la mise à jour de la stratégie de contrôle de la dynamique du corps C , affectant ainsi la stabilité posturale.

Les travaux passés se sont intéressés à suivre l'évolution de la trajectoire de la projection du centre de gravité des personnes [Okawa *et al.*, 1995]. Il a été montré en particulier que le nuage de points formé par la projection du centre de gravité devient clairsemé lorsqu'un sujet est exposé à des images stéréoscopiques [Takada *et al.*, 2007] et que l'estimation du temps restant avant que le centre de gravité ne quitte la surface de stabilité peut être un précurseur de cinétose [Li *et al.*, 2018], ce qui donne des indices pour l'estimation du cybermalaise. En réalité virtuelle, les analyses de l'équilibre postural sont toujours effectuées dans le domaine temporel [Cobb, 1999; Kennedy and Stanney, 1996; Murata, 2004], ce qui ne permet pas toujours de caractériser l'occurrence du cybermalaise et peut, si l'analyse est mal conduite, aboutir à des résultats biaisés.

C'est pourquoi nous avons proposé une autre méthode permettant de manière fiable d'estimer et prédire l'occurrence du cybermalaise. Nous montrons d'abord le cadre théorique que nous validerons par simulation puis par des expérimentations sur des sujets.

3.2.2 Modélisation et simulation

La position debout sur un sol plat est de manière inhérente instable car elle nécessite le contrôle d'un ensemble complexe de segments, l'ensemble ayant un centre de gravité situé assez haut (au niveau du bassin) et une surface de contact de stabilité restreinte. Le système nerveux central applique de manière continue un couple de flexion plantaire des pieds pour empêcher le corps de tomber [Masani *et al.*, 2003].

Nous pouvons de fait considérer que la stabilité posturale est assurée par le bas du corps, et donc modéliser le corps humain par un pendule inversé (Fig. 3.11). Nous pouvons ainsi modéliser le contrôle de l'équilibre postural par le schéma de la figure 3.12. Ce schéma de contrôle, adapté de [Masani *et al.*, 2003], se restreint à une seule direction de balancement (dans le plan sagittal), en sachant que l'autre direction (dans le plan frontal) peut être obtenue avec différentes valeurs des paramètres. L'entrée du système correspond à la consigne en couple appliquée au niveau des

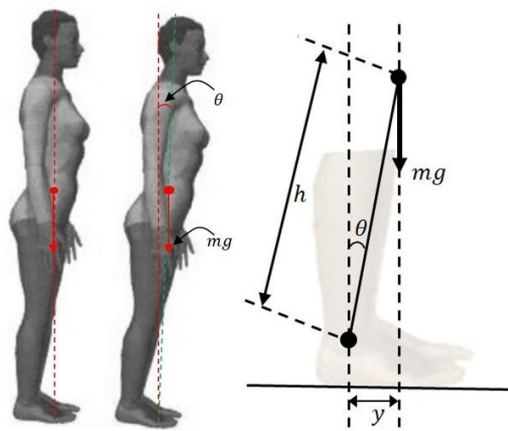


FIGURE 3.11 – Modèle dynamique de l'équilibre postural.

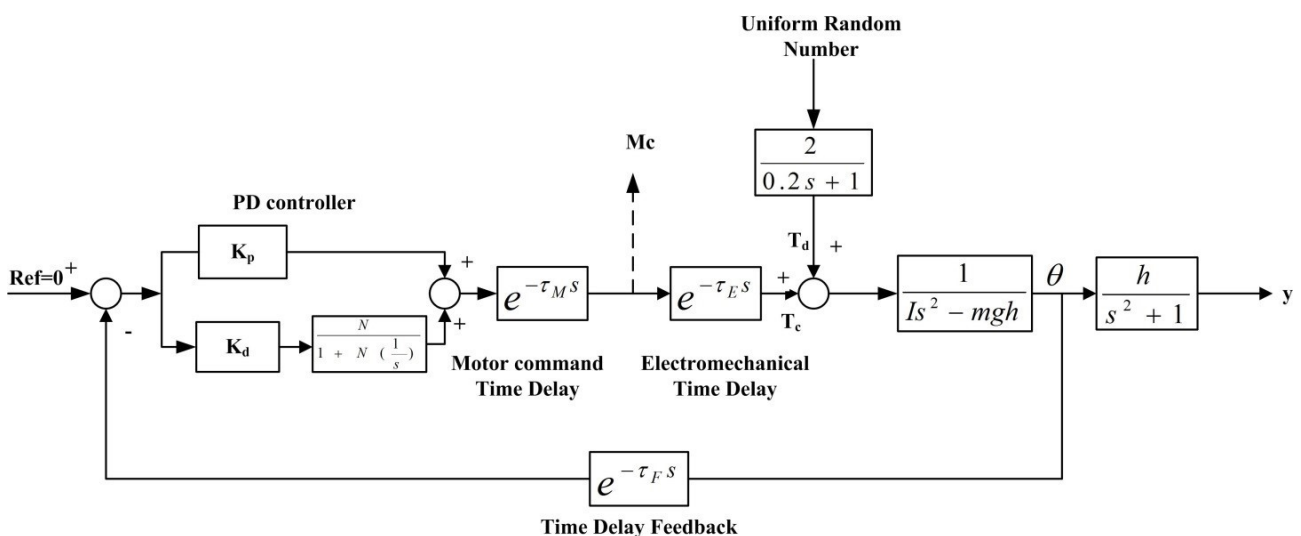


FIGURE 3.12 – Modèle du pendule inversé et schéma de contrôle de l'équilibre postural.

chevilles. Puisque l'objectif est de rester dans une position statique verticale, la consigne est nulle. La commande faite par le système nerveux central est modélisée par un correcteur proportionnel-dérivé filtré. Trois paramètres, dits cognitifs, apparaissent dans le modèle. τ_M représente le retard

TABLE 3.2 – Paramètres de simulation (S. = stable, MS. = marginalement stable).

	τ_F (ms)	τ_E (ms)	τ_M (ms)	K_p	K_d	N
Intervalle	35,1-40,1	10,54-11,5	25-215	50-3000	50-2000	5-2000
S. Frontal	40	11	135	680	320	15
S. Sagittal	40	11	135	750	350	20
MS. Frontal	40	11	175	680	350	9
MS. Sagittal	40	11	175	700	380	10

dans la commande moteur dû au traitement de l'information motrice dans le système nerveux central et la transmission neuronale entre celui-ci et les fléchisseurs plantaires. τ_E représente la différence temporelle entre le moment où la commande musculaire est générée et celui où le muscle réagit effectivement. τ_F représente enfin le retard observé entre le moment où la stimulation sensorielle est fournie au pied et celui où le potentiel évoqué est enregistré par le cerveau. T_c et T_d sont respectivement le couple appliqué au niveau des chevilles et un couple parasite. La fonction de transfert qui donne l'angle de balancement θ (Fig. 3.11), $\frac{1}{Is^2-mgh}$, correspond au modèle dynamique simplifié du corps, avec I le moment d'inertie, m la masse du corps, g la gravité et h la taille de la partie inférieure du corps.

Avant de simuler ce modèle, nous pouvons rappeler que selon la théorie du contrôle d'un système en boucle fermée, il existe trois états possibles de stabilité : stable, marginalement stable et instable. L'équilibre postural étant modélisé comme un système en boucle fermée, la stabilité est caractérisée par des mouvements de très faible amplitude nécessaires au maintien de la posture. Des mouvements amples indiquent alors des mouvements volontaires du sujet. Les états instables sont caractérisés par des mouvements amples involontaires qui peuvent aboutir à la chute du sujet. Dans le cas d'une stabilité marginale, le système nerveux central tente de conserver une posture la plus verticale possible en alternant des états stables et instables. Ainsi, en stabilité marginale, les mouvements sont aussi bien volontaires qu'involontaires.

Pour la simulation, nous avons choisi les paramètres indiqués dans le tableau 3.2. A noter que la valeur exacte des différents paramètres est généralement inconnue et a été choisie ici sur la base des résultats de [Peterka, 2000]. Les paramètres du corps humain utilisés sont ceux d'un homme adulte, définis dans [Masani et al., 2003] ($m = 76$ kg, $I = 66$ kg.m², $h = 0,87$ m). Nous avons réalisé la simulation sous Matlab Simulink sur 20 secondes avec un pas d'échantillonnage de 100 Hz.

Analyse dans le domaine temporel

La figure 3.13 montre les courbes de simulations de la projection du centre de gravité effectuées avec les paramètres de la table 3.2 dans les deux plans sagittal et frontal, et dans les états stable et marginalement stable.

Comme nous pouvons le constater, l'amplitude des signaux dans l'état marginalement stable s'amplifie au fur et à mesure du temps contrairement à l'état stable. Cependant, n'oublions pas que la simulation représente toujours des cas idéaux et qu'ainsi un signal réel ne sera jamais aussi facile à interpréter. Aussi proposons-nous d'examiner d'autres caractéristiques dans les signaux afin de mieux mettre en évidence la différence entre état stable et état marginalement stable.

Nous projetons les courbes de la figure 3.13 sur un plan XY (Fig. 3.14). Cette vue nous permet d'analyser la surface de projection du centre de gravité. Par définition, cette surface représente la surface délimitée par l'ellipse contenant 90% des points [TechnoConcept, 2007]. L'intervalle de confiance est calculée à partir du barycentre du nuage de points, et non à partir de l'origine des repères.

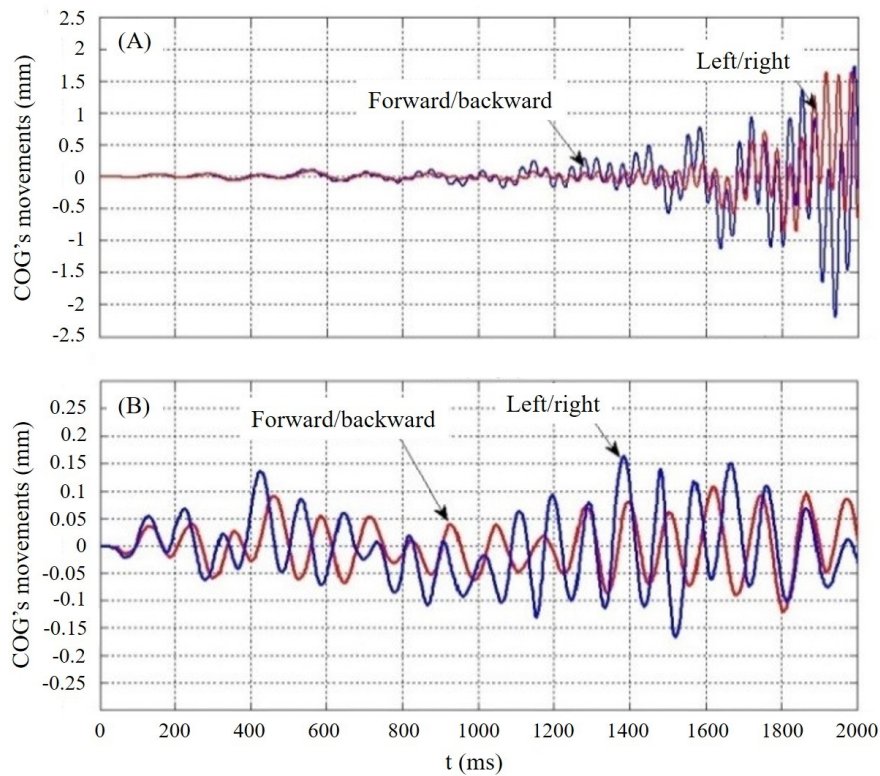


FIGURE 3.13 – Courbes de simulation de stabilité posturale dans les plans sagittal et frontal dans un état (A) marginalement stable et (B) stable.

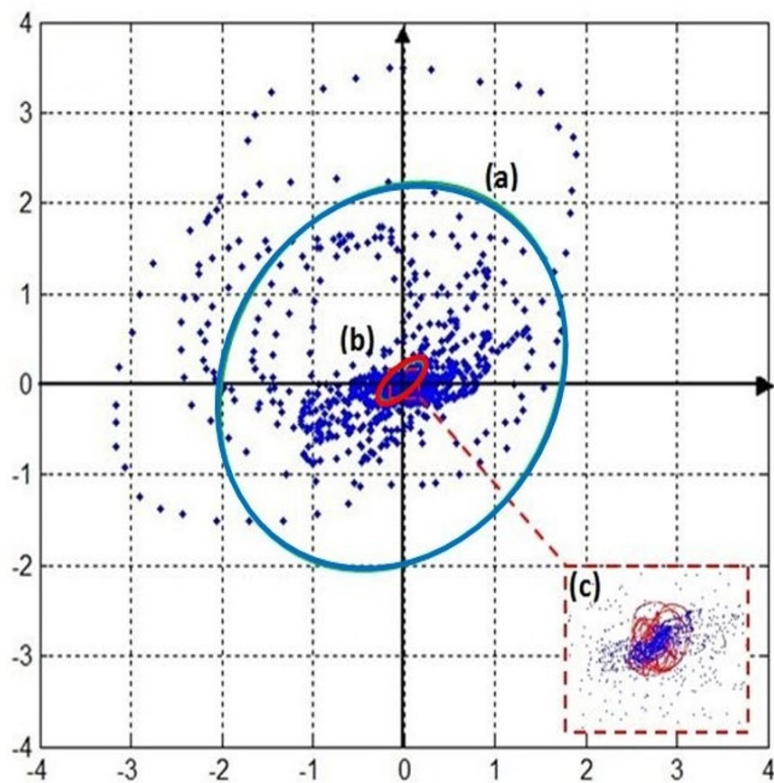


FIGURE 3.14 – Courbes de simulation de stabilité posturale dans le plan XY dans un état (A) marginalement stable et (B) stable.

Plusieurs observations peuvent être faites. D'une part, et de manière cohérente avec la figure 3.13, le corps ne se balance que peu dans l'état stable, avec une densité de points élevée, tandis que dans l'état marginalement stable, la distribution des points est beaucoup plus éparse. D'autre part, nous constatons que dans l'état stable, la surface de projection du centre de gravité est elliptique, tandis que dans l'état marginalement stable, cette surface tend vers un disque.

Ces observations sur la surface de projection du centre de gravité (taille et forme) nous donnent une première caractéristique pour l'estimation du cybermalaise que nous validerons expérimentalement.

Analyse dans le domaine fréquentiel

Allons un peu plus loin dans l'analyse des signaux en les transformant dans le domaine fréquentiel. L'analyse dans le domaine fréquentiel permet généralement de faire ressortir des éléments intéressants qui ne sont pas toujours visibles dans le domaine temporel. Nous nous limiterons pour plus de clarté à l'équilibre postural dans le plan sagittal, la démarche pour le plan frontal étant identique. Après utilisation de la transformée de Fourier rapide des signaux de la figure 3.13, nous obtenons les signaux de la figure 3.15.

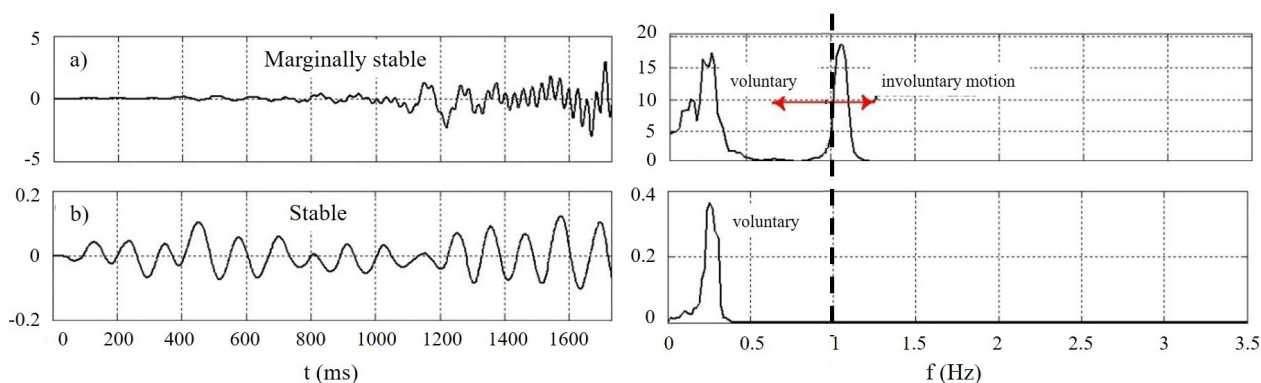


FIGURE 3.15 – A gauche, signaux dans le plan sagittal dans le domaine temporel. A droite, les mêmes signaux dans le domaine fréquentiel. (a) Etat marginalement stable, (b) état stable.

Nous pouvons constater dans l'état stable des composantes du signal uniquement entre 0 et 0,5 Hz, tandis que dans l'état marginalement stable, des composantes sont présentes d'une part entre 0 et 0,5 Hz et d'autre part entre 1 et 1,5 Hz. Bos a montré qu'un signal présentant des composantes en-dessous de 1 Hz correspondaient à des mouvements volontaires, tandis que celles au-dessus de 1 Hz correspondaient à des mouvements involontaires [Bos, 2003]. Or rappelons-nous de ce que nous avons mentionné plus haut : un état stable correspond à des mouvements volontaires, alors qu'un état marginalement stable correspond à des alternances de mouvements volontaires et involontaires. Selon les observations de Bos, c'est bien ce que nous observons dans la figure 3.15a : les composantes en-dessous de 1 Hz correspondent à des mouvements volontaires et celles au-dessus de 1 Hz correspondent à des mouvements involontaires. Dans l'état stable (Fig. 3.15b), nous n'observons aucune composante au-dessus de 1 Hz.

Ces observations sur les composantes fréquentielles de l'équilibre postural nous donnent une seconde caractéristique pour l'estimation du cybermalaise que nous validerons expérimentalement.

3.2.3 Validation expérimentale

Les hypothèses que nous faisons sont basées sur les résultats de simulation :

- H1 Lorsque le cybermalaise apparaît, la surface de projection du centre de gravité change d'une ellipse en un disque et se dilate.
- H2 Les composantes fréquentielles de l'équilibre postural se séparent en deux groupes : un groupe de composantes correspondant à des mouvements volontaires (l'utilisateur contrôle ses mouvements) et un correspondant à des mouvements involontaires (l'utilisateur est victime de cybermalaise).

Nous avons demandé à 17 sujets (13 hommes et 4 femmes) d'effectuer un parcours très simple dans un environnement virtuel constitué d'une salle d'environ 20 m de côté : il s'agissait de suivre une ligne constituée de points le long d'un mur présentant une texture qui favorise l'apparition du cybermalaise (voir Fig. 3.16b). Chaque sujet devait réaliser le parcours sept fois avec entre chaque réalisation de parcours une mesure de l'équilibre postural par une plateforme de stabilométrie Stabilotest de Techno Concept [TechnoConcept, 2007] et une mesure du cybermalaise à travers le SSQ. La navigation s'est faite en utilisant un joystick avec une vitesse de 2 m/s (cette vitesse est supérieure à la vitesse moyenne de marche d'un être humain pour favoriser davantage l'apparition du cybermalaise et donc avoir des données plus significatives). Les sujets étaient placés dans le CAVE que nous avons déjà présenté plus haut (voir Fig. 3.16a). L'expérimentation a duré au total en moyenne 50 minutes par sujet.

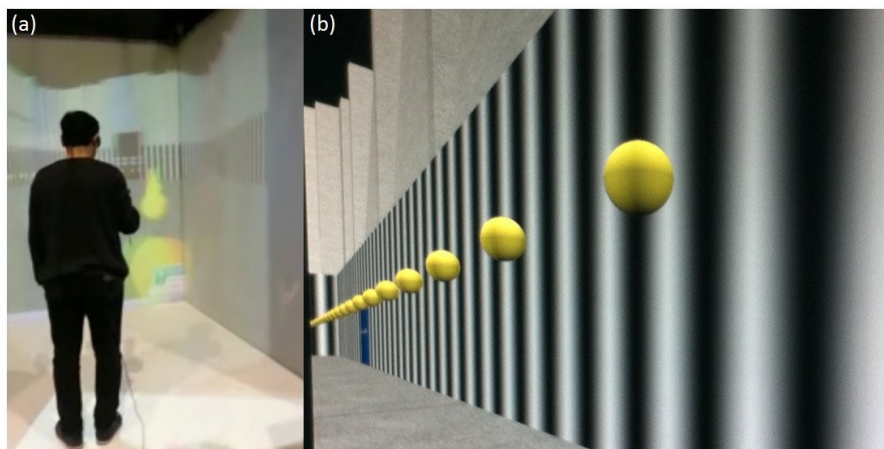


FIGURE 3.16 – (a) Sujet passant l'expérience dans le CAVE. (b) Environnement virtuel avec le parcours à suivre et le mur texturé.

A l'issue de l'expérimentation, 8 sujets ont mentionné être malades, ils ont cependant mené l'expérimentation totalement.

Analyse dans le domaine temporel

La plateforme Stabilotest fournit l'évolution du centre de gravité dans les plans sagittal et frontal, ainsi que 13 paramètres dont la taille de la surface de projection du centre de gravité et la longueur du lieu de la projection du centre de gravité. En simulation, nous avons vu que la surface de projection (taille et forme) fournissait une caractéristique pour l'estimation du cybermalaise. Pour chacun des sujets, nous avons projeté les courbes d'équilibre postural sur un plan XY. La figure 3.17 montre un exemple pour un sujet.

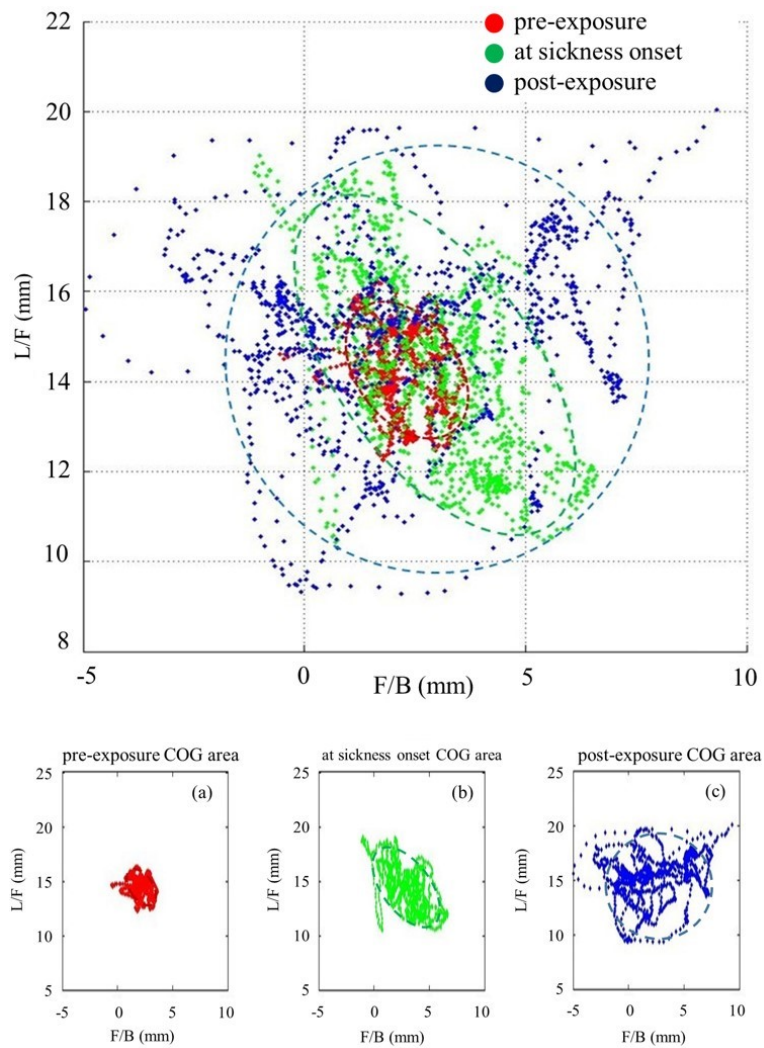


FIGURE 3.17 – Courbes d'équilibre postural pour un sujet dans le plan XY. Les cercles représentent les surfaces de projection du centre de gravité.

Sur cette figure, nous avons indiqué l'équilibre postural à trois instants : avant l'expérimentation (en rouge), après l'expérimentation (en bleu) et à l'instant où le cybermalaise apparaît (en vert). Cet instant n'est *a priori* pas connu. Nous l'avons donc défini comme l'instant où (ou le parcours après lequel) une augmentation soudaine de la valeur donnée par le SSQ est observée. Nous observons que, comme en simulation, la surface de projection du centre de gravité se dilate. Nous avons calculé pour chacun des participants la variation de taille de la surface de projection entre l'instant d'apparition du cybermalaise et avant l'expérimentation ΔA_1 , entre après et avant l'expérimentation ΔA_2 , et entre après l'expérimentation et l'instant d'apparition du cybermalaise ΔA_3 . Nous avons fait de même avec les valeurs données par le SSQ à ces mêmes instants (SSQ_1 , SSQ_2 et SSQ_3). Nous avons ensuite effectué des tests de corrélation entre SSQ_1 et ΔA_1 , entre SSQ_2 et ΔA_2 , et entre SSQ_3 et ΔA_3 . Les résultats sont représentés sur la figure 3.18.

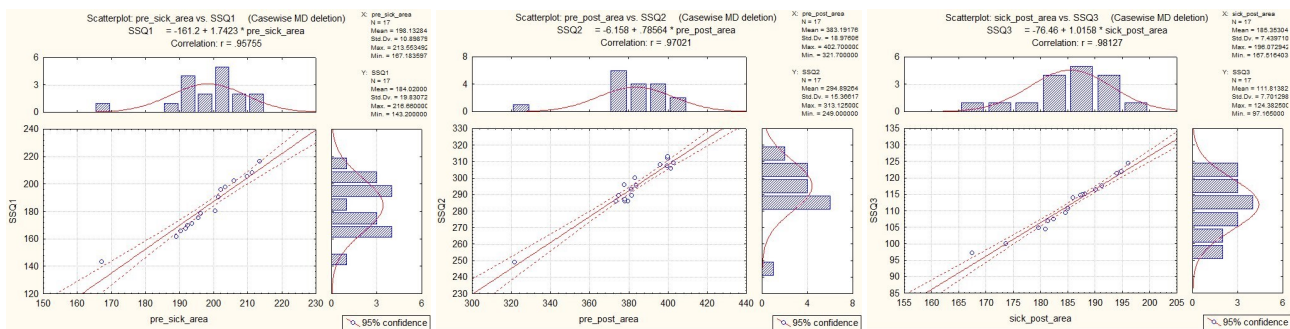


FIGURE 3.18 – Corrélation entre le niveau de cybermalaise et la variation de la surface de projection du centre de gravité : (a) SSQ_1 et ΔA_1 , (b) SSQ_2 et ΔA_2 , (c) SSQ_3 et ΔA_3 .

Nous observons une corrélation forte entre SSQ_1 et ΔA_1 ($r = .96$), entre SSQ_2 et ΔA_2 ($r = .97$), et entre SSQ_3 et ΔA_3 ($r = .98$), indiquant que la taille de la surface de projection du centre de gravité est bien corrélée avec le niveau de cybermalaise.

Par ailleurs, en observant l'évolution de la surface de projection du centre de gravité sur l'ensemble des sujets, nous observons que cette surface évolue d'une ellipse à un disque et que ce changement s'effectue à l'instant où le cybermalaise apparaît (la figure 3.19 montre l'évolution de la surface de projection pour deux sujets), ce qui est conforme à nos observations en simulation. Pour en être certain, nous avons effectué un test de corrélation entre l'évolution de la forme de la surface à deux instants successifs suivant l'apparition du cybermalaise, et les niveaux de cybermalaise correspondants, la forme étant déterminée par le rapport entre les deux rayons de l'ellipse. Les résultats sont représentés sur la figure 3.20.

Nous observons une corrélation forte entre l'évolution de la forme et celle du niveau de cybermalaise ($r = .95$), indiquant que lorsqu'un sujet devient malade, la surface de projection de son centre de gravité évolue d'une ellipse à un disque.

Ainsi, la première hypothèse que nous avons formulée est bien vérifiée.

Analyse dans le domaine fréquentiel

Comme en simulation, nous avons transformé les signaux de l'équilibre postural dans le domaine fréquentiel à l'aide de la transformée de Fourier rapide. La figure 3.21 présente le spectre des signaux dans le plan sagittal pour le sujet de la figure 3.17, aux mêmes instants.

Nous remarquons qu'avant l'expérimentation, le spectre ne possède que des composantes en-dessous de 1 Hz, indiquant, selon les résultats de [Bos, 2003], que les mouvements sont bien volontaires et correspondent à un état où le sujet n'est pas malade. A l'inverse, les spectres des signaux à l'instant d'apparition du cybermalaise et après l'expérimentation présentent des composantes

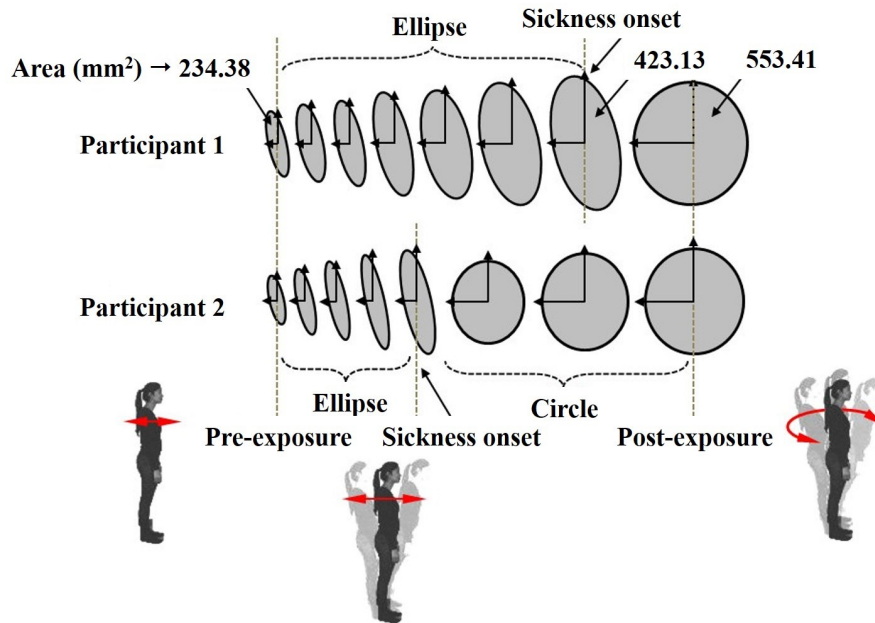


FIGURE 3.19 – Evolution de la surface de projection du centre de gravité pour deux sujets.

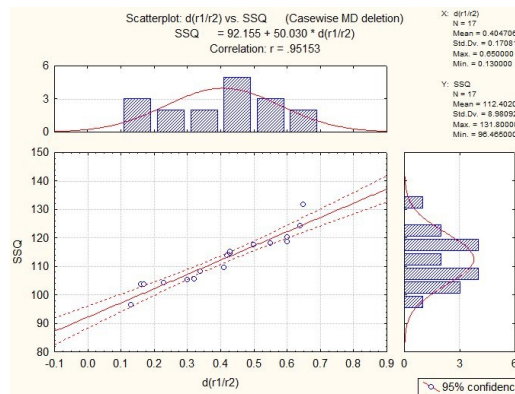


FIGURE 3.20 – Corrélation entre la forme de la surface de projection du centre de gravité et le niveau de cybermalaise.

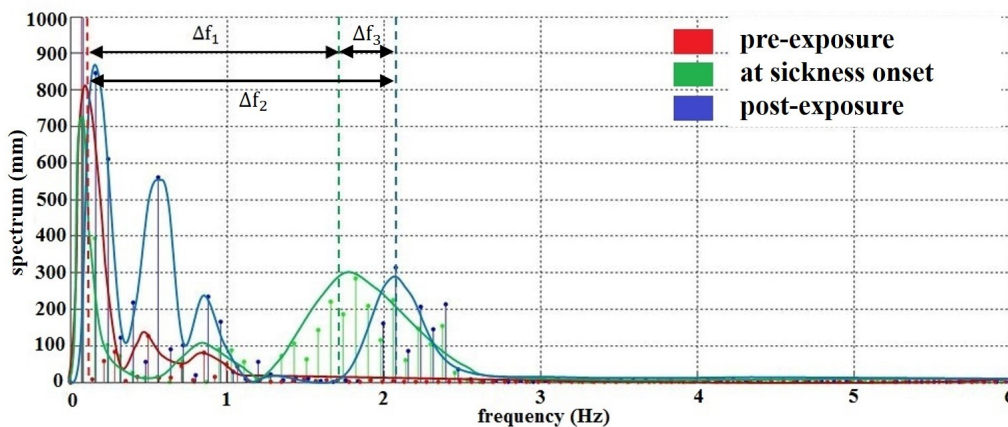


FIGURE 3.21 – Spectre du signal d'équilibre postural pour un sujet dans le plan sagittal.

au-dessus de 1 Hz en plus de composantes en-dessous de 1 Hz, indiquant que l'équilibre postural est bien constitué de mouvements involontaires, signe d'une présence du cybermalaise. Par ailleurs, nous observons que plus le niveau de cybermalaise est élevé, plus les composantes au-dessus de 1 Hz s'éloignent dans le spectre. Ces résultats sont confirmés par les tests de corrélation entre SSQ_1 et Δf_1 , entre SSQ_2 et Δf_2 , et entre SSQ_3 et Δf_3 , Δf_1 , Δf_2 et Δf_3 correspondant aux valeurs indiquées sur la figure 3.21. La figure 3.22 présente les résultats pour l'ensemble des sujets.

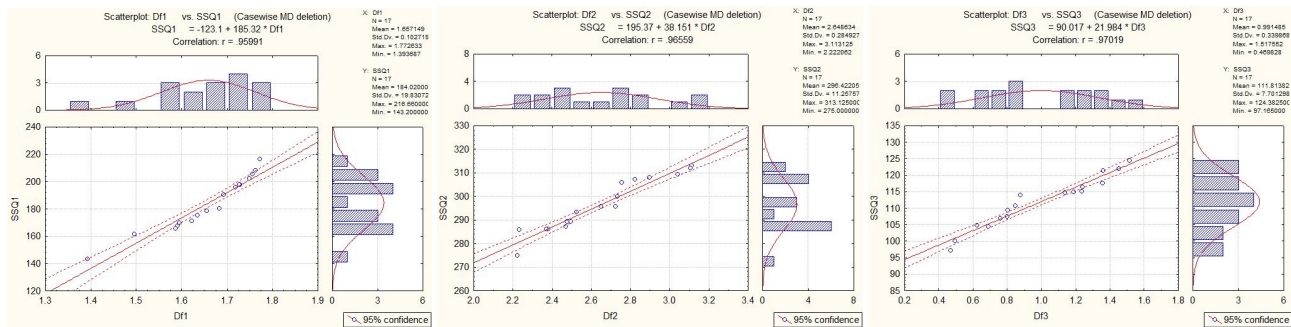


FIGURE 3.22 – Corrélation entre le niveau de cybermalaise et la variation des composantes fréquentielles : (a) SSQ_1 et Δf_1 , (b) SSQ_2 et Δf_2 , (c) SSQ_3 et Δf_3 .

Nous observons une corrélation forte entre SSQ_1 et Δf_1 ($r = .96$), entre SSQ_2 et Δf_2 ($r = .97$), et entre SSQ_3 et Δf_3 ($r = .97$), validant notre seconde hypothèse.

3.2.4 Discussion et prédiction

Nous avons proposé une méthode permettant d'estimer le niveau de cybermalaise grâce à plusieurs caractéristiques : la dilatation de la surface de projection du centre de gravité, l'évolution de sa forme, et la variation du spectre de l'équilibre postural sont des indicateurs efficaces du niveau de cybermalaise. Ces résultats valident les premiers travaux réalisés sur la mesure de l'équilibre postural en réalité virtuelle [Kennedy and Stanney, 1996]. Cependant, la simple analyse de l'équilibre postural dans le domaine temporel ne permet pas d'estimer avec précision le niveau de cybermalaise. En effet, il n'est en particulier pas possible de distinguer si les mouvements observés relèvent de mouvements involontaires ou bien juste de mouvements volontaires. Or ce critère est essentiel pour déterminer la présence de cybermalaise et son niveau.

C'est pourquoi nous avons proposé d'utiliser non seulement la surface de projection du centre de gravité, étudiée dans les travaux antérieurs, mais aussi d'étudier sa forme et le spectre de l'équilibre postural. Nous avons montré qu'en plus de se dilater, la surface de projection du centre de gravité change de forme et devient circulaire à l'instant où le cybermalaise apparaît (en fonction des scores rapportés par les sujets). Nous avons également montré, à partir des résultats de [Bos, 2003], que le spectre de l'équilibre postural d'un sujet victime de cybermalaise montre des composantes correspondant à des mouvements involontaires, donc non contrôlés par le sujet, donc correspondant à la présence de cybermalaise.

Ces résultats nous amènent à proposer une méthode pour prédire l'occurrence du cybermalaise, consistant à restreindre la tâche en réalité virtuelle en fonction des composantes du spectre d'équilibre postural ou en fonction de la taille et de la forme de la surface de projection du centre de gravité (Fig. 3.23).

Si l'avantage de la mesure de l'équilibre postural est de permettre à un sujet de s'affranchir du port souvent intrusif de capteurs, son inconvénient réside dans le caractère non continu des mesures. En effet, si un utilisateur effectue une tâche de navigation, il doit l'interrompre à plusieurs

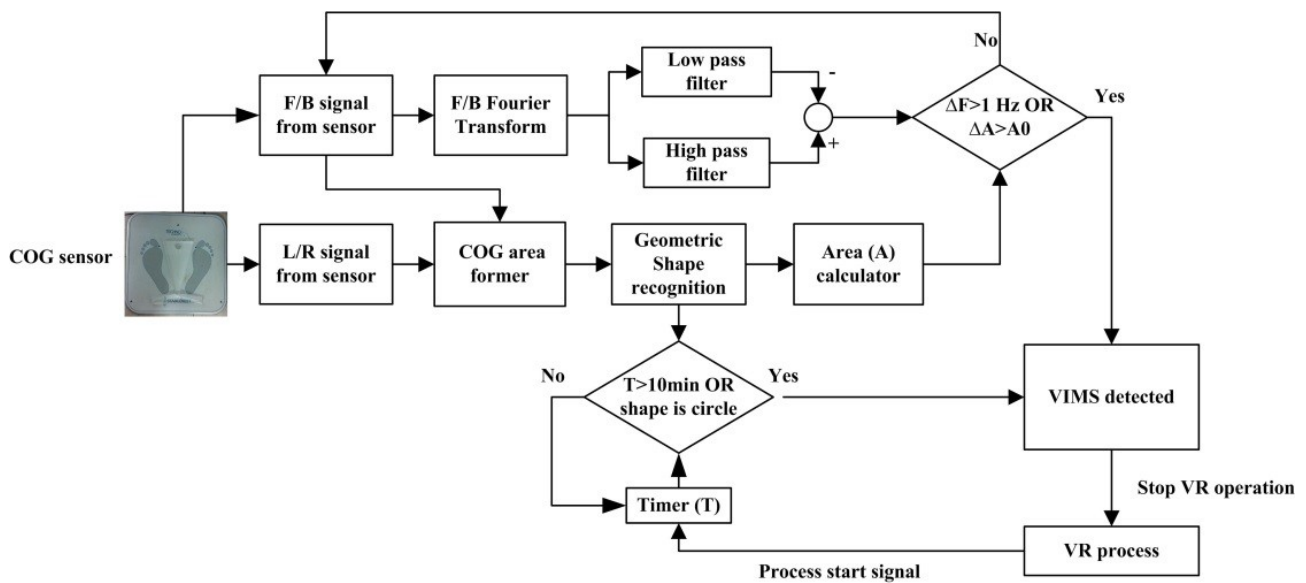


FIGURE 3.23 – Prédiction du cybermalaise dans une application de réalité virtuelle.

reprises pour effectuer des mesures et déterminer son niveau de cybermalaise. Autrement, les mesures risquent d'être biaisées par la présence d'autres mouvements non liés au cybermalaise mais à l'action de l'utilisateur. Il est donc nécessaire de disposer d'une méthode permettant en temps réel et de manière continue une évaluation fiable du niveau de cybermalaise. La littérature a commencé à fournir des travaux dans ce sens, mais dans des cas qui ne sont pas spécifiquement liés à la réalité virtuelle [Laboissière *et al.*, 2015; Palmisano *et al.*, 2018]. Des alternatives à l'équilibre postural pourraient être envisagées telles que la mesure des mouvements de la tête, au moyen de capteurs inertiels, la mesure de l'électroconductivité de la peau, bien que celle-ci, comme indiqué plus haut, varie beaucoup d'une personne à une autre, ou bien la mesure d'autres paramètres physio-comportementaux (par exemple, rythme cardiaque, respiration).

Ces travaux ouvrent une piste intéressante de personnalisation de l'interaction vers laquelle nous souhaitons tendre. En effet, si nous connaissons l'évolution en temps réel du niveau de cybermalaise, nous serons capables d'adapter la navigation en conséquence en temps réel et donc d'améliorer le confort des utilisateurs, ce que nous proposons plus loin, dans le chapitre 6.

3.3 Publications associées à ce chapitre

Partie 3.1

-
- [Marsh *et al.*, 2014] *W. E. Marsh, J.-R. Chardonnet, and F. Merienne*, Virtual Distance Estimation in a CAVE, in **Spatial Cognition IX**, 2014, vol. 8684, pp. 354–369.
- [Marsh *et al.*, 2015] *W. E. Marsh, J.-R. Chardonnet, and F. Merienne*, Distance Perception During Cooperative Virtual Locomotion, in **IEEE Symposium on 3D User Interfaces**, Arles, France, 2015, pp. 173–174.
- [Dorado *et al.*, 2017] *J. L. Dorado, P. Figueroa, J.-R. Chardonnet, F. Merienne, and T. Hernandez*, Comparing VR Environments for Seat Selection in an Opera Theater, in **IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)**, Los Angeles, USA, 2017, pp. 221–222.
-

Partie 3.2

-
- [Chardonnet *et al.*, 2015] *J.-R. Chardonnet, M.-A. Mirzaei, and F. Merienne*, Visually Induced Motion Sickness Estimation and Prediction in Virtual Reality using Frequency Components Analysis of Postural Sway Signal, in **ICAT EGVE**, Kyoto, Japan, 2015, pp. 9–16.
- [Chardonnet *et al.*, 2017] *J.-R. Chardonnet, M.-A. Mirzaei, and F. Merienne*, Features of the Postural Sway Signal as Indicators to Estimate and Predict Visually Induced Motion Sickness in Virtual Reality, **International Journal of Human–Computer Interaction**, vol. 33, no. 10, pp. 771–785, 2017.

Navigation en environnement virtuel

Dans le chapitre précédent nous avons cherché à mieux comprendre ce qu'un utilisateur perçoit en environnement virtuel. Des travaux que nous avons présentés précédemment, nous proposons dans ce chapitre d'explorer plusieurs méthodes de navigation permettant de répondre aux questions initialement posées d'intuitivité et de réduction du cybermalaise. Nous proposons ici d'aborder ces problématiques non par le développement de nouveaux dispositifs d'interaction, mais par le développement de nouvelles techniques d'interaction. En effet, d'une part les technologies de réalité virtuelle ont beaucoup progressé et ont maintenant une faible latence, une haute définition des écrans et un suivi en position de l'utilisateur performant, autant de paramètres liés au cybermalaise en moins à gérer; d'autre part l'offre en dispositifs d'interaction est suffisamment large pour ne s'intéresser qu'à la partie logicielle de l'interaction.

Nous étoffons ainsi le catalogue des méthodes d'interaction, déjà bien épais de par la multitude de travaux passés sur le sujet [Boletsis, 2017]. En faisant un rapide tour du catalogue, nous avons établi dans le tableau 4.1 un comparatif des principales méthodes de navigation existantes, en termes d'affordance (la méthode suggère son usage de manière facile et instantanée), d'ergonomie (la méthode est performante et confortable), de présence (la méthode permet de se sentir présent dans l'environnement virtuel), de cybermalaise (la méthode n'engendre pas de cybermalaise élevé) et d'adaptabilité à un cas d'usage (la méthode est utilisable dans tous types d'applications). Comme nous pouvons le voir et sans surprise, à part la marche naturelle, aucune méthode n'arrive à concilier l'ensemble des paramètres de manière optimale. Le défaut majeur de la marche naturelle est lié à des contraintes physiques inhérentes aux technologies de réalité virtuelle. La téléportation, de plus en plus populaire depuis peu, est également bien évaluée mais ne correspond pas à une navigation naturelle et peut mener à une perte d'orientation spatiale [Bowman *et al.*, 1997]. La marche redirigée est également une technique de navigation qui fait l'objet d'une grande attention depuis peu car elle permet d'explorer des environnements virtuels infinis tout en marchant réellement dans un espace physique contraint, cependant elle nécessite un paramétrage des gains de redirection qui, s'il est mal réalisé, peut perturber fortement l'utilisateur [Langbehn and Steinicke, 2018].

La plupart des travaux passés de la littérature se sont attachés à modifier les paramètres de navigation pour réduire le cybermalaise, au détriment de la performance de navigation et de l'aide à naviguer dans l'environnement virtuel. Il existe d'ailleurs dans la littérature des articles proposant des recommandations pour limiter le cybermalaise, en particulier lors d'utilisations de casques immersifs et plutôt pour des applications liées à la santé ou aux jeux vidéo [Porcino *et*

TABLE 4.1 – Comparatif de plusieurs méthodes de navigation.

Méthode de navigation	Affordance	Ergonomie	Présence	Cybermalaise	Adaptabilité	Défaut
Marche [Ware and Osborne, 1990]	+++	++	++	+++	--	Limites physiques
Bottes de sept lieues [Interrante et al., 2007]	++	++	++	+	+	Nécessité de se recaler périodiquement
Marche redirigée [Razzaque, 2005]	++	+	+	+++	---	Paramétrage complexe
Marche sur place [Slater et al., 1995]	+	-	+	++	-	Combinaison difficile avec la marche classique
Marche sur place redirigée [Razzaque et al., 2002]	+	-	+	++	-	Combinaison difficile avec la marche classique
Ruban magique [Cirio et al., 2009]	++	++	-	--	+	Recalage précis difficile et rotation manquante
Véhicule volant [Ware and Osborne, 1990]	---	---	-	---	--	Très difficile à maîtriser
Manette/joystick	++	+++	+	-	++	Lois de déplacements qui rendent malade
Téléportation [Bozgeyikli et al., 2016]	++	+	+	++	++	N'est pas naturel, perte d'orientation spatiale
Pointage [Mine, 1995]	++	+	+	--	+	Rotation manquante
Posture comme joystick [Beckhaus et al., 2005]	++	-	++	+	-	Fatigant physiquement
Carte 2D [Angus and Sowizral, 1995]	+	+	+	--	-	Peu pratique pour des déplacements locaux
World in Miniature (WIM) [Pausch et al., 1995]	+	+	+	+	+	Compliqué à utiliser
Step WIM [LaViola et al., 2001]	--	+	+	++	-	Peu pratique pour des déplacements locaux
Path drawing [Igarashi et al., 1998]	+++	+	+	-	++	Recalage peu aisé
Compagnon virtuel [Cirio et al., 2012]	+	+	+	+	-	Pas adapté à toutes les situations
Portail [Pierce et al., 1997]	--	--	++	+++	--	Moyen manquant pour choisir la destination
Scaled-world grab [Mine et al., 1997]	---	---	--	+	--	Impossible à maîtriser pour un néophyte
Grabbing the air [Mapes and Moshell, 1995]	++	--	+	-	+	Fastidieux pour de longs trajets
Rotation de la tête [Sargunam et al., 2017]	++	--	+	++	+	Effort physique important

al., 2017]. La téléportation semble à ce titre adaptée mais comme indiqué plus haut, cette technique peut provoquer des pertes d'orientation spatiale. Pour essayer de réconcilier un maximum de critères, nous proposons ici plusieurs méthodes de navigation que nous décomposons en interactions dites naturelles et en interactions dites informatiques.

L'interaction dite naturelle est réalisée au moyen d'interfaces peu visibles et généralement non intrusives pour l'utilisateur (par exemple une caméra, un micro) avec des techniques ne nécessitant que peu d'apprentissage car exploitant des compétences acquises dès le plus jeune âge telles que le geste et la parole. Par opposition, l'interaction dite informatique nécessite à l'utilisateur de manipuler des interfaces qui peuvent être intrusives et requérir un temps non négligeable d'apprentissage dans leur utilisation (par exemple un joystick) car nouvelles et inhabituelles pour l'utilisateur. Pour comprendre cette distinction, prenons un exemple de la vie quotidienne : pour saisir de la nourriture, il est possible de le faire avec ses doigts en faisant un geste de pincement, mais il est possible aussi de le faire en utilisant des baguettes (telles qu'utilisées dans certains pays d'Asie). Cependant, il est clair que l'utilisation des baguettes en plus de devoir les porter est problématique pour des utilisateurs novices, alors que les baguettes ici n'ont d'autre fonction que de pincer, geste que quiconque est capable de faire avec ses doigts dès son plus jeune âge. En termes de charge cognitive, l'utilisation de baguettes sera donc plus contraignante que le geste de pincement en lui-même. En transposant ceci à la réalité virtuelle, le geste de pincement avec ses doigts correspondra à une interaction naturelle, quand l'utilisation des baguettes correspondra à une interaction informatique.

Nous considérerons enfin une méthode de navigation dite semi-automatique permettant d'aider l'utilisateur dans la réalisation de sa tâche.

4.1 Interactions naturelles

Une des préoccupations de l'interaction homme-machine est l'intégration de moyens naturels tels que la marche, les gestes, l'interaction orale, etc. Comme nous l'avons déjà indiqué, les technologies de réalité virtuelle imposent des contraintes physiques, empêchant une utilisation simple de ces moyens naturels, altérant ainsi l'expérience utilisateur. Ainsi la marche comme moyen de navigation en environnement virtuel est impossible si l'on se trouve dans un CAVE en raison des limites physiques du système, et difficile si l'on utilise un casque immersif en raison de la coupure complète avec le monde réel qui engendre une perte d'orientation spatiale par rapport au réel. Cependant, l'interaction naturelle est intéressante à explorer car elle ne nécessite pas d'utiliser d'interfaces intrusives pour l'utilisateur.

Nous présentons d'abord plusieurs travaux que nous avons réalisés sur l'interaction naturelle, utilisant d'une part le geste, d'autre part la voix, avant de les comparer dans une tâche de navigation simple.

4.1.1 Interaction gestuelle

Les problématiques présentes dans l'interaction gestuelle résident d'une part dans la manière de capter ces gestes (quels capteurs utiliser?), de les interpréter et de définir une taxonomie d'interaction adaptée. Dans cette partie, nous commettrons un abus de langage en parlant de gestes car étant donné que dans ce chapitre nous parlons de navigation, le geste ici sera la marche.

Nous avons développé une méthode d'analyse en temps réel de gestes à base d'ondelettes et l'avons appliquée à la navigation dans un environnement virtuel. Nous avons effectué les tests dans un CAVE, aussi la méthode de navigation utilisée est-elle la marche sur place [Slater *et al.*, 1995] qui, si elle est moins ergonomique que la marche classique, permet de s'approcher de celle-ci. Nous n'avons pas utilisé la marche redirigée car les capteurs de gestes étant fixes, il aurait

été difficile de capter les gestes de l'utilisateur. Pour proposer une interaction performante, il est d'abord nécessaire d'analyser le geste de la marche.

Lorsqu'un utilisateur marche sur place, il doit lever ses deux pieds l'un après l'autre. Les mouvements sont captés à l'aide d'une caméra. La manière la plus simple pour créer une commande de navigation est de définir un seuil, correspondant à une hauteur minimale de soulèvement des pieds, à partir duquel la commande devient active. Une commande en accélération peut être effectuée en considérant l'accélération de mouvement comme une fonction du temps pendant lequel l'utilisateur garde son pied au-dessus de ce seuil (Fig. 4.1).

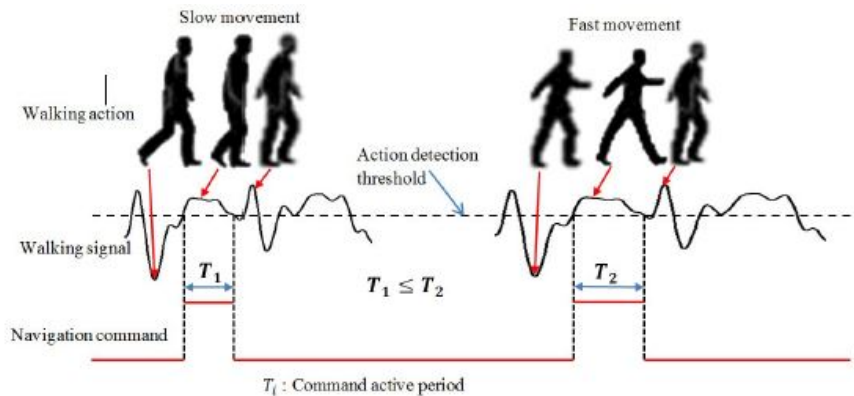


FIGURE 4.1 – Commande de navigation créée à partir de l'analyse du signal de marche.

Dans la pratique, les signaux de marche captés seront ceux de la figure 4.2. Sur la figure du haut, le signal représente une situation où vu du capteur, l'utilisateur n'arrive pas à rester sur place (il avance ou recule par rapport au capteur) ni à faire des pas d'amplitude constante (il ne lève pas ses pieds à la même hauteur). Le signal de la figure du bas est obtenu lorsque vu du capteur, le mouvement des pas est d'amplitude constante et que la distance entre l'utilisateur et le capteur est également constante. Ainsi, l'amplitude des pas vue du capteur est fonction de la distance à celui-ci, ce qui n'est souhaité. De fait, même si l'utilisateur lève ses pieds à la même hauteur, selon qu'il avance ou recule par rapport au capteur, d'une part l'activation de la commande de navigation ne se fera pas aisément (plus l'utilisateur sera loin du capteur, plus il devra lever son pied pour atteindre le seuil défini), d'autre part la distance parcourue en virtuel à chaque pas variera fortement. Ceci engendrera une incompréhension de la part de l'utilisateur dans le fonctionnement de l'interaction.

De fait, une autre solution pour réaliser une commande de navigation est de définir un motif de référence pour la marche et de le détecter dans le signal. Pour cela, nous avons considéré l'analyse par ondelettes. Contrairement à la transformée de Fourier qui ne met en œuvre qu'une base sinusoïdale, la transformée en ondelettes a l'avantage d'utiliser des fonctions localisées à la fois dans l'espace réel et dans l'espace de Fourier et donc de fournir des informations que la transformée de Fourier ne fait pas apparaître.

L'analyse multirésolution par ondelettes décompose un signal $x(t) \in V_{-1} \subseteq L^2(\mathbb{R})$ en une série infinie de fonctions de détail [Chapa and Rao, 2000]. En projetant $x(t)$ sur deux sous-espaces orthogonaux V_0 et W_0 , le signal est décomposé en une approximation et un détail appartenant respectivement à V_0 et à W_0 . Le processus de décomposition est répété successivement dans les sous-espaces V_j et W_j . Les bases orthonormales de V_j et W_j sont décrites respectivement à partir d'une fonction d'échelle $\phi(t)$ qui décrit les propriétés du signal et d'une fonction $\psi(t)$ dite ondelette mère :

$$\phi_{j,k} = 2^{-\frac{j}{2}} \phi\left(2^{-j}t - k\right), \psi_{j,k} = 2^{-\frac{j}{2}} \psi\left(2^{-j}t - k\right), k \in \mathbb{Z} \quad (4.1)$$

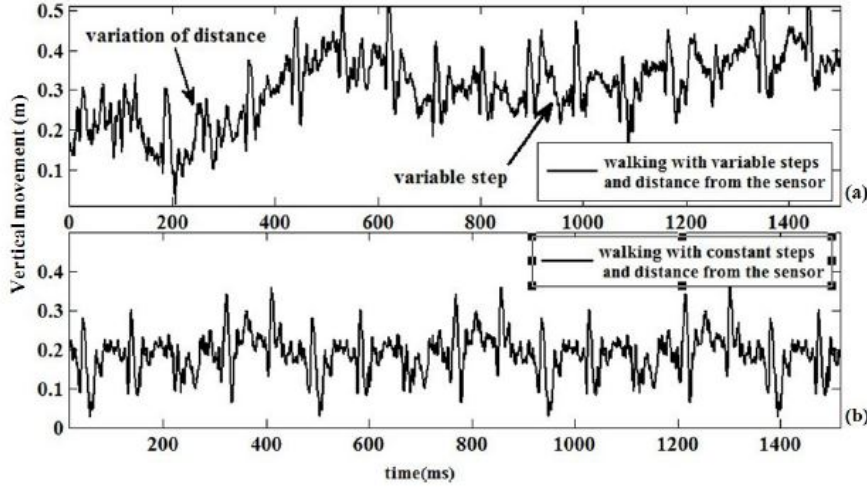


FIGURE 4.2 – Exemple de signaux de marche humaine avec un pas et une distance du capteur (a) variables et (b) constants.

Il reste à définir une fonction d'ondelette mère qui détecte les caractéristiques du signal de marche. Dans la pratique, nous ne connaissons généralement qu'un seul échantillonnage d'une fonction f sur un intervalle $[a, b]$. Nous avons un ensemble fini de valeurs $\{(t_k, y_k)\}_{k=1, \dots, N}$ tel que $y_k \approx f(t_k)$. Nous considérons une famille $F = \{\rho_i\}_{i=1}^N$ linéairement indépendante dans $L^2(a, b)$ et nous notons V le sous-espace vectoriel engendré par F . Le problème est de chercher $\alpha = \{\alpha_i\}_{i=1}^N \in \mathbb{R}$ et une ondelette mère $\psi = \sum_{i=1}^N \alpha_i \rho_i$ tels que

$$\sum_{i=1}^N [\psi(t_k) - y_k]^2 = \min_{\beta \in \mathbb{R}^N} \left\{ \sum_{i=1}^N [V_\beta(t_k) - y_k]^2 \right\} \quad (4.2)$$

tel que

$$\int_b^a V_\beta dt = 0 \quad (4.3)$$

avec $V_\beta = \sum_{i=1}^N \beta_i \rho_i$. Il est ainsi possible de trouver un polynôme qui peut correspondre au motif en satisfaisant les conditions générales de l'ondelette mère tout en maximisant le résultat de l'analyse. Ce polynôme est choisi de degré maximal égal à six pour que le temps de traitement ne dégrade pas la navigation. Il est cependant important d'avoir un polynôme de degré suffisamment élevé pour éviter des erreurs trop grandes.

Pour un signal de marche donné, l'analyse multirésolution par ondelettes utilisant l'ondelette mère précédente donne le résultat de la figure 4.3. Les minima et maxima locaux sont détectés par cette analyse. La commande de mouvement est générée à partir du temps que met le signal pour passer d'un maximum à un minimum. Plus la différence entre un maximum et un minimum sera élevée, plus la commande de mouvement sera de longue durée.

Nous ferons une évaluation de ce mode de déplacement plus loin.

4.1.2 Interaction vocale - Speak-to-VR

Une autre méthode d'interaction naturelle est d'utiliser la voix. C'est d'ailleurs un mode d'interaction de plus en plus répandu depuis l'arrivée des smartphones, d'autant plus que les systèmes de reconnaissance vocale sont de plus en plus performants : des entreprises comme Google

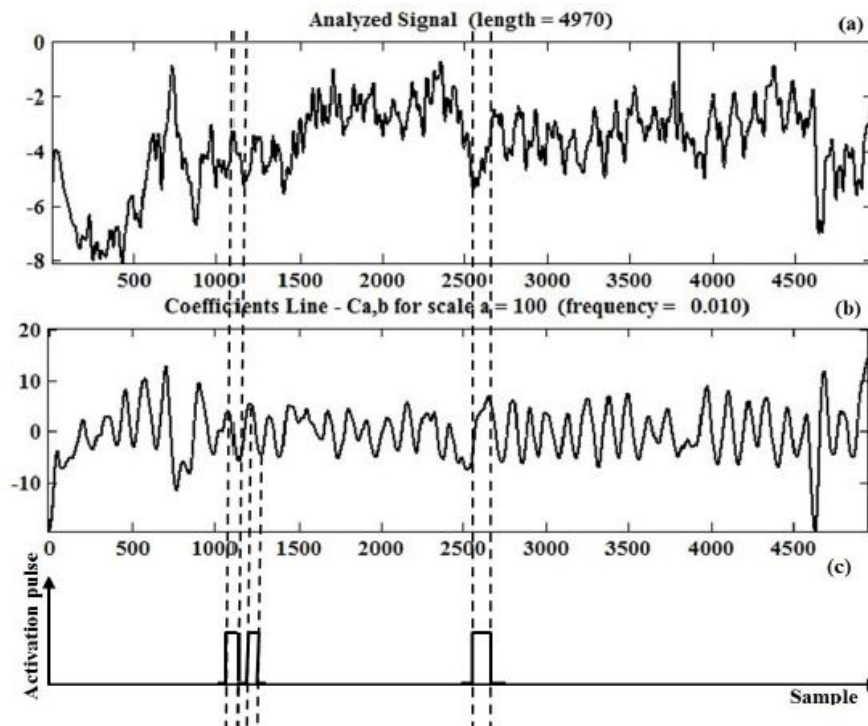


FIGURE 4.3 – Commande de mouvement (c) générée à partir de l’analyse multirésolution par ondelettes (b) du signal (a).

et Microsoft ont annoncé en 2018 des taux de reconnaissance vocale de l’ordre de 95% en langue anglaise¹).

Dans un contexte où les taux de reconnaissance vocale n’atteignaient pas encore ce niveau - les travaux que je présente ici datent de 2013, les taux de reconnaissance étaient alors aux alentours de 75% -, nous avons développé une méthode nommée *Speak-to-VR* pour interagir (naviguer et manipuler) en réalité virtuelle, basée sur Microsoft Speech SDK et utilisant le micro intégré à la Kinect. La problématique reste le traitement du signal, en particulier son filtrage par rapport au bruit ambiant (bruit, écho, réverbération).

Nous avons ainsi combiné Microsoft Speech SDK avec un algorithme de réponse sans distorsion à variance minimum (MVDR) [Shao and Qian, 2013], et l’avons appliqué sur un ensemble de quatre micros présents dans la Kinect. Cet algorithme, très utilisé dans le domaine de la reconnaissance vocale, est une technique de filtrage spatial adaptatif dont le but est de minimiser la variance du signal enregistré. Si le bruit et le signal que l’on souhaite récupérer ne sont pas corrélés, ce qui est généralement le cas, la variance du signal enregistré est la somme des variances du signal désiré et du bruit. En minimisant cette somme (en utilisant par exemple une méthode de Lagrange), l’algorithme pallie l’effet du bruit.

Une fois le signal filtré, il est nécessaire de le traiter pour extraire les mots prononcés. Le système effectue un apprentissage des sons (en utilisant par exemple un modèle de Markov caché). Il analyse chaque mot prononcé et le compare avec une banque de mots. Lorsque le mot correspond, la commande d’interaction est transmise. Le principe complet est indiqué dans la figure 4.4.

Nous avons effectué des tests pour déterminer si le système pouvait être efficace pour réaliser une tâche en réalité virtuelle, en l’occurrence ici naviguer dans un environnement virtuel. Nous avons choisi de constituer deux banques de mots de tailles différentes représentées dans le tableau 4.2.

1. Globalme, *Speech Recognition Technology Overview*, 2018

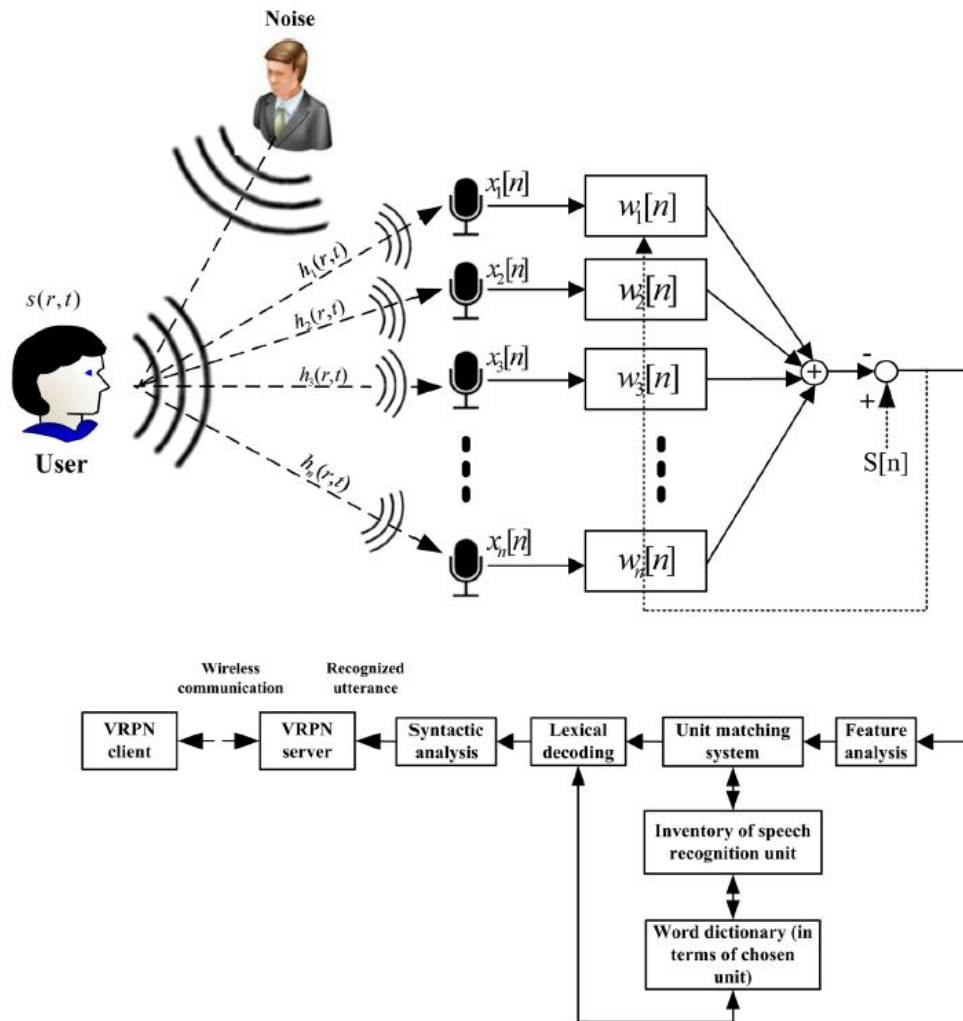
FIGURE 4.4 – Architecture de *Speak-to-VR*.

TABLE 4.2 – Banques de mots utilisés pour la navigation avec *Speak-to-VR*.

Vocabulaire	
Dictionnaire 1	Start, stop, turn left, turn right, forward, backward, move forward, move backward, increase speed, decrease speed, decrease velocity, increase velocity, increase acceleration, decrease acceleration
Dictionnaire 2	Start, stop, turn left, turn right, move forward, decrease velocity, increase velocity, increase acceleration, decrease acceleration

TABLE 4.3 – Temps de traitement de la voix (ms) pour la commande de navigation.

Mot (nombre de lettres)	Start (5)	Turn right (9)	Move forward (11)	Increase speed (13)	Decrease velocity (16)	Increase acceleration (20)
Dictionnaire 1	106	334,8	497,2	691,6	1043,2	1624
Dictionnaire 2	82	248,4	365,2	504,4	755,2	1168

Le tableau 4.3 montre les temps mis pour traiter l'information de la voix selon les mots et selon la banque de données.

Nous observons qu'une banque de mots plus fournie induit un temps de traitement plus élevé, de même que des mots plus longs induisent un temps de traitement plus élevé. Le temps de traitement augmente de manière exponentielle lorsque la longueur des mots augmente. Il est donc clair qu'il n'est pas possible d'utiliser beaucoup de mots ni des mots trop longs, autrement l'interaction ne peut pas être réalisée en temps réel.

Une autre difficulté réside dans le taux de détection des mots. Nous avons observé un taux moyen de 96,25%, cependant, lorsque les mots sont assez proches phonétiquement, comme "Start" et "Stop", le taux de détection est inférieur (95,2%). Enfin, ici, les mots utilisés sont en anglais et le système mis en place est fait pour de la reconnaissance de mots en anglais. Si un utilisateur prononce mal les mots du fait de son accent, le taux de détection est faible.

4.1.3 Evaluation et discussion

Nous évaluons ici les deux techniques d'interaction naturelle (gestes/marche et *Speak-to-VR*) dans un cas de navigation en environnement virtuel. Au vu des résultats précédents, nous faisons l'hypothèse que la technique à base de gestes est plus efficace en termes de cybermalaise que *Speak-to-VR*.

Nous avons demandé à 17 sujets (12 hommes et 5 femmes) de suivre un parcours simple similaire à celui de la figure 3.16, avec les deux techniques. Les sujets étaient placés dans le même CAVE qu'au chapitre précédent. A la fin de chaque parcours, une mesure du SSQ et de l'équilibre postural était effectuée. Les résultats obtenus pour le SSQ sont indiqués sur la figure 4.5.

La technique à base de gestes engendre significativement moins de cybermalaise que *Speak-to-VR*. En utilisant la méthode d'estimation basée sur les composantes fréquentielles de l'équilibre postural présentée dans le chapitre précédent, ce résultat est confirmé.

Ces résultats ne sont pas surprenants, dans la mesure où, avec *Speak-to-VR*, le délai entre le moment où l'utilisateur prononce une commande et le moment où le système réagit effectivement ne permet clairement pas de naviguer de manière souple et efficace. Cette souplesse est également mise à mal du fait de la mauvaise prononciation possible de la part des utilisateurs qui de fait doivent répéter plusieurs fois le même mot pour être compris.

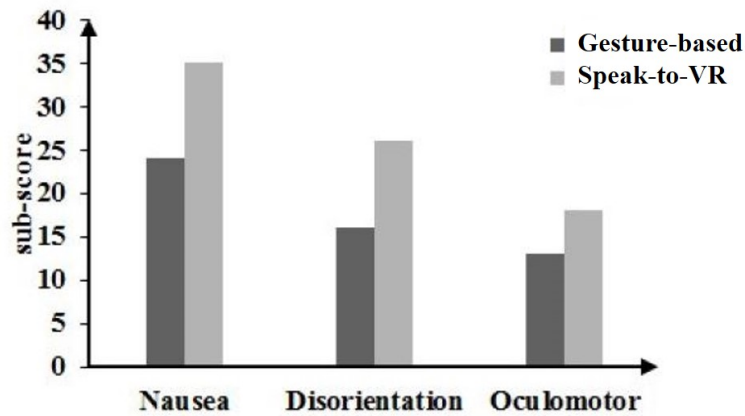


FIGURE 4.5 – Comparaison des scores du SSQ entre la technique à base de gestes et *Speak-to-VR*.

Un test rapide a été réalisé avec *Speak-to-VR* pour une tâche de manipulation et nous avons demandé aux sujets si cette technique était mieux adaptée pour une tâche de manipulation ou de navigation. Il apparaît que *Speak-to-VR* est plus adaptée pour la manipulation en réalité virtuelle que pour la navigation, l'inconfort étant moindre pour la manipulation.

Dans un autre contexte, nous avons observé une performance faible de l'interaction vocale. Il s'agissait de modéliser par la voix, sans traitement initial de signal tel que celui présenté dans *Speak-to-VR*, une chaise très simple composée uniquement de parallélépipèdes en utilisant AutoCAD sur un poste de travail. Les résultats sur 8 sujets ont montré qu'ils avaient beaucoup de mal à réaliser la tâche (en moyenne 77% des commandes vocales étaient détectées avec une faible certitude et seules 7% des commandes vocales étaient acceptées et envoyés à AutoCAD). Les raisons d'une telle performance résidaient pour 88% dans le fait que les voix étaient trop douces, donc que le signal était trop atténué, pour 9% dans le fait que le signal était trop bruité, et le reste dans le fait que les utilisateurs parlaient soit trop vite, soit trop lentement, soit trop fort.

Il est à noter que, comme indiqué plus haut, les taux de reconnaissance vocale atteignant maintenant des niveaux proches de 100%, il serait intéressant de considérer à nouveau ce mode d'interaction en réalité virtuelle. Cependant, la reconnaissance vocale reste un domaine de recherche très actif et l'utilisation d'outils d'intelligence artificielle et en particulier de *deep learning* contribue à améliorer les performances de manière significative (par exemple [Maas et al., 2017]), avec une utilisation possible dans de plus en plus de langues.

L'interaction dite naturelle est un champ de recherche à part entière dans le domaine de l'interaction homme-machine. Sans être entré en profondeur, nous voyons à travers les quelques développements que nous avons réalisés qu'il n'est pas aisé de retranscrire et d'utiliser des gestes apparemment simples et évidents pour les êtres humains dans un environnement tel que proposé par la réalité virtuelle. De manière intéressante, certains chercheurs dans ce domaine montrent que l'interaction naturelle atteint vite des limites poussant à proposer des techniques d'interactions qui ne sont finalement pas si naturelles [Norman, 2010; Bowman et al., 2012]. Ces interactions peuvent au contraire être tout aussi artificielles que celles plus traditionnelles [Malizia and Bellucci, 2012]. Cependant, comme le clavier et la souris qui sont tout sauf naturels ou bien plus récemment l'interaction tactile sur smartphones, une adoption et une utilisation massives ont rendu ces interfaces "naturelles" dans leurs manières respectives de les utiliser. C'est peut-être ce qui compte le plus dans le développement d'interactions dites naturelles plutôt que de chercher à imiter des gestes naturels biologiquement.

4.2 Interactions informatiques

Dans cette partie, nous présentons plusieurs méthodes de navigation que nous avons développées sur la base de périphériques informatiques. Ici, nous ne développons pas de nouvelles interfaces d'interaction ; nous nous basons sur des interfaces existantes. Nous comparons nos méthodes avec une méthode de navigation au joystick (la plus répandue).

4.2.1 Space Scrolling

Les smartphones sont de plus en plus présents (près de 3,2 milliards d'utilisateurs dans le monde en 2019²), par exemple en France en 2019, 77% de la population possédaient et utilisaient un smartphone³. En partant de ce constat, nous avons développé une méthode de navigation qui puisse tirer profit de la familiarité des utilisateurs pour interagir avec des contenus sur smartphones (pincer pour zoomer, scrolling, etc.).

Cette méthode, appelée *Space Scrolling*, utilise un principe simple : pour se déplacer, l'utilisateur doit faire défiler son doigt sur le smartphone, comme il le ferait avec une page sur Internet.

En théorie, le déplacement peut se faire selon deux directions : un défilement sur la longueur provoquera une translation quand un défilement sur la largeur provoquera une rotation. En pratique, l'implémentation est plus complexe car les mouvements de défilement avec le doigt sur le smartphone ne sont jamais linéaires, mais plutôt circulaire de par l'anatomie du pouce par rapport à l'écran du smartphone. Il en résulte des mouvements indésirables qui peuvent perturber la navigation en environnement virtuel.

Pour contrer ce problème, nous avons choisi de limiter le déplacement du doigt sur un seul axe à la fois. Cela nécessite de déterminer l'axe le plus proche selon lequel le doigt se déplace. Cependant, les technologies utilisées pour les écrans tactiles engendrent des imprécisions car seul le centre géométrique de la surface de contact entre le doigt et l'écran est mesuré. Or si un utilisateur augmente la surface de contact de son doigt avec l'écran de manière continue, l'écran considérera qu'un mouvement a été réalisé (Fig. 4.6). Pour résoudre ce problème, le principe est de créer une surface circulaire de contact autour du point de contact détecté par l'écran de la découper en quatre zones identiques (représentées sur la figure 4.6), d'affecter à chacune de ces zones un type de déplacement (translation ou rotation, avant/arrière, gauche/droite) puis de déterminer la zone dans laquelle le doigt se trouve au moment où celui-ci quitte le centre de la surface créée. Par exemple, une possibilité est d'affecter la zone bleue à une translation vers l'avant/arrière et la zone rouge à une rotation vers la gauche/droite. Une autre possibilité est d'affecter la zone bleue toujours à une translation vers l'avant/arrière et la zone rouge à une translation latérale vers la gauche/droite, auquel cas la rotation pourra être assurée par l'orientation du téléphone, détectée à l'aide de marqueurs optiques fixés à celui-ci.

Enfin, un effet d'inertie a été ajouté, présent lorsque l'on défile une page Internet sur un smartphone. Cet effet d'inertie a pour objectifs d'une part d'éviter des déplacements brusques (décélé-rations infinies, arrêts brutaux) pouvant induire un niveau de cybermalaise élevé, d'autre part, vu que l'utilisateur est susceptible d'actionner son doigt plusieurs fois sur l'écran pour atteindre son objectif, de permettre des déplacements fluides dans l'environnement virtuel pour éviter encore une fois des à-coups brusques. Ainsi, le mouvement dans l'environnement virtuel ralentit avec une décélération constante dont la valeur est déterminée de manière empirique.

Les premières expérimentations ont cependant montré que cette technique ne permettait pas de naviguer de manière précise car les accélérations étaient trop élevées. Cela nous a amenés à développer la méthode suivante.

2. [statista, Number of smartphone users worldwide from 2016 to 2021, 2019](#)

3. [Conseil général de l'économie, Baromètre numérique 2019, 2019](#)

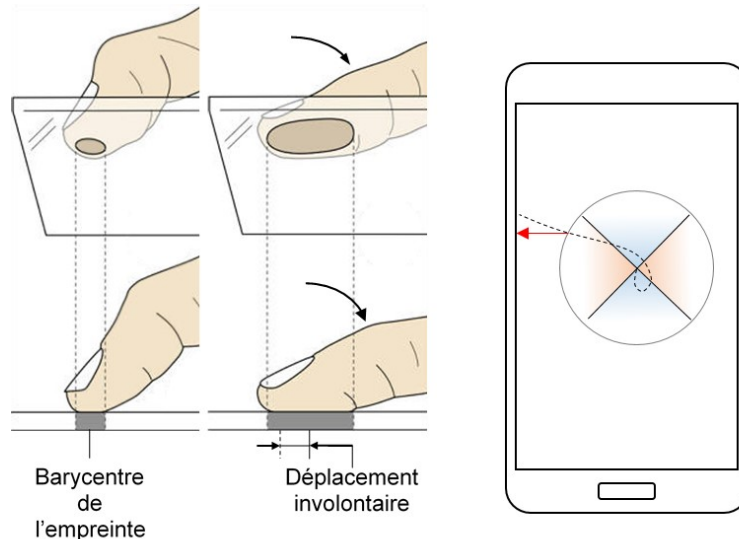


FIGURE 4.6 – A gauche, problème de la précision des écrans tactiles. A droite, principe du verrouillage de la direction du geste sur l'écran (en pointillés, le déplacement réel du doigt, la flèche rouge représente la direction du déplacement retenue).

4.2.2 Avatar Follow

La commande de déplacement *Space Scrolling* se fait en accélération. Comme pour un joystick, son inconvénient est de nécessiter un réglage de paramètres adéquat pour permettre une navigation confortable pour les utilisateurs. En particulier, le problème récurrent de ce genre de commande est que les réglages dépendent fortement du profil des utilisateurs : un utilisateur habitué à jouer aux jeux vidéo aura tendance à préférer des accélérations fortes quand un utilisateur novice préférera plutôt des accélérations faibles pour mieux contrôler ses déplacements et s'habituer à ce mode de déplacement pas très naturel.

La technique *Avatar Follow* est une extension de *Space Scrolling* et permet de mieux contrôler les accélérations lors des déplacements en environnement virtuel. Le principe est de déplacer un avatar virtuel à l'endroit désiré en utilisant *Space Scrolling* et l'utilisateur est ensuite transporté automatiquement à cette position (Fig. 4.7). Cette méthode se rapproche de la technique *Path Drawing* [Igarashi *et al.*, 1998].

Lors d'un déplacement, la translation est effectuée en ligne droite du point où se situe l'utilisateur à celui où se situe l'avatar virtuel, et à une vitesse et une accélération imposées. La rotation est effectuée en alignant la direction pointée par le smartphone et celle pointée par l'avatar. Pour contrer les mouvements involontaires, les commandes en translation et en rotation sont déclenchées à partir de seuils définis expérimentalement. Pour réduire le cybermalaise, des limites en vitesse et accélération sont imposées en translation et rotation, ces limites étant ajustées de manière empirique - la littérature tente de donner des seuils optimaux [Kemeny *et al.*, 2015; So *et al.*, 2001], sans succès véritable étant donné qu'ils dépendent des utilisateurs.

4.2.3 Head Lock

La méthode *Head Lock* s'intéresse spécifiquement à la rotation, connue pour être la composante de déplacement la plus influente sur le cybermalaise [Kemeny *et al.*, 2015].

Le principe est, en position statique, de tourner la tête dans la direction souhaitée, d'attacher l'environnement virtuel à la tête (Fig. 4.8b.) puis de remettre la tête en position initiale (Fig. 4.8c.).

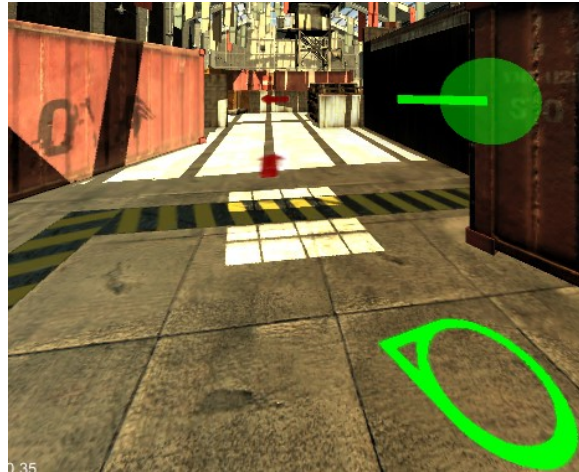


FIGURE 4.7 – Principe de *Avatar Follow*. La sphère représente la position de l’avatar, la tige dans la sphère indique la direction de déplacement.

Dans cette dernière phase, l’environnement virtuel suit donc la tête. Une fois celle-ci en position initiale, l’environnement virtuel redevient indépendant des mouvements de la tête (Fig. 4.8d.). Les rotations sont contraintes autour de l’axe vertical. Le couplage entre l’environnement virtuel et la tête se fait en fermant les yeux, la désolidarisation se fait en les rouvrant, ce qui nécessite d’utiliser un dispositif de suivi du regard. En pratique, nous avons utilisé le bouton d’une manette pour simplifier l’équipement.

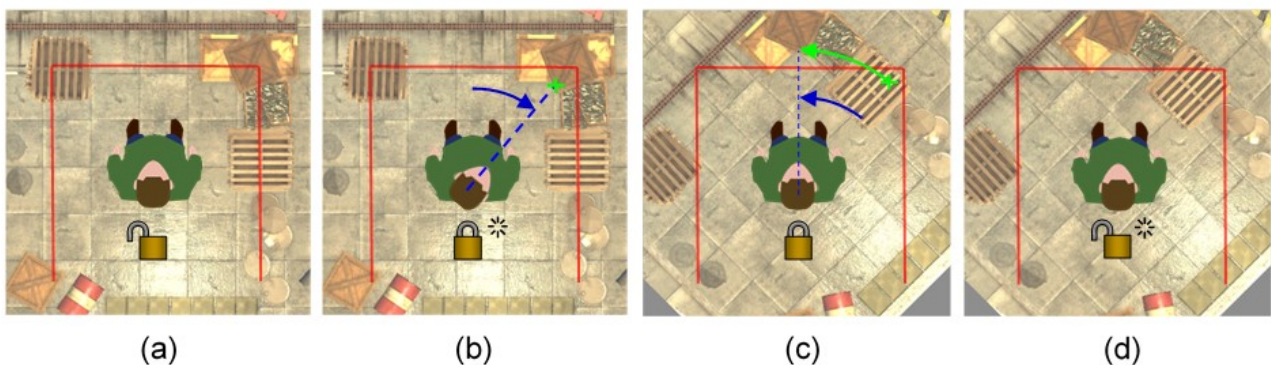


FIGURE 4.8 – Principe de *Head Lock*.

Les premiers essais ont montré que cette technique n’est pas intuitive. En effet, les utilisateurs avaient du mal à coordonner l’appui sur le bouton et la rotation de la tête pour changer de direction (ils appuyaient d’abord sur le bouton avant de choisir la direction). Pour contrer ce problème, une version dite semi-automatique a été implémentée. Lorsque le bouton est appuyé, les mouvements de la tête sont analysés, l’utilisateur tourne sa tête jusqu’à la direction souhaitée. Une tolérance suit le mouvement de la tête (Fig. 4.9b.). Lorsque la tête bouge dans l’autre sens et sort de la zone de tolérance, l’environnement virtuel se solidarise de la tête (Fig. 4.9c.). Enfin lorsque la tête revient à sa position initiale à un seuil près, l’environnement se désolidarise à nouveau (Fig. 4.9d.).

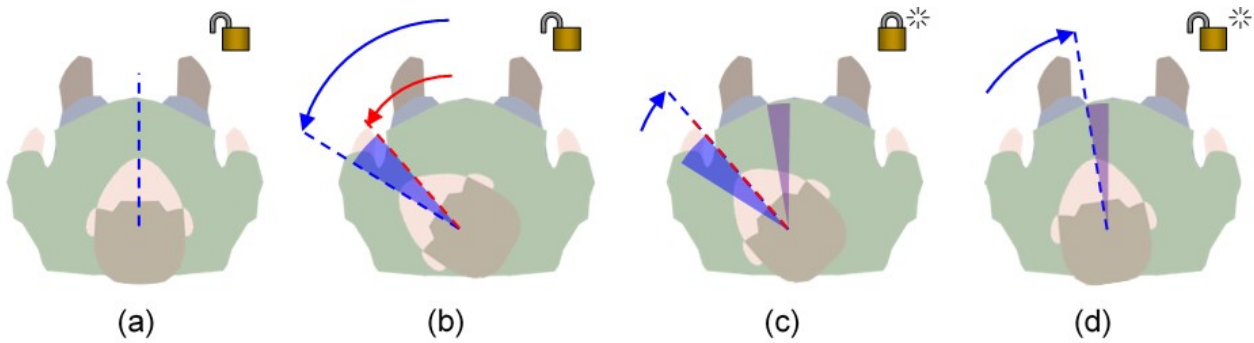


FIGURE 4.9 – Principe de *Head Lock* semi-automatique. La tolérance des mouvements de la tête est représentée par la zone bleue.

4.2.4 Evaluation

Nous avons demandé à 31 sujets (26 hommes et 5 femmes) d'évaluer les méthodes *Avatar Follow* (méthode S) et *Head Lock* (méthode H) et de les comparer à la manette de jeu vidéo traditionnelle, un joystick, dont les mouvements sont contrôlés en accélération (méthode J) sur un parcours de navigation dans un environnement complexe qui pourrait correspondre à une usine virtuelle (Fig. 4.10). Les sujets étaient placés dans un CAVE à quatre faces que le technocentre Renault possède (3,3 m de côté et 2,5 m de haut, résolution de 1024 px x 768 px par face et système de tracking ART). Chaque méthode était évaluée sur 40 minutes environ.

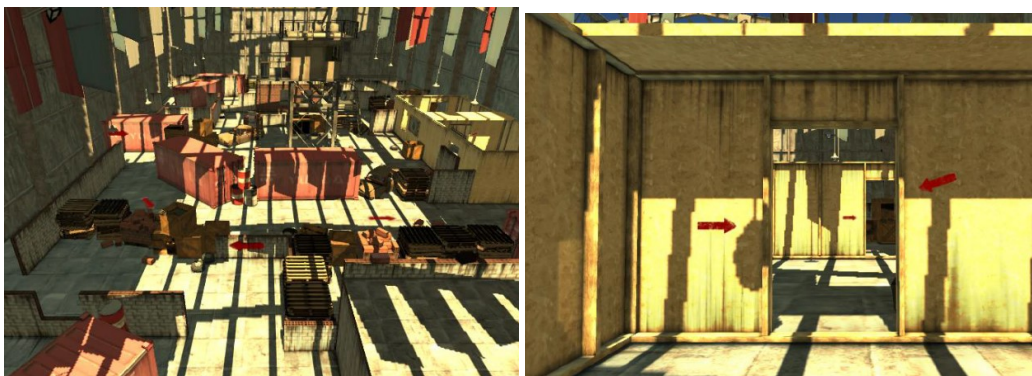


FIGURE 4.10 – Parcours dans l'environnement virtuel.

Pour chacune des méthodes, une mesure de l'équilibre postural par la plateforme Stabilotest déjà utilisée dans le précédent chapitre, une mesure du cybermalaise à travers le SSQ et une mesure de la présence à travers le questionnaire de présence de Witmer et Singer [Witmer and Singer, 1998] étaient effectuées. Enfin, à la fin de l'expérimentation qui s'étalait sur trois jours, les sujets étaient invités à remplir un questionnaire de satisfaction incluant des questions sur l'intuitivité de chaque méthode d'interaction.

Les résultats sont donnés dans la figure 4.11.

La méthode S induit significativement moins d'instabilité posturale que la navigation au joystick. Idem pour la méthode H. En revanche, aucune différence significative n'existe entre *Avatar Follow* et *Head Lock*, même si cette dernière semble mieux adaptée. Les mêmes résultats sont observés pour la mesure du SSQ. En ce sens, nos méthodes sont efficaces vis-à-vis du cybermalaise. Sur l'intuitivité, les résultats montrent que le joystick reste de manière significative la méthode la

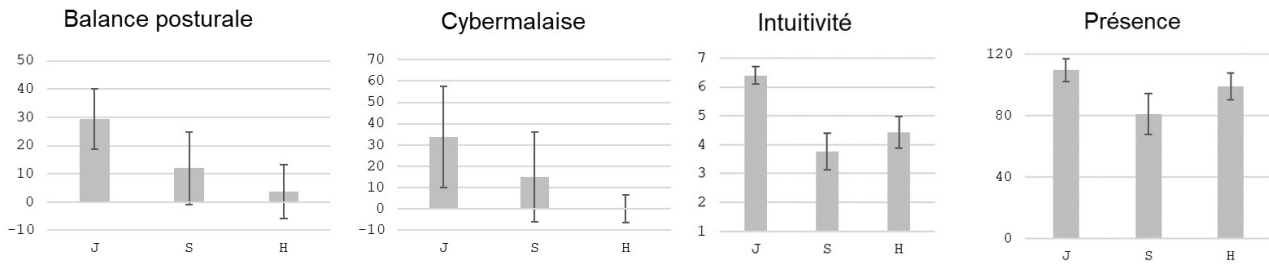


FIGURE 4.11 – De gauche à droite, équilibre postural, SSQ, intuitivité et présence.

plus intuitive. En termes de présence, le joystick est également significativement meilleur que les autres modalités.

Enfin, les sujets ont déclaré à 73% préférer la navigation au joystick.

4.2.5 Discussion

Ces résultats montrent que les méthodes proposées ici répondent bien au problème du cybermalaise mais, concernant l'intuitivité et la présence, la méthode classique du joystick reste la meilleure.

Les premiers enseignements que nous pouvons en tirer sont d'une part la difficulté à concevoir des méthodes de navigation qui concilient l'ensemble des critères imposés en début de chapitre, d'autant plus que des critères tels que l'intuitivité sont très subjectifs. Si le cybermalaise est le défaut le plus récurrent et le plus significatif dans une tâche de navigation, les autres critères sont aussi importants pour une adoption des technologies de réalité virtuelle par les utilisateurs. Par ailleurs, à travers le développement de nouvelles techniques, il est définitivement clair que la recherche d'une meilleure expérience (immersion, présence, cybermalaise réduit, intuitivité) en réalité virtuelle se heurte très vite aux contraintes physiques imposées par la technologie elle-même et aux spécificités de l'utilisateur (caractéristiques psycho-physiologiques), et ne peut absolument pas s'en affranchir.

C'est pourquoi il est nécessaire de repenser totalement la manière de concevoir de nouvelles techniques, voire d'interfaces, d'interaction. En l'occurrence, le tableau 4.1 nous indique que le joystick reste la meilleure méthode en termes d'intuitivité et d'ergonomie et s'adapte bien à tous cas d'usage. Son seul défaut reste un risque fort d'induire un cybermalaise. Aussi, la question qui se pose est de savoir comment utiliser intelligemment une technique telle que le joystick pour la rendre "idéale".

4.3 Navigation semi-automatique

Si dans les parties précédentes, nous avons développé des méthodes de navigation avec des objectifs d'amélioration de l'ergonomie et de réduction de cybermalaise, ces méthodes, comme toutes celles de la littérature, mettent en œuvre des lois de commande très artificielles et lointaines de la marche, avec des mouvements des utilisateurs généralement très séquentiels. Nous proposons ici une technique de navigation hybride permettant d'assister l'utilisateur dans sa navigation, en automatisant partiellement la navigation.

4.3.1 Planification de trajectoires

Une des manières d'aborder ce problème est de faire un parallèle avec la robotique et plus particulièrement la robotique humanoïde. En effet, depuis une bonne quarantaine d'années, ce domaine s'intéresse à faire marcher des robots bipèdes pour les faire évoluer dans des environnements quelconques [Harada *et al.*, 2010]. Une des questions qui se pose est en particulier de déterminer comment faire évoluer un robot humanoïde de manière régulière et continue et non de manière séquentielle comme c'est le cas en réalité virtuelle. Vient alors la notion de planification de trajectoires, très étudiée en robotique humanoïde. Un certain nombre de travaux se sont basés sur de l'optimisation mathématique ou la théorie des graphes pour la planification de trajectoires pour naviguer d'un point à un autre, tels que A* [Hart *et al.*, 1968], en prenant en compte les contraintes de l'environnement telles que des obstacles, mais aussi les contraintes mécaniques des robots telles que les limites articulaires, les frottements internes, ou encore les auto-collisions. D'autres travaux ont basé la planification de trajectoires sur des considérations biomécaniques, en utilisant la capture de mouvements ou les outils d'intelligence artificielle tels que les réseaux de neurones.

En réalité virtuelle, peu de travaux ont tenté d'intégrer des travaux issus de la robotique pour la navigation. Pourtant, la problématique est très proche, dans la mesure où en réalité virtuelle les lois de commande de navigation sont toutes calculées par ordinateur. En y regardant de plus près, les quelques travaux qui ont intégré la planification de trajectoires d'une part se sont focalisés principalement non sur la commande en navigation de l'avatar de l'utilisateur, mais sur celle d'agents autonomes, pour de la simulation de foule dans les jeux vidéo par exemple [Lin *et al.*, 2008; Sud *et al.*, 2008], d'autre part ne font pas d'évaluation sur sujets [Sud *et al.*, 2008; Peng *et al.*, 2009]. Igarashi *et al.* ont proposé une version simplifiée de la planification de trajectoires en demandant à l'utilisateur de dessiner lui-même la trajectoire à suivre, le système transporte alors l'utilisateur selon cette trajectoire [Igarashi *et al.*, 1998]. Cette technique a été prévue initialement pour une utilisation sur écran tactile, une version immersive a été proposée plus tard [Renner *et al.*, 2010]. Dans cette méthode cependant, c'est l'utilisateur qui décide de la trajectoire avant de naviguer et non le système en temps réel.

Un des objectifs du travail que nous avons initié dans le cadre de la thèse de Yuyang Wang est d'explorer de manière plus précise ces méthodes de planification de trajectoires pour les adapter en immersion virtuelle. Plusieurs étapes sont alors nécessaires :

1. adapter une méthode de planification de trajectoires (par exemple A*) en immersion virtuelle. L'utilisateur indique un objectif à atteindre, le système l'y amène de manière automatique. Si de prime abord, cette technique peut sembler proche de la méthode *Avatar Follow* présentée dans la partie 4.2.2 ou bien d'une méthode de téléportation animée [Rahimi *et al.*, 2020], d'une part la trajectoire suivie n'est pas une ligne droite et tient compte de la géométrie de l'environnement virtuel, d'autre part l'utilisateur peut toujours interagir avec le système lors du déplacement en modifiant la vitesse de navigation ;
2. optimiser la trajectoire sous diverses contraintes telles que la plus courte distance, la continuité de la trajectoire, ou le minimum de cybermalaise ;
3. prendre en compte la démarche de l'utilisateur pour coller au mieux à l'utilisateur en termes de perception.

Ici, nous n'aborderons que le premier point et partiellement le deuxième comme préliminaire à une méthode de navigation plus complète.

4.3.2 Principe de la navigation semi-automatique

L'idée de la navigation semi-automatique est de proposer une technique permettant à un utilisateur de bénéficier d'un contrôle de ses mouvements en environnements virtuels mais avec une dynamique lui permettant de s'affranchir de mouvements superflus résultant d'un mauvais contrôle de l'interaction et pouvant engendrer un niveau élevé de cybermalaise. Pour cela, nous avons proposé de combiner une commande de navigation basée sur le regard, pour le contrôle des mouvements, qui permet de se rapprocher d'une situation réelle dans laquelle nous regardons où aller avant de nous engager, et un planificateur de trajectoires, pour s'affranchir des mouvements superflus (Fig. 4.12).

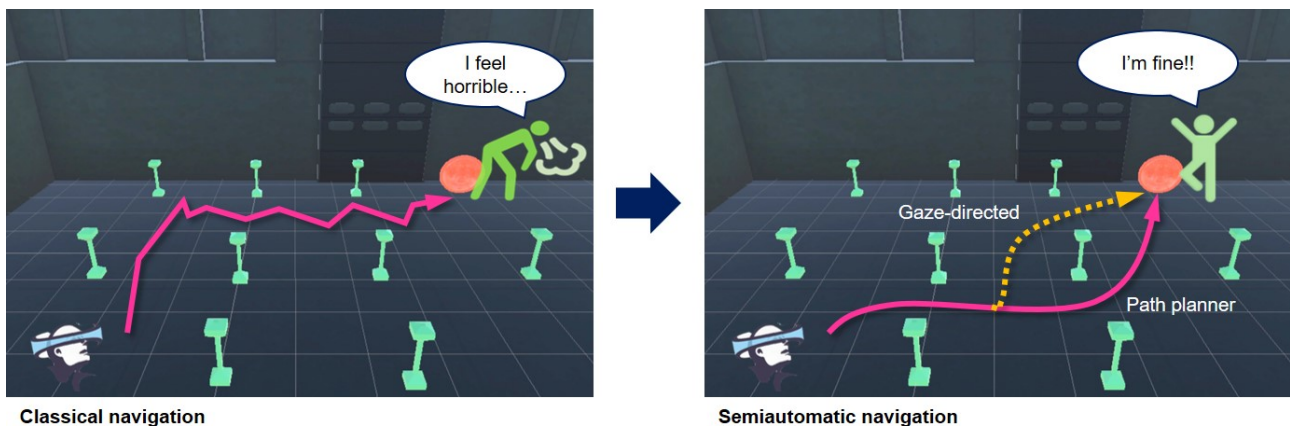


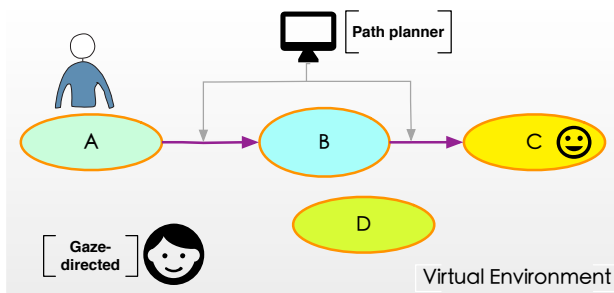
FIGURE 4.12 – A gauche : la navigation classique, par exemple avec un joystick, engendre une trajectoire irrégulière avec des mouvements non naturels pouvant mener à un cybermalaise. A droite : la navigation semi-automatique permet de s'affranchir de mouvements superflus en proposant une trajectoire optimisée lissée.

La planification de trajectoires est basée sur l'algorithme A* qui fournit une trajectoire minimale mais possédant une continuité \mathcal{C}^0 , ce qui ne correspond pas à nos besoins de trajectoires naturelles et régulières. Nous avons donc ajouté une méthode numérique de lissage pour assurer au minimum une continuité \mathcal{C}^1 à la trajectoire calculée. Parmi les méthodes existantes (courbes de Bézier, clothoïdes, courbes polynomiales, etc.), nous avons choisi les courbes de Bézier purement pour des raisons d'implémentation, afin de ne pas engendrer de latence durant la navigation. Dans un travail ultérieur, d'autres méthodes de lissage seront évaluées.

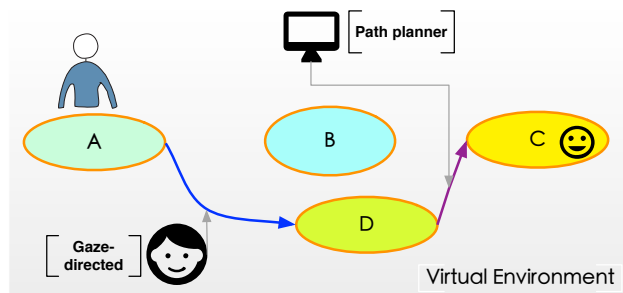
Pour naviguer, l'utilisateur sélectionne l'objectif à atteindre, puis par défaut le planificateur de trajectoires propose la trajectoire minimale à suivre. L'utilisateur peut se laisser guider le long de la trajectoire ou bien décider de changer la trajectoire en orientant son regard dans une autre direction. La sélection du mode de déplacement (planificateur ou contrôle basé sur le regard) se fait en agissant sur l'interface de navigation, par exemple par appui sur un bouton d'une manette.

La figure 4.13 montre quatre exemples de situations d'utilisation de la navigation semi-automatique pour naviguer d'un point de l'environnement virtuel à un autre. Par défaut, le planificateur propose une trajectoire passant par le point intermédiaire B, mais l'utilisateur peut choisir un autre chemin en passant par le point D en activant le contrôle basé sur le regard. L'utilisateur peut ensuite réactiver le planificateur pour reprendre une trajectoire calculée automatiquement.

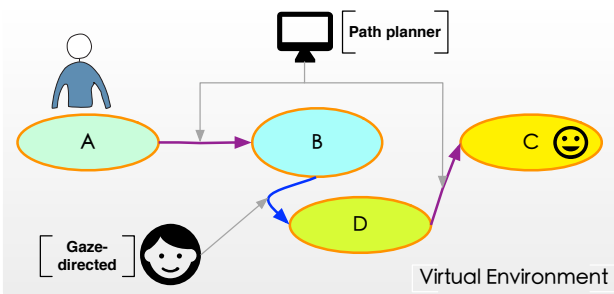
Pour que l'utilisateur garde le contrôle de sa navigation, le déplacement le long de la trajectoire calculée se fait à une vitesse contrôlée par l'utilisateur, grâce à un joystick par exemple.



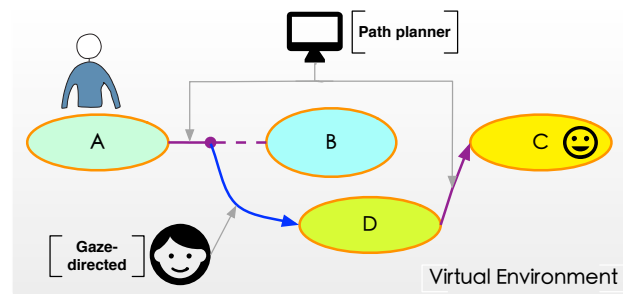
(a) L'utilisateur navigue du point A au point C en suivant la trajectoire proposée par le planificateur. La trajectoire passe par le point B.



(b) L'utilisateur choisit de passer par le point D en utilisant le regard, puis active le planificateur du point D au point C.



(c) L'utilisateur passe par le point B avec le planificateur, puis avant d'aller au point C, choisit de passer par le point D en utilisant le regard. Il réactive ensuite le planificateur pour atteindre le point C.



(d) L'utilisateur suit la trajectoire du planificateur qui propose de passer par le point B mais décide en cours de chemin de passer par le point D en utilisant le regard. Il réactive ensuite le planificateur pour atteindre l'objectif final.

FIGURE 4.13 – Exemples d'utilisation de la navigation semi-automatique pour naviguer du point A (position initiale de l'utilisateur) au point C (objectif final). Les points B et D sont des points intermédiaires dans l'environnement virtuel.

4.3.3 Validation expérimentale

Les hypothèses que nous faisons sont les suivantes :

H1 La navigation semi-automatique permet de diminuer le cybermalaise.

H2 La navigation semi-automatique est plus intuitive et augmente les performances de navigation.

H3 Les utilisateurs préfèrent la navigation semi-automatique.

Nous avons demandé à 13 sujets (9 hommes et 4 femmes) de réaliser une tâche de navigation consistant à passer le plus rapidement possible et dans un ordre défini par 30 étapes réparties dans plusieurs salles de diverses dimensions. Chaque sujet devait réaliser la tâche deux fois, une fois avec une méthode de navigation manuelle (en utilisant un joystick de manière usuelle) et l'autre avec notre méthode (navigation semi-automatique), dans un ordre aléatoire avec au minimum une journée entre les deux modalités. Les sujets étaient placés dans un casque de réalité virtuelle HTC Vive et naviguaient en utilisant les manettes fournies avec le casque. Dans la navigation semi-automatique, pour contrôler la vitesse de déplacement avec le planificateur, les sujets actionnaient la gâchette présente au dos de la manette; le contrôle par le regard était activé en appuyant sur le pad de la manette. La trajectoire proposée par le planificateur était affichée dans l'environnement virtuel. Au cours de l'expérimentation, un seul sujet a rapporté être très malade et donc n'a pas été pris en compte dans l'analyse des résultats.

Pour mesurer l'efficacité de la navigation semi-automatique, nous avons demandé aux sujets de remplir après chaque modalité un questionnaire SSQ et un questionnaire basé sur celui de présence de Witmer et Singer pour obtenir un retour utilisateur en termes d'efficacité (la méthode a permis au sujet d'être efficace dans sa tâche), de précision de réalisation de la tâche (la méthode a permis au sujet d'atteindre les étapes de manière précise), de facilité de prise en main de la méthode de navigation et d'intuitivité (la méthode ne nécessite pas une phase d'apprentissage longue), d'immersion (le sujet s'est senti présent dans l'environnement virtuel), de cohérence par rapport au réel dans la manière de naviguer (la méthode permet une navigation réaliste), et de besoin de concentration (la méthode permet de se concentrer davantage sur la tâche à réaliser que sur la manière de naviguer). L'équilibre postural du sujet et le temps d'exécution de la tâche étaient également mesurés. Enfin, à l'issue de l'expérimentation, nous avons demandé aux sujets d'indiquer leur préférence entre les deux méthodes de navigation.

Les résultats sont donnés dans la figure 4.14. Le mode joystick correspond à la navigation manuelle.

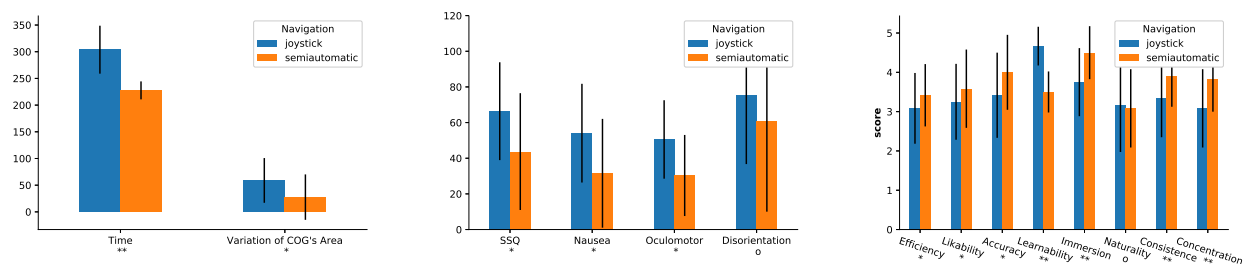


FIGURE 4.14 – De gauche à droite, temps de réalisation de la tâche et équilibre postural, cybermalaise mesuré par le SSQ, retours des utilisateurs.

Sans réelle surprise, la navigation semi-automatique a un effet significatif sur le temps d'exécution de la tâche. Le niveau de cybermalaise, mesuré par l'équilibre postural et le SSQ, est si-

gnificativement réduit avec la navigation semi-automatique. Concernant les retours des utilisateurs selon les critères indiqués plus haut, une différence significative existe entre la méthode manuelle et la méthode semi-automatique pour tous les critères à l'exception de l'intuitivité : les utilisateurs préfèrent la navigation semi-automatique, estiment que celle-ci est plus efficace et permet d'être plus précis dans la réalisation de la tâche de navigation, implique une meilleure immersion, est plus cohérente que la méthode manuelle et permet de se concentrer davantage sur la tâche à exécuter que sur la méthode de navigation en elle-même. En revanche, la navigation semi-automatique n'est pas plus intuitive que la méthode manuelle et semble être plus difficile à prendre en main. Il est à noter que dans le mode semi-automatique, les sujets ont principalement utilisé le planificateur plutôt que le contrôle par le regard dans les situations où il leur semblait difficile de naviguer manuellement.

4.3.4 Discussion

L'hypothèse H1 est validée. L'hypothèse H2 est partiellement validée. Si le temps d'exécution de la tâche est effectivement significativement plus faible avec la navigation semi-automatique, celle-ci n'est pas pour autant vue par les utilisateurs comme plus intuitive que la navigation manuelle. La raison que nous avançons est que les sujets avaient déjà une expérience d'utilisation d'un joystick (par exemple dans des jeux vidéo) et donc n'ont pas eu à apprendre à l'utiliser. En revanche, il a été observé qu'en mode manuel, les sujets avaient du mal à contrôler finement leurs mouvements et réalisaient un grand nombre de petits mouvements d'ajustement pour atteindre précisément les objectifs, rendant la navigation globale très séquentielle et contribuant à un niveau de cybermalaise plus élevé que dans la navigation semi-automatique.

Enfin, si les utilisateurs ont majoritairement apprécié la navigation semi-automatique, à cause d'une plus faible intuitivité de ce mode, l'hypothèse H3 est partiellement validée. Ce résultat est confirmé par le fait que certains sujets ont également rapporté ne pas apprécier être contraints par une trajectoire proposée par un système.

Notre méthode possède de fait certaines limites. La première est qu'il est nécessaire de spécifier l'objectif à atteindre pour que le planificateur propose une trajectoire, ce qui est implicite et fait de manière inconsciente dans une marche naturelle. La seconde limitation fait suite aux retours des sujets sur le fait que les trajectoires proposées par le planificateur sont calculées pour minimiser la distance, mais ne correspondent pas à des contraintes définies par les utilisateurs.

4.4 Conclusion

J'ai présenté l'ensemble des travaux réalisés relatifs au développement de techniques de navigation en environnement virtuel. Ces travaux ont fait apparaître d'une part des interactions dites naturelles, d'autre part des interactions dites informatiques, enfin une nouvelle méthode dite semi-automatique. Le tableau 4.4 résume l'ensemble des méthodes proposées dans ce chapitre et les évaluations par rapport au joystick.

Ces travaux ont montré qu'il est possible d'imaginer à l'infini des solutions pour "mieux" naviguer en environnement virtuel. L'interaction naturelle a vite atteint ses limites en ce qu'elle n'est pas si naturelle que cela. L'interaction informatique atteint également rapidement des limites dans le sens où ce n'est pas tant l'interface elle-même qui est problématique, mais la manière dont elle a été programmée dans son usage. La navigation semi-automatique est intéressante car elle permet à l'utilisateur de se concentrer davantage sur l'exécution de sa tâche en lui proposant des trajectoires minimales et donc de s'affranchir de mouvements superflus.

La réalité virtuelle est trans-disciplinaire car elle est centrée sur l'utilisateur et donc nécessite de s'intéresser à son fonctionnement, à ce que l'on appelle communément les facteurs humains. Or la

TABLE 4.4 – Comparatif des méthodes de navigation proposées dans ce chapitre.

Méthode de navigation	Affordance	Ergonomie	Présence	Cybermalaise	Adaptabilité	Défaut
Manette/joystick	++	+++	+	-	++	Lois de déplacements qui rendent malade
Interaction gestuelle [Mirzaei <i>et al.</i> , 2013]	+	-	+	+	+	Reconnaissance parfaite
Speak-to-VR [Mirzaei <i>et al.</i> , 2014b]	-	-	-	-	++	Reconnaissance vocale parfaite et latence
Avatar Follow [George <i>et al.</i> , 2014]	--	-	+	++	-	Difficulté à positionner l'avatar
Head Lock [George, 2016]	--	+	+	+++	+	Peu intuitif
Semi-automatique [Wang <i>et al.</i> , 2019]	+	++	++	++	++	Trajectoires imposées

réalité virtuelle s'est souvent contentée de développer des interfaces et des méthodes d'interaction avec une vision très informatique, c'est-à-dire avec une approche où tout est homogène pour tout le monde, sans tenir compte de l'utilisateur dans son ensemble. L'interaction en réalité virtuelle semble à ce titre être l'héritière des développements effectués il y a plus de 50 ans sur l'interaction homme-machine en deux dimensions, les résultats les plus répandus de ces développements étant le clavier et la souris informatiques et le tactile sur écrans. En somme et en caricaturant un peu, l'interaction en réalité virtuelle ne semble pas avoir évolué depuis le clavier et la souris. Une des raisons que nous pouvons supposer est l'absence de supports de visualisation réellement 3D (on affiche bien du contenu 3D mais toujours sur des supports 2D, quels qu'ils soient). Egalement, la majorité des acteurs en réalité virtuelle sont finalement plutôt des ingénieurs informaticiens plus que neuroscientifiques.

Il semble donc d'une part important, si l'on cherche à reproduire la réalité, de reconsidérer à nouveau le monde qui nous entoure, la manière dont nous interagissons avec. En quelque sorte, même si les très nombreux travaux dans ce domaine s'efforcent de faciliter l'interaction en 3D jusqu'à proposer des interactions dites "hyper-naturelles" [Bowman *et al.*, 2012], inconsciemment peut-être restons-nous bloqués sur le fait qu'au final l'interaction se fait principalement devant un écran 2D, autrement dit que l'immersion dans le virtuel ne peut pas être totale. La question qui vient alors après est : finalement, est-ce pertinent de chercher à reproduire à tout prix en virtuel une interaction semblable voire identique à la réalité ? La question de la marche naturelle en réalité virtuelle est éloquent et reste toujours une source de travaux de recherche intenses [Nilsson *et al.*, 2018].

D'autre part, si l'interaction 2D ne fait pas intervenir les facteurs humains de manière aussi forte qu'en 3D (ceux-ci étant surtout limités à l'ergonomie), la réalité virtuelle nécessite la prise en compte de l'humain, ce qui n'est le cas que de manière finalement superficielle, la couche informatique restant prépondérante. C'est pourquoi, il est nécessaire de repenser l'interaction de manière plus intelligente, en intégrant l'humain dans son ensemble mais aussi et surtout dans son unicité. Par exemple, une façon de réduire le cybermalaise est d'ajuster les paramètres de vitesses et d'accélération sous des seuils [Kemeny *et al.*, 2015; So *et al.*, 2001; Terenzi and Zaal, 2020], mais qui ne sont qu'empiriques puisque déterminés à partir d'un échantillon. Il n'est pas

possible de généraliser à tous les utilisateurs puisque chacun est unique et a son propre fonctionnement neuro-psycho-physiologique. Il convient donc de développer des techniques d'interaction qui puissent s'adapter à chaque utilisateur. La personnalisation de l'interaction est ainsi à explorer et sera proposée dans le chapitre 6.

4.5 Publications associées à ce chapitre

Partie 4.1

- [Mirzaei *et al.*, 2013] *M. A. Mirzaei, J.-R. Chardonnet, C. Père, and F. Merienne*, Improvement of the real-time gesture analysis by a new mother wavelet and the application for the navigation inside a scale-one 3D system, in **IEEE International Conference on Advanced Video and Signal-Based Surveillance**, Krakow, Poland, 2013, pp. 270–275.
- [Mirzaei *et al.*, 2014b] *M. A. Mirzaei, F. Merienne, J. H. Oliver, and J.-R. Chardonnet*, New wireless connection between user and VE using speech processing, **Virtual Reality**, vol. 18, no. 4, pp. 235–243, Nov. 2014.
- [Mirzaei *et al.*, 2014a] *M. A. Mirzaei, J.-R. Chardonnet, F. Merienne, and A. Genty*, Navigation and interaction in a real-scale digital mock-up using natural language and user gesture, in **Laval Virtual VRIC'14**, Laval, France, 2014, pp. 1–4.
- [Alibay *et al.*, 2017] *F. Alibay, M. Kavakli, J.-R. Chardonnet, and M. Z. Baig*, The Usability of Speech and/or Gestures in Multi-Modal Interface Systems, in **International Conference on Computer and Automation Engineering**, Sydney, Australia, 2017, pp. 73–77.
-

Partie 4.2

- [George *et al.*, 2013] *P. George, A. Kemeny, F. Merienne, J.-R. Chardonnet, I. Mouttapa Thouvenin, J. Posselt, and E. Icart*, Nomad Devices for Interactions in Immersive Virtual Environments, in **IS&T/SPIE Electronic Imaging, The Engineering Reality of Virtual Reality**, Burlingame, USA, 2013, vol. 8649, pp. 86490I-1,86490I-7.
- [George *et al.*, 2014] *P. George, A. Kemeny, F. Colombet, F. Merienne, J.-R. Chardonnet, and I. Mouttapa Thouvenin*, Evaluation of Smartphone-based interaction techniques in a CAVE in the context of immersive digital project review, in **IS&T/SPIE Electronic Imaging, The Engineering Reality of Virtual Reality**, San Francisco, USA, 2014, vol. 9012, pp. 901203-1,901203-7.
-

Partie 4.3

- [Wang *et al.*, 2019] *Y. Wang, J.-R. Chardonnet, and F. Merienne*, Design of a Semiautomatic Travel Technique in VR Environments, in **IEEE Virtual Reality (VR)**, Osaka, Japan, 2019, pp. 1223-1224.

Intégration de la multi-sensorialité

Dans le chapitre précédent, nous nous sommes concentrés sur le développement de techniques de navigation. Dans ce chapitre, nous faisons une incursion dans notre quête d'interactions intuitives et ergonomiques pour explorer l'intérêt de la multi-sensorialité. Nous nous concentrons ici sur le retour vibratoire et haptique, ce sens étant le plus significatif avec la vue. Nos travaux concernent le développement d'une interface d'interaction à main nue, le HandNavigator et le HaptiHand, puis une illustration de l'intégration de la multi-sensorialité pour répondre à un cas d'usage industriel.

5.1 HandNavigator et HaptiHand

Nous présentons ici deux dispositifs destinés principalement à la manipulation d'objets virtuels mais qui pourraient très bien être utilisés comme interfaces de navigation.

5.1.1 HandNavigator

Le premier dispositif, appelé HandNavigator, tente d'adresser la problématique de la préhension d'objets virtuels fidèle à la réalité. Cette recherche de fidélité dans la préhension d'objets est motivée par certaines applications qui mettent en œuvre des situations complexes telles que l'assemblage de pièces dans des environnements très contraints, et pour lesquelles des considérations ergonomiques et de dextérité sont à prendre en compte. Nous partons du principe qu'il existe une multitude de configurations de sa main et de ses doigts pour saisir un objet [Steinfeld, 1986], qu'il est difficile de reproduire en réalité virtuelle avec les dispositifs classiques. Cette complexité est due à la cinématique de nos mains qui contient plus de 25 degrés de liberté par main.

Des dispositifs tels que la Leap Motion permettent de reproduire en réalité virtuelle des configurations de doigts variées et d'envisager des interactions naturelles mais ils restent encore peu précis, nécessitent une étape de calibration encore hésitante et longue et surtout aucun retour tactile n'est disponible. Or, la littérature a montré l'importance d'un retour tactile dans une tâche de manipulation [Talati *et al.*, 2005; Perret *et al.*, 2013]. Les travaux passés ont proposé une quantité importante de dispositifs à retour d'efforts assurant une dextérité de manipulation, par exemple [Koyama *et al.*, 2002; López *et al.*, 2012; Ma and Ben-Tzvi, 2015; Choi and Follmer, 2016]. L'inconvénient de ces dispositifs est qu'ils sont souvent très intrusifs, complexes à utiliser et nécessitent d'avoir les mains en l'air pendant toute la durée de la tâche, ce qui n'est pas ergonomique.

Les objectifs du HandNavigator sont de (i) permettre le contrôle d'un nombre important de degrés de liberté (en l'occurrence ceux indiqués sur la figure 5.1 droite), (ii) permettre une diversité de configurations, (iii) être ergonomique afin d'éviter une fatigue musculaire et permettre une utilisation prolongée, (iv) permettre une restitution du contact avec des objets virtuels qui soit pertinente, (v) permettre à un utilisateur d'interrompre à tout moment une tâche en cours en conservant la configuration virtuelle des doigts, ce qu'aucun dispositif existant ne permet, (vi) être facile et rapide d'utilisation, sans étape de calibration préalable.

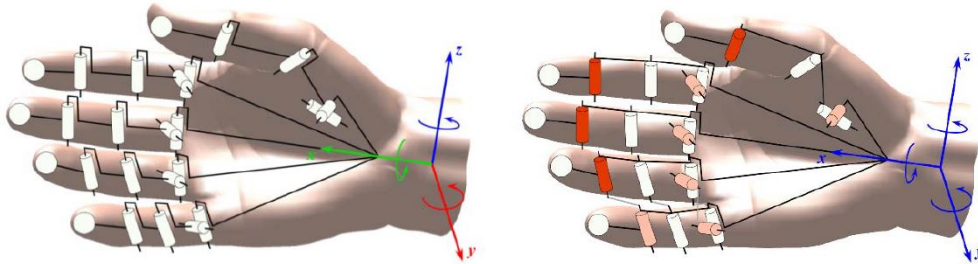


FIGURE 5.1 – Cinématique de la main virtuelle. A gauche, le modèle complet non contraint comporte 6 degrés de liberté pour la main dans l'espace et 4 par doigt (le pouce possède 5 degrés de liberté). A droite, le modèle avec les degrés de liberté contrôlés - indiqués en orange foncé - et les degrés de liberté internes non contrôlés - indiqués en orange clair.

Pour répondre à ces nombreux objectifs, nous sommes partis d'un ensemble de prototypes initiaux du HandNavigator développés précédemment [Kry *et al.*, 2008; Chardonnet and Léon, 2010] qui répondent partiellement aux objectifs visés, à savoir la possibilité d'interagir avec les objets virtuels en ayant sa main posée sur une table pour éviter une fatigue musculaire, à la manière d'une souris classique, d'obtenir une diversité de configurations, d'interrompre à tout moment une tâche et d'être utilisable sans calibration préalable (Fig. 5.2). L'évaluation de ces différentes versions ont mis en évidence un certain nombre de pistes d'améliorations.



FIGURE 5.2 – Différents prototypes initiaux du HandNavigator, appelés de gauche à droite V2, V3t et V3s.

La première concerne l'ergonomie. Les différentes versions de la figure 5.2 imposent des mouvements de la main et des doigts pouvant amener à une fatigue musculaire (typiquement, V2 impose d'avoir le poignet plié à 90 degrés pour le manipuler ainsi que l'utilisation de deux capteurs pour contrôler les doigts - un pour ouvrir et l'autre pour fermer -, V3t impose des mouvements de doigts fréquents du fait de la technologie de capteurs utilisée pour le contrôle des doigts et V3s impose des amplitudes de mouvements des doigts importants). La seconde concerne des aspects neuro-psychologiques. Pour éviter une sollicitation trop forte des muscles, nous nous basons sur un principe similaire à la technique d'interaction go-go [Poupyrev *et al.*, 1996], à savoir réaliser de

faibles amplitudes de mouvements des doigts et de la main réels pour produire des mouvements virtuels de grande amplitude. En effet, la littérature a montré que pour une même tâche, la différence entre l'activité motrice et l'activité mentale n'est pas significative en termes de temps de complétion de la tâche [Kosslyn *et al.*, 2003].

De ces considérations, nous avons développé une nouvelle version du HandNavigator dont le principe est représenté sur la figure 5.3. Le dispositif est composé de quatre modules, un pour chaque doigt. Chaque module est constitué d'un actionneur à molette permettant l'ouverture et la fermeture du doigt, d'un vibreur permettant un retour tactile lors d'une collision avec un objet virtuel et d'un capteur de pression donnant à un utilisateur une sensation de pression exercée lors de la saisie d'un objet. Le contrôle en ouverture et fermeture s'effectue en vitesse et n'est actif que lorsque les doigts virtuels sont libres dans l'espace. Le capteur de pression n'est actif que lors de la saisie d'un objet. Dans cette situation, pour maintenir un objet virtuel dans ses doigts, l'utilisateur doit exercer un effort conséquent sur le capteur de pression. Le déplacement de la main virtuelle dans l'espace est contrôlé comme pour les anciennes versions du HandNavigator par une souris 3D (en l'occurrence un SpaceNavigator - appelé maintenant SpaceMouse¹). La version complète est présentée dans la figure 5.4.

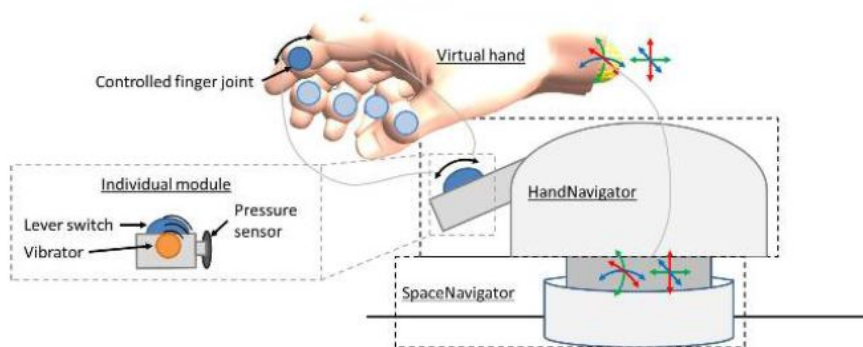


FIGURE 5.3 – Principe de la nouvelle version du HandNavigator.

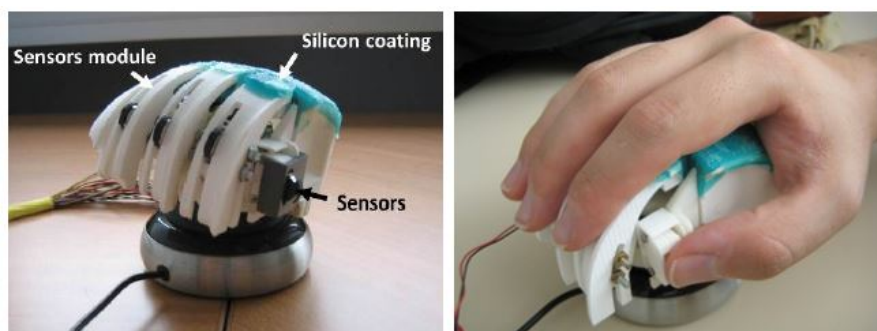


FIGURE 5.4 – Prototype de la nouvelle version du HandNavigator.

La figure 5.5 présente quelques exemples de configurations différentes pour saisir un même objet réalisées en virtuel avec le HandNavigator. Les configurations virtuelles sont très proches de celles réelles, même si pour la dernière configuration, nous observons une différence car nous avons choisi de ne pas contrôler tous les degrés de liberté des doigts.

1. 3Dconnexion, SpaceMouse Compact

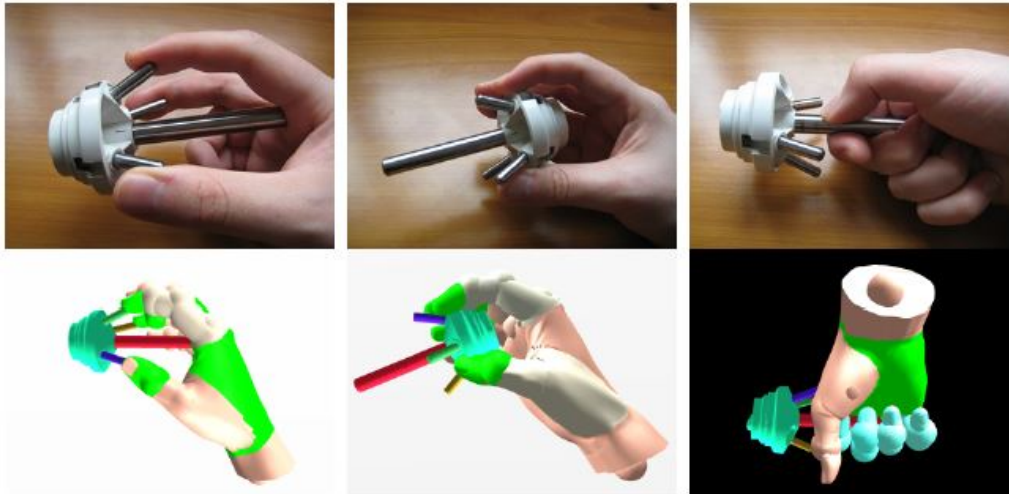


FIGURE 5.5 – Plusieurs exemples de configurations des doigts pour saisir le même objet, en réel et en virtuel. Les parties vertes des doigts correspondent aux parties en contact avec l’objet virtuel.

Enfin, une évaluation auprès de 32 sujets sur une tâche de saisie d’un objet virtuel, ici une représentation virtuelle de Sophie la Girafe, montre que sur des critères de confort, de difficulté d’utilisation, de contrôle des mouvements, ce dispositif est significativement meilleur que les anciennes versions du HandNavigator et qu’il répond à l’ensemble des objectifs que nous nous sommes fixés.

5.1.2 HaptiHand

A la suite de ces travaux, nous avons développé une extension du HandNavigator en le portant sur un bras haptique à six degrés de liberté, le Virtuose 6D de Haption. La raison de ce portage réside dans le fait que sur le HandNavigator, il n’existe pas de retour d’effort sur le déplacement de la main virtuelle dans l’espace. L’objectif est donc de profiter des possibilités en termes de retours d’efforts du bras Virtuose 6D pour pallier ce manque. Le principe est donc de remplacer la poignée présente par défaut sur le bras et de la remplacer par le HandNavigator.

L’architecture particulière du Virtuose 6D nous a amenés à revoir complètement la conception du dispositif. Pour le différencier du HandNavigator, nous avons choisi de l’appeler HaptiHand. Nous avons effectué des études d’ergonomie afin de déterminer la forme la plus confortable pour l’utilisateur permettant d’effectuer les actions sur les capteurs tout en respectant les objectifs donnés pour le HandNavigator. Si les capteurs utilisés dans le HaptiHand sont exactement les mêmes que sur la dernière version du HandNavigator, nous avons affiné la conception des différents modules pour chacun des doigts, en particulier pour assurer une bonne indépendance de chacun des doigts dans leur fonctionnement et dans la perception des retours. Typiquement, comme nous utilisons des vibreurs pour indiquer à l’utilisateur une collision des doigts avec un objet virtuel, il est nécessaire que ce retour vibratoire soit clairement identifié comme agissant sur le ou les doigts concernés, autrement dit il est nécessaire d’avoir une isolation vibratoire efficace sur l’ensemble du dispositif et entre chaque module. Pour cela, nous avons placé des couches de silicone superposées sur chaque module adaptables en rigidité et en amortissement. Nous avons réalisé plusieurs variantes d’amortissement en faisant varier le nombre de couches et en changeant les matériaux de fixation du module sur le dispositif, puis, en mesurant l’accélération de la coque du HaptiHand (excitation sous vibrations), nous avons choisi la conception donnant l’accélération minimale, autrement dit donnant l’isolation vibratoire maximale (Fig. 5.6 gauche). Pour s’assurer

que cette isolation ne porte pas atteinte au retour tactile, nous avons vérifié par analyse spectrale du signal vibratoire que les vibrations par doigt possédaient des composantes de fréquences dans l'intervalle d'activation des corpuscules de Meissner et de Pacini, primordiaux au niveau de la peau pour la sensation haptique (Fig. 5.6 droite). La figure 5.7 montre la conception du dispositif.

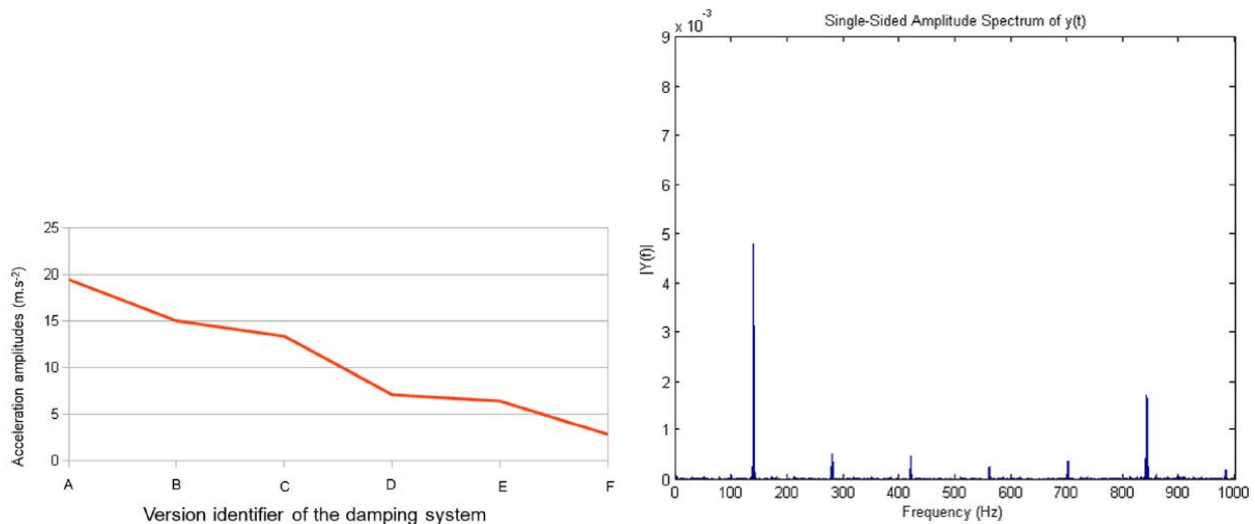


FIGURE 5.6 – A gauche : niveaux d'accélération observés sous vibrations selon le type d'amortissement choisi. A droite : spectre du signal vibratoire.

Une première validation fonctionnelle du HaptiHand a été réalisée sur un cas d'usage en manipulation. Il s'agissait de simuler le montage d'un moteur de lève-vitres dans une portière de voiture, en contrôlant un mannequin virtuel sous CATIA (Fig. 5.8).

5.2 Cas d'usage industriel : simulateur de travaux en hauteur

Nous présentons ici un cas d'usage industriel d'interaction en réalité virtuelle mettant en œuvre des interactions multi-sensorielles. Le cas d'usage a été réalisé en partenariat avec Enedis Bourgogne. L'objectif était de réaliser un simulateur de travaux en hauteur permettant à Enedis Bourgogne d'aider au recrutement de futurs monteurs, en particulier pour détecter la susceptibilité au vertige et donc déterminer la capacité des techniciens à travailler en hauteur.

Contrairement aux autres travaux réalisés présentés dans ce manuscrit, ce simulateur adresse des problématiques différentes et non présentées par ailleurs. D'une part, se pose la question de la navigation en hauteur (généralement les travaux se concentrent sur de la navigation horizontale). D'autre part, se pose la question de la relation entre réalité virtuelle et vertige, et plus largement la relation entre immersion et anxiété.

La littérature a depuis longtemps exploré le phénomène de vertige [Bles *et al.*, 1980; Brandt *et al.*, 1980]. Selon les différentes théories, un conflit visuo-vestibulaire semble être responsable du vertige, pas de la même manière que pour le cybermalaise lui aussi considéré comme une conséquence d'un conflit visuo-vestibulaire, mais dans le sens où l'être humain a besoin de repères visuels proches et stables pour maintenir un équilibre postural. En l'absence de tels repères, l'être humain doit s'appuyer sur des informations proprioceptives et vestibulaires, ce qui peut engendrer un balancement caractéristique du corps voire une chute dans une situation de hauteur [Coelho and Wallis, 2010]. De manière intéressante, il a été montré que des déplacements latéraux en hauteur contribuaient au vertige auprès de personnes acrophobiques [Coelho *et al.*, 2008].

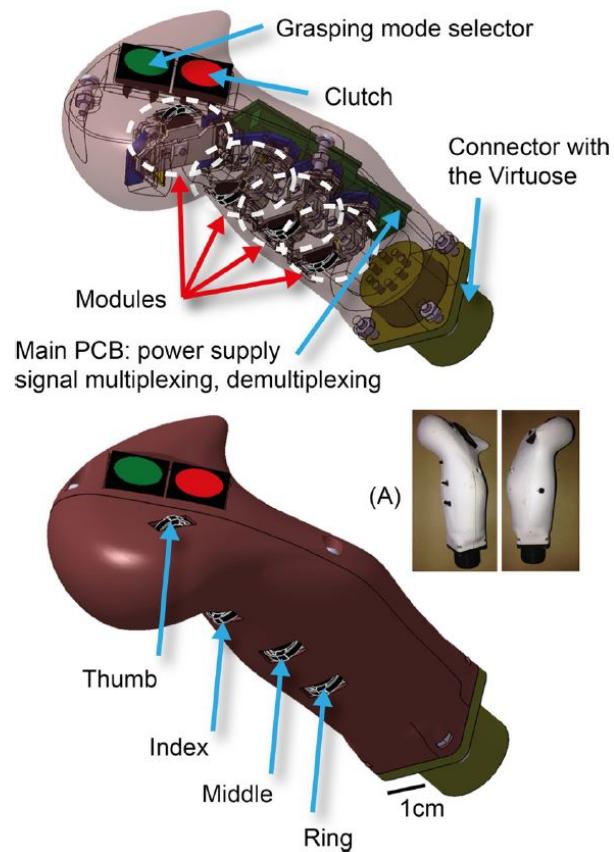


FIGURE 5.7 – Maquette numérique du HaptiHand. La vue du haut montre la localisation des différents modules. La vue du bas montre le prototype avec (A) la version réelle réalisée en impression 3D.

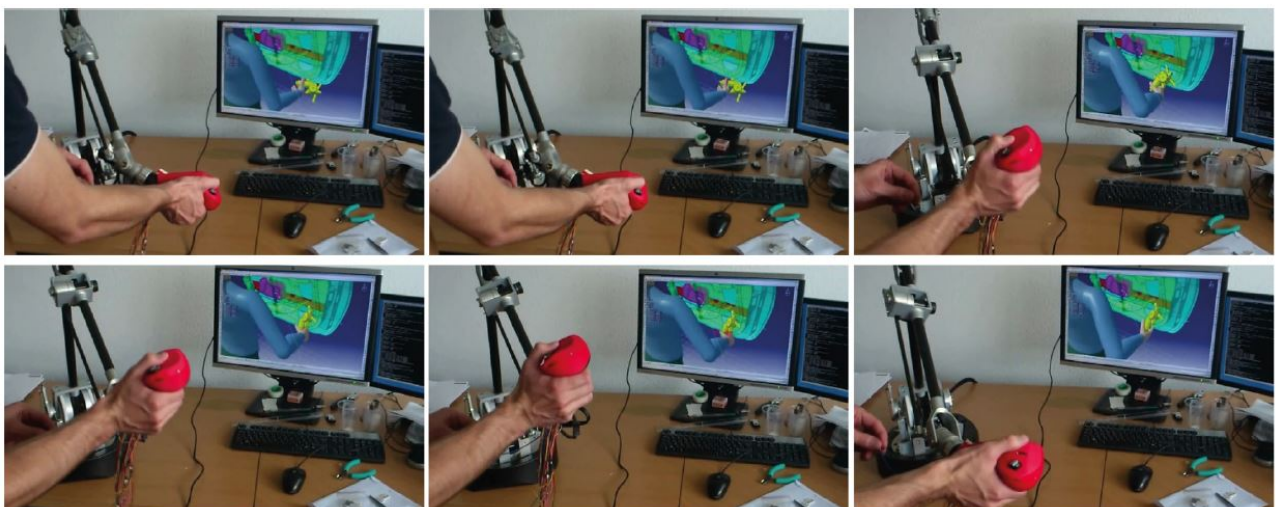


FIGURE 5.8 – Simulation d'assemblage de pièces avec le HaptiHand.

Cette sensation de vertige a également été étudiée en réalité virtuelle, d'une part pour déterminer la capacité de la réalité virtuelle à reproduire des réactions similaires à la réalité [Simeonov *et al.*, 2005], d'autre part pour utiliser la réalité virtuelle comme outil thérapeutique contre l'acrophobie [Jang *et al.*, 2002]. Ce qui nous intéresse ici n'est pas de créer un simulateur à but thérapeutique mais plutôt comme outil de détection d'acrophobie. Aussi, il est important de définir les paramètres nécessaires à la reproduction réaliste d'une situation en hauteur et de valider ces paramètres à travers des mesures pertinentes.

Dans notre cas d'usage, le scénario consiste à se placer sur la plateforme d'une nacelle élévatrice virtuelle, puis à monter virtuellement à 11 mètres de hauteur pour atteindre une échelle placée sur un poteau électrique, à grimper l'échelle et enfin à attraper avec ses deux un objet virtuel placé derrière la personne (pour cela, la personne doit lâcher ses deux mains de l'échelle). Pour traiter les différentes problématiques de navigation en hauteur et de vertige en réalité virtuelle, en lien avec ce scénario, le simulateur que nous avons développé contient les éléments suivants :

- **navigation verticale.** Une des problématiques est la restitution de la gravité et donc des efforts physiques associés à une ascension. Plutôt que tromper les utilisateurs par des techniques d'interaction telles que proposées dans la littérature [Slater *et al.*, 1995; Lai *et al.*, 2015; Marchal *et al.*, 2010], nous avons intégré une échelle réelle fixée sur un pilier et synchronisée en position avec sa représentation virtuelle, permettant de renforcer l'immersion. Nous avons également intégré une plateforme dynamique reproduisant le plateau de la nacelle élévatrice. Cette plateforme, développée pour des applications générales de réalité virtuelle [Plouzeau *et al.*, 2017], est capable de produire des vibrations jusqu'à 3 kHz, permettant de simuler le mouvement de la nacelle (Fig. 5.9). L'efficacité des vibrations sur l'immersion et la réduction du cybermalaise pendant la navigation a été démontrée dans la littérature [Vasylevska and Kaufmann, 2014; Plouzeau *et al.*, 2015].
- **réalisme et vertige.** La présence est un élément important dans la fidélité d'un simulateur. Les travaux passés montrent des résultats contradictoires sur la relation entre présence et anxiété. Certains indiquent qu'il n'existe aucune relation entre présence et anxiété [Krijn *et al.*, 2004], d'autres indiquent le contraire, en particulier pour des environnements stressants, et que le réalisme perçu est le facteur de présence principal pour déclencher l'anxiété [Alsina-Jurnet *et al.*, 2011]. L'échelle réelle fait partie du simulateur pour cette raison, de même que le fait de lâcher ses mains une fois en hauteur dans le scénario. Par ailleurs, l'environnement virtuel a été défini pour reproduire une situation proche de la réalité, avec intégration de repères visuels lointains et dynamiques pour engendrer une sensation de vertige, telles que nuages et voitures.

La figure 5.10 présente le simulateur développé.

Nous avons évalué la performance de notre simulateur sur 14 sujets (13 hommes et 1 femme) en leur demandant de tester le simulateur dans deux configurations, l'une sans vibration (M1) de la plateforme, l'autre avec vibrations (M2). Durant l'expérimentation, l'électroconductivité dermale était mesurée en temps réel afin de mesurer le degré d'anxiété [Birket-Smith *et al.*, 1993], et à la fin de chaque modalité, étaient effectuées une mesure de l'équilibre postural par la plateforme Stabilotest, une mesure du cybermalaise à travers le SSQ et une mesure du sens de présence et plus précisément du réalisme perçu par un questionnaire de présence de Witmer et Singer. Il était également demandé aux sujets de remplir un questionnaire d'acrophobie permettant de connaître la susceptibilité à l'acrophobie [Cohen, 1977].

Les résultats sont présentés sur les figures 5.11 et 5.12.

L'apport de vibrations n'a pas d'effet significatif sur le cybermalaise. Le cybermalaise observé ici est très bas, expliqué par une obligation des sujets à se mouvoir physiquement durant la simulation et par le fait que la montée de la nacelle se fait à vitesse suffisamment lente.

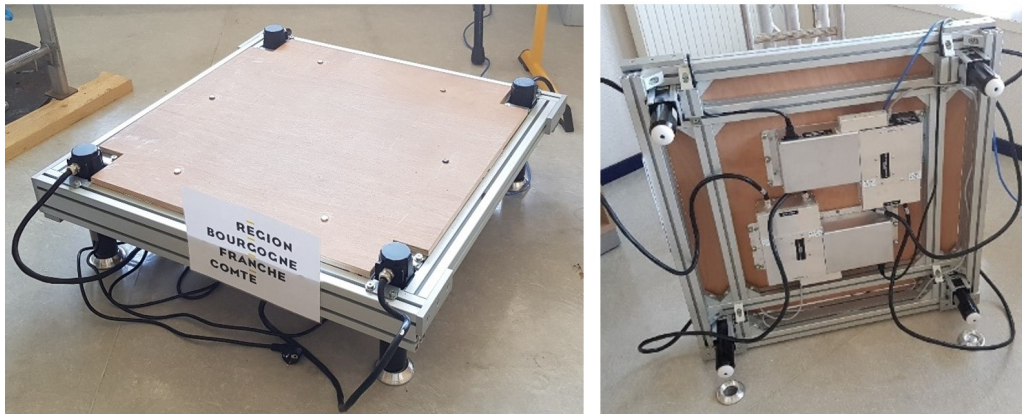


FIGURE 5.9 – Plateforme dynamique simulant la nacelle élévatrice.



FIGURE 5.10 – A gauche, simulateur physique avec plateforme dynamique, échelle et harnais. A droite, environnement virtuel de simulation.

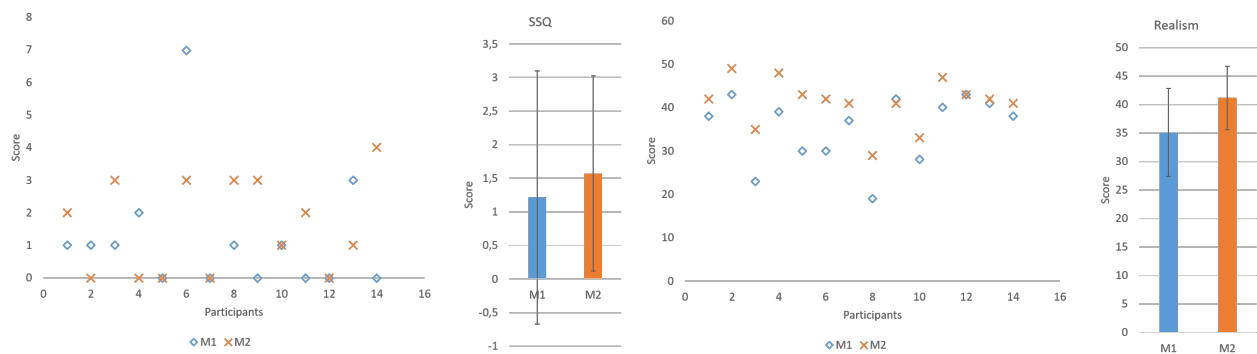


FIGURE 5.11 – Pour chacune des modalités : A gauche, SSQ. A droite, scores de réalisme perçu.

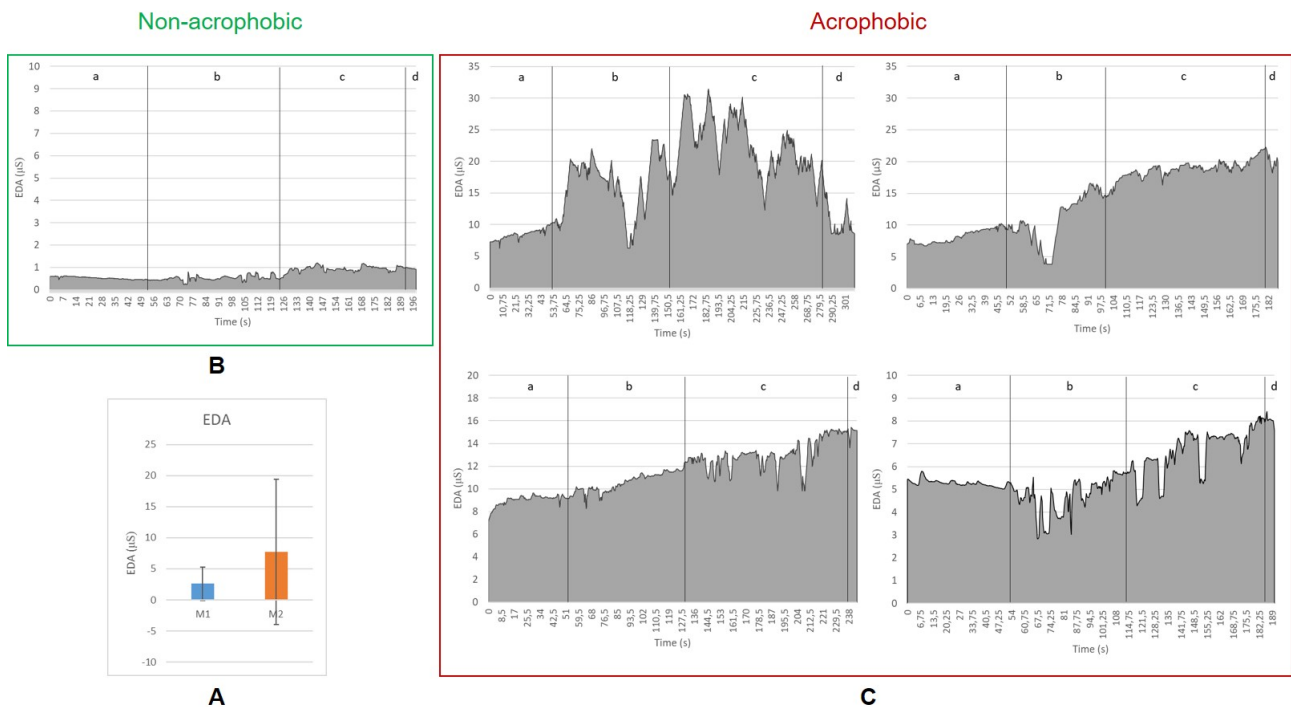


FIGURE 5.12 – A. Valeurs de l'électroconductivité dermale pour chaque modalité. B. Evolution pour un sujet non-acrophobique. C. Evolution pour les participants ayant indiqué être acrophobiques. Dans B et C, les vibrations n'étaient pas activées. Les différentes phases sont (a) la montée de la nacelle, (b) la montée sur l'échelle, (c) la saisie de l'objet, (d) la fin de l'expérimentation.

En revanche, l'apport de vibrations a un effet significatif sur le réalisme perçu, ce qui est confirmé par les retours oraux des sujets.

Enfin, sur l'anxiété, l'électroconductivité dermale n'évolue pas de manière significative même si en moyenne elle augmente en présence des vibrations. Par ailleurs, nous observons une variation brutale de l'activité électrodermale chez les sujets ayant indiqué être acrophobiques (quatre sur l'ensemble des participants) lorsqu'ils grimpent sur l'échelle, qui traduit bien une anxiété accrue (cette variation soudaine d'activité électrodermale est caractéristique d'un évènement brusque et n'est donc pas imputable au cybermalaise qui lui se traduit par une augmentation progressive dans le temps [Kim *et al.*, 2005]). Au contraire, les sujets non acrophobiques gardent une activité électrodermale basse et constante.

5.3 Conclusion

La littérature a montré depuis longtemps que la prise en compte de la multi-sensorialité dans l'interaction est un élément important pour améliorer celle-ci, puisqu'elle contribue par exemple à la diminution du cybermalaise dans une tâche de navigation, ou encore elle permet d'améliorer le réalisme perçu pour des tâches faisant intervenir des phénomènes psychologiques tels que le vertige.

Nous nous sommes concentrés sur le retour vibratoire/haptique, qui est le sens le plus significatif avec la vue, mais qui est aussi le plus utilisé en réalité virtuelle après la vue. D'autres sens pourraient être intégrés comme le son ou l'odorat. Ce sont des pistes à explorer, d'autant plus que de nombreux travaux existent sur l'effet du son spatialisé dans un environnement virtuel, par exemple [Ortega-Gonzalez, 2011]. Si l'intégration de plusieurs sens est bénéfique, ils nécessitent

néanmoins le développement de dispositifs spécifiques qui peuvent selon le cas être intrusifs et donc repousser les utilisateurs dans l'adoption des technologies de réalité virtuelle.

5.4 Publications associées à ce chapitre

Partie 5.1

- [Chardonnet and Léon, 2012a] **J.-R. Chardonnet and J.-C. Léon**, Designing Interaction in Virtual Worlds through a Passive Haptic Peripheral, in **ROMAN'2012 : 21th International Symposium on Robot and Human Interactive Communication**, Paris, France, 2012, pp. 284–289.
- [Chardonnet and Léon, 2012b] **J.-R. Chardonnet and J.-C. Léon**, Monitoring a Realistic Virtual Hand using a Passive Haptic Device to Interact with Virtual Worlds, in **Joint Virtual Reality Conference**, Madrid, Spain, 2012.
- [Chardonnet and Léon, 2013] **J.-R. Chardonnet and J.-C. Léon**, Périphérique d'interaction apte à contrôler un élément de toucher et de préhension d'objets virtuels multidimensionnels, brevet FR2986342A1, 02-Aug-2013.
- [Léon et al., 2015] **J.-C. Léon, T. Dupeux, J.-R. Chardonnet, and J. Perret**, An add-on device to perform dexterous grasping tasks with a haptic feedback system, in **DETC2015 - ASME 2015 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference**, Boston, USA, 2015.
- [Léon et al., 2016] **J.-C. Léon, T. Dupeux, J.-R. Chardonnet, and J. Perret**, Dexterous grasping tasks generated with an add-on end-effector of a haptic feedback system, **Journal of Computing and Information Science in Engineering**, vol. 16, no. 3, pp. 030903-1,030903-10, 2016.
-

Partie 5.2

- [Di Loreto et al., 2018] **C. Di Loreto, J.-R. Chardonnet, J. Ryard, and A. Rousseau**, WoaH : A Virtual Reality Work-at-height Simulator, in **IEEE Virtual Reality (VR)**, Reutlingen, Germany, 2018, pp. 281-288.

Vers une réalité virtuelle personnalisée

Dans le chapitre 4, nous avons exploré plusieurs techniques d'interaction, principalement de navigation, pour améliorer le confort et les performances des utilisateurs. Cependant, les paramètres de navigation de ces méthodes, ainsi que de toutes celles de la littérature, restent statiques, quel que soit l'utilisateur. Le paramétrage dynamique de la navigation est un sujet récent. Basting et al. proposent un changement dynamique du champ de vision en fonction du déplacement de l'utilisateur [Basting *et al.*, 2017]. Lorsqu'il navigue, son champ de vision est réduit au fur et à mesure, tout en restant imperceptible. La réduction du champ de vision permet de réduire le cybermalaise mais déforme la perception des vitesses et donc des distances. Arguelaguet Sanz a proposé une méthode de navigation adaptative, non en fonction de l'utilisateur, mais en fonction de l'environnement virtuel [Argelaguet Sanz, 2014]. La vitesse de déplacement est calculée en fonction de la complexité et du type d'environnement. En fonction des objets présents dans l'environnement, la vitesse est modulée pour limiter le flux optique et le phénomène de vection.

Ces différents travaux font apparaître une tendance à réinventer l'interaction en réalité virtuelle. S'ils ne la recentrent pas vraiment sur l'utilisateur, ils représentent déjà un premier pas vers ce que nous pourrions appeler une intelligence dans l'interaction. Cette notion d'intelligence n'est pas à prendre au sens de l'intelligence artificielle, celle-ci pouvant être définie comme la *“recherche de moyens susceptibles de doter les systèmes informatiques de capacités intellectuelles comparables à celles des êtres humains”* ([La Recherche, 1979], p. 61). Plusieurs travaux de la littérature se sont intéressés d'ailleurs à cette idée assez rapidement (par exemple [Luck and Aylett, 2000]). Si cette piste est en effet intéressante à explorer, surtout au regard de la tendance actuelle à placer de l'intelligence artificielle dans toutes les applications, l'intelligence telle qu'imaginée ici s'entend davantage comme *“l'aptitude à adapter son comportement à une situation nouvelle, adresse qu'on montre dans une situation donnée, habileté dans le choix des moyens qu'on emploie pour parvenir à un certain résultat”* [Académie française, 2000]. Autrement dit, il s'agit d'utiliser les outils de réalité virtuelle (environnements virtuels, interfaces d'interaction, techniques d'interaction) de manière plus habile et judicieuse - ce qui pourrait correspondre au terme anglais *smart*. En l'occurrence - et c'est ce qui va nous intéresser ici -, il s'agit de définir des interactions en réalité virtuelle qui s'adaptent davantage à l'utilisateur et à son état. Personnalisation et intelligence vont donc de pair.

Dans ce chapitre, nous tentons de contribuer à cette notion de réalité virtuelle intelligente en recentrant davantage l'interaction sur l'utilisateur, ce qui n'est pas le cas des travaux précédents de la littérature. Pour cela et comme première approche, nous avons défini une méthode de navigation particulière en ce qu'elle s'adapte à l'état physiologique de l'utilisateur, nous permettant

de nous affranchir d'un certain nombre de contraintes humaines liées au cybermalaise telles que l'âge ou le sexe.

6.1 Navigation adaptative

Si les méthodes proposées dans le chapitre 4 ont tenté bon an, mal an de concilier l'ensemble des critères tels que nous les avons définis au début de ce manuscrit, et en particulier le cybermalaise, elles ne prennent pas pour autant en compte l'utilisateur (son état à un instant donné, ses caractéristiques), pourtant central, dans la définition de l'interaction. Dans le chapitre 3, nous avons proposé des outils d'estimation et de prédiction du cybermalaise dans l'objectif d'adapter de manière dynamique les paramètres de navigation en conséquence. C'est pourquoi nous avons développé une méthode de navigation qui s'adapte à l'utilisateur, plus particulièrement à son état physiologique, en temps réel, sans brider les performances de navigation. Le principe est de modifier la loi de commande de navigation en fonction du niveau de cybermalaise ressenti en temps réel (Fig. 6.1).

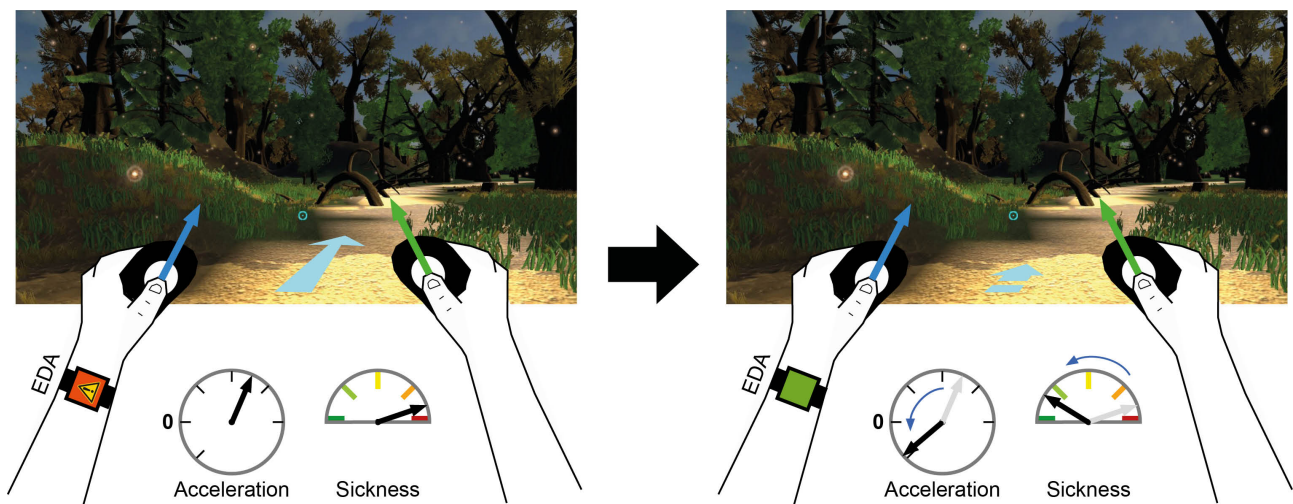


FIGURE 6.1 – Principe de la navigation adaptative.

6.1.1 Loi de commande

Nous avons choisi de nous baser sur la navigation classique par joysticks. En effet, cette interface reste la plus courante lorsque l'application implique un déplacement dans un environnement virtuel (Tableau 4.1). Surtout, nous avons souhaité montrer qu'il n'était pas nécessaire de créer de nouvelles interfaces d'interaction, ni de modifier complètement les techniques de navigation existantes, mais qu'en les utilisant de manière habile, il était possible de corriger leurs défauts. La loi de commande de base choisie est en accélération car il s'agit de la loi de commande la plus répandue : à une position des joysticks correspond une accélération.

La mesure de l'équilibre postural utilisée dans le chapitre 3 nécessitant d'interrompre la navigation, nous avons choisi une autre manière de mesurer le cybermalaise : l'électroconductivité de la peau, qui permet une mesure en temps réel et peu intrusive grâce aux derniers capteurs du marché. Dans le chapitre précédent, nous avons déjà utilisé ce moyen de mesure mais pour évaluer le stress. La littérature a montré que le cybermalaise se caractérise par une évolution progressive et continue de l'électroconductivité dermale [Kim *et al.*, 2005], contrairement au stress qui se caractérise par des pics d'amplitude brusques. Ainsi, pour adapter la navigation à l'utilisateur, nous

avons proposé de faire varier l'accélération de navigation en fonction de la variation d'électroconductivité dermale au cours de la simulation, avec pour objectif de limiter celle-ci :

$$A(t) = A(t_{-1}) - 0,5 \times \frac{dEDA(t)}{dt} \quad (6.1)$$

où :

- $A(t)$ représente l'accélération, en translation ou en rotation, à l'instant présent;
- $A(t_{-1})$ représente l'accélération, en translation ou en rotation, à l'instant précédent;
- $\frac{dEDA(t)}{dt}$ représente la variation d'électroconductivité dermale entre les deux instants;
- le paramètre 0,5 est déterminé empiriquement par des simulations avec différentes fréquences et amplitudes de variation d'électroconductivité dermale, afin d'être adapté au temps de réaction physiologique de l'électroconductivité dermale [Nishisato, 1966]. Une valeur trop élevée ferait changer les accélérations trop rapidement et une valeur trop basse n'aurait pas d'impact.

Ainsi, lorsqu'un utilisateur devient malade, son activité électrodermale augmente, l'accélération de navigation diminue en conséquence jusqu'à arrêter la navigation le cas échéant, permettant de limiter l'inconfort.

Une modification additionnelle des accélérations est mise en place pour prendre en compte le degré d'aisance d'utilisation des joysticks. La dynamique des doigts étant supérieure à celle du corps, un utilisateur peut agir sur les joysticks avec imprécision et effectuer des actions brusques non désirées. Nous effectuons un filtrage sur le signal des joysticks en supprimant les hautes fréquences afin de lisser la commande. Enfin, une quantité de mouvements des joysticks sur une période donnée est déterminée en continu. Si cette quantité dépasse un seuil, l'accélération diminue. Ainsi, plus l'utilisateur agit sur les joysticks, plus l'accélération de navigation diminue, ce qui permet de limiter les à-coups dans la navigation.

6.1.2 Validation expérimentale

Les hypothèses que nous faisons sont les suivantes :

- H1 La navigation adaptée en fonction du cybermalaise permet de diminuer celui-ci.
- H2 Le contrôle adaptatif de la navigation augmente les performances de navigation.
- H3 Les utilisateurs préfèrent la navigation adaptative.

Nous avons demandé à 17 sujets de suivre le parcours de la figure 6.2. Ce parcours, d'une longueur de 1180 m, est simple, large et bien visible pour éviter la moindre surcharge cognitive. L'environnement alentour (une forêt dense avec bruits d'animaux) permet une immersion élevée. Par ailleurs, les sujets entendent le bruit de leurs pas lorsqu'ils naviguent. Chaque sujet devait réaliser le parcours deux fois, une fois avec une méthode de navigation normale (sans modification de la loi de commande, modalité N) et l'autre avec notre méthode (modalité A), dans un ordre aléatoire avec entre 1 et 5 jours de repos entre les deux modalités. A chaque fois, le parcours devait être réalisé en deux temps, le premier temps, du point bleu au point rose (Fig. 6.2), correspondant à un temps de familiarisation, le second, du point rose au point bleu, correspondant au test en lui-même. Ces deux points n'étaient pas visibles pour les sujets, mais étaient indiqués oralement par l'expérimentateur. Au point rose, un SSQ était administré en sachant que si un sujet était malade,

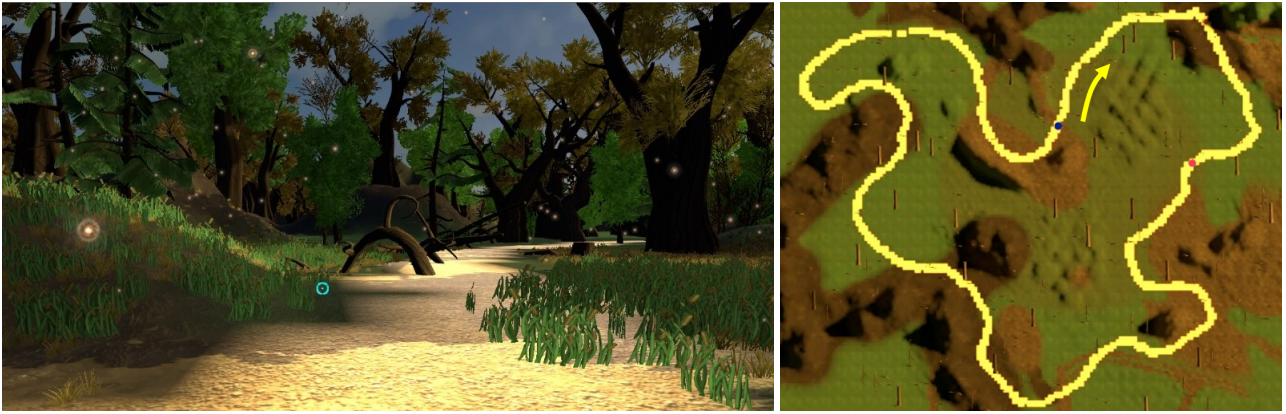


FIGURE 6.2 – A gauche, l’environnement virtuel de test. A droite, le parcours à suivre avec le point de départ en bleu et un point intermédiaire en rose.

TABLE 6.1 – Indicateurs objectifs d’efficacité.

Indicateur	Formule	Unité	Définition
Motion Sickness Dose Value [So, 1999]	$MSDV_i(t) = [\int a_i^2(t) dt]^{\frac{1}{2}}$		Cybermalaise (mesure objective)
Mouvement virtuel	$VM_i(t) = \int v_i(t) dt$	m	Distance parcourue par le sujet
Mouvement des joysticks	$JoyDev_i(t) = \int V_{joy_i}(t) dt$	cm	Quantité de déplacement des joysticks
Electroconductivité de la peau	$EDA(t) = \int EDA_{var}(t) dt$	μS	Quantité de variation d’électroconductivité de la peau

il était exclu du second temps. Au cours de l’expérimentation, un seul sujet a rapporté être très malade et donc n’a pas été pris en compte dans l’analyse des résultats.

L’électroconductivité de la peau était mesurée en continu pendant les parcours avec un bracelet E4 Empatica (précision de l’ordre du μS , fréquence d’échantillonnage de 4 Hz) [McCarthy *et al.*, 2016]. Après chaque parcours, étaient effectuées une mesure d’équilibre postural par la plateforme Stabilotest, une mesure du cybermalaise à travers le SSQ et une mesure de la charge cognitive à travers le NASA-TLX [Hart and Stavenland, 1988]. Les sujets étaient placés dans un casque de réalité virtuelle Oculus Rift. Le choix s’est porté sur un casque plutôt qu’un CAVE (i) du fait de la diffusion massive de cette technologie et (ii) la littérature a prouvé que les casques immersifs pouvaient induire un cybermalaise élevé [Munafò *et al.*, 2017]. C’est donc un outil idéal pour tester l’efficacité de notre méthode de navigation adaptative.

Pour mesurer l’efficacité du contrôle adaptatif, nous avons également défini des indicateurs objectifs indiqués dans le tableau 6.1. Les deux mesures de mouvement virtuel et de mouvement des joysticks permettent de mesurer la performance de navigation.

Les résultats sont donnés dans les figures 6.3, 6.4 et 6.5.

Le contrôle adaptatif n’a pas d’effet significatif sur la distance totale parcourue, ni sur la quantité de déplacement des joysticks. L’utilisation de la navigation adaptative n’influence donc pas ces différents paramètres. Un autre moyen d’évaluer les performances de navigation est de regarder si les sujets ont réussi ou non à finir le tour pour chaque modalité. 3 des 16 sujets n’ont pas réussi à finir le tour complet avec la modalité normale tandis qu’avec la modalité adaptative, ils ont soit

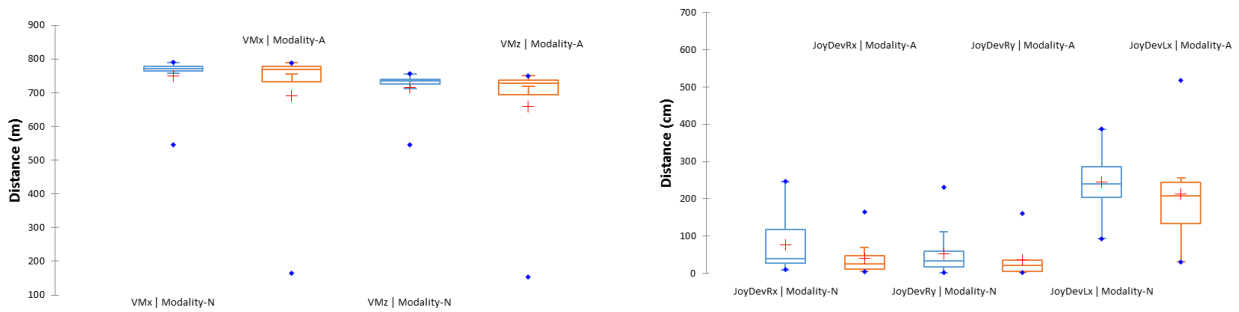


FIGURE 6.3 – A gauche, distance parcourue. A droite, quantité de déplacement des joysticks. Les mesures se font sur chaque axe de déplacement.

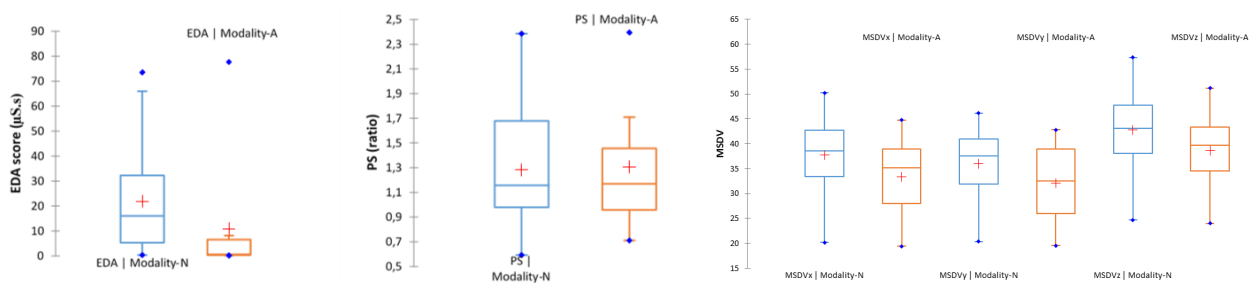


FIGURE 6.4 – De gauche à droite, électroconductivité de la peau, stabilité posturale et Motion Sickness Dose Value. Les mesures se font sur chaque axe de déplacement.

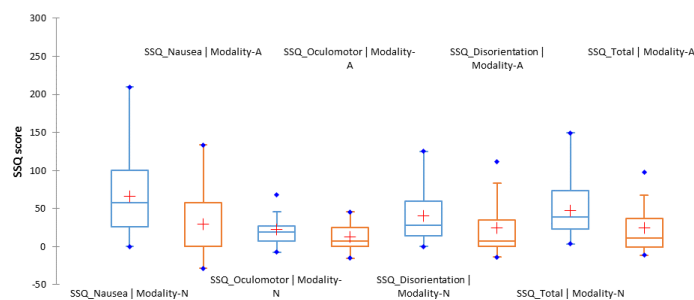


FIGURE 6.5 – Cybermalaise mesuré par le SSQ.

TABLE 6.2 – Récapitulatif des différentes mesures avec leur évolution moyenne de la navigation normale à la navigation adaptative et leur significativité.

	Evolution moyenne	Sign.
MSDV_x	-20%	*
MSDV_y	-19%	*
MSDV_z	-15%	*
VM _x	-7%	
VM _z	-7%	
JoyDevRx	-31%	
JoyDevRy	-22%	
JoyDevLx	-27%	
EDA	-54%	*
SSQ_{Nausea}	-57%	*
SSQ _{Oculomotor}	-39%	
SSQ_{Disorientation}	-51%	*
SSQ_{Total}	-71%	*
PS	1%	

fini la simulation complètement soit été plus loin dans le parcours. Cela montre que la modalité adaptative n'a pas d'effet négatif sur les performances de navigation.

En revanche, le contrôle adaptatif a un effet significatif sur l'électroconductivité de la peau, la Motion Sickness Dose Value, ainsi que sur le SSQ. Cela montre que la manipulation des paramètres de navigation en fonction de l'électroconductivité de la peau agit sur elle-même et sur le cybermalaise, ce qui est l'effet recherché. Observation intéressante, l'équilibre postural n'a pas évolué de manière significative, alors que nous avons observé une forte corrélation entre l'équilibre postural et les scores du SSQ.

Par ailleurs, la charge cognitive n'évolue quasiment pas entre les deux modalités (0,5% de charge en plus pour la navigation adaptative, en sachant qu'elle est de 49,6% pour la modalité normale), indiquant que la navigation adaptative n'entraîne pas plus de charge cognitive.

Enfin, les sujets ont déclaré préférer la navigation adaptée à 69%.

6.1.3 Discussion

Les hypothèses H1 et H3 sont bien validées. Concernant l'hypothèse H2, le contrôle adaptatif n'a pas amélioré de manière significative les performances de navigation mais elles ne les ont pas dégradées non plus. Notre objectif était de permettre une navigation efficace en termes de performance, ce que la navigation adaptative a permis de maintenir.

Adapter les paramètres de navigation en fonction de l'activité électrodermale de l'utilisateur permet de diminuer le cybermalaise sans changer l'interaction en réalité virtuelle. Autrement dit, nous arrivons à concilier l'ensemble des critères imposés au début de ce manuscrit, et ce, simplement en modifiant la loi de commande de navigation de manière appropriée (la méthode de navigation utilisée reste classique). Le tableau 6.2 montre l'évolution moyenne des différentes mesures entre les deux modalités de l'expérimentation. Il montre que la Motion Sickness Dose Value est diminuée de 18%, l'électroconductivité de la peau est diminuée de 54% et surtout les scores du SSQ sont diminués de 71%. Ces résultats sont très encourageants et montrent l'intérêt de proposer une navigation adaptative.

Notre méthode possède tout de même certaines limites. La première est que certaines per-

sonnes n'ont pas de réaction électrodermale. La mesure de l'électroconductivité de la peau dans ce cas ne serait pas significative. La seconde limitation vient de la caractéristique du temps de réaction de l'électroconductivité de la peau par rapport à l'adaptation. La mesure de l'activité électrodermale nécessite en effet un certain temps avant que les paramètres de navigation ne s'adaptent de façon efficace. Si l'utilisateur est très sensible au cybermalaise, il risque d'être malade avant que l'adaptation ne soit opérationnelle.

6.2 Conclusion

La navigation adaptative apparaît être une bonne solution contre le cybermalaise. Cependant il faut garder en tête que même s'il est diminué, le cybermalaise reste présent. Ainsi, nous montrons qu'adapter les paramètres de navigation en fonction d'indicateurs du cybermalaise est un bon moyen de diminuer celui-ci. Surtout, nous avons mis en évidence que prendre en compte l'utilisateur, en particulier son état, durant la tâche, et non juste avant ou après, était utile et efficace. Cela permet de nous conforter dans l'idée d'une réalité virtuelle davantage personnalisée. D'ailleurs, récemment, Sun et al. ont proposé une méthode de marche redirigée basée sur les mouvements de saccade des yeux des utilisateurs, un autre paramètre propre aux utilisateurs [Sun *et al.*, 2018]. Leurs résultats montrent l'efficacité de leur technique pour naviguer dans des environnements virtuels infinis.

Par ailleurs, proposer une telle adaptation nous affranchit de concevoir de nouvelles interfaces ou de nouvelles méthodes de navigation. Il suffit d'utiliser les interfaces et les méthodes existantes et répandues, en l'occurrence ici un joystick, mais de manière plus habile. C'est en ce sens que nous avons défini l'intelligence dans la réalité virtuelle. Le changement dans la manière de naviguer est totalement transparent pour l'utilisateur. Cela nous permet de nous concentrer davantage sur l'utilisateur plutôt que sur les interfaces et les techniques de navigation en elles-mêmes.

A travers ces premiers résultats encourageants, l'objectif est maintenant d'aller plus loin dans la personnalisation de l'interaction. Avec un de mes doctorants, Yuyang Wang, nous travaillons actuellement sur la mise en place d'outils de prédiction en temps réel d'apparition du cybermalaise à partir du profil des utilisateurs. Ces outils peuvent être issus de l'intelligence artificielle, pour que le système de réalité virtuelle apprenne à détecter des seuils d'apparition de cybermalaise à partir d'indicateurs propres à l'utilisateur (équilibre postural, regard, etc.). La première étape est de réaliser un état de l'art exhaustif des paramètres humains pouvant favoriser l'apparition de cybermalaise, puis d'en déterminer les plus significatifs. L'étape suivante consiste à développer un modèle de profil personnalisé d'utilisateur qui sera ensuite intégré à la commande de navigation. La création de ce modèle ainsi que les expérimentations sont actuellement en cours de réalisation.

6.3 Publications associées à ce chapitre

- [Plouzeau *et al.*, 2018] *J. Plouzeau, J.-R. Chardonnet, and F. Merienne, Using cybersickness indicators to adapt navigation in virtual reality : a pre-study, in IEEE Virtual Reality (VR), Reutlingen, Germany, 2018, pp. 661-662.*

Après ma thèse, lors de mon passage à l'INRIA, mes travaux de recherche se sont inscrits dans le développement d'interfaces de réalité virtuelle. Les problématiques qui sont apparues étaient alors relatives à l'ergonomie à l'utilisation et au rendu réaliste de l'interaction. Certes, à ce moment, ces interfaces n'étaient pas destinées à être utilisées en immersion virtuelle mais sur un poste de travail de bureau, ce qui n'impliquait pas certaines des problématiques exprimées dans ce manuscrit. Mes travaux de recherche à l'Institut Image se sont intéressés à de nouvelles problématiques, mais dans la continuité de mes travaux précédents. En particulier, très rapidement s'est posée la question de l'utilisateur dans l'interaction. Quel est son rôle, est-il vraiment au centre de l'interaction, l'interaction est-elle vraiment adaptée? Si non, comment la rendre plus adaptée, comment l'utilisateur peut-il s'approprier pleinement ces outils de manière naturelle et sans appréhension?

Ce manuscrit a retracé huit années de travaux réalisés pour tenter d'apporter des éléments de réponses à ces questions et débloquent les différents verrous qui vont bien au-delà de verrous simplement technologiques. La rédaction de ce document nous a permis de comprendre que l'utilisateur a véritablement été au cœur de notre démarche, quelles que soient la finalité et l'application des outils développés en réalité virtuelle.

7.1 Bilan du travail effectué

Rappelons les problématiques mentionnées dans le chapitre 2 :

1. la perception de l'environnement, la pertinence de l'immersion vécue et le cybermalaise
2. l'intuitivité de l'interaction
3. la prise en compte des caractéristiques des utilisateurs

De ces problématiques, j'avais défini un objectif principal qui était de proposer des approches pour interagir efficacement en réalité virtuelle. Par efficacité, nous entendions : (i) cohérence de la perception avec son expérience passée, (ii) intuitivité de l'interaction et (iii) personnalisation de l'interaction.

Dans le chapitre 3, nous nous sommes intéressés à la perception en réalité virtuelle, afin de mieux comprendre comment un utilisateur perçoit un environnement virtuel et les différents facteurs jouant un rôle prépondérant dans l'interaction en environnement virtuel. Pour cela, nous

avons considéré deux facteurs importants : d'une part la perception des distances, d'autre part le cybermalaise.

Sur la perception des distances, nous avons étudié la stratégie des utilisateurs pour estimer des distances virtuelles dans un CAVE. Nous avons montré que les utilisateurs se servaient des limites physiques du CAVE pour réaliser leurs estimations. Nous avons étendu l'étude à l'influence de la navigation sur la perception des distances. Nous avons en particulier comparé cette perception dans un cas où l'utilisateur navigue de manière collaborative. Nous avons montré qu'il n'existait pas de différence significative entre un mode solo et un mode collaboratif, de même que nous n'avons pas observé de différence significative avec le réel. Nous avons enfin étudié l'influence du système de visualisation - CAVE ou casque immersif - en associant d'autres modalités sensorielles. L'application choisie consistait à demander à l'utilisateur de choisir le meilleur siège dans un théâtre. D'une part, nous avons montré qu'une interaction utilisant la direction du regard pour naviguer était plus efficace qu'avec une manette de type Wand. D'autre part, nous avons montré que le dispositif de visualisation impactait la perception de l'environnement virtuel. Cela nous permet d'imaginer dans le futur un modèle permettant à un utilisateur de bénéficier de la même expérience de réalité virtuelle, quel que soit le dispositif de visualisation.

Le second facteur que nous avons considéré est le cybermalaise, facteur d'une importance capitale en réalité virtuelle et qui reste un sujet de recherche encore très abondant. Nous avons travaillé sur l'estimation et la prédiction du cybermalaise. Plusieurs indicateurs objectifs et subjectifs permettent d'estimer l'occurrence du cybermalaise. Nous nous sommes concentrés ici sur l'équilibre postural, un indice qui permet à un utilisateur de mesurer son niveau de cybermalaise de manière non intrusive. Nous avons exploré les caractéristiques des signaux issus de la mesure de l'équilibre postural pour détecter des indicateurs pertinents d'apparition du cybermalaise : distribution de la projection du centre de gravité, évolution de la taille et de la forme de cette distribution, composantes fréquentielles des signaux. Nous avons montré que l'apparition du cybermalaise était fortement corrélée à l'évolution des signaux dans les domaines temporel et fréquentiel : la surface de projection du centre de gravité se dilate fortement et sa forme change d'une ellipse à un cercle, le spectre de l'équilibre postural fait apparaître des composantes correspondant à des mouvements involontaires en présence de cybermalaise. Nous avons enfin prouvé une forte corrélation entre ces indicateurs et les évaluations plus subjectives telles que le questionnaire SSQ.

Nous avons ensuite proposé dans le chapitre 4 de nouvelles techniques permettant d'interagir avec l'environnement virtuel de manière plus intuitive tout en réduisant le cybermalaise. Nous avons décomposé les interactions en deux classes : les interactions dites naturelles, basées sur les gestes des utilisateurs, et les interactions dites informatiques, basées sur l'utilisation de périphériques d'interaction.

Concernant les interactions naturelles, nous avons développé des approches pour améliorer d'une part la détection des gestes, en particulier lors de l'utilisation de périphériques à base de caméras, en utilisant l'analyse par ondelettes. D'autre part, nous avons travaillé sur l'interaction vocale afin de déterminer si ce mode d'interaction permettait une interaction aisée avec l'environnement virtuel. Les résultats ont montré que l'interaction naturelle et en particulier l'interaction vocale n'est pas encore pleinement mature, du fait de la latence inhérente aux algorithmes de reconnaissance des mots mais aussi de la difficulté à prononcer les mots avec un accent suffisamment précis pour le système.

Nous avons alors recentré nos recherches sur des méthodes d'interactions informatiques. Nous avons proposé deux méthodes, *Space Scrolling* et *Avatar Follow*, basées sur l'utilisation d'un smartphone, utilisé de manière très régulière par un grand nombre de personnes. Nous avons ensuite présentée *Head Lock*, après que des premiers tests ont montré une difficulté des utilisateurs à utiliser ces techniques pour naviguer en environnement virtuel. Si ces différentes méthodes ont bien permis une diminution du cybermalaise, il n'en reste pas moins qu'elles ne sont pas considérées

comme intuitives.

Nous avons alors exploré une méthode de navigation semi-automatique, basée sur un couplage entre la planification de trajectoire et un contrôle basé sur le regard, avec pour objectif d'aider l'utilisateur dans sa tâche de navigation et ainsi éviter des mouvements superflus pouvant contribuer à un cybermalaise plus élevé. Si cette méthode s'avère efficace contre le cybermalaise et est globalement appréciée par les utilisateurs, elle ne semble pas totalement intuitive.

Dans le chapitre 5, nous nous sommes intéressés à la multi-sensorialité, absente de toutes les méthodes proposées précédemment, car la littérature a montré par le passé son apport pour améliorer l'expérience utilisateur. Nous avons abordé cet aspect d'une part par le développement d'interfaces d'interaction à main nue avec retour d'effort, le HandNavigator et le HaptiHand. Nous avons développé ces interfaces dans un but premier de manipulation d'objets virtuels, mais elles peuvent également être utilisées pour la navigation en environnement virtuel. Le verrou majeur lors de la conception du HandNavigator et du HaptiHand a concerné l'ergonomie à l'utilisation et l'intuitivité. D'autre part, nous avons présenté une application concrète d'intégration de la multi-sensorialité : la simulation de travail en hauteur. Nous avons développé pour cela une plateforme dynamique et un environnement de simulation avec présence d'objets tangibles pour augmenter la sensation de présence et exciter la sensation de vertige.

L'ensemble de ces travaux n'a cependant pas réellement pris en compte l'utilisateur dans le sens où toutes les méthodes développées ne s'adaptent pas au profil des utilisateurs. C'est pourquoi, dans le chapitre 6, nous avons imaginé une méthode de navigation adaptative, en ce qu'elle prend en compte en temps réel le niveau de cybermalaise des utilisateurs. Le principe est de définir la loi de commande de navigation comme une fonction du niveau de cybermalaise de l'utilisateur, ce qui permet de diminuer l'accélération de navigation si l'utilisateur ressent un malaise et donc d'atténuer le niveau de cybermalaise. Nous avons montré que notre méthode est très efficace pour diminuer le cybermalaise sans altérer les performances de navigation.

7.2 Perspectives

Les différents travaux que nous avons menés montrent qu'une meilleure compréhension de l'humain et une prise en compte de celui-ci dans l'interaction ouvrent des perspectives intéressantes pour une meilleure appréhension et utilisation de la réalité virtuelle. Rappelons que l'objectif principal est de faciliter une diffusion des technologies de réalité virtuelle au plus grand nombre. Or le marché est encore dans une phase instable et les ventes de dispositifs de réalité virtuelle en 2019 ont été beaucoup moins élevées que ce que les cabinets de conseil avaient prédit¹. Si ces cabinets continuent de prévoir malgré tout une augmentation des ventes dans les années à venir grâce à une offre plus importante de contenus et une baisse des prix, la progression moins rapide qu'espérée du marché est probablement due aussi à l'inconfort que procurent les dispositifs de réalité virtuelle. A travers les travaux que nous avons menés, nous avons tenté de progresser dans le traitement des problématiques que nous avons rappelées dans la partie précédente, mais celles-ci restent loin d'avoir été résolues.

Par exemple, concernant le cybermalaise, il sera difficile, voire impossible, de supprimer cet effet de par les contraintes physiques imposées : dans le cas d'utilisation d'un CAVE, espace délimité par les écrans, dans le cas d'utilisation d'un casque, présence de câbles, puissance limitée lorsque le casque est autonome, vision coupée du monde donc perte potentielle de repères spatiaux. D'autres approches, différentes de celles proposées actuellement pour lever ce verrou, sont ainsi à explorer. La thèse de Yuyang Wang, en cours, permet d'envisager de nouvelles approches.

Parallèlement au cybermalaise, les autres thèses en cours continuent d'étudier la perception en

1. [wccftch, ANALYSIS: Magic Leap Isn't Going to Get the \\$10 Billion It's After, 2020](#)

environnements virtuels (thèses de José Luis Dorado et de Théo Combe) et l'interaction homme-machine dans un contexte automobile (thèses de Carolina Rengifo Cadavid et de Cédric Di Loreto).

Nous proposons quatre axes de développement :

1. Développement de la navigation dite collaborative
2. Intégration poussée de la multi-sensorialité dans l'interaction
3. Application à la simulation de conduite
4. Exploration de l'interaction dite subconsciente

7.2.1 Axe 1 : Navigation collaborative

Pour naviguer en environnement virtuel, un utilisateur contrôle son avatar virtuel et c'est cet avatar qui se déplace dans l'environnement. Telle qu'est conçue l'interaction en réalité virtuelle, l'avatar, par définition, ne fait que suivre les commandes de l'utilisateur, autrement dit, l'avatar est dépourvu d'intelligence ou plutôt de comportement.

Nous souhaitons faire évoluer cette représentation de l'avatar vers une entité semi-autonome. Ainsi, l'avatar pourra devenir comme un compagnon virtuel. L'idée principale derrière cette notion d'avatar semi-autonome est de considérer la navigation comme une tâche collaborative entre l'utilisateur et son avatar (et non comme une navigation totalement assistée). Les travaux passés de la littérature ont exploré l'idée d'un compagnon virtuel mais qui ne fait que "transporter" l'utilisateur durant la navigation [Cirio *et al.*, 2012]. L'animation comportementale d'agents virtuels, déjà très présente par exemple dans les jeux vidéo, ne s'applique jamais à l'avatar d'un utilisateur [Lin *et al.*, 2008]. Rares sont les travaux ayant considéré des avatars autonomes [Kim *et al.*, 2000]. Dans cette perspective, la problématique principale sera de déterminer le degré d'autonomie qui pourra être transmise au compagnon pour assister l'utilisateur dans la navigation.

Pour répondre à cette problématique, plusieurs pistes seront explorées. La première sera d'abord d'étudier, comme pour la navigation par planification de trajectoires introduite dans le chapitre 4.3, ce qui se fait en robotique. En effet, de nombreux travaux ont été réalisés en particulier en robotique humanoïde sur la collaboration homme-robot. Cette notion de collaboration a trouvé une portée accrue depuis l'arrivée de l'industrie du futur (ou industrie 4.0) dans laquelle ressort la notion de cobotique. Un des éléments de base est la notion de maître-esclave ou de leader-suiveur. L'idée primaire est d'affecter à chacun des protagonistes (l'utilisateur et son avatar) un coefficient de leadership qui varie de manière continue dans le temps entre 0 et 1, le coefficient de l'un étant complémentaire à celui de l'autre (la somme des deux coefficients ne doit pas excéder 1) (Figure 7.1) [Kheddar *et al.*, 2009]. Ainsi, lors de la navigation, tantôt l'avatar est leader et transporte l'utilisateur, tantôt l'utilisateur est leader et contrôle son avatar, tantôt les deux peuvent se retrouver dans une situation de négociation, selon le contexte dans lequel se trouve l'utilisateur.

Cette notion de leader-suiveur, aussi élémentaire semble-t-elle, se retrouve également dans les travaux effectués autour du véhicule autonome et plus particulièrement dans les problématiques liées à la délégation de conduite. En effet, avec les véhicules autonomes, le conducteur doit pouvoir reprendre le contrôle du véhicule si celui-ci le demande, de même qu'il doit pouvoir laisser la main si le véhicule le peut, de manière transparente pour le conducteur et sans à-coups. Une manière d'y arriver est de considérer le système conducteur-véhicule comme un problème d'optimisation contraint résolu à l'aide de méthodes prédictives [Guo *et al.*, 2019].

Nous souhaitons donc utiliser la collaboration comme moyen de faciliter la navigation car au-delà de la réalité virtuelle, cette approche peut avoir des applications directes dans des domaines

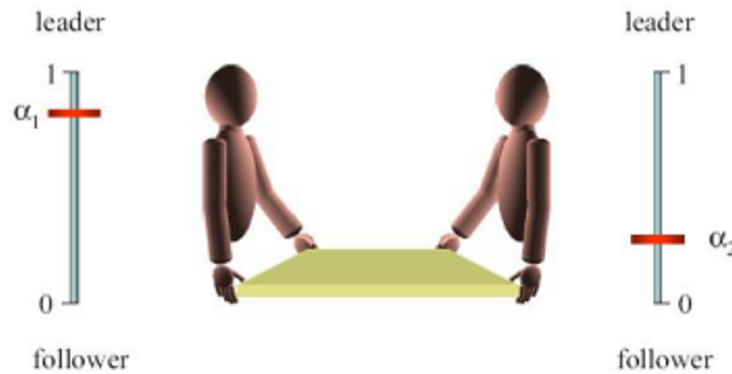


FIGURE 7.1 – Relation de leader-suiveur dans une collaboration (tiré de [Kheddar *et al.*, 2009]).

tels que le véhicule autonome. Ainsi, plus que l'interaction avec l'environnement virtuel, c'est l'interaction avec son propre avatar que nous souhaitons reconsidérer ici.

Une autre piste sera de revenir au concept même d'avatar. Par définition, au sens informatique du terme, un avatar est sensé être une représentation de l'utilisateur. Mais représente-t-il vraiment l'utilisateur? De nombreux travaux se sont intéressés à la question de l'appropriation de l'avatar par l'utilisateur (par exemple [Kilteni *et al.*, 2012]). Ici, la tâche sera plus complexe car nous souhaitons intégrer un certain degré d'autonomie à l'avatar. Aussi, l'avatar ne serait plus juste une représentation de l'utilisateur, mais une entité à double vie. L'idée proposée sera donc de considérer l'état psychologique, physiologique et comportemental des utilisateurs, comme nous avons commencé à le faire et présenté dans le chapitre 6, tel que l'équilibre postural, la conductance électrodermale, le mouvement des yeux, comme paramètres objectifs, pour construire un premier modèle personnalisé du compagnon virtuel de l'utilisateur. Ce modèle nous servira ensuite à prédire les intentions de l'utilisateur, et l'évolution de son état en fonction de ses actions dans l'environnement virtuel et du contexte de navigation permettra d'améliorer le comportement du compagnon pour une meilleure navigation. La prédiction et l'évolution du comportement du compagnon pourront s'appuyer sur des outils issus de l'intelligence artificielle tels que l'apprentissage ou des approches topologiques utilisées par exemple pour la classification du mouvement [Bensekka *et al.*, 2017]. C'est ici que prend le sens d'une réalité virtuelle intelligente au sens de l'intelligence artificielle définie par exemple dans [Luck and Aylett, 2000] et non plus juste au sens d'une interaction judicieuse telle que décrite dans le chapitre 6. Nous souhaitons ainsi remettre en cause le rôle de l'utilisateur dans l'interaction pour mieux centrer la réalité virtuelle sur l'utilisateur.

Pour parvenir à ces résultats, les actions envisagées sont les suivantes :

- collaboration utilisateur-avatar : mise en place d'une thèse pour développer des modèles d'interaction homme-avatar inspirés de la robotique et améliorer la navigation en environnement virtuel. Des études utilisateurs seront menées pour valider l'approche.
- avatar semi-autonome : durant cette même thèse, il s'agira (i) d'analyser les intentions des utilisateurs à travers des paramètres intrinsèques comme première brique d'une amélioration de l'expérience utilisateur, (ii) d'intégrer un modèle comportemental à l'avatar de l'utilisateur pour faciliter la navigation. Des études utilisateurs seront menées pour valider l'approche.

7.2.2 Axe 2 : Interaction multi-sensorielle

Nous avons au cours des travaux exposés ici étudié l'influence de la multi-sensorialité sur l'interaction, en intégrant en particulier le retour vibratoire et haptique. Convaincus de l'apport du retour multi-sensoriel, nous souhaitons explorer davantage l'utilisation de l'ensemble des sens humains.

En premier lieu, nous souhaitons aller plus loin sur le retour haptique. La littérature fournit une quantité impressionnante de travaux sur le développement de dispositifs à retour d'efforts, tous aussi originaux les uns que les autres pour restituer une sensation de toucher fine et réaliste, par exemple par l'utilisation d'ultra-sons [Carter *et al.*, 2013] ou de stimuli électriques [Yem *et al.*, 2018]. D'une part, les dispositifs proposés sont soit intrusifs, soit ne permettent pas un retour d'effort important dans le cas de dispositifs non intrusifs. Nous souhaitons développer des dispositifs qui puissent lever ces verrous. D'autre part, le retour haptique n'est présent la plupart du temps que sur les doigts, ce qui est assez naturel puisque l'interaction avec des objets virtuels est principalement effectuée avec les mains et les doigts. Cependant, nous souhaitons qu'un utilisateur puisse profiter d'un retour haptique sur l'ensemble de son corps. Des combinaisons haptiques commercialisées existent telles que Teslasuit², mais ne permettent un retour haptique qu'en des points localisés. Or la sensibilité des organes humains n'est pas locale. Nous souhaitons étudier et déterminer l'influence d'un retour sur l'ensemble du corps sur la performance d'interaction et l'expérience utilisateur en termes de confort et de cybermalaise : il s'agira d'évaluer les types de stimuli (fréquence, amplitude, lieux d'application des stimuli) permettant d'améliorer l'expérience utilisateur.

Dans un registre assez proche, nous considérerons également la multi-sensorialité au niveau vestibulaire. En effet, le cybermalaise résultant d'un conflit visuo-vestibulaire, nous examinerons comment nous pouvons mieux prendre en compte l'oreille interne dans la définition de méthodes de navigation. Cela pourra passer par le développement de systèmes dynamiques qui stimulent les organes ayant un rôle important dans le cybermalaise. En particulier, comme pour le retour d'effort, nous évaluerons les stimuli (mouvements de faibles ou hautes fréquences type vibrations, amplitudes) pertinents. Une piste sera de s'inspirer de la stimulation galvanique, pour laquelle des travaux ont montré une efficacité dans la réduction du cybermalaise [Cevette *et al.*, 2012; Gálvez-García *et al.*, 2015], bien que l'implémentation effective de cette technique soit encore rare.

Un autre sens déjà exploré dans la littérature concerne l'ouïe. Il est connu que le son spatialisé permet un enrichissement de l'expérience en réalité virtuelle [Ortega-Gonzalez, 2011]. Nous souhaitons intégrer davantage le son comme outil d'aide au repérage spatial et l'interaction en environnement virtuel.

Enfin, nous souhaitons explorer l'intégration des autres sens, le goût et l'odorat. La littérature est moins abondante sur cet aspect, les interactions en environnement virtuel étant moins évidentes, en particulier pour le goût. L'odorat pourrait être intéressant à étudier comme interface d'interaction [Yanagida, 2008; Kato *et al.*, 2018]. L'odorat est également un indice important pour le repérage spatial : en effet il a été montré à l'aide d'un dispositif de réalité virtuelle intégrant un diffuseur d'odeurs qu'un mammifère peut construire une carte mentale de son environnement simplement par les odeurs [Radvansky and Dombeck, 2018]. Nous envisageons donc d'intégrer davantage ce sens dans les applications de réalité virtuelle, pour la navigation en environnement virtuel par exemple, et d'évaluer l'influence de cette modalité sensorielle sur l'expérience utilisateur et la performance d'interaction.

Pour parvenir à ces résultats, les actions envisagées sont les suivantes :

- retour haptique/vestibulaire : mise en place d'une thèse pour développer des modalités haptiques et vestibulaires. Il s'agira d'évaluer de manière fine l'apport de ces modalités sur l'ex-

2. <https://teslasuit.io/>

périence utilisateur (confort, cybermalaise, immersion) et la performance d'interaction en faisant varier des paramètres tels que les lieux d'application, la fréquence et l'amplitude des stimulations.

- retour auditif et olfactif : mise en place d'un post-doctorat pour explorer ces retours et leur influence sur l'expérience utilisateur. Il s'agira dans un premier temps d'évaluer divers stimuli sonores (types de sons à diffuser, spatialisation, modulation des sons, ...). Dans un second temps, il s'agira d'évaluer le retour olfactif en utilisant un diffuseur d'odeurs. Plusieurs paramètres tels que l'intensité de diffusion, la position, la fréquence seront à étudier. Des études utilisateurs précises seront réalisées afin de déterminer l'influence de ce retour sur l'expérience utilisateur.

7.2.3 Axe 3 : Application à la simulation de conduite

Un domaine d'application intéressant à explorer est la simulation de conduite. En effet, l'histoire de la simulation de conduite et celle de la réalité virtuelle sont assez liées, avec des technologies assez similaires et des problématiques scientifiques proches [Kemeny, 2014]. La simulation de conduite est un moyen de recherche et de développement indispensable pour les constructeurs automobiles pour valider des comportements de conducteurs dans des situations variées, mais aussi évaluer les interactions avec les systèmes d'aide à la conduite dans des environnements sécurisés et contrôlés.

Parmi les problématiques scientifiques, nous retrouvons la perception des distances, des vitesses et des accélérations, mais aussi le cybermalaise. Ce dernier est particulièrement exacerbé, du fait des fortes accélérations et vitesses atteintes. Pour traiter ces problématiques, dès les années 70, des simulateurs dynamiques ont été conçus permettant d'exciter le système vestibulaire, organe qui joue un rôle prépondérant dans la perception du mouvement. De tels simulateurs sont présents maintenant chez la plupart des constructeurs automobiles, leurs caractéristiques techniques étant assez variées et uniques. Le développement des véhicules autonomes a ajouté une couche supplémentaire dans l'utilisation massive de la simulation de conduite, avec des problématiques liées à l'interaction homme-véhicule, en particulier lors du transfert de délégation de la conduite, mais aussi des problématiques liées aux aspects cognitifs dans des situations à risque telles que le freinage d'urgence, voire les chocs.

Dans le cadre de l'activité SIMCO dont j'ai la responsabilité à l'Institut Image, la thèse CIFRE de Carolina Rengifo Cadavid avec Renault, récemment soutenue, s'est intéressée à améliorer la perception d'un conducteur en simulation de conduite d'un point de vue très systémique. La thèse de Cédric Di Loreto avec l'Institut de Biomécanique Humaine Georges Charpak étudie l'apport de l'immersion virtuelle pour évaluer le comportement des passagers d'un véhicule autonome dans des situations critiques d'un point de vue biomécanique, et de manière sous-jacente améliorer la sécurité des passagers.

Dans la thèse de Carolina Rengifo Cadavid, l'objectif est de fournir des lois de commande aux simulateurs de conduite qui permettent des mouvements perçus proches de la réalité, pour des applications liées au véhicule autonome. Des premiers travaux ont été initiés pour fournir un algorithme de restitution de mouvements basé sur du contrôle prédictif (*Model Predictive Control* (MPC)) réputé robuste [Beghi *et al.*, 2012; Fang and Kemeny, 2016; Ellensohn *et al.*, 2017]. Le verrou des modèles MPC réside dans la recherche d'une solution optimale en temps réel. En effet, la dynamique du système varie rapidement et donc nécessite des outils dédiés [Goodwin *et al.*, 2006]. L'utilisation d'outils d'intelligence artificielle, tels que les réseaux de neurones récurrents, apparaît intéressante pour de l'optimisation dynamique sur simulateurs. Différents modèles ont été proposés pour l'optimisation basée sur des réseaux de neurones récurrents : à base de pénalités, simple à implanter mais approximative [Cheng *et al.*, 2009], à base de lagrangien, qui per-

met de gérer les contraintes d'égalité et d'inégalités [Costantini *et al.*, 2008], ou encore par projection, qui ne nécessite aucun paramètre de pénalité [Liu and Wang, 2015]. Certains de ces modèles ont été utilisés avec succès pour l'implantation de contrôle prédictif [Yan and Wang, 2012; Wang *et al.*, 2014]. Cependant, aucune de ces applications n'évalue la possibilité d'utiliser une méthode à base de pénalités comme une forme d'optimisation efficace pour l'implantation dans une boucle de contrôle prédictif. Nous avons ainsi proposé un algorithme de restitution de mouvements basé sur du MPC en utilisant un réseau de neurones récurrents à base de pénalités [Rengifo *et al.*, 2018]. Les premiers résultats ont montré que les réseaux de neurones n'apportent pas une amélioration significative dans la recherche d'une solution optimale en temps réel. Il est à noter que dans ce premier travail, nous n'avons pas intégré de modèle de perception humaine car l'objet était simplement d'évaluer l'intérêt des outils d'intelligence artificielle pour la restitution de mouvements. Nous souhaitons cependant poursuivre ces travaux sur l'utilisation d'outils d'intelligence artificielle en intégrant pleinement l'humain dans la boucle. L'idée sera alors de définir un modèle permettant de déterminer automatiquement les paramètres pertinents liés à l'utilisateur (caractéristiques physiologiques, physiques, comportementales) et de les intégrer dans les lois de commande de la plateforme de simulation de conduite. Ce nouveau modèle de perception humaine serait alors un modèle personnalisé, ce qui n'est pas le cas des modèles présents dans la littérature [Telban and Cardullo, 2005]. La particularité est que les mouvements ne correspondraient pas nécessairement à une réalité physique (tels que définis par les modèles dynamiques de véhicule et d'interaction avec la route), en revanche, ils correspondraient davantage à une réalité *perçue* par chacun des utilisateurs.

Dans la thèse de Cédric Di Loreto, il s'agit de comprendre le comportement et les différentes stratégies cognitives du corps humain dans un environnement dynamique réel couplé à un environnement virtuel contrôlé. Contrairement à la thèse de Carolina Rengifo Cadavid, il s'agit ici de reproduire le plus fidèlement des dynamiques physiques réelles. Des premiers essais sur véhicule réel sur pistes contrôlées ont permis d'acquérir un grand nombre de données issues du véhicule mais aussi des passagers [Di Loreto *et al.*, 2019]. Les situations réelles ont ensuite été répliquées sur deux simulateurs dynamiques de conduite différents. L'analyse des données est en cours d'exploitation.

L'extension naturelle de ces thèses sera de travailler sur l'interaction usager-véhicule afin d'offrir une conduite autonome souple, confortable et sécurisée pour l'usager. Ensuite, il s'agira de coupler plusieurs simulateurs de conduite entre eux et de déterminer comment plusieurs véhicules autonomes et plusieurs usagers de ces véhicules pourront interagir entre eux et contribuer à un trafic plus fluide et sécurisé. Nous souhaitons nous référer pour cela aux travaux réalisés dans le domaine des systèmes multi-agents, pour lesquels de nombreux modèles d'interaction existent [Oh *et al.*, 2015]. Des travaux de recherche en partenariat avec le Laboratoire d'Automatique, de Mécanique et d'Informatique industrielles et Humaines (LAMIH) de Valenciennes sont en cours à travers le projet Co-simulation.

7.2.4 Axe 4 : Interaction subconsciente

Cet axe est beaucoup plus exploratoire. Je l'indique ici comme perspective ultime.

Nous nous souvenons du film Matrix de Lana et Lilly Wachowski sorti en 1999 dans lequel des humains sont enfermés dans un univers virtuel réaliste (la Matrice) simulant le monde actuel. Les humains sont branchés et pilotés par des machines, ils vivent dans la Matrice de manière inconsciente.

Si ce film donne une vision totalement irréaliste voire inquiétante du monde et du pouvoir des machines, il est néanmoins intéressant dans la manière d'aborder la relation avec le monde et en particulier l'interaction avec celui-ci, dans la mesure où les humains réalisent de manière

inconsciente toutes leurs actions dans un monde virtuel.

Sans aller jusqu'à une concrétisation de Matrix, nous souhaitons explorer ce mode d'interaction de deux manières. La première est de nous intéresser à ce qui nous semble proche de l'idée de Matrix : le rêve. En effet, lorsque nous rêvons, nous réalisons dans nos rêves des actions qui peuvent être de la navigation (marcher, courir, voler), de la manipulation d'objets et de l'interaction sociale. Si nous considérons la navigation, il est intéressant de noter que bien que le système vestibulaire ne soit pas excité, nous ne ressentons pas de mal-être comme en immersion virtuelle, et pourtant dans nos rêves nous ressentons bien un mouvement. Une raison simple que nous pouvons donner est l'absence de conflit sensoriel entre le système visuel et le système vestibulaire puisque le système visuel n'est pas sollicité.

De manière surprenante, lors du sommeil, on observe des mouvements du corps divers tels que mouvements oculaires rapides, une respiration et un rythme cardiaque irréguliers, dans une phase importante du sommeil appelé sommeil paradoxal (*Rapid Eye Movement sleep*), qui peut provoquer une dépense énergétique du corps aussi forte qu'en éveil alors même que les muscles n'ont pas ou peu d'activité [Mallick *et al.*, 2011].

Par ailleurs, il existe un état de rêve appelé rêve lucide, durant lequel une personne est consciente qu'elle rêve, ce qui lui permet de contrôler ses actions dans son rêve, mais aussi le contenu et le déroulement de celui-ci [Gackenbach and LaBerge, 1988]. De plus il a été montré qu'il est possible d'apprendre à faire des rêves lucides [La Berge, 1980] et qu'une personne s'entraînant à une activité motrice dans un rêve lucide avait une performance plus élevée qu'une personne s'étant entraînée en éveil [Erlacher and Schredl, 2010]. Ces aspects sont intéressants car en transposant à la réalité virtuelle, nous pourrions imaginer qu'un utilisateur puisse interagir en environnement virtuel de manière lucide tout en étant dans un état de rêve, ce qui pourrait permettre de s'affranchir de la problématique du cybermalaise par exemple dans la navigation, tout en étant performant dans sa tâche.

Nous souhaitons ainsi nous intéresser fortement aux mécanismes du rêve pour proposer des méthodes d'interaction en réalité virtuelle utilisant ces mécanismes.

Une limitation cependant que nous pourrions voir est la difficulté à demander à un utilisateur de dormir pour vivre une expérience de réalité virtuelle. Aussi, souhaitons-nous également envisager une autre approche en nous intéressant aux signaux cérébraux. L'électroencéphalographie (EEG) est un moyen de connaître l'activité cérébrale. Elle a déjà été utilisée en réalité virtuelle comme interface d'interaction [Lécuyer *et al.*, 2008]. Le premier objectif sera donc de récupérer des signaux issus de l'EEG dans des états de rêve pour comprendre quelles zones du cerveau sont actionnées durant un rêve, en particulier lorsque celui-ci fait intervenir des mouvements de marche, de course, d'interaction avec l'environnement fictif. Il s'agira ensuite de définir des méthodes d'interaction en réalité virtuelle permettant de reproduire l'activation de ces zones cérébrales, sans affecter le système vestibulaire.

Pour atteindre cet objectif, je souhaite mettre en place dans un premier temps une thèse avec les actions suivantes :

- capture des signaux EEG d'une personne en état de rêve et analyse;
- capture des signaux EEG d'une personne en interaction en réalité virtuelle et analyse;
- comparaison des zones cérébrales activées;
- définition d'une méthode permettant d'activer en immersion virtuelle les mêmes zones cérébrales que dans un rêve;
- études utilisateurs sur un scénario de navigation simple.

Etant donné que ce domaine est totalement nouveau pour moi, des collaborations avec des équipes en neurosciences seront nécessaires.

Annexe

A.1 Context and positioning

Virtual reality is witnessing great interest for the last couple of years, though the first developments started in the 60s. Since 2013, the availability on the market of more and more affordable head-mounted displays and included development kits allowed a large diffusion of these technologies in many application fields, starting with video games, but also industry [Berg and Vance, 2017], healthcare [Ruthenbeck and Reynolds, 2015; Bourrelief *et al.*, 2016], construction [Genty, 2015; Paes and Irizarry, 2018] and cultural heritage [Bekele *et al.*, 2018], training [Prasolova-Førland *et al.*, 2017] and education [Merchant *et al.*, 2014], and many others. According to Gartner that regularly publishes a curve of expectations for new technologies called the hype cycle, in 2016, virtual reality passed the through of disillusionment, in 2017, it was on the slope of enlightenment and in 2018, it disappeared from the cycle¹, leading to a progressive development of the market. In 2016, different consulting companies estimated the virtual reality market around 5 billion dollars, with a prediction of exponential growth by 2022 - some predictions rising to more than 100 billion dollars -, along with more and more available contents^{2, 3}. This development of virtual reality also lies in an increasing interest from especially industrial companies : according to a report from Capgemini released in 2018, almost three-fourths of the companies get more than 10% operating profits thanks to the use of virtual reality⁴.

According to the *Traité de la Réalité Virtuelle*, the goal of virtual reality is to allow a person (or several persons) a sensori-motor activity in an artificial world [Fuchs and Moreau, 2003].

The specificity of virtual reality lies in the possibility for a user to be fully immersed in a virtual environment and to interact with it [Sherman and Craig, 2003], i.e., to allow a two-way action, from the user to the environment and inversely. By interaction, we include here navigation in an environment and object manipulation. Therefore the user becomes fully an actor in the virtual world, on the contrary of 3D movies where the user is just a viewer : virtual reality is and must be user centered.

1. Gartner, Hype Cycle for Emerging Technologies, 2018

2. Deloitte, Virtual reality (VR): a billion dollar niche, 2016

3. Crédit Suisse, Investing in the Matrix? Augmented and Virtual Reality Show High Investment Potential, 2016

4. Capgemini, Augmented and Virtual Reality in Operations: A guide for investment, 2018

A.1.1 Issues and challenges

The rapid development of virtual reality and its deployment in many application fields impose a wide acceptance from general consumers. However, still many scientific issues related to interaction in virtual reality remain. The development of virtual reality is therefore an important challenge for a better diffusion and usage at all levels. Among the issues, we can cite :

1. **environment perception and cybersickness.** Virtual reality allows a user to be fully immersed. Therefore, it is of major importance that the experience as lived by him/her be faithful and consistent with respect to a situation that could be real. This feeling, generally called presence, remains a wide research topic. Indeed, an important number of parameters must be taken into account for successful immersion, among which we can cite : the interpupillary distance, parameter tuning of image displays in terms of colorimetry, contrast, the system latency, the field of view, or user tracking. These parameters can induce inconsistencies that are then hard to diagnose and fix, leading to a loss of immersion and more generally to a rejection of the technology. Among the the phenomena that are still hard to control, we can mention scale perception, distance perception, speed perception, or perceived realism. Furthermore, it is well known that virtual reality is prone to a characteristic uneasiness, called cybersickness, and more particularly during a navigation task. If many studies agree on the reasons of such phenomenon, the internal mechanisms still remain an active research topic in the virtual reality community that goes beyond this community as knowledge in the neuro-psycho-physiological constitution of human beings are required. Yet, cybersickness often causes rejection or apprehension of virtual reality technologies by end users.

In this frame, the research questions are the followings :

- What are the parameters influencing the perception of the environment?
- How to ensure consistent immersion for users?
- How to estimate and predict the occurrence of cybersickness?
- How to limit cybersickness to a minimum?

2. **interaction intuitivity.** Interaction in virtual reality requires using interfaces and techniques, even for tasks that are apparently the simplest. For instance, to navigate in a virtual environment, the most natural way is to walk. However virtual reality technologies such as CAVE[®]-like immersive rooms or head-mounted displays do not allow natural walking because of physical constraints : typically, when using a CAVE, size of the screens and so displacement area, when using a head-mounted display, limited position of the trackers, presence of wires linked to a computer. Hence, it is mandatory to use stratagems, either by providing a physical device allowing natural walking, e.g., an omnidirectional treadmill, either by providing a technique that simulates a displacement, e.g., teleportation. In both cases, a novice user may need instructions to use these means and so require training. Intuitivity will therefore be an important criteria for virtual reality usability and diffusion.

In this frame, the research questions are the followings :

- How to define intuitive interaction methods?
- Can multi-sensory feedback improve interaction?

3. **integration of users' characteristics.** Though virtual reality is meant to be user-centered, interaction interfaces and techniques are developed to be uniform, whoever the user, wha-

tever his/her profile, his/her own specificities. In other terms, they do not take into consideration users' specificities whereas each user is unique. In that, developments in virtual reality seem to be thought with an overly computer-science driven approach, such as classical human-computer interfaces (keyboard, mouse). Besides, part of past work in the development of human-machine interfaces in virtual reality refers to results that are purely computer-science driven. However, the major difference between virtual reality and computer science is that virtual reality fully integrates the user during interaction, by soliciting neuro-psycho-physiological mechanisms. Therefore there is a strong need to better take into consideration users' own specificities and to define a virtual reality that we could qualify as smart in that it becomes customized.

In this frame, the research questions are the followings :

- What are the important user parameters to consider?
- How to best integrate users' characteristics to improve interaction experiences?

A.1.2 Definitions

Before exposing my work, I provide here the definition of some words and concepts that will be used throughout this manuscript.

Affordance : ability of an object to suggest its usage and action possibilities [Gibson, 1977]. For example a chair is affordant in that it suggests to sit on it. Affordance can be seen as a kind of intuitivity. In virtual reality, an interaction technique will be affordant if it suggests its usage easily and instantaneously.

Ergonomics : set of scientific knowledge related to the human being, and mandatory to design tools, machines, and devices that can be used with the maximum of comfort, safety and efficiency [Wisner, 1995]. In virtual reality, an interaction technique will be ergonomic if it is efficient and comfortable to allow an extended usage.

Intuitivity : *“degree of the effort rate required by a user in using a product for the first time”* [Lastrucci *et al.*, 2009]. Within intuitivity, it is possible to distinguish what relates to perception such as affordance and what relates to cognition such as familiarity, memory of situations and procedures [Baccino and Draï-Zerbib, 2012]. In virtual reality, an interaction technique will be intuitive if it does not require any learning by the user and allows to be efficient.

Presence : sense of being there in the virtual environment [Slater and Wilbur, 1997]. The sense of presence is achieved when the user behaves and feel in the virtual environment as in the real world.

A.1.3 Objectives and approach

The main objective of my work is to propose innovative approaches to interact in a virtual environment, in an affordant and ergonomic way, while considering their influence on the user, and so allow an improved user experience, mandatory for a better diffusion of these technologies. I restrained interaction to mainly navigation in a virtual environment, object manipulation being seen here as an extension. Following the above-mentioned research questions, we can identify several criteria for successful interaction :

1. **Consistency** : interaction ensuring a perception seen from the user as consistent with his/her past experience and not only with the real world

2. **Intuitivity** : affordant, ergonomic interaction
3. **Customization** : interaction adapted to user's own characteristics

The general methodology of our approach is represented in Fig. A.1. We based it on the observation that interaction in a virtual environment is achieved in a uniform way, whatever the user profile, which generates frustration and, in the case of navigation, cybersickness. Our approach consists in first better characterizing the user in terms of perception with respect to his/her profile and his/her state. Then, we use these information to define navigation techniques that improve user experience. Last, we consider making interaction smart, by customizing it, i.e., by integrating users' specificities within the interaction paradigms.

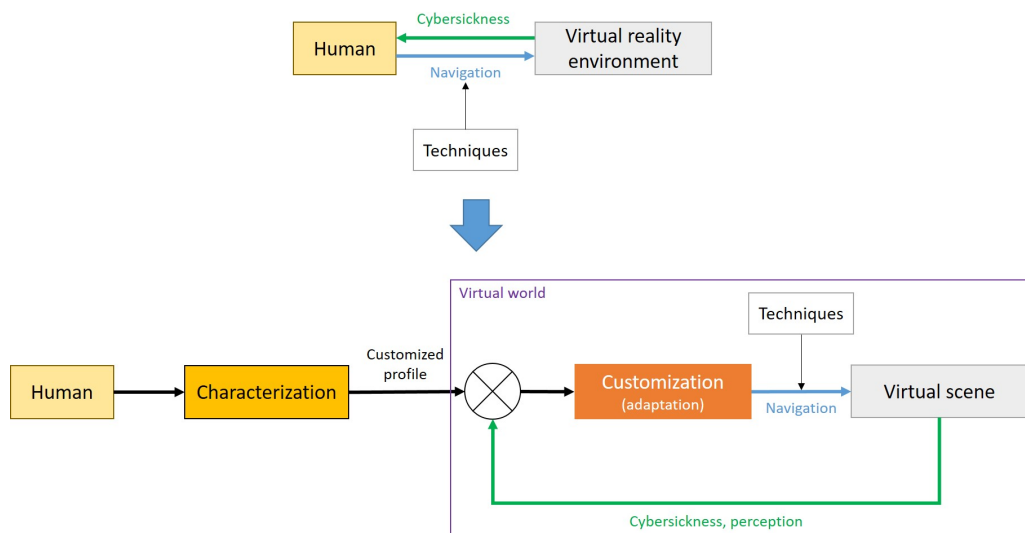


FIGURE A.1 – From a classical approach of navigation toward the proposed approach.

In the context of navigation, we first studied human factors occurring during a navigation task in order to better understand how a human being reacts when interacting in virtual immersion : distance perception, transfer of an experience from a virtual reality device to another. Then we focused on cybersickness that is characteristic in a navigation task : we studied different metrics allowing to estimate cybersickness and proposed means to predict its occurrence. From these information, we proposed several navigation methods taking into account intuitivity and cybersickness reduction constraints : we considered natural methods, artificial or computer-based methods and a method that we qualified as semi-automatic. The contribution of multi-sensory feedback was also explored through the development of a hands-on interaction device and an industrial use case. We then proposed a first approach to adapt navigation methods to the user, representing the first step toward advanced customization and intelligence in virtual reality.

A.1.4 Executed works

The works presented here were executed between 2011 and 2019. During this time, I co-supervised three Ph.D. theses defended in 2014 (Mohammad Ali Mirzaei), 2016 (Paul George) and 2020 (Carolina Rengifo Cadavid), and six Ph.D. theses are ongoing (José Luis Dorado, Yuyang Wang, Cédric Di Loreto, Quentin Jacquemin, Théo Combe and Guillaume Klein). I also supervised many M.Sc. internships and managed three post-docs (Eric Marsh, Baris Aykent and Jérémy Plouzeau).

The post-doc of Eric Marsh in 2014 and the Ph.D. thesis of José Luis Dorado, co-supervised from 2016 with Frédéric Merienne, Pablo Figueroa and Tiberio Hernandez (co-tutelle with Los

Andes Universidad, Colombia), focus on perception in virtual environment, such as distance perception, either in static situations or during a navigation task (post-doc of Eric Marsh). Especially, with José Luis Dorado, we aim at proposing a user experience that is similar whatever the immersive device (CAVE or head-mounted display), by defining a transfer function that can be applied to any kind of tasks among which navigation. It is worth noting that the work of Théo Combe, who started in 2019, also addresses this topic, but it will not be presented in this manuscript.

With Mohammad Ali Mirzaei, co-supervised with Frédéric Merienne between 2011 and 2014, we worked on the internal mechanisms of cybersickness. We set up cybersickness estimation and prediction methods. We also proposed interaction methods for navigation using gestures and voice. The work on cybersickness continued during the post-doc of Jérémy Plouzeau : we proposed a method to adapt navigation as a function of the level of cybersickness felt in real time by the user, providing insights to intelligence in interaction.

With Paul George, co-supervised with Frédéric Merienne and Indira Thouvenin (UTCompiègne, France) in partnership with Renault under the supervision of Andras Kemeny between 2012 and 2016, we worked on the development of novel interaction techniques favoring intuitivity while reducing cybersickness. These techniques were rather developed for a usage in a CAVE.

With Yuyang Wang, co-supervised with Frédéric Merienne since 2017, we worked on the development of semi-automatic navigation techniques inspired from humanoid robotics. Long-term objectives are to continue working on customizing interaction and to develop new cybersickness prediction tools for navigation.

We also worked on developing hands-on interaction devices, called HandNavigator and Hap-tiHand, in partnership with INRIA Grenoble, France, based on a development initiated in 2009.

Other projects were developed with M.Sc. students. We developed several simulators for industrial purposes. The first one is a horse carriage simulator, for which the issue relates to gesture restitution to learn how to drive a horse carriage. To this end we developed a multi-sensory device allowing to drive a virtual horse in a way consistent with real situations. This simulator was developed for the Institut Français du Cheval et de l'Équitation (IFCE). It is currently in a process of patent submission, therefore it cannot be presented here. The second simulator is a work-at-height simulator, for which the issue relates to vertical displacements in virtual reality, the sense of presence and anxiety at height. We also implemented multi-sensory feedback showing that it has a positive impact on anxiety. This simulator was developed for Enedis, the French company that distributes electrical power. Last, the third simulator is a robotic cystoscopy simulator, which is currently being developed by Quentin Jacquemin, co-supervised with Nazih Mechbal and Laurent Berthe (PIMM, France). This simulator will allow to train practitioners to using a cystoscope and will integrate a force feedback system. This work being ongoing, it will not be exposed here.

Last, we initiated in 2017 several Ph.D. theses on an extension of work in virtual reality to driving simulation, with Cédric Di Loreto, co-supervised with Frédéric Merienne and Baptiste Sandoz (IBHGC, France), and Carolina Rengifo Cadavid, co-supervised with Andras Kemeny (in partnership with Renault) and Damien Paillot (Burgundy university, France), knowing that in 2014, we did a first work on acceleration perception in driving simulation with Baris Aykent's post-doc. This manuscript being focused on interaction in virtual reality, we will not present these works here and we leave them as research perspectives.

Figure A.2 summarizes the different works presented in chronological order with the corresponding chapters in the French version of the manuscript.

Part of the work exposed here was done in collaboration with domestic and international partners. The main collaborations with academic partners were the followings :

- Pablo Figueroa and Tiberio Hernandez, professors at Los Andes Universidad, Colombia : collaboration on perception in virtual reality and the elaboration of transfer functions between visualization systems

- Manolya Kavakli, honorary professor at Macquarie University, Australia : collaboration on vocal interaction with virtual objects
- Andras Kemeny, expert leader immersive simulation and virtual reality (Renault), director of the Laboratory for Immersive Visualization (Arts et Métiers / Renault) : collaboration on the development of navigation methods and driving simulation
- Jean-Claude Léon, professor at Grenoble INP, France : collaboration on the development of hands-on interaction devices
- Indira Thouvenin, professor at UTCompiègne, France : collaboration on the development of navigation methods

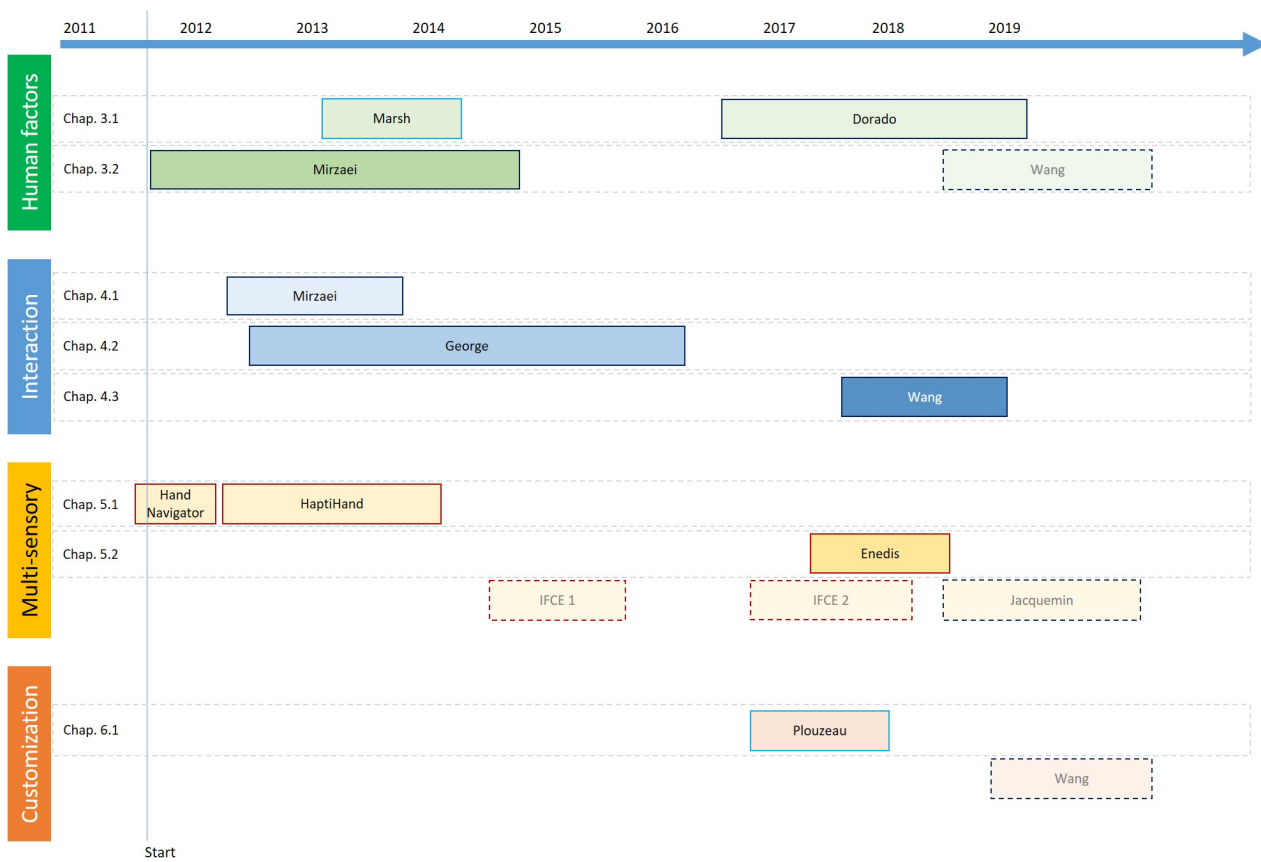


FIGURE A.2 – Timeline of the executed works with the corresponding chapters in the French version of the manuscript, with the students involved in the different works (framed in black = Ph.D. theses, framed in blue = post-docs, framed in red = M.Sc. and research projects). Works framed in dashed line are not exposed in the manuscript because either patent pending, or in progress. Note that the work on driving simulation is not mentioned neither, as being left as research perspectives.

A.2 Summary of the executed works

In this section, a detailed summary of the executed works as presented in French in the previous chapters is provided.

A.2.1 Perception in virtual environments

This section summarizes chapter 3. We focused on perception in virtual reality, in order to better understand how a user perceives a virtual environment and the different factors encountering for interaction in a virtual environment. We considered two important factors : on one hand distance perception, on the other hand cybersickness. The associated publications are shown in Table A.1.

TABLE A.1 – Publications associated to perception.

Section 3.1	
[Marsh <i>et al.</i> , 2014]	<i>W. E. Marsh, J.-R. Chardonnet, and F. Merienne</i> , Virtual Distance Estimation in a CAVE, in Spatial Cognition IX , 2014, vol. 8684, pp. 354–369.
[Marsh <i>et al.</i> , 2015]	<i>W. E. Marsh, J.-R. Chardonnet, and F. Merienne</i> , Distance Perception During Cooperative Virtual Locomotion, in IEEE Symposium on 3D User Interfaces , Arles, France, 2015, pp. 173–174.
[Dorado <i>et al.</i> , 2017]	<i>J. L. Dorado, P. Figueroa, J.-R. Chardonnet, F. Merienne, and T. Hernandez</i> , Comparing VR Environments for Seat Selection in an Opera Theater, in IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI) , Los Angeles, USA, 2017, pp. 221–222.
Section 3.2	
[Chardonnet <i>et al.</i> , 2015]	<i>J.-R. Chardonnet, M.-A. Mirzaei, and F. Merienne</i> , Visually Induced Motion Sickness Estimation and Prediction in Virtual Reality using Frequency Components Analysis of Postural Sway Signal, in ICAT EGVE , Kyoto, Japan, 2015, pp. 9–16.
[Chardonnet <i>et al.</i> , 2017]	<i>J.-R. Chardonnet, M.-A. Mirzaei, and F. Merienne</i> , Features of the Postural Sway Signal as Indicators to Estimate and Predict Visually Induced Motion Sickness in Virtual Reality, International Journal of Human–Computer Interaction , vol. 33, no. 10, pp. 771–785, 2017.

Distances

It is well admitted that size and distance perception in virtual reality seems wrong. Especially, the literature shows that distances are generally under-estimated of about 50% in virtual environments compared to the real world [Renner *et al.*, 2013; Messing and Durgin, 2005]. This phenomenon, complex to explain, is particularly inconvenient when moving in a virtual environment during an architectural project review for example. Distance underestimation can originate from a mix of factors such as constraints linked to the virtual reality systems (mass of a head-mounted display or a navigation device), uses of unnatural interfaces, graphics quality of a virtual environment (though the latter seems not to have any significant impact on distance perception [Thompson *et al.*, 2004]), virtual camera tuning with respect to users inter-pupillary distance, parallax, distance to the screen [Bruder *et al.*, 2016], or even users' cognitive profile [Boustila *et al.*, 2015]. These different factors can cause a lack of presence in the virtual environment which in turn can affect the interpretation of perceived distances [Interrante *et al.*, 2006].

However, the literature showed that simply moving in a virtual environment enables to build a precise spatial representation [Ruddle *et al.*, 2011]. More generally, making (or intending to make) an effort to interact in a virtual environment, either to navigate or to manipulate a virtual object,

has a positive influence on distance estimation [Witt *et al.*, 2004; Waller and Richardson, 2008]. However, for large distances (more than 100 meters), distances are highly under-estimated, no matter if the user is active or passive [Hecht *et al.*, 2018]. In our case, we will not consider spaces of such sizes. In any case, it seems important to perform an action, such as navigation, and so to have appropriate interaction methods for better experience in immersion. Regarding this aspect, the literature showed that for an architectural project review for instance, low navigation speeds allow better distance perception [Boustila *et al.*, 2015].

We wanted to focus on distance perception, without going too much into detail as it is a very wide and complex research field that, if we do not pay attention, can bring out from my mainstream research work.

We first studied the strategy of users to estimate virtual distances in a CAVE (Sect. 3.1.1). We asked 14 participants to estimate the distance between two virtual cones placed either horizontally either vertically at three different distances (Fig. A.3 left). We found that participants globally under-estimated distances, as found in the literature, however the lowest under-estimation was found when the virtual cones were displayed on the physical edges of the CAVE (Fig. A.3 right). Therefore we can suppose that participants used physical cues, here the edges of the CAVE, to make their estimations.

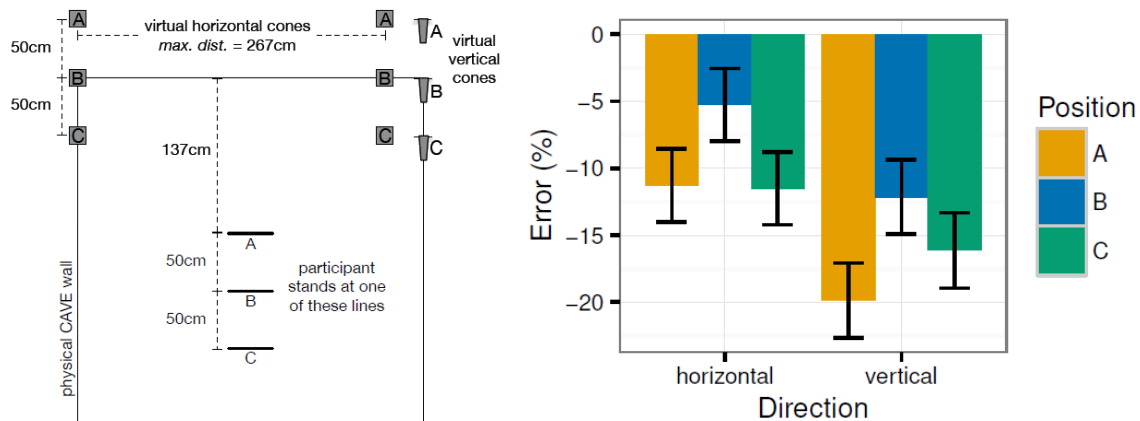


FIGURE A.3 – Left : Virtual cones and participants positions with respect to the screens of the CAVE (top view). Right : Mean percentage error of distance estimation for the six conditions positions-directions.

We then studied the influence of navigation on distance perception (Sect. 3.1.2). We asked 12 participants to estimate the distance between the same virtual cones placed either horizontally, either vertically or in depth, in a mode in which navigation was allowed and in a mode in which navigation was not allowed. We hypothesized that navigation allows better distance estimation. We found that navigation did have an effect on distance perception with a significantly reduced under-estimation than when participants did not navigate, whatever the direction (Fig. A.4).

We extended this study to the influence of collaboration during navigation on distance perception (Sect. 3.1.2). We compared between a mode in which a user navigates lonely and a mode in which two users navigate together, hypothesizing that the cooperative mode allows better distance estimation. We asked 8 participants to estimate the distance between the same virtual cones as before placed horizontally at three distances. We found that there was no significant difference between both modes.

Finally, we studied the influence of the visualization device - CAVE or head-mounted display - on distance perception, including other sensory modalities (Sect. 3.1.3). The chosen application consisted in asking the user to select the best seat in a theater. We hypothesized that the visualiza-

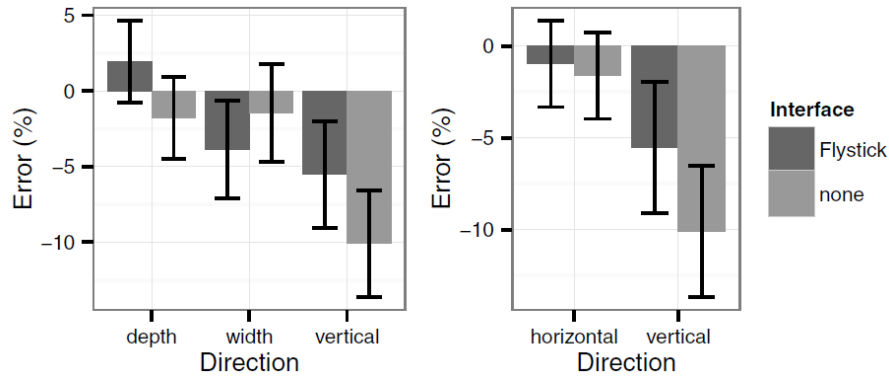


FIGURE A.4 – Mean percentage error of distance estimation for the six conditions interface-directions (left) and by grouping both horizontal and depth conditions into a single condition called horizontal (right).

tion system has a significant effect on the choice of the seat because of the visual quality and the specificities of each system. We asked 14 participants to perform two tasks : one where we asked them to navigate to several indicated seats in the theater using either gaze-based interaction in a GearVR head-mounted display or joystick-based interaction in a CAVE, and one where we asked them to select the best seat in the theater using both visualization devices. We found that gaze-based interaction was more efficient than joystick-based interaction to navigate. Then, we showed that the visualization device impacted the perception of the virtual environment (Fig. A.5) but not significantly. Especially, size perception seemed more faithful to reality in the CAVE than with the GearVR, however the perceived realism was not affected.

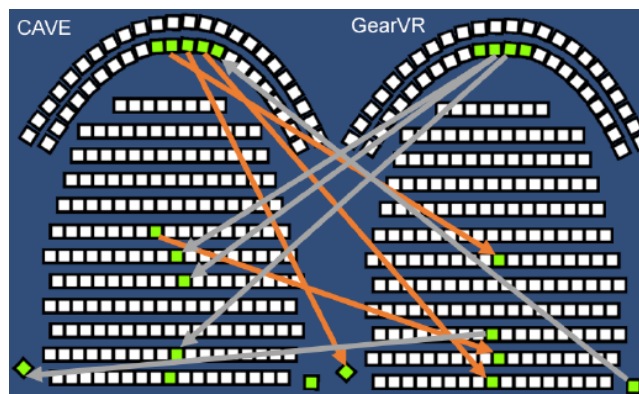


FIGURE A.5 – Seat preference and preference changes done between both devices. Orange arrows show the changes from the CAVE to the GearVR while gray arrows show the changes from the GearVR to the CAVE.

Distance perception is a fully-fledged research topic that is very complex to understand and to address. Especially one of the difficulties is that perception lies on purely subjective and personal judgements. These works allowed us to better catch the issues for a better user experience in virtual reality. It is interesting to see how a user perceives a virtual environment compared to the real world and thus to see how it is possible to transfer this perception in virtual reality. This also confirms that it is important to consider further customizing virtual reality experiences, perception being purely individual.

The objective of these works was to help defining better interaction techniques in virtual rea-

lity. Distance perception has been one of the factors of interest, but there are other factors that should be studied. Unfortunately, there are too many factors and to address the initial issues presented in the previous chapter, a combination of several factors should be considered. What remains is to find the most relevant combination of factors, if such combination exists. The next major factor we studied is cybersickness.

Cybersickness

It is well admitted that exposure to motion is prone to sickness, for example a moving car or a train, or when observing a motion without moving. The literature qualifies the former as motion sickness and the latter as visually-induced motion sickness [Bos *et al.*, 2008; Oman, 1990]. Whatever the reasons, clinical signs of sickness are cold sweating, belching, retching, pallor, decreased gastric tonus, headache, stomach discomfort, feeling of warmth, nausea, and eventually vomiting.

The literature showed that this sickness could occur at different levels depending on the persons and that several parameters could influence its occurrence. For example, repeated exposure can limit the effects through a habituation phenomenon [Rine *et al.*, 1999]. Also, persons with inner ear deficiency never suffer from motion sickness [Cheung *et al.*, 1991; Johnson *et al.*, 1999]. Keeping static favors sickness compared to moving [Guo *et al.*, 2013]. Last, women seem generally more prone to sickness than men [Koslucher *et al.*, 2016].

In virtual reality, if similar symptoms can often occur, especially when moving in a virtual environment, the reasons of such phenomenon, generally called cybersickness, can be explained by several proposed theories [Keshavarz *et al.*, 2014] : the most admitted one is the sensory conflict theory stating that a conflict occurs between sensory stimulations and expected sensations [Reason and Brand, 1975]; a well studied theory is the postural instability theory stating that extended postural instability precedes motion sickness, this instability coming from a disorder in the sensori-motor loop [Riccio and Stoffregen, 1991]; and one less admitted theory is the poisoning theory stating that motion is seen as poisoning, causing the body to evacuate toxins, which leads to sickness [Treisman, 1977].

Cybersickness is generally measured either in a subjective way or in an objective way. The most used ways is the Simulator Sickness Questionnaire (SSQ) [Kennedy *et al.*, 1993], initially used in the aviation field and revisited several times [Bouchard *et al.*, 2007; Kim *et al.*, 2018]. This questionnaire is based only on user feelings at the time the user fills it and thus may not reflect characteristic signs of cybersickness. Therefore complementary measurements are performed that are physiological or behavioral to provide more quantitative measures and bring consistency to results, such as : heart rate variation, blood pressure [Holmes and Griffin, 2001], electrogastrography [Himi *et al.*, 2004], skin conductance [Yokota *et al.*, 2005] or postural sway [Takada *et al.*, 2007].

In this work, we focused on postural sway. Recall that we want to improve navigation in virtual environments by better taking into account the user in the control loop. One key point is to precisely estimate the occurrence of cybersickness and to anticipate it in order to act consequently and minimize user discomfort. Moreover, it has been shown that cybersickness is a mean to determine the psychological validity of a virtual reality application [Pinto *et al.*, 2008]. Postural sway seemed an interesting mean to achieve our goal.

We exploited the signals derived from the measure of postural sway to detect relevant features of presence of cybersickness : distribution of the projection of the center of gravity, size and shape evolution of this distribution, frequential components of the signals. Simulation (Sect. 3.2.2) then experiments (Sect. 3.2.3) were performed to find these features. We asked 17 participants to perform a navigation task several times in a row and we measured between each task the level of cybersickness through an SSQ and a measurement of postural way using a balance board. We showed that the occurrence of cybersickness was strongly correlated with the evolution of the signals in both the temporal and the frequential domains : the projection area of the center of gravity

highly expands and its shape evolves from an ellipse to a circle (Fig. A.6), the postural sway spectrum shows components corresponding to involuntary movements in presence of cybersickness (Fig. A.7). We also proved a high correlation between these features and more subjective evaluations such as the SSQ.

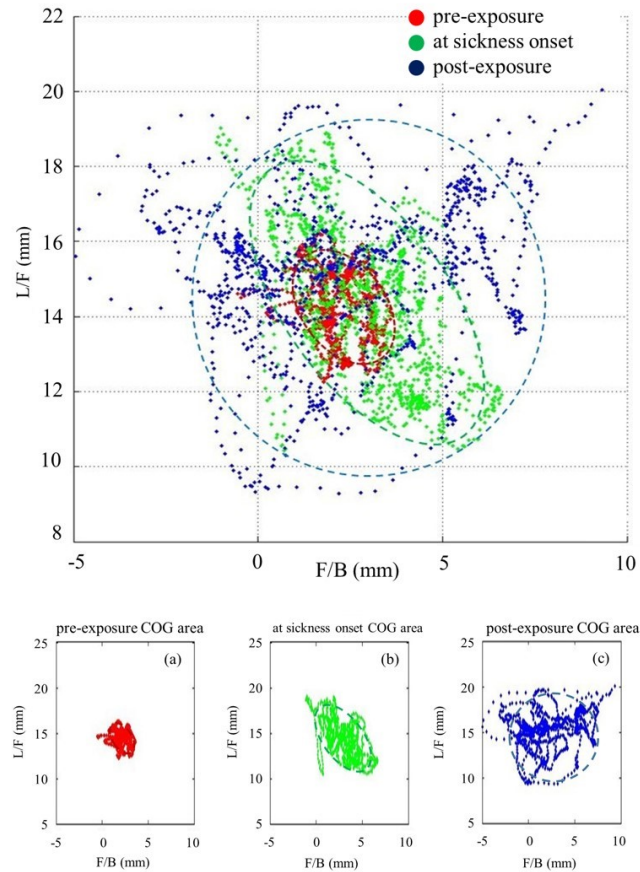


FIGURE A.6 – Postural sway for one participant in an XY plane. Circles represent projection areas of the center of gravity.

These results allowed to propose a method to predict the occurrence of cybersickness, consisting in restricting virtual reality tasks depending on the components of the postural sway spectrum or on the size and the shape of the projection area of the center of gravity.

If the advantage of measuring postural sway is to avoid wearing intrusive sensors, its drawback is its difficulty to get continuous measures of postural sway. Indeed, if a user performs a navigation task, he/she must interrupt it several times to make measurements and determine his/her level of cybersickness. Otherwise, measurements may be biased by the presence of other movements that are not linked to cybersickness but rather to user actions. It is therefore necessary to have a method that allows to get continuously and in real time reliable measures of the level of cybersickness. The literature began to provide work on it, but in situations that are not specifically linked to virtual reality [Laboissière *et al.*, 2015; Palmisano *et al.*, 2018]. Alternatives to postural sway could be considered such as head movements tracking, through inertial sensors, skin conductance, though it highly varies from a person to another, or other physio-behavioral parameters (for example, heart rate or breathing).

This work opens an interesting clue to customizing interaction toward which we want to get. Indeed, if we know the real time evolution of the level of cybersickness, we will be able to adapt navigation in real time and thus improve user comfort, which is presented in Chap. 6.

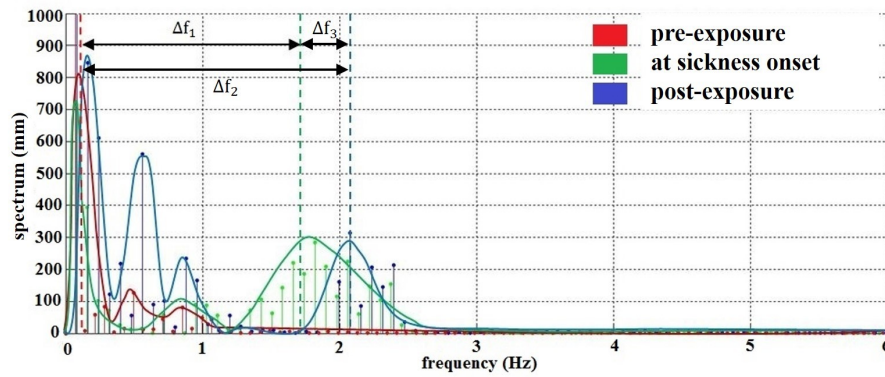


FIGURE A.7 – Postural sway spectrum for one participant in the sagittal plane.

A.2.2 Navigation in virtual environments

This section summarizes chapter 4. Works on perception in virtual reality allowed us to better understand the user to propose new techniques enabling more intuitive interaction with the virtual environment while reducing cybersickness. We considered developing new interaction methods rather than developing new interaction devices, as recent virtual reality technologies greatly improved with low latency, high screen definition, efficient user tracking, and a wide offering on the market in terms of interaction devices.

We extended the catalog of interaction methods, which is already well furnished thanks to a huge piece of past work [Boletsis, 2017]. From the literature and considering the criteria of affordance, ergonomics, presence, cybersickness and adaptability, it seems that apart from natural walking, no navigation technique succeeds in conciliating all the criteria in an optimal way. The major drawback of natural walking is linked to physical constraints that are inherent to virtual reality technologies. Teleportation, which gains more and more popularity for the past years, is also well appreciated but does not correspond to natural navigation and can cause a loss of spatial orientation [Bowman *et al.*, 1997]. Redirected walking is also a navigation technique that is gathering great attention since recently as it allows to explore infinite virtual environments while really walking in a constrained physical space, however it requires redirection gains tuning which, if not well done, can highly disturb the user [Langbehn and Steinicke, 2018].

Most of past work of the literature focused on modifying navigation parameters to reduce cybersickness, degrading navigation performance and navigation easiness. There exist articles proposing recommendations to limit cybersickness, especially while using head-mounted displays and rather for applications linked to healthcare or video games [Porcino *et al.*, 2017]. Teleportation seems in this context adapted but as mentioned above, this technique can lead to a strong loss of spatial orientation. In order to reconcile a maximum of criteria, we developed three types of interaction techniques : natural interaction, based on gestures, computer-based interaction, based on the use of interaction devices, and semi-automatic interaction, based on a combination of path planning and gaze-directed navigation. The associated publications are shown in Table A.2.

Natural interaction

One of the most important issue in human-machine interaction is to integrate natural means such as walking, gestures, vocal interaction, etc. As already mentioned, virtual reality technologies impose physical constraints, preventing ease of use of these natural means, thus altering user experience. Hence walking as a navigation mean in virtual environments is impossible if we are in a CAVE due to the physical limits of the system, and hard if we use a head-mounted display because

TABLE A.2 – Publications associated to navigation.

Section 4.1	
[Mirzaei <i>et al.</i> , 2013]	<i>M. A. Mirzaei, J.-R. Chardonnet, C. Père, and F. Merienne</i> , Improvement of the real-time gesture analysis by a new mother wavelet and the application for the navigation inside a scale-one 3D system, in IEEE International Conference on Advanced Video and Signal-Based Surveillance , Krakow, Poland, 2013, pp. 270–275.
[Mirzaei <i>et al.</i> , 2014b]	<i>M. A. Mirzaei, F. Merienne, J. H. Oliver, and J.-R. Chardonnet</i> , New wireless connection between user and VE using speech processing, Virtual Reality , vol. 18, no. 4, pp. 235–243, Nov. 2014.
[Mirzaei <i>et al.</i> , 2014a]	<i>M. A. Mirzaei, J.-R. Chardonnet, F. Merienne, and A. Genty</i> , Navigation and interaction in a real-scale digital mock-up using natural language and user gesture, in Laval Virtual VRIC'14 , Laval, France, 2014, pp. 1–4.
[Alibay <i>et al.</i> , 2017]	<i>F. Alibay, M. Kavakli, J.-R. Chardonnet, and M. Z. Baig</i> , The Usability of Speech and/or Gestures in Multi-Modal Interface Systems, in International Conference on Computer and Automation Engineering , Sydney, Australia, 2017, pp. 73–77.
Section 4.2	
[George <i>et al.</i> , 2013]	<i>P. George, A. Kemeny, F. Merienne, J.-R. Chardonnet, I. Mouttapa Thouvenin, J. Posselt, and E. Icart</i> , Nomad Devices for Interactions in Immersive Virtual Environments, in IS&T/SPIE Electronic Imaging, The Engineering Reality of Virtual Reality , Burlingame, USA, 2013, vol. 8649, pp. 86490I-1,86490I-7.
[George <i>et al.</i> , 2014]	<i>P. George, A. Kemeny, F. Colombet, F. Merienne, J.-R. Chardonnet, and I. Mouttapa Thouvenin</i> , Evaluation of Smartphone-based interaction techniques in a CAVE in the context of immersive digital project review, in IS&T/SPIE Electronic Imaging, The Engineering Reality of Virtual Reality , San Francisco, USA, 2014, vol. 9012, pp. 901203-1,901203-7.
Section 4.3	
[Wang <i>et al.</i> , 2019]	<i>Y. Wang, J.-R. Chardonnet, and F. Merienne</i> , Design of a Semiautomatic Travel Technique in VR Environments, in IEEE Virtual Reality (VR) , Osaka, Japan, 2019, pp. 1223-1224.

of a total disconnection with the real world that can cause a loss of spatial orientation with respect to the real world. However, natural interaction is interesting to explore as it does not require using intrusive interfaces.

We first developed approaches to improve on one hand gesture detection, especially when using camera-based devices, by using wavelet analysis (Sect. 4.1.1). On the other hand, we worked on vocal interaction called Speak-to-VR to determine whether this interaction mode could enable interacting with the virtual environment more easily (Sect. 4.1.2). We asked 17 participants to navigate in a virtual environment using either gestures (here walking in place) or vocal interaction. Results showed that natural interaction and especially vocal interaction is still not mature, because of the latency that is inherent to speech recognition algorithms and the difficulty to pronounce words with an enough precise accent for the system. In terms of cybersickness, results showed that gesture-based interaction is much more efficient than Speak-to-VR because of the above-mentioned latency (Fig. A.8).

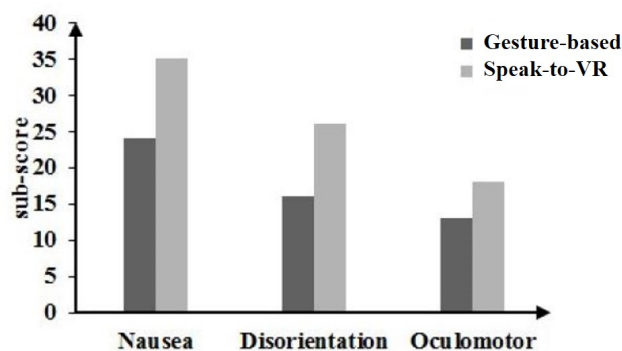


FIGURE A.8 – Comparison of SSQ scores between gesture-based and Speak-to-VR interaction techniques.

From this work, we see that it is not easy to transcribe and use gestures that are apparently simple and evident for human beings in a virtual environment. Interestingly, some researchers in this field show that natural interaction quickly reaches its limits, encouraging to propose interaction techniques that are finally not so natural [Norman, 2010; Bowman *et al.*, 2012]. These interaction techniques are on the contrary as artificial as more traditional ones [Malizia and Bellucci, 2012]. However, as for the keyboard and the mouse or more recently tactile interaction on smartphones that are not natural, massive adoption and use made these interaction “natural” in their respective usages. This is probably what encounters the most in the development of so-called natural interaction techniques rather than trying to imitate natural gestures.

Computer-based interaction

We then decided to focus on computer-based interaction methods. We proposed two methods, Space Scrolling and Avatar Follow, consisting in scrolling on the screen of a smartphone used as the interaction device to navigate in a virtual environment (Sects. 4.2.1 and 4.2.2). The interest of using a smartphone is that it is nowadays used by millions of people around the world. We developed Avatar Follow as an extension of Space Scrolling, as first user tests showed difficulties in using Space Scrolling to navigate precisely in a virtual environment because of high accelerations. In Avatar Follow, the user first moves his/her avatar in the virtual environment using the Space Scrolling technique then automatically moves to the avatar position (Fig. A.9).

Then we developed Head Lock, consisting in using the user’s head as the interaction device : to rotate, the user locks his/her head to the virtual environment and move his/her head accordingly

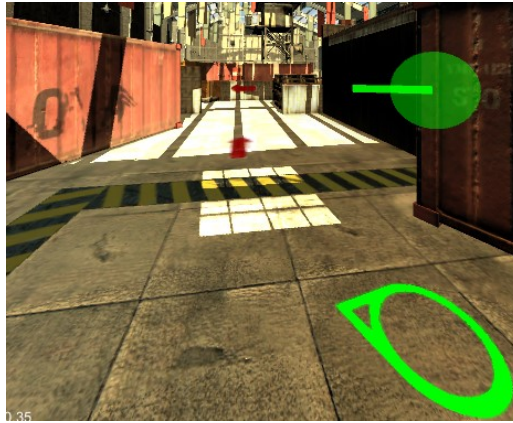


FIGURE A.9 – The Avatar Follow technique. The sphere represents the avatar position, the rod in the sphere represents the motion direction.

avoiding any sensory conflict; after rotating, the user unlocks his/her head (Sect. 4.2.3) (Fig. A.10).

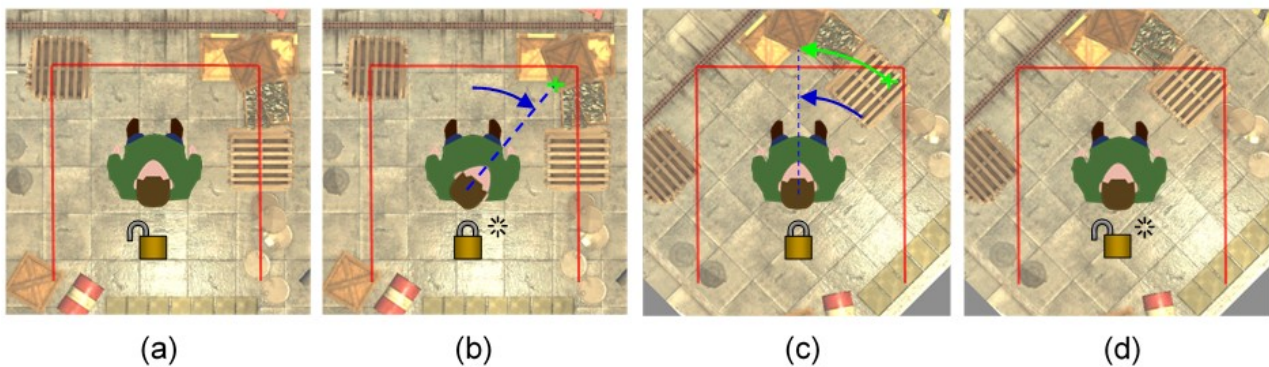


FIGURE A.10 – The Head Lock technique.

We evaluated Avatar Follow and Head Lock and compared them with joystick-based navigation. We asked 31 participants to navigate in a virtual environment using all the methods. Evaluation was done in a CAVE. Results showed that our proposed methods produce significantly less cybersickness than joystick-based navigation (Fig. A.11). However, no significant difference exists between Avatar Follow and Head Lock, though the latter seems better adapted. Regarding intuitivity, results showed that joystick-based navigation significantly remains the most intuitive method. We observed the same results for presence (Fig. A.11). Finally, a majority of participants declared that they preferred joystick-based navigation.

These results show that the proposed methods well address the cybersickness issue however, regarding intuitivity and presence, the classical joystick method remains the best.

From this, we conclude that designing navigation methods that reconcile all the above-mentioned criteria is difficult, knowing that criteria such as intuitivity are very subjective. If cybersickness is the most recurring and the most significant issue in a navigation task, the other criteria are as important to make virtual reality technologies be adopted. Besides, through the development of new techniques, it is definitely clear that the search for better virtual reality experience (immersion, presence, reduced cybersickness, intuitivity) quickly reaches the physical constraints imposed by the technology itself and user specificities (psycho-physiological specificities), and cannot avoid them.

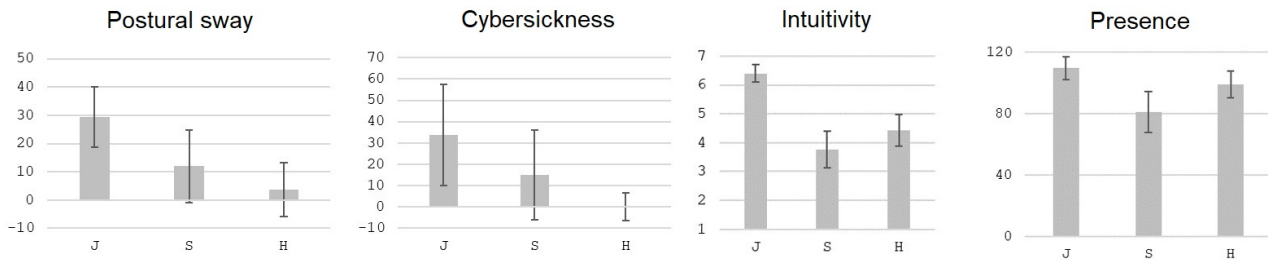


FIGURE A.11 – From left to right, postural sway, SSQ scores, intuitivity and presence.

Therefore it is necessary to totally rethink the way to design new interaction techniques, even interfaces. Especially, the joystick remains the best method in terms of intuitivity and ergonomics and can be adapted to any use case. Its major drawback is its high risk of inducing cybersickness. Therefore, the question is how to use a technique such as the joystick in a smarter way to make it “ideal”.

Semi-automatic navigation

In the previous sections, we developed navigation methods aiming at improving ergonomics and reducing cybersickness, however these methods, like all the ones of the literature, integrate control laws that are artificial and far from walking, with generally highly sequential movements.

We proposed a hybrid navigation method allowing to assist the user in his/her navigation, by partially automating navigation (Sect. 4.3). It consists in combining path planning and gaze-directed control. The use of path planning algorithms derived from the humanoid robotics field aims at helping the user navigating by avoiding any superfluous movements that can contribute to higher cybersickness (high acceleration movements due to unsmooth trajectories), while gaze-directed control allows to let the user set his/her navigation targets in a close-to-real way.

We asked 13 participants to perform a navigation task in a virtual environment displayed in a head-mounted display and to grab coins placed in this environment as fast as possible, using either joystick-based navigation (classical navigation) or semi-automatic navigation. Results showed that performance was significantly increased with semi-automatic navigation. Also, cybersickness as measured by postural sway and an SSQ was significantly reduced with semi-automatic navigation (Fig. A.12). User feedback was collected through a questionnaire on intuitivity, learnability, accuracy, likability, efficiency, presence, consistency and concentration. Results showed that semi-automatic navigation is significantly preferred over classical navigation for all criteria except intuitivity (Fig. A.12). Indeed, participants mentioned that classical navigation was easier to perform.

Discussion

These works showed that it is possible to imagine solutions *ad infinitum* to “better” navigate in virtual environments. Natural interaction quickly reaches its limits in that it is not as natural as claimed. Computer-based interaction also quickly reaches limits in that it is not much the interface which is an issue, but the way to use it, i.e., its implementation. Semi-automatic navigation is interesting because it allows a user to concentrate more on executing his/her task by proposing minimal trajectories thus avoiding superfluous movements.

Virtual reality is transdisciplinary as it is user centered and so requires to get interested in human factors. However virtual reality has often focused on developing interaction interfaces and methods with a strong computer-science driven vision, i.e., with a perspective where everything is

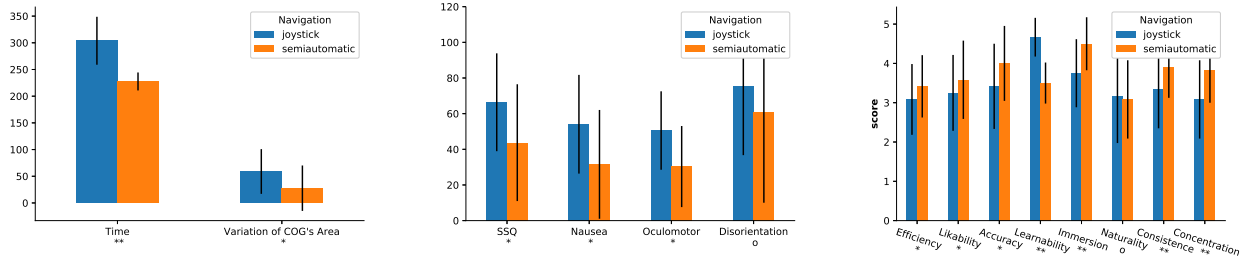


FIGURE A.12 – From left to right, task completion time and postural sway, cybersickness as measured by the SSQ, user feedback.

uniform for everyone, without taking into consideration the user as a whole. Interaction in virtual reality seems therefore to inherit from developments made for more than 50 years on 2D human-machine interaction, the most widespread results being the keyboard, the mouse and tactile screens. Caricaturing a bit, interaction in virtual reality seems not to have evolved since the keyboard and the mouse. One reason we can suppose is the absence of real 3D visualization means (3D content is indeed displayed but always on 2D systems, whatever the system). Also, the majority of virtual reality actors are more computer scientists than neuroscientists.

It is therefore important to reconsider the surrounding world, how we interact with it, if we look for reproducing the real world. In a way, though a huge piece of work exists aiming at easing 3D interaction, even by proposing so-called “hyper-natural” interaction [Bowman *et al.*, 2012], perhaps unconsciously we lock on the fact that interaction is mainly done on a 2D screen, i.e., virtual immersion cannot be total. Then the question is : is it really relevant to look for reproducing in virtual worlds close-to-real or identical-to-real interaction? The natural walking issue in virtual reality is a good example and remains a strong research topic [Nilsson *et al.*, 2018].

Besides, if 2D interaction does not integrate human factors in the same way as in 3D (these being mostly limited to ergonomics), virtual reality requires taking into account the user, which may be the case but in a superficial manner, the computer layer being overriding. That is why it is necessary to reconsider interaction in a smarter way, integrating the human as a whole but also in its unicity. For example, one way to reduce cybersickness is to adjust speed and acceleration parameters under thresholds [Kemeny *et al.*, 2015; So *et al.*, 2001; Terenzi and Zaal, 2020]. However these thresholds are empirical as they are determined from samples. It is not possible to generalize to all users as each of them is unique and has his/her own neuro-psycho-physiological functioning. Therefore it is mandatory that these interaction techniques be able to adapt to each user.

A.2.3 Integration of multi-sensory feedback

This section summarizes chapter 5. In the previous part, we focused on developing navigation techniques. In Chap. 5, we proposed to focus on the influence of multi-sensory feedback on interaction intuitivity and ergonomics. We focused on vibratory and haptic feedback, this sense being the most significant with vision. Past literature showed the contribution of multi-sensory feedback to improve user experience. The associated publications are shown in Table A.3.

HandNavigator and HaptiHand

We developed hands-on manipulation devices integrating force feedback, called the HandNavigator (Sect. 5.1.1) and the HaptiHand (Sect. 5.1.2). These devices were mainly developed for

TABLE A.3 – Publications associated to multi-sensory feedback.

Section 5.1

- [Chardonnet and Léon, 2012a] *J.-R. Chardonnet and J.-C. Léon*, Designing Interaction in Virtual Worlds through a Passive Haptic Peripheral, in **RO-MAN'2012 : 21th International Symposium on Robot and Human Interactive Communication**, Paris, France, 2012, pp. 284–289.
- [Chardonnet and Léon, 2012b] *J.-R. Chardonnet and J.-C. Léon*, Monitoring a Realistic Virtual Hand using a Passive Haptic Device to Interact with Virtual Worlds, in **Joint Virtual Reality Conference**, Madrid, Spain, 2012.
- [Chardonnet and Léon, 2013] *J.-R. Chardonnet and J.-C. Léon*, Périphérique d'interaction apte à contrôler un élément de toucher et de préhension d'objets virtuels multidimensionnels, brevet FR2986342A1, 02-Aug-2013.
- [Léon et al., 2015] *J.-C. Léon, T. Dupeux, J.-R. Chardonnet, and J. Perret*, An add-on device to perform dexterous grasping tasks with a haptic feedback system, in **DETC2015 - ASME 2015 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference**, Boston, USA, 2015.
- [Léon et al., 2016] *J.-C. Léon, T. Dupeux, J.-R. Chardonnet, and J. Perret*, Dexterous grasping tasks generated with an add-on end-effector of a haptic feedback system, **Journal of Computing and Information Science in Engineering**, vol. 16, no. 3, pp. 030903-1,030903-10, 2016.
-

Section 5.2

- [Di Loreto et al., 2018] *C. Di Loreto, J.-R. Chardonnet, J. Ryard, and A. Rousseau*, WoaH : A Virtual Reality Work-at-height Simulator, in **IEEE Virtual Reality (VR)**, Reutlingen, Germany, 2018, pp. 281-288.

manipulation purposes, however they could be used for navigation. The main issues for the design of these devices related to ergonomics and intuitivity.

The HandNavigator consists in a shell integrating four modules. Each module is a set of several sensors : a lever switch to control a virtual finger, a vibrator to render collisions between the finger and virtual objects, and a pressure sensor to simulate an exerted force when grasping a virtual object. Finger opening and closing motions are speed-controlled. The shell is mounted on a 3D mouse to control the position and orientation of the virtual hand in 3D space (Fig. A.13 left). This device enables to fully control a virtual hand with its fingers thus to precisely manipulate virtual objects, without being intrusive as users do not have to wear it. Use cases include virtual assembly simulations (Fig. A.13 right).



FIGURE A.13 – Left : The HandNavigator. Right : Several examples of finger configuration to grasp the same object, in the real world and in virtual reality. Green parts correspond to parts colliding with the virtual object.

The HaptiHand is an extension of the HandNavigator. We mounted the HandNavigator on a Haption Virtuose 6D force feedback arm. The device has been totally redesigned to cope with ergonomics issues, but the functionalities remain the same. The device was validated in a virtual assembly simulation (Fig. A.14).

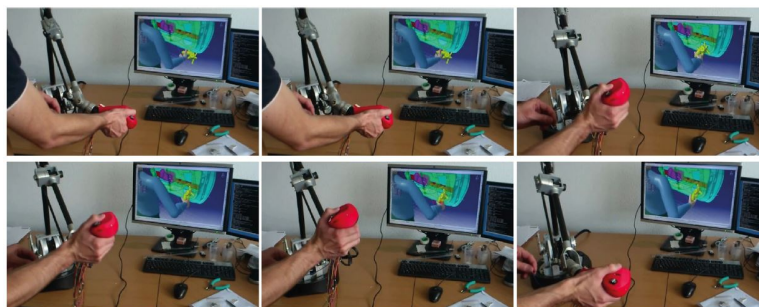


FIGURE A.14 – Part assembly simulation with the HaptiHand.

Industrial use case : a work-at-height simulator

We present an industrial interaction use case integrating multi-sensory feedback. The use case was developed in partnership with Enedis Bourgogne, the French company that distributes electrical power. The objective was to design a work-at-height simulator as an aid to recruit future workers, especially to detect susceptibility to vertigo and thus to determine the capability of workers to work at height (Sect. 5.2). Issues related to vertical navigation, which has been hardly addressed in past literature [Slater *et al.*, 1995; Lai *et al.*, 2015; Marchal *et al.*, 2010], the relationship

between perceived realism and anxiety, which was shown not to be obvious [Krijn *et al.*, 2004; Alsina-Jurnet *et al.*, 2011].

We developed a dynamic platform to reproduce the vibrations of an aerial device [Plouzeau *et al.*, 2017] and created a virtual environment integrating distant moving visual cues such as clouds and moving cars, to generate vertigo. A real ladder was also included in the simulation to enhance the perceived realism (Fig. A.15).



FIGURE A.15 – Left : Simulator with the dynamic platform. Right : Virtual environment.

We asked 14 participants to test the simulator in two configurations, one without any multi-sensory feedback and one with. Participants had to rise to 11 meters above the ground using the virtual aerial device and to climb on the virtual ladder using the real one after being harnessed. Once on top of the ladder, participants had to remove their hands off the ladder and catch an object placed behind them. Results showed that multi-sensory feedback had a significant effect on the perceived realism. Regarding anxiety, skin conductance measurements showed that acrophobic participants had a higher electrodermal activity than non-acrophobic participants (Fig. A.16).

A.2.4 Towards personalized virtual reality

This section summarizes chapter 6. In Chap. 4, we explored several navigation techniques to improve user comfort and performance. However, the navigation parameters of these methods as well as the ones from the literature are static, whoever the user. Dynamic tuning is a recent topic. Basting *et al.* propose a dynamic change of the field of view depending on user motion [Basting *et al.*, 2017]. When navigating, the field of view reduces, while remaining imperceptible. Reducing the field of view allows reducing cybersickness but deforms speed perception and so distance perception. Arguelaguet Sanz proposed an adaptive navigation method, not depending on the user, but rather on the virtual environment [Argelaguet Sanz, 2014]. The motion speed is computed as a function of the environment complexity and type. Depending on the objects in the environment, the speed is modulated to limit the optic flow and vection.

These different works show a tendency to reinvent interaction in virtual reality. Though they still do not recenter it on users, they represent a first step toward intelligence in interaction. This intelligence is not to be understood as in artificial intelligence but rather as smart. In this sense, personalization and intelligence go hand in hand. In this frame, we proposed a navigation method that adapts to the user and his/her state. The associated publications are shown in Table A.4.

The concept is to define the navigation control law, expressed in terms of acceleration, as a function of the level of cybersickness felt by the user. The level of cybersickness is measured in real

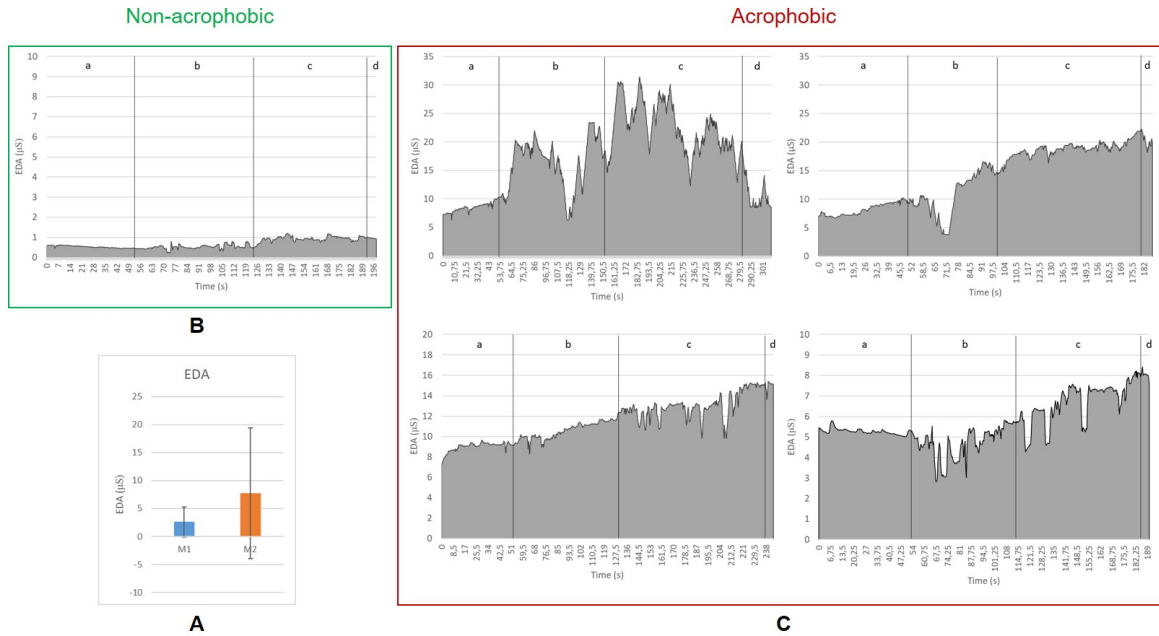


FIGURE A.16 – A. Skin conductance values for each modality. B. Evolution for a non-acrophobic participant. C. Evolution for acrophobic participants. The different phases are : (a) rise of the aerial device, (b) ladder climbing, (c) object catch, (d) end of the experiment.

TABLE A.4 – Publications associated to smarter virtual reality.

[Plouzeau *et al.*, 2018] *J. Plouzeau, J.-R. Chardonnet, and F. Merienne*, Using cybersickness indicators to adapt navigation in virtual reality : a pre-study, in **IEEE Virtual Reality (VR)**, Reutlingen, Germany, 2018, pp. 661-662.

time by the electrodermal activity. Thus, when the level of cybersickness is high, the navigation acceleration is decreased to limit discomfort. We asked 17 participants to perform a navigation task with and without adaptation. Navigation was performed using a joystick (a classical navigation interface and method) and a head-mounted display. Results showed that with adaptive navigation, cybersickness as measured by the SSQ, skin conductance and postural sway is significantly reduced (Fig. A.17). Adaptive control has however no significant effect on navigation performance.

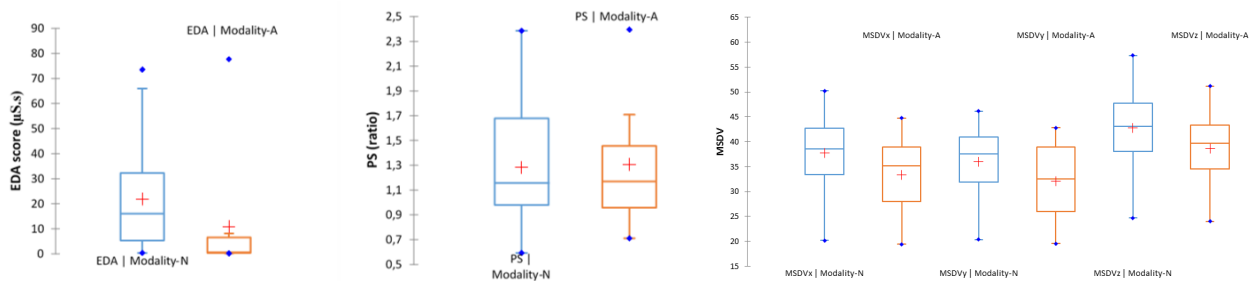


FIGURE A.17 – From left to right, skin conductance, postural sway and Motion Sickness Dose Value. Measurements are done along each motion direction.

Adaptive navigation seems a good solution for the cybersickness issue. However, though cybersickness is reduced, it cannot be totally avoided. Hence, we show that adapting navigation parameters as a function of cybersickness indicators is an efficient mean to reduce it. More important, we showed that taking into account the user's state in real time during the task, and not just before and after exposure, was useful and effective. Besides, recently, Sun et al. proposed a redirected walking method based on saccadic eye movements, another specific user parameter [Sun et al., 2018]. Their results show effectiveness to navigate in infinite virtual environments.

Moreover, proposing such adaptation can liberate from designing new navigation interfaces or methods. We showed that using existing and well-used navigation interfaces and methods (for example a joystick) is enough, these have just to be used in a smarter way. This is how we defined smart virtual reality. This allows to better concentrate on the user rather than on the interfaces and techniques themselves.

Another approach is to develop real prediction methods for cybersickness occurrence based on user profiles. These tools can come from artificial intelligence, so that the virtual reality system learns to detect cybersickness onset thresholds from features specific to users (postural sway, eye gaze, etc.). Then the output of the prediction system can be injected in the navigation control law to optimize user experience. This work is currently being conducted with Yuyang Wang.

A.3 Perspectives

The different works we have been conducting for eight years showed that a better comprehension and consideration of human beings in interaction provide interesting insights for a better apprehension and usage of virtual reality. Recall that the main objective is to favor a widespread of virtual reality technologies. Yet the market is still in an unstable phase and head-mounted display sales were less high than what consulting companies predicted⁵. Even though these companies anticipate that the market will grow again thanks to more available contents and price cutting, slower-than-expected growth of the market may also be due to the discomfort generated by virtual reality devices. Through the work we conducted, we attempted to progress in addressing the scientific issues we exposed in Chap. 2, however these are far to be solved.

5. wccftch, ANALYSIS: Magic Leap Isn't Going to Get the \$10 Billion It's After, 2020

For example, regarding cybersickness, it will be difficult, even impossible, to totally eliminate this effect due to the imposed physical constraints, as already mentioned : when using a CAVE, space limited by the screens, when using a head-mounted display, presence of wires, limited power when the display is standalone, total shield from the real world leading to a potential loss of spatial orientation. Other approaches, different from the ones currently proposed to unlock this issue, shall be explored. Yuyang Wang's ongoing Ph.D. thesis allows to envision novel approaches.

In parallel to cybersickness, the other ongoing Ph.D. theses continue studying perception in virtual environments (José Luis Dorado's and Théo Combe Ph.D. theses), the integration of multi-sensory feedback in simulators for training purposes (Quentin Jacquemin's Ph.D. thesis) and human-machine interaction in the automotive context (Carolina Rengifo Cadavid's and Cédric Di Loreto's Ph.D. theses).

We propose four development axes :

1. Development of a navigation paradigm called collaborative navigation
2. Advanced integration of multi-sensory interaction
3. Application to driving simulation
4. Exploration of an interaction mode called subconscious interaction

A.3.1 Axis 1 : Collaborative navigation

To navigate in a virtual environment, a user controls his/her virtual avatar and this avatar moves in the environment. As interaction in virtual reality is designed, the avatar, by definition, only follows orders provided by the user, i.e., the avatar does not integrate any intelligence or, rather, any behavior.

We wish to push forward this avatar representation to a semi-autonomous entity. Hence, the avatar will become a kind of virtual companion. The main idea behind this concept of semi-autonomous avatar is to consider navigation as a collaborative task between the user and his/her avatar (and not as a fully assisted navigation). Past work in the literature explored the idea of a virtual companion that only "carries" the user during navigation [Cirio *et al.*, 2012]. Behavioral animation of virtual agents, used for example in video games, never applies to the user's avatar [Lin *et al.*, 2008]. Work that considered autonomous avatars are rare [Kim *et al.*, 2000]. In this perspective, the main issue will be to determine the degree of autonomy that can be transferred to the companion to assist the user in navigation.

To address this issue, several solutions will be explored. The first one will be to study, as in navigation by path planning that we previously introduced, past work in the robotics field. Indeed, a large piece of work exists in humanoid robotics on human-robot collaboration. This concept of collaboration has recently found an increased coverage since the development of Industry 4.0 in which the concept of cobotics is of major importance. One of the main clues lies in the concept of master-slave or leader-follower. The basic idea is to assign to each actor (the user and his/her avatar) a leadership coefficient that continuously varies in real time between 0 and 1, both coefficients being complementary to each other (the sum of both coefficients must not exceed 1) (Figure A.18) [Kheddar *et al.*, 2009]. Therefore, during navigation, the avatar may be the leader and carry the user, the user may then be the leader and control his/her avatar, or both may be negotiating, depending on the context in which the user is.

This concept of leader-follower, which seems basic, is also considered in work done on autonomous vehicles and more specifically in issues linked to driving delegation. Indeed, with autonomous vehicles, the driver must be able to recover the control of the vehicle if it asks for it, as well as

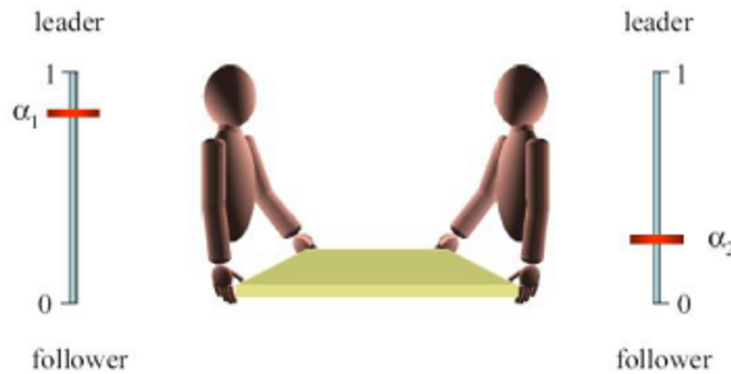


FIGURE A.18 – Leader-follower relationship in a collaborative task (from [Kheddar *et al.*, 2009]).

he/she must be able to let the vehicle recover control, in a transparent and smooth way for the driver. One way to achieve this is to consider the driver-vehicle system as a constrained optimization problem solved by predictive methods [Guo *et al.*, 2019].

Therefore we wish to use collaboration as a mean to ease navigation because, beyond virtual reality, this approach can have direct applications in fields such as autonomous vehicles. Hence, more than interaction with the virtual environment, it is the interaction with our own avatar that we want to reconsider here.

Another solution will be to go back to the concept of avatar itself. By definition, from a computer science perspective, an avatar is supposed to be a representation of the user. But does it really represent the user? A huge piece of work exists on embodiment (for example [Kilteni *et al.*, 2012]). Here, the solution will be more complex as we want to integrate a certain level of autonomy to the avatar. Therefore, the avatar would not be just a representation of the user, but an entity with a dual life. The proposed idea will be thus to consider the psychological, physiological and behavioral state of the users, as we started to do in adaptive navigation, integrating objective parameters such as postural sway, electrodermal activity, eye movement, to build a first customized model of the user's virtual companion. This model will be used then to predict user intentions, and the evolution of his/her state depending on his/her actions in the virtual environment and the navigation context will allow to improve the companion's behavior. The prediction and evolution of the companion's behavior could be based on tools from artificial intelligence such as deep learning or topological approaches used for example to classify movements [Bensekka *et al.*, 2017]. This is where the concept of smart virtual reality as integrating intelligency [Luck and Aylett, 2000] and not just being judicious as described previously takes place. We therefore wish to question the user's role in virtual reality to best center virtual reality on the user.

To achieve these results, the proposed actions are the followings :

- user-avatar collaboration : setup of a Ph.D. thesis to develop human-avatar interaction models inspired from robotics and improve navigation in virtual environments. User studies will be conducted to assess the approach.
- semi-autonomous avatar : during the same Ph.D. thesis, we will (i) analyze user intentions through intrinsic parameters as a first layer to improve user experience, (ii) integrate a behavioral model to the user's avatar to ease navigation. User studies will be conducted to assess the approach.

A.3.2 Axis 2 : Multi-sensory interaction

We studied the influence of multi-sensory feedback on interaction, integrating especially vibratory and haptic feedbacks. Convinced by the contribution of multi-sensory feedback, we wish to further explore the use of the whole set of human senses.

First, we want to further explore haptic feedback. The literature provides a huge piece of work on the development of force feedback devices, all challenging with imagination to render precise and realistic touch sensations, for example by using ultra-sounds [Carter *et al.*, 2013] or electrical stimuli [Yem *et al.*, 2018]. On one hand, the proposed devices are either intrusive or do not provide with large force feedback in the case of non-intrusive devices. We want to develop devices that can unlock these issues. On the other hand, haptic feedback is generally provided only to fingers, which is quite natural as interaction with virtual objects are mainly done with hands and fingers. However, we want a user to benefit from haptic feedback on his/her whole body. Haptic suits exist on the market such as the Teslasuit⁶, however haptic feedback is localized on specific points. Yet the sensitivity of human organs is not local. We want to study and determine the influence of a feedback on the whole body on interaction performance and user experience in terms of comfort and cybersickness : we will evaluate different stimuli (frequency, amplitude, locations of stimuli applications) that can improve user experience.

On a closely related note, we will also consider multi-sensory feedback at the vestibular level. Indeed, as cybersickness results from a visuo-vestibular conflict, we will examine how we can better take into consideration the internal ear in the definition of navigation methods. This could be addressed by developing specific dynamic setups that can stimulate organs encountering for cybersickness. Especially, as for force feedback, we will evaluate the relevant stimuli (low or high frequency motion (vibrations), amplitudes). One clue will be to study past work on galvanic stimulation, as studies showed efficiency in reducing cybersickness [Cevette *et al.*, 2012; Gálvez-García *et al.*, 2015], even though effective implementation of this technique remains scarce.

Another sense already explored in the literature relates to hearing. It is known that spatialized sound allows to enrich virtual reality experience [Ortega-Gonzalez, 2011]. We wish to further integrate sound as an aid to spatial tracking and interaction in virtual environments.

Finally, we want to explore the integration of other senses, taste and smell. The literature is less abundant on this aspect, as interactions in virtual reality are less evident, especially for taste. Smell can be interesting to study as an interaction interface [Yanagida, 2008; Kato *et al.*, 2018]. Smell is also an important cue for spatial tracking : indeed it has been shown using a virtual reality device integrating a smell diffuser that a mammal can build a mental map of its environment just through smells [Radvansky and Dombeck, 2018]. Therefore we envision to further integrate this sense in virtual reality applications, e.g., navigation in virtual environments, and to evaluate the influence of this sensory modality on user experience and interaction performance.

To achieve these results, the proposed actions are the followings :

- haptic/vestibular feedback : setup of a Ph.D. thesis to develop haptic and vestibular modalities. We will analyze in depth the contribution of these modalities on user experience (comfort, cybersickness, immersion) and interaction performance by varying parameters such as the locations of stimuli applications, the stimuli frequencies and amplitudes.
- auditory and olfactory feedback : setup of a post-doc to explore these feedbacks and their influence on user experience. We will first evaluate different sound stimuli (types of sounds to be diffused, spatialization, sound modulation, ...). Then, we will evaluate the olfactory modality by using a smell diffuser. Several parameters such as the diffusion intensity, position and frequency will be studied. Precise user studies will be conducted to determine the

6. <https://teslasuit.io/>

influence of this feedback on user experience.

A.3.3 Axis 3 : Application to driving simulation

An interesting application field to be explored is driving simulation. Indeed, the history of driving simulation is close to the one of virtual reality, with quite similar technologies and close scientific issues [Kemeny, 2014]. Driving simulation is a research and development mean that is mandatory for car manufacturers to validate drivers behaviors in various situations, but also to evaluate interactions with driver-assistance systems in secured and controlled environments.

Among the scientific issues, we find again distance perception, speed and acceleration perception, but also cybersickness. The latter is particularly exacerbated, because of high accelerations and speed that can be achieved. To address these issues, since the 70s, dynamic simulators were designed to stimulate the vestibular system. Such simulators are now present in most car manufacturers, their technical specificities are quite different and unique to each other. The development of autonomous vehicles added an extra layer in the massive use of driving simulation, with issues linked to human-vehicle interaction, especially during driving delegation transfer, but also issues linked to cognitive aspects in critical situations such as emergency breaking, or even collisions.

In the frame of the SIMCO group that I am in charge of within Institut Image, Carolina Rengifo Cadavid's Ph.D. thesis with Renault, recently defended, focused on improving the perception of a driver in a driving simulation from a very systemic viewpoint. Cédric Di Loreto's Ph.D. thesis with the Georges Charpak Institute for Human Biomechanics, France, studies the contribution of virtual immersion to evaluate the behavior of the passengers of an autonomous vehicle in situations that are critical from a biomechanical perspective, and implicitly improve the passengers' safety.

In Carolina Rengifo Cadavid's Ph.D. thesis, the goal is to provide control laws to driving simulators allowing movements that are perceived as close to the real world as possible, for applications linked to autonomous vehicles. First work was initiated to provide a motion restitution algorithm based on Model Predictive Control (MPC) that is known to be robust [Beghi *et al.*, 2012; Fang and Kemeny, 2016; Ellensohn *et al.*, 2017]. The issue in MPC models lies in the search for an optimal solution in real time. Indeed, the system dynamics varies quickly and thus requires dedicated tools [Goodwin *et al.*, 2006]. Using artificial intelligence tools, such as recurrent neural networks, seems interesting for dynamic optimization on simulators. Different models were proposed for optimization based on recurrent neural networks : penalty-based, easy to implement but approximative [Cheng *et al.*, 2009], Lagrangian-based, that allows to manage equality and inequality constraints [Costantini *et al.*, 2008], or by projection, that requires no penalty parameter [Liu and Wang, 2015]. Some of these models were used successfully to implement predictive control [Yan and Wang, 2012; Wang *et al.*, 2014]. However, none of these applications evaluates the possibility to use a penalty-based method as an efficient optimization form to be implemented in a predictive control loop. We therefore proposed a motion restitution algorithm based on MPC using penalty-based recurrent neural networks [Rengifo *et al.*, 2018]. First results showed that neural networks do not bring any significant improvement in searching an optimal solution in real time. Note that in this first work, we did not integrate any human perception model as the objective was just to evaluate the interest of artificial intelligence tools for motion restitution. We wish however to continue this work in using artificial intelligence tools by fully integrating the human in the loop. The idea will be then to define a model allowing to automatically determine relevant user's parameters (physiological, physical, behavioral specificities) and to integrate them in the control laws of the driving simulation platform. This new human perception model would then be a customized model, which is not the case of models of the literature [Telban and Cardullo, 2005]. The specificity is that movements would not necessarily correspond to a physical reality (as defined by vehicle dynamic models and road interaction models), but would better correspond to a reality that is

perceived by each user.

In Cédric Di Loreto's Ph.D. thesis, the goal is to understand the behavior and the different cognitive strategies of the human body in a real dynamic environment coupled to a controlled virtual environment. On the contrary of Carolina Rengifo Cadavid's Ph.D. thesis, here we aim at reproducing as most as possible real physical dynamics. First trials on real vehicles on controlled tracks allowed to acquire a large amount of data from the vehicles and the passengers [Di Loreto *et al.*, 2019]. The real situations were then replicated on two different dynamic driving simulators. Data analysis is still in progress.

The natural extension of these theses will be to work on user-vehicle interaction in order to provide smooth, comfortable and secured autonomous driving for the user. Then, we will couple several driving simulators together and determine how several autonomous vehicles and several users of these vehicles will be able to interact together and contribute to smoother and more secured traffic. For that we want to refer to past work done in the field of multi-agent systems, for which multiple interaction models exist [Oh *et al.*, 2015]. Research work is in progress with the LAMIH, France, through the Co-simulation project.

A.3.4 Axis 4 : Subconscious interaction

This axis is much more exploratory. I present it here as an ultimate perspective.

We remember *Matrix* by Lana et Lilly Wachowski released in 1999 in which humans are locked in a realistic virtual universe (the Matrix) that simulates the real world. Humans are linked to and controlled by machines, they live in the Matrix unconsciously.

If this movie provides a totally unrealistic even disturbing vision of the world and the power of machines, it is nevertheless interesting in the way to address the relation with the world and especially interaction with it, since humans perform all their actions in a virtual world unconsciously.

Without aiming at concretizing Matrix, we wish to explore this interaction mode by two ways. The first one is to focus on what seems close to the concept of Matrix : dream. Indeed, when we dream, we perform in our dreams actions that can be navigation (walking, running, flying), object manipulation and social interaction. If we consider navigation, it is interesting to note that even though the vestibular system is not stimulated, we do not feel any sickness as in virtual immersion, whereas we feel motion in our dreams. One simple reason we can give is the absence of sensory conflict between the visual and the vestibular systems since the visual system is not solicited.

Surprisingly, when sleeping, we observe various body movements such as rapid eye movements, irregular breathing and heart rate, during an important sleep phase called Rapid Eye Movement sleep, that can cause a body energy expenditure as high as during awakening, whereas muscles have no or little activity [Mallick *et al.*, 2011].

Moreover, there exists a dream state called lucid dreaming, during which a person is aware that he/she dreams, which allows him/her to control his/her actions in his/her dream, but also its content and its progression [Gackenbach and LaBerge, 1988]. It has been shown that it is possible to learn how to make lucid dreams [La Berge, 1980] and that a person who trained to a motor activity in a lucid dream had better performance than a person who trained in an awoken state [Erlacher and Schredl, 2010]. These aspects are interesting because, transposing to virtual reality, we could imagine a user be able to interact in a virtual environment in a lucid state while being dreaming, which could avoid cybersickness for example during navigation, while keeping task performance.

One limitation though is the difficulty to ask a user to sleep to have a virtual reality experience. Still, we also want to study dream mechanisms to propose interaction methods in virtual reality that use these mechanisms. Therefore, we want to consider studying cerebral signals. Electroencephalography (EEG) is a mean to study brain activity. It has already been used in virtual reality as

an interaction device [Lécuyer *et al.*, 2008]. The first objective will be then to get signals from EEG in dream states to understand which brain zones are active during a dream, especially when walking, running movements and interaction with a fictional environment occur. Then we will define interaction methods in virtual reality allowing to reproduce the activation of these brain zones, without affecting the vestibular system.

To implement this objective, I want to set up a Ph.D. thesis with the following actions :

- capture of EEG signals of a person in a dream state and analysis;
- capture of EEG signals of a person interacting in virtual reality and analysis;
- comparison of activated brain zones;
- definition of a method allowing to activate the same brain zones in virtual immersion as in a dream;
- user studies on a simple navigation scenario.

As this field is totally new for me, collaboration with neuroscientists will be required.

- [Académie française, 2000] Académie française. *Dictionnaire de l'Académie Française*, volume 2. Librairie Arthème Fayard et Imprimerie nationale, 9e édition, 2000.
- [Alibay *et al.*, 2017] F. Alibay, M. Kavakli, J.-R. Chardonnet, and M. Z. Baig. The usability of speech and/or gestures in multi-modal interface systems. In *International Conference on Computer and Automation Engineering*, pages 73–77, 2017.
- [Alsina-Jurnet *et al.*, 2011] I. Alsina-Jurnet, J. Gutiérrez-Maldonado, and M. V. Rangel-Gómez. The role of presence in the level of anxiety experienced in clinical virtual environments. *Computers in Human Behavior*, 27(1) :504–512, 2011.
- [Angus and Sowizral, 1995] Ian G. Angus and Henry A. Sowizral. Embedding the 2D interaction metaphor in a real 3D virtual environment. In *Volume 2409, Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems II*, volume 2409, pages 2409 :1–2409 :12, 1995.
- [Arcioni *et al.*, 2018] Benjamin Arcioni, Stephen Palmisano, Deborah Apthorp, and Juno Kim. Postural stability predicts the likelihood of cybersickness in active HMD-based virtual reality. *Displays*, 2018.
- [Argelaguet Sanz, 2014] Ferran Argelaguet Sanz. Adaptive navigation for virtual environments. In *IEEE Symposium on 3D User Interfaces*, pages 91–94, 2014.
- [Baccino and Draï-Zerbib, 2012] Thierry Baccino and Valérie Draï-Zerbib. L'usage des tablettes numériques : évaluation ergonomique. In *écriTech'3 : La tablette numérique, nouvelle ardoise de l'élève?*, 2012.
- [Basting *et al.*, 2017] O. Basting, A. Fuhrmann, and S. M. Grünvogel. The effectiveness of changing the field of view in a HMD on the perceived self-motion. In *2017 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)*, pages 225–226, 2017.
- [Beckhaus *et al.*, 2005] Steffi Beckhaus, Kristopher J. Blom, and Matthias Haringer. Intuitive, hands-free travel interfaces for virtual environments. In *New directions in 3D user interfaces workshop of IEEE VR*, pages 57–60, 2005.
- [Beghi *et al.*, 2012] A. Beghi, M. Bruschetta, and F. Maran. A real time implementation of MPC based motion cueing strategy for driving simulators. In *2012 IEEE 51st IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, pages 6340–6345, 2012.

- [Bekele *et al.*, 2018] Mafkereseb Kassahun Bekele, Roberto Pierdicca, Emanuele Frontoni, Eva Savina Malinverni, and James Gain. A survey of augmented, virtual, and mixed reality for cultural heritage. *Journal on Computing and Cultural Heritage*, 11(2) :7 :1–7 :36, 2018.
- [Bensekka *et al.*, 2017] C. Bensekka, C. Guillet, F. Merienne, and T. Pozzo. A topological approach for human movement classification and anticipation. In *Gait & Posture*, volume 57, pages 229–230, 2017.
- [Berg and Vance, 2017] Leif P. Berg and Judy M. Vance. Industry use of virtual reality in product design and manufacturing : a survey. *Virtual Reality*, 21(1) :1–17, 2017.
- [Birket-Smith *et al.*, 1993] M. Birket-Smith, N. Hasle, and H. H. Jensen. Electrodermal activity in anxiety disorders. *Acta Psychiatrica Scandinavica*, 88(5) :350–355, 1993.
- [Bles *et al.*, 1980] W. Bles, T. S. Kapteyn, T. Brandt, and F. Arnold. The mechanism of physiological height vertigo. II. Posturography. *Acta Oto-Laryngologica*, 89(5-6) :534–540, 1980.
- [Boletsis, 2017] Costas Boletsis. The new era of virtual reality locomotion : a systematic literature review of techniques and a proposed typology. *Multimodal Technologies Interact.*, 1(4), 2017.
- [Bos *et al.*, 2008] Jelte E. Bos, Willem Bles, and Eric L. Groen. A theory on visually induced motion sickness. *Displays*, 29(2) :47–57, 2008.
- [Bos, 2003] Jelte Egbert Bos. Method for the prevention of motion sickness, and apparatus for detecting and signaling potentially sickening motions, 2003.
- [Bouchard *et al.*, 2007] S. Bouchard, G. Robillard, and P. Renaud. Revising the factor structure of the simulator sickness questionnaire. *Annual Review of CyberTherapy and Telemedicine*, 5 :128–137, 2007.
- [Bourrelief *et al.*, 2016] Julien Bourrelief, Julien Ryard, Michèle Dion, Frédéric Merienne, Patrick Manckoundia, and France Mourey. Use of a virtual environment to engage motor and postural abilities in elderly subjects with and without mild cognitive impairment (MAAMI project). *IRBM Special Issue TecSan 2012*, 37(2) :75–80, 2016.
- [Boustila *et al.*, 2015] Sabah Boustila, Antonio Capobianco, and Dominique Bechmann. Evaluation of factors affecting distance perception in architectural project review in immersive virtual environments. In *Proceedings of the 21st ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, VRST '15, pages 207–216, 2015.
- [Bowman *et al.*, 1997] D. A. Bowman, D. Koller, and L. F. Hodges. Travel in immersive virtual environments : an evaluation of viewpoint motion control techniques. In *Proceedings of IEEE 1997 Annual International Symposium on Virtual Reality*, pages 45–52, 1997.
- [Bowman *et al.*, 2012] Doug A. Bowman, Ryan P. McMahan, and Eric D. Ragan. Questioning naturalism in 3D user interfaces. *Communications of the ACM*, 55(9) :78–88, 2012.
- [Bozgeyikli *et al.*, 2016] Evren Bozgeyikli, Andrew Raij, Srinivas Katkoori, and Rajiv Dubey. Point & teleport locomotion technique for virtual reality. In *Proceedings of the 2016 Annual Symposium on Computer-Human Interaction in Play*, CHI PLAY '16, pages 205–216, 2016.
- [Brandt *et al.*, 1980] T. Brandt, F. Arnold, W. Bles, and T. S. Kapteyn. The mechanism of physiological height vertigo. I. Theoretical approach and psychophysics. *Acta Oto-Laryngologica*, 89(5-6) :513–523, 1980.

- [Bruder *et al.*, 2016] Gerd Bruder, Ferran Argelaguet, Anne-Hélène Olivier, and Anatole Lécuyer. Cave size matters : effects of screen distance and parallax on distance estimation in large immersive display setups. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 25(1) :1–16, 2016.
- [Carter *et al.*, 2013] Tom Carter, Sue Ann Seah, Benjamin Long, Bruce Drinkwater, and Sriram Subramanian. UltraHaptics : Multi-point mid-air haptic feedback for touch surfaces. In *Proceedings of the 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '13, pages 505–514, 2013.
- [Cevette *et al.*, 2012] Michael J. Cevette, Jan Stepanek, Daniela Cocco, Anna M. Galea, Gaurav N. Pradhan, Linsey S. Wagner, Sarah R. Oakley, Benn E. Smith, David A. Zapala, and Kenneth H. Brookler. Oculo-vestibular recoupling using galvanic vestibular stimulation to mitigate simulator sickness. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 83(6) :549–555, 2012.
- [Chang *et al.*, 2020] Eunhee Chang, Hyun Taek Kim, and Byoungyun Yoo. Virtual reality sickness : A review of causes and measurements. *International Journal of Human–Computer Interaction*, 0(0) :1–25, 2020.
- [Chapa and Rao, 2000] J. O. Chapa and R. M. Rao. Algorithms for designing wavelets to match a specified signal. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 48(12) :3395–3406, 2000.
- [Chardonnet and Léon, 2010] Jean-Rémy Chardonnet and Jean-Claude Léon. Design of an immersive peripheral for object grasping. In *DETC2010 - ASME 2010 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference*, pages 1335–1344, 2010.
- [Chardonnet and Léon, 2012a] Jean-Rémy Chardonnet and Jean-Claude Léon. Designing interaction in virtual worlds through a passive haptic peripheral. In *RO-MAN'2012 : 21th International Symposium on Robot and Human Interactive Communication*, pages 284–289, 2012.
- [Chardonnet and Léon, 2012b] Jean-Rémy Chardonnet and Jean-Claude Léon. Monitoring a realistic virtual hand using a passive haptic device to interact with virtual worlds. In *Joint Virtual Reality Conference*, 2012.
- [Chardonnet and Léon, 2013] Jean-Rémy Chardonnet and Jean-Claude Léon. Périphérique d'interaction apte à contrôler un élément de toucher et de préhension d'objets virtuels multidimensionnels (brevet), 2013.
- [Chardonnet *et al.*, 2015] J.-R. Chardonnet, M.-A. Mirzaei, and F. Merienne. Visually induced motion sickness estimation and prediction in virtual reality using frequency components analysis of postural sway signal. In *ICAT EGVE*, pages 9–16, 2015.
- [Chardonnet *et al.*, 2017] J.-R. Chardonnet, M.-A. Mirzaei, and F. Merienne. Features of the postural sway signal as indicators to estimate and predict visually induced motion sickness in virtual reality. *International Journal of Human–Computer Interaction*, 33(10) :771–785, 2017.
- [Cheng *et al.*, 2009] L. Cheng, Z. G. Hou, N. Homma, M. Tan, and M. M. Gupta. Solving convex optimization problems using recurrent neural networks in finite time. In *2009 International Joint Conference on Neural Networks*, pages 538–543, 2009.
- [Cheung *et al.*, 1991] B. S. Cheung, I. P. Howard, and K. E. Money. Visually-induced sickness in normal and bilaterally labyrinthine-defective subjects. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 1 :1–10, 1991.

- [Choi and Follmer, 2016] Inrak Choi and Sean Follmer. Wolverine : A wearable haptic interface for grasping in VR. In *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '16 Adjunct, pages 117–119, 2016.
- [Cirio *et al.*, 2009] Gabriel Cirio, Maud Marchal, Tony Regia-Corte, and Anatole Lécuyer. The Magic Barrier Tape : A novel metaphor for infinite navigation in virtual worlds with a restricted walking workspace. In *Proceedings of the 16th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, VRST '09, pages 155–162, 2009.
- [Cirio *et al.*, 2012] Gabriel Cirio, Peter Vangorp, Emmanuelle Chapoulie, Maud Marchal, Anatole Lécuyer, and George Drettakis. Walking in a cube : Novel metaphors for safely navigating large virtual environments in restricted real workspaces. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 18(4) :546–554, 2012.
- [Cobb, 1999] Susan Valerie Gray Cobb. Measurement of postural stability before and after immersion in a virtual environment. *Applied Ergonomics*, 30(1) :47–57, 1999.
- [Coelho and Wallis, 2010] Carlos M. Coelho and Guy Wallis. Deconstructing acrophobia : Physiological and psychological precursors to developing a fear of heights. *Depression and Anxiety*, 27(9) :864–870, 2010.
- [Coelho *et al.*, 2008] Carlos M. Coelho, Jorge A. Santos, Carlos Silva, Guy Wallis, Jennifer Tichon, and Trevor J. Hine. The role of self-motion in acrophobia treatment. *CyberPsychology & Behavior*, 11(6) :723–725, 2008.
- [Cohen, 1977] D. C. Cohen. Comparison of self-report and overt-behavioral procedures for assessing acrophobia. *Behavior Therapy*, 8(1) :17–23, 1977.
- [Costantini *et al.*, 2008] G. Costantini, R. Perfetti, and M. Todisco. Quasi-Lagrangian neural network for convex quadratic optimization. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 19(10) :1804–1809, 2008.
- [Creem-Regehr *et al.*, 2015] Sarah H. Creem-Regehr, Jeanine K. Stefanucci, William B. Thompson, Nathan Nash, and Michael McCardell. Egocentric distance perception in the Oculus Rift (DK2). In *Proceedings of the ACM SIGGRAPH Symposium on Applied Perception*, SAP '15, pages 47–50, 2015.
- [Di Loreto *et al.*, 2018] C. Di Loreto, J.-R. Chardonnet, J. Ryard, and A. Rousseau. WoaH : A virtual reality work-at-height simulator. In *IEEE Virtual Reality (VR)*, pages 281–288, 2018.
- [Di Loreto *et al.*, 2019] C. Di Loreto, J. Dutschke, M. Forrest, A. Van Den Berg, J.-R. Chardonnet, F. Mérienne, J. Mackenzie, and B. Sandoz. Head dynamics during emergency braking events. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 22(sup1) :S224–S226, 2019.
- [Dorado *et al.*, 2017] J. L. Dorado, P. Figueroa, J.-R. Chardonnet, F. Merienne, and T. Hernandez. Comparing VR environments for seat selection in an opera theater. In *IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)*, pages 221–222, 2017.
- [Ellensohn *et al.*, 2017] Felix Ellensohn, Markus Schwienbacher, Joost Venrooij, and Daniel Rixen. Comparison of a filter- and a model predictive control based motion cueing algorithm. *PAMM*, 17(1) :787–788, 2017.

- [Erlacher and Schredl, 2010] Daniel Erlacher and Michael Schredl. Practicing a motor task in a lucid dream enhances subsequent performance : A pilot study. *The Sport Psychologist*, 24(2) :157–167, 2010.
- [Fang and Kemeny, 2016] Zhou Fang and Andras Kemeny. An efficient model predictive control-based motion cueing algorithm for the driving simulator. *SIMULATION*, 92(11) :1025–1033, 2016.
- [Fuchs and Moreau, 2003] Philippe Fuchs and Guillaume Moreau. *Traité de Réalité Virtuelle - volume 2*. Presses des Biogenic Amines, 2003.
- [Gackenbach and LaBerge, 1988] Jayne Gackenbach and Stephen LaBerge, editors. *Conscious mind, sleeping brain : Perspectives on lucid dreaming*. Springer US, 1988.
- [Genty, 2015] Ariane Genty. Virtual reality for the construction industry, the Callisto-SARI project, benefits for Bouygues Construction. In *Virtual Reality International Conference*, 2015.
- [George *et al.*, 2013] Paul George, Andras Kemeny, Frédéric Merienne, Jean-Rémy Chardonnet, Indira Mouttapa Thouvenin, Javier Posselt, and Emmanuel Icart. Nomad devices for interactions in immersive virtual environments. In *IS&T/SPIE Electronic Imaging, The Engineering Reality of Virtual Reality*, volume 8649, pages 86490I–1,86490I–7, 2013.
- [George *et al.*, 2014] Paul George, Andras Kemeny, Florent Colombet, Frédéric Merienne, Jean-Rémy Chardonnet, and Indira Mouttapa Thouvenin. Evaluation of smartphone-based interaction techniques in a CAVE in the context of immersive digital project review. In *IS&T/SPIE Electronic Imaging, The Engineering Reality of Virtual Reality*, volume 9012, pages 901203–1,901203–7, 2014.
- [George, 2016] P. George. *Interactions nomades en environnement virtuel immersif pour des applications de revue de projet numérique*. PhD thesis, Ecole Nationale Supérieure d’Arts et Métiers, 2016.
- [Gibson, 1977] James J. Gibson. *Perceiving, acting, and knowing : toward an ecological psychology*, chapter The theory of affordances, pages 67–82. Lawrence Erlbaum Associates, 1977.
- [Gálvez-García *et al.*, 2015] Germán Gálvez-García, Marion Hay, and Catherine Gabaude. Alleviating simulator sickness with galvanic cutaneous stimulation. *Human Factors*, 57(4) :649–657, 2015.
- [Goodwin *et al.*, 2006] Graham Goodwin, María M. Seron, and José A. De Doná. *Constrained control and estimation : an optimisation approach*. Springer Science & Business Media, 2006.
- [Guo *et al.*, 2013] C. T. Guo, Chi Wai Tsoi, Yiu Lun Wong, Kwok Chun Yu, and R. H. Y. So. Visually induced motion sickness during computer game playing. In *International Conference on Contemporary Ergonomics and Human Factors*, pages 51–58, 2013.
- [Guo *et al.*, 2019] Chunshi Guo, Chouki Sentouh, Jean-Christophe Popieul, and Jean-Baptiste Haué. Predictive shared steering control for driver override in automated driving : A simulator study. *Transportation Research Part F : Traffic Psychology and Behaviour*, 61 :326–336, 2019.
- [Harada *et al.*, 2010] Kensuke Harada, Eiichi Yoshida, and Kazuhito Yokoi, editors. *Motion planning for humanoid robots*. Springer-Verlag London, 2010.

- [Hart and Stavenland, 1988] S. G. Hart and L. E. Stavenland. Development of NASA-TLX (Task Load Index) : Results of empirical and theoretical research. In P. A. Hancock and N. Meshkati, editors, *Human Mental Workload*, chapter 7, pages 139–183. Elsevier, 1988.
- [Hart *et al.*, 1968] P. E. Hart, N. J. Nilsson, and B. Raphael. A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths. *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics*, 4(2) :100–107, 1968.
- [Hecht *et al.*, 2018] Heiko Hecht, Max Ramdohr, and Christoph von Castell. Underestimation of large distances in active and passive locomotion. *Experimental Brain Research*, 236(6) :1603–1609, 2018.
- [Himi *et al.*, 2004] Naoyuki Himi, Tomoshige Koga, Emi Nakamura, Motoi Kobashi, Masanobu Yamane, and Katsuhiko Tsujioka. Differences in autonomic responses between subjects with and without nausea while watching an irregularly oscillating video. *Autonomic Neuroscience*, 116(1) :46–53, 2004.
- [Holmes and Griffin, 2001] Sharon R. Holmes and Michael J. Griffin. Correlation between heart rate and the severity of motion sickness caused by optokinetic stimulation. *Journal of Psychophysiology*, 15(1) :35–42, 2001.
- [Igarashi *et al.*, 1998] Takeo Igarashi, Rieko Kadobayashi, Kenji Mase, and Hidehiko Tanaka. Path drawing for 3D walkthrough. In *Proceedings of the 11th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '98, pages 173–174, 1998.
- [Interrante *et al.*, 2006] V. Interrante, B. Ries, and L. Anderson. Distance perception in immersive virtual environments, revisited. In *IEEE Virtual Reality Conference (VR 2006)*, pages 3–10, 2006.
- [Interrante *et al.*, 2007] V. Interrante, B. Ries, and L. Anderson. Seven League Boots : A new metaphor for augmented locomotion through moderately large scale immersive virtual environments. In *2007 IEEE Symposium on 3D User Interfaces*, 2007.
- [Jang *et al.*, 2002] D. P. Jang, J. H. Ku, Y. H. Choi, B. K. Wiederhold, S. W. Nam, I. Y. Kim, and S. I. Kim. The development of virtual reality therapy (VRT) system for the treatment of acrophobia and therapeutic case. *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, 6(3) :213–217, 2002.
- [Jeon *et al.*, 2008] Jin Yong Jeon, Yong Hee Kim, Densil Cabrera, and John Bassett. The effect of visual and auditory cues on seat preference in an opera theater. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 123(6) :4272–4282, 2008.
- [Johnson *et al.*, 1999] Walter H. Johnson, Fred A. Sunahara, and Jack P. Landolt. Importance of the vestibular system in visually induced nausea and self-vection. *Journal of Vestibular Research*, 9(2) :83–87, 1999.
- [Kato *et al.*, 2018] Shingo Kato, Masaaki Iseki, and Takamichi Nakamoto. Demonstration of olfactory display based on sniffing action. In *IEEE Virtual Reality*, Research demonstration, 2018.
- [Kellner *et al.*, 2012] F. Kellner, B. Bolte, G. Bruder, U. Rautenberg, F. Steinicke, M. Lappe, and R. Koch. Geometric calibration of head-mounted displays and its effects on distance estimation. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 18(4) :589–596, 2012.
- [Kelly *et al.*, 2017] Jonathan W. Kelly, Lucia A. Cherep, and Zachary D. Siegel. Perceived space in the HTC Vive. *ACM Transactions on Applied Perception*, 15(1) :2 :1–2 :16, 2017.

- [Kemeny *et al.*, 2015] A. Kemeny, F. Colombet, and T. Denoual. How to avoid simulation sickness in virtual environments during user displacement. In *The Engineering Reality of Virtual Reality 2015*, volume 9392, pages 9392 :1–9392 :9, 2015.
- [Kemeny, 2014] Andras Kemeny. From driving simulation to virtual reality. In *Proceedings of the 2014 Virtual Reality International Conference, VRIC '14*, pages 32 :1–32 :5, 2014.
- [Kennedy and Stanney, 1996] Robert S. Kennedy and Kay M. Stanney. Postural instability induced by virtual reality exposure : Development of a certification protocol. *International Journal of Human–Computer Interaction*, 8(1) :25–47, 1996.
- [Kennedy *et al.*, 1993] Robert S. Kennedy, Norman E. Lane, Kevin S. Berbaum, and Michael G. Lienthal. Simulator sickness questionnaire : An enhanced method for quantifying simulator sickness. *The international Journal of Aviation Psychology*, 3(3) :203–220, 1993.
- [Keshavarz *et al.*, 2014] B. Keshavarz, H. Hecht, and B. D. Lawson. *Handbook of virtual environments : Design, implementation, and applications*, chapter Visually induced motion sickness : Characteristics, causes, and countermeasures, pages 647–698. CRC Press, 2014.
- [Kheddar *et al.*, 2009] A. Kheddar, R. Bernhaupt, R. Aked, A. Billard, M. Buss, C. Balaguer, C. Bosch Cantallops, M. Di Girolamo, and K. Yokoi. Robot@CWE. FP6 EU project 34002, 2009.
- [Kilteni *et al.*, 2012] K. Kilteni, R. Groten, and M. Slater. The sense of embodiment in virtual reality. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 21(4) :373–387, 2012.
- [Kim *et al.*, 2000] J. S. Kim, K. H. Park, J. B. Kim, J. H. Do, K. J. Song, and Z. Bien. Study on intelligent autonomous navigation of avatar using hand gesture recognition. In *2000 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, volume 2, pages 846–851, 2000.
- [Kim *et al.*, 2005] Young Youn Kim, Hyun Ju Kim, Eun Nam Kim, Hee Dong Ko, and Hyun Taek Kim. Characteristic changes in the physiological components of cybersickness. *Psychophysiology*, 42(5) :616–625, 2005.
- [Kim *et al.*, 2018] Hyun K. Kim, Jaehyun Park, Yeongcheol Choi, and Mungyeong Choe. Virtual reality sickness questionnaire (VRSQ) : Motion sickness measurement index in a virtual reality environment. *Applied Ergonomics*, 69 :66–73, 2018.
- [Klein *et al.*, 2009] E. Klein, J. E. Swan, G. S. Schmidt, M. A. Livingston, and O. G. Staadt. Measurement protocols for medium-field distance perception in large-screen immersive displays. In *2009 IEEE Virtual Reality Conference*, pages 107–113, 2009.
- [Koslucher *et al.*, 2016] Frank Koslucher, Justin Munafo, and Thomas A. Stoffregen. Postural sway in men and women during nauseogenic motion of the illuminated environment. *Experimental Brain Research*, 234(9) :2709–2720, 2016.
- [Kosslyn *et al.*, 2003] Stephen M. Kosslyn, Gregory J. Digirolamo, William L. Thompson, and Nathaniel M. Alpert. Mental rotation of objects versus hands : Neural mechanisms revealed by positron emission tomography. *Psychophysiology*, 35(2) :151–161, 2003.
- [Koyama *et al.*, 2002] T. Koyama, I. Yamano, K. Takemura, and T. Maeno. Multi-fingered exoskeleton haptic device using passive force feedback for dexterous teleoperation. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, volume 3, pages 2905–2910, 2002.

- [Krijn *et al.*, 2004] M. Krijn, P. M. G. Emmelkamp, R. Biemond, C. de Wilde de Ligny, M. J. Schuemie, and C. A. P. G. van der Mast. Treatment of acrophobia in virtual reality : The role of immersion and presence. *Behaviour Research and Therapy*, 42(2) :229–239, 2004.
- [Kry *et al.*, 2008] Paul G. Kry, Adeline Pihuit, Adrien Bernhardt, and Marie-Paule Cani. HandNavigator : Hands-on interaction for desktop virtual reality. In *Proceedings of the 2008 ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, pages 53–60, 2008.
- [La Berge, 1980] Stephen P. La Berge. Lucid dreaming as a learnable skill : A case study. *Perceptual and Motor Skills*, 51(3_suppl2) :1039–1042, 1980.
- [La Recherche, 1979] La Recherche. n. 96, vol. 10, January 1979.
- [Laboissière *et al.*, 2015] Rafael Laboissière, Jean-Charles Letievant, Eugen Ionescu, Pierre-Alain Barraud, Michel Mazzuca, and Corinne Cian. Relationship between spectral characteristics of spontaneous postural sway and motion sickness susceptibility. *PLOS ONE*, 10(12) :1–15, 2015.
- [Lai *et al.*, 2015] C. Lai, R. P. McMahan, and J. Hall. March-and-Reach : A realistic ladder climbing technique. In *2015 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)*, pages 15–18, 2015.
- [Langbehn and Steinicke, 2018] Eike Langbehn and Frank Steinicke. *Encyclopedia of computer graphics and games*, chapter Redirected walking in virtual reality, pages 1–11. Springer International Publishing, 2018.
- [Lastrucci *et al.*, 2009] Emilio Lastrucci, Debora Infante, and Angela Pascale. *Evaluating usability to improve efficiency in E-Learning programs*, chapter Encyclopedia of information communication technology, pages 315–320. IGI Global, 2009.
- [LaViola *et al.*, 2001] Joseph J. LaViola, Jr., Daniel Acevedo Feliz, Daniel F. Keefe, and Robert C. Zelenik. Hands-free multi-scale navigation in virtual environments. In *Proceedings of the 2001 Symposium on Interactive 3D Graphics, I3D '01*, pages 9–15, 2001.
- [Lécuyer *et al.*, 2008] A. Lécuyer, F. Lotte, R. B. Reilly, R. Leeb, M. Hirose, and M. Slater. Brain-computer interfaces, virtual reality, and videogames. *Computer*, 41(10) :66–72, 2008.
- [Li *et al.*, 2018] Ruixuan Li, Hannah Walter, Christopher Curry, Ruth Rath, Nicolette Peterson, and Thomas A. Stoffregen. Postural time-to-contact as a precursor of visually induced motion sickness. *Experimental Brain Research*, 2018.
- [Lin *et al.*, 2008] Ming C. Lin, Avneesh Sud, Jur Van den Berg, Russell Gayle, Sean Curtis, Hengchin Yeh, Stephen Guy, Eric Andersen, Sachin Patil, Jason Sewall, and Dinesh Manocha. Real-time path planning and navigation for multi-agent and crowd simulations. In Arjan Egges, Arno Kamphuis, and Mark Overmars, editors, *Motion in Games*, pages 23–32. Springer Berlin Heidelberg, 2008.
- [Liu and Wang, 2015] Qingshan Liu and Jun Wang. A projection neural network for constrained quadratic minimax optimization. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 26(11) :2891–2900, 2015.
- [Léon *et al.*, 2015] Jean-Claude Léon, Thomas Dupeux, Jean-Rémy Chardonnet, and Jérôme Perret. An add-on device to perform dexterous grasping tasks with a haptic feedback system. In *DETC2015 - ASME 2015 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference*, 2015.

- [Léon *et al.*, 2016] J.-C. Léon, T. Dupeux, J.-R. Chardonnet, and J. Perret. Dexterous grasping tasks generated with an add-on end-effector of a haptic feedback system. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 16(3), 2016.
- [López *et al.*, 2012] Javier López, Jose Breñosa, Ignacio Galiana, Manuel Ferre, Antonio Giménez, and Jorge Barrio. Mechanical design optimization for multi-finger haptic devices applied to virtual grasping manipulation. *Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering*, 58(7-8) :431–443, 2012.
- [Luck and Aylett, 2000] Michael Luck and Ruth Aylett. Applying artificial intelligence to virtual reality : Intelligent virtual environments. *Applied Artificial Intelligence*, 14(1) :3–32, 2000.
- [Ma and Ben-Tzvi, 2015] Z. Ma and P. Ben-Tzvi. Design and optimization of a five-finger haptic glove mechanism. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 7(4), 2015.
- [Maas *et al.*, 2017] Andrew L. Maas, Peng Qi, Ziang Xie, Awni Y. Hannun, Christopher T. Lengerich, Daniel Jurafsky, and Andrew Y. Ng. Building DNN acoustic models for large vocabulary speech recognition. *Computer Speech & Language*, 41 :195–213, 2017.
- [Malizia and Bellucci, 2012] Alessio Malizia and Andrea Bellucci. The artificiality of natural user interfaces. *Communications of the ACM*, 55(3) :36–38, 2012.
- [Mallick *et al.*, 2011] B. Mallick, S. Pandi-Perumal, R. McCarley, and A. Morrison, editors. *Rapid eye movement sleep : Regulation and function*. Cambridge University Press, 2011.
- [Mapes and Moshell, 1995] Daniel P. Mapes and J. Michael Moshell. A two-handed interface for object manipulation in virtual environments. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 4(4) :403–416, 1995.
- [Marchal *et al.*, 2010] M. Marchal, A. Lécuyer, G. Cirio, L. Bonnet, and M. Emily. Walking up and down in immersive virtual worlds : Novel interactive techniques based on visual feedback. In *2010 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)*, pages 19–26, 2010.
- [Marsh *et al.*, 2014] William Eric Marsh, Jean-Rémy Chardonnet, and Frédéric Merienne. Virtual distance estimation in a CAVE. In *Spatial Cognition IX*, volume 8684, pages 354–369, 2014.
- [Marsh *et al.*, 2015] William Eric Marsh, Jean-Rémy Chardonnet, and Frédéric Merienne. Distance perception during cooperative virtual locomotion. In *IEEE Symposium on 3D User Interfaces*, pages 173–174, 2015.
- [Masani *et al.*, 2003] Kei Masani, Milos R. Popovic, Kimitaka Nakazawa, Motoki Kouzaki, and Daiichi Nozaki. Importance of body sway velocity information in controlling ankle extensor activities during quiet stance. *Journal of Neurophysiology*, 90(6) :3774–3782, 2003.
- [McCarthy *et al.*, 2016] C. McCarthy, N. Pradhan, C. Redpath, and A. Adler. Validation of the Empatica E4 wristband. In *2016 IEEE EMBS Int. Student Conference (ISC)*, pages 1–4, 2016.
- [Merchant *et al.*, 2014] Zahira Merchant, Ernest T. Goetz, Lauren Cifuentes, Wendy Keeney-Kennicutt, and Trina J. Davis. Effectiveness of virtual reality-based instruction on students' learning outcomes in K-12 and higher education : A meta-analysis. *Computers & Education*, 70 :29 – 40, 2014.
- [Messing and Durgin, 2005] Ross Messing and Frank H. Durgin. Distance perception and the visual horizon in head-mounted displays. *ACM Transactions on Applied Perception*, 2(3) :234–250, 2005.

- [Mine *et al.*, 1997] M. R. Mine, F. P. Brooks Jr, and C. H. Sequin. Moving objects in space : exploiting proprioception in virtual-environment interaction. In *24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 19–26, 1997.
- [Mine, 1995] M. Mine. Virtual environment interaction techniques. Technical Report TR95-018, UNC Chapel Hill, 1995.
- [Mirzaei *et al.*, 2013] Mohammad Ali Mirzaei, Jean-Rémy Chardonnet, Christian Père, and Frédéric Merienne. Improvement of the real-time gesture analysis by a new mother wavelet and the application for the navigation inside a scale-one 3D system. In *IEEE International Conference on Advanced Video and Signal-Based Surveillance*, pages 270–275, 2013.
- [Mirzaei *et al.*, 2014a] Mohammad Ali Mirzaei, Jean-Rémy Chardonnet, Frédéric Merienne, and Ariane Genty. Navigation and interaction in a real-scale digital mock-up using natural language and user gesture. In *Laval Virtual VRIC'14*, pages 1–4, 2014.
- [Mirzaei *et al.*, 2014b] Mohammad Ali Mirzaei, Frédéric Merienne, James H. Oliver, and Jean-Rémy Chardonnet. New wireless connection between user and VE using speech processing. *Virtual Reality*, 18(4) :235–243, 2014. Erratum published in March 2015.
- [Munafo *et al.*, 2017] Justin Munafo, Meg Diedrick, and Thomas A. Stoffregen. The virtual reality head-mounted display Oculus Rift induces motion sickness and is sexist in its effects. *Experimental Brain Research*, 235(3) :889–901, 2017.
- [Murata, 2004] A. Murata. Effects of duration of immersion in a virtual reality environment on postural stability. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 17(4) :463–477, 2004.
- [Murgia and Sharkey, 2009] A. Murgia and P. M. Sharkey. Estimation of distances in virtual environments using size constancy. *International Journal of Virtual Reality*, 8(1) :67–74, 2009.
- [Nacéri *et al.*, 2010] Abdeldjallil Nacéri, Ryad Chellali, Fabien Dionnet, and Simone Toma. Depth perception within virtual environments : Comparison between two display technologies. *International Journal On Advances in Intelligent Systems*, 3 :51–64, 2010.
- [Nilsson *et al.*, 2018] Niels Christian Nilsson, Stefania Serafin, Frank Steinicke, and Rolf Nordahl. Natural walking in virtual reality : A review. *Comput. Entertain.*, 16(2) :8 :1–8 :22, 2018.
- [Nishisato, 1966] Shizuhiko Nishisato. Reaction time as a function of arousal and anxiety. *Psychonomic Science*, 6(4) :157–158, 1966.
- [Norman, 2010] Donald A. Norman. Natural user interfaces are not natural. *interactions*, 17(3) :6–10, 2010.
- [Oh *et al.*, 2015] Kwang-Kyo Oh, Myoung-Chul Park, and Hyo-Sung Ahn. A survey of multi-agent formation control. *Automatica*, 53 :424–440, 2015.
- [Okawa *et al.*, 1995] T. Okawa, T. Tokita, Y. Shibata, T. Ogawa, and H. Miyata. Stabilometry. Significance of locus length per unit area (L/A) in patients with equilibrium disturbances. *Equilibrium Research*, 55(3) :283–293, 1995.
- [Oman, 1990] Charles M. Oman. Motion sickness : a synthesis and evaluation of the sensory conflict theory. *Canadian Journal of Physiology and Pharmacology*, 68(2) :294–303, 1990.

- [Ortega-Gonzalez, 2011] E.-V. Ortega-Gonzalez. *Etude de son 3D pour une interaction audiovisuelle en environnement virtuel enrichi*. PhD thesis, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2011.
- [Paes and Irizarry, 2018] Daniel Paes and Javier Irizarry. A usability study of an immersive virtual reality platform for building design review : Considerations on human factors and user interface. In *Construction Research Congress 2018*, 2018.
- [Palmisano *et al.*, 2018] Stephen Palmisano, Benjamin Arcioni, and Paul J. Stapley. Predicting vection and visually induced motion sickness based on spontaneous postural activity. *Experimental Brain Research*, 236(1) :315–329, 2018.
- [Pausch *et al.*, 1995] Randy Pausch, Tommy Burnette, Dan Brockway, and Michael E. Weiblen. Navigation and locomotion in virtual worlds via flight into hand-held miniatures. In *Proceedings of the 22nd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, SIGGRAPH '95, pages 399–400, 1995.
- [Peer and Ponto, 2017] A. Peer and K. Ponto. Evaluating perceived distance measures in room-scale spaces using consumer-grade head mounted displays. In *2017 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)*, pages 83–86, 2017.
- [Peng *et al.*, 2009] Qing-Jin Peng, Xiu-Mei Kang, and Ting-Ting Zhao. Effective virtual reality based building navigation using dynamic loading and path optimization. *International Journal of Automation and Computing*, 6(4) :335, 2009.
- [Perret *et al.*, 2013] Jérôme Perret, Christoph Kneschke, Judy Vance, and Georges Dumont. Interactive assembly simulation with haptic feedback. *Assembly Automation*, 33(3) :214–220, 2013.
- [Peterka, 2000] Robert J. Peterka. Postural control model interpretation of stabilogram diffusion analysis. *Biological Cybernetics*, 82(4) :335–343, 2000.
- [Pierce *et al.*, 1997] Jeffrey S. Pierce, Andrew S. Forsberg, Matthew J. Conway, Seung Hong, Robert C. Zeleznik, and Mark R. Mine. Image plane interaction techniques in 3D immersive environments. In *Proceedings of the 1997 Symposium on Interactive 3D Graphics*, I3D '97, pages 39–ff., 1997.
- [Pinto *et al.*, 2008] M. Pinto, V. Cavallo, and T. Ohlmann. The development of driving simulators : toward a multisensory solution. *Le travail humain*, 71(1) :62–95, 2008.
- [Plouzeau *et al.*, 2015] J. Plouzeau, D. Paillot, J.-R. Chardonnet, and F. Merienne. Effect of proprioceptive vibrations on simulator sickness during navigation task in virtual environment. In *ICAT EGVE*, pages 1–6, 2015.
- [Plouzeau *et al.*, 2017] J. Plouzeau, J.-R. Chardonnet, and F. Merienne. Dynamic platform for virtual reality applications. In *EuroVR*, pages 2–5, 2017.
- [Plouzeau *et al.*, 2018] J. Plouzeau, J.-R. Chardonnet, and F. Merienne. Using cybersickness indicators to adapt navigation in virtual reality : a pre-study. In *IEEE Virtual Reality (VR)*, pages 661–662, 2018.
- [Pollock *et al.*, 2012] Brice Pollock, Melissa Burton, Jonathan W. Kelly, Stephen Gilbert, and Eliot Winer. The right view from the wrong location : Depth perception in stereoscopic multi-user virtual environments. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 18(4) :581–588, 2012.

- [Porcino *et al.*, 2017] T. M. Porcino, E. Clua, D. Trevisan, C. N. Vasconcelos, and L. Valente. Minimizing cyber sickness in head mounted display systems : Design guidelines and applications. In *2017 IEEE 5th International Conference on Serious Games and Applications for Health (SeGAH)*, pages 1–6, 2017.
- [Poupyrev *et al.*, 1996] Ivan Poupyrev, Mark Billinghurst, Suzanne Weghorst, and Tadao Ichikawa. The Go-go interaction technique : Non-linear mapping for direct manipulation in VR. In *Proceedings of the 9th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '96, pages 79–80, 1996.
- [Prasolova-Førland *et al.*, 2017] E. Prasolova-Førland, J. Molka-Danielsen, M. Fominykh, and K. Lamb. Active learning modules for multi-professional emergency management training in virtual reality. In *2017 IEEE 6th International Conference on Teaching, Assessment, and Learning for Engineering (TALE)*, pages 461–468, 2017.
- [Radvansky and Dombeck, 2018] Brad A. Radvansky and Daniel A. Dombeck. An olfactory virtual reality system for mice. *Nature Communications*, 9, 2018.
- [Rahimi *et al.*, 2020] K. Rahimi, C. Banigan, and E. D. Ragan. Scene transitions and teleportation in virtual reality and the implications for spatial awareness and sickness. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 26(6) :2273–2287, 2020.
- [Razzaque *et al.*, 2002] Sharif Razzaque, David Swapp, Mel Slater, Mary C. Whitton, and Anthony Steed. Redirected walking in place. In *Proceedings of the Workshop on Virtual Environments 2002*, EGVE '02, pages 123–130, 2002.
- [Razzaque, 2005] Sharif Razzaque. *Redirected walking*. PhD thesis, University of North Carolina at Chapel Hill, 2005.
- [Reason and Brand, 1975] J. T. Reason and J. J. Brand. *Motion sickness*. Academic Press, London, 1975.
- [Reason, 1978] J. T. Reason. Motion sickness adaptation : a neural mismatch model. *Journal of the Royal Society of Medicine*, 71(11) :819–829, 1978.
- [Rengifo *et al.*, 2018] C. Rengifo, J.-R. Chardonnet, D. Paillot, H. Mohellebi, and A. Kemeny. Solving the constrained problem in model predictive control based motion cueing algorithm with a neural network approach. In *17th Driving Simulation & Virtual Reality Conference & Exhibition*, pages 63–69, 2018.
- [Renner *et al.*, 2010] Patrick Renner, Timo Dankert, Dorothe Schneider, Nikita Mattar, and Thies Pfeiffer. Navigating and selecting in the virtual supermarket : review and update of classic interaction techniques. In *Virtuelle und Erweiterte Realitaet : 7. Workshop der GI-Fachgruppe VR/AR*, pages 71–82, 2010.
- [Renner *et al.*, 2013] Rebekka S. Renner, Boris M. Velichkovsky, and Jens R. Helmert. The perception of egocentric distances in virtual environments - A review. *ACM Computing Surveys*, 46(2) :23 :1–23 :40, 2013.
- [Riccio and Stoffregen, 1991] Gary E. Riccio and Thomas A. Stoffregen. An ecological theory of motion sickness and postural instability. *Ecological psychology*, 3(3) :195–240, 1991.
- [Rine *et al.*, 1999] Rose Marie Rine, Michael C. Schubert, and Thomas J. Balkany. Visual-vestibular habituation and balance training for motion sickness. *Physical Therapy*, 79(10) :949–957, 1999.

- [Ruddle *et al.*, 2011] Roy A. Ruddle, Ekaterina Volkova, and Heinrich H. Bühlhoff. Walking improves your cognitive map in environments that are large-scale and large in extent. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, 18(2) :10 :1–10 :20, 2011.
- [Ruthenbeck and Reynolds, 2015] G. Ruthenbeck and K. Reynolds. Virtual reality for medical training : the state-of-the-art. *Journal of Simulation*, 9(1) :16–26, 2015.
- [Sahm *et al.*, 2005] Cynthia S. Sahm, Sarah H. Creem-Regehr, William B. Thompson, and Peter Willemsen. Throwing versus walking as indicators of distance perception in similar real and virtual environments. *ACM Transactions on Applied Perception*, 2(1) :35–45, 2005.
- [Sargunam *et al.*, 2017] S. P. Sargunam, K. R. Moghadam, M. Suhail, and E. D. Ragan. Guided head rotation and amplified head rotation : Evaluating semi-natural travel and viewing techniques in virtual reality. In *2017 IEEE Virtual Reality (VR)*, pages 19–28, 2017.
- [Shao and Qian, 2013] Wei Shao and Zuping Qian. A new partially adaptive minimum variance distortionless response beamformer with constrained stability least mean squares algorithm. *Advanced Science Letters*, 19(4) :1071–1074, 2013.
- [Sherman and Craig, 2003] William R. Sherman and Alan B. Craig. *Understanding virtual reality*. Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2003.
- [Simeonov *et al.*, 2005] P. I. Simeonov, H. Hsiao, B. W. Dotson, and D. E. Ammons. Height effects in real and virtual environments. *Human Factors*, 47(2) :430–438, 2005.
- [Slater and Wilbur, 1997] Mel Slater and Sylvia Wilbur. A framework for immersive virtual environments (FIVE) : Speculations on the role of presence in virtual environments. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 6(6) :603–616, 1997.
- [Slater *et al.*, 1995] Mel Slater, Martin Usoh, and Anthony Steed. Taking steps : The influence of a walking technique on presence in virtual reality. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, 2(3) :201–219, 1995.
- [So *et al.*, 2001] Richard H. Y. So, W. T. Lo, and Andy T. K. Ho. Effects of navigation speed on motion sickness caused by an immersive virtual environment. *Human Factors*, 43(3) :452–461, 2001.
- [So, 1999] Richard H. Y. So. The search for a cybersickness dose value. In *Proceedings of 8th HCI International on Human-Computer Interaction : Ergonomics and User Interfaces*, volume I, pages 152–156, 1999.
- [Steinfeld, 1986] Edward Steinfeld. *Hands-on architecture : Executive summary and recommended guidelines*. Washington, DC : The Board, 1986.
- [Stoffregen *et al.*, 2000] Thomas A. Stoffregen, Lawrence J. Hettinger, Michael W. Haas, Merry M. Roe, and L. James Smart. Postural instability and motion sickness in a fixed-base flight simulator. *Human Factors : The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 42(3) :458–469, 2000.
- [Sud *et al.*, 2008] A. Sud, E. Andersen, S. Curtis, M. C. Lin, and D. Manocha. Real-time path planning in dynamic virtual environments using multiagent navigation graphs. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 14(3) :526–538, 2008.
- [Sun *et al.*, 2018] Qi Sun, Anjul Patney, Li-Yi Wei, Omer Shapira, Jingwan Lu, Paul Asente, Suwen Zhu, Morgan McGuire, David Luebke, and Arie Kaufman. Towards virtual reality infinite walking : Dynamic saccadic redirection. In *SIGGRAPH 2018*, 2018.

- [Takada *et al.*, 2007] Hiroki Takada, Kazuhiro Fujikake, Masaru Miyao, and Yasuyuki Matsuura. Indices to detect visually induced motion sickness using stabilometry. In *First International Symposium on Visually Induced Motion Sickness, Fatigue, and Photosensitive Epileptic Seizures (VIMS2007)*, volume 1, pages 178–183, 2007.
- [Talati *et al.*, 2005] Ardesheer Talati, Francisco J. Valero-Cuevas, and Joy Hirsch. Visual and tactile guidance of dexterous manipulation tasks : An fMRI study. *Perceptual and Motor Skills*, 101 :317–334, 2005.
- [TechnoConcept, 2007] TechnoConcept. *Techno-concept balance board manual, Notice Logiciel SabotSoft*, 2007.
- [Telban and Cardullo, 2005] Robert J. Telban and Frank M. Cardullo. Motion cueing algorithm development : Human-centered linear and nonlinear approaches. Technical Report CR-2005-213747, NASA, 2005.
- [Terenzi and Zaal, 2020] Lorenzo Terenzi and Peter Zaal. Rotational and translational velocity and acceleration thresholds for the onset of cybersickness in virtual reality. In *AIAA Scitech 2020 Forum*, 2020.
- [Thompson *et al.*, 2004] William B. Thompson, Peter Willemsen, Amy A. Gooch, and Sarah H. Creem-Regehr. Does the quality of the computer graphics matter when judging distances in visually immersive environments? *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 13(5) :560–571, 2004.
- [Treisman, 1977] M. Treisman. Motion sickness : an evolutionary hypothesis. *Science*, 197(4302) :493–495, 1977.
- [Vasylevska and Kaufmann, 2014] Khrystyna Vasylevska and Hannes Kaufmann. Influence of vertical navigation metaphors on presence. In *Challenging Presence - Proceedings of 15th International Conference on Presence (ISPR 2014)*, pages 205–212, 2014.
- [Waller and Richardson, 2008] D. Waller and A. R. Richardson. Correcting distance estimates by interacting with immersive virtual environments : Effects of task and available sensory information. *Journal of Experimental Psychology : Applied*, 14(1) :61–72, 2008.
- [Wang *et al.*, 2014] X. Wang, Z. Yan, and J. Wang. Model predictive control of multi-robot formation based on the simplified dual neural network. In *2014 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*, pages 3161–3166, 2014.
- [Wang *et al.*, 2019] Y. Wang, J.-R. Chardonnet, and F. Merienne. Design of a semiautomatic travel technique in VR environments. In *IEEE Virtual Reality (VR)*, pages 1223–1224, 2019.
- [Ware and Osborne, 1990] Colin Ware and Steven Osborne. Exploration and virtual camera control in virtual three dimensional environments. *SIGGRAPH Computer Graphics*, 24(2) :175–183, 1990.
- [Willemsen *et al.*, 2008] Peter Willemsen, Amy A. Gooch, William B. Thompson, and Sarah H. Creem-Regehr. Effects of stereo viewing conditions on distance perception in virtual environments. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 17(1) :91–101, 2008.
- [Wisner, 1995] Alain Wisner. *Réflexions sur l'ergonomie : 1962-1995*. Octares éditions, 1995.

- [Witmer and Singer, 1998] Bob G. Witmer and Michael J. Singer. Measuring presence in virtual environments : A presence questionnaire. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 7(3) :225–240, 1998.
- [Witt *et al.*, 2004] Jessica K. Witt, Dennis R. Proffitt, and William Epstein. Perceiving distance : A role of effort and intent. *Perception*, 33(5) :577–590, 2004.
- [Yan and Wang, 2012] Zheng Yan and Jun Wang. Model predictive control of nonlinear systems with unmodeled dynamics based on feedforward and recurrent neural networks. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 8(4) :746–756, 2012.
- [Yanagida, 2008] Yasuyuki Yanagida. Chapter 8 - olfactory interfaces. In Philip Kortum, editor, *HCI Beyond the GUI*, Interactive Technologies, pages 267–290. Morgan Kaufmann, 2008.
- [Yem *et al.*, 2018] Vibol Yem, Kevin Vu, Yuki Kon, and Hiroyuki Kajimoto. Effect of electrical stimulation haptic feedback on perceptions of softness-hardness and stickiness while touching a virtual object. In *IEEE Virtual Reality*, 2018.
- [Yokota *et al.*, 2005] Yoichi Yokota, Mitsuhiro Aoki, Keisuke Mizuta, Yatsuji Ito, and Naoki Isu. Motion sickness susceptibility associated with visually induced postural instability and cardiac autonomic responses in healthy subjects. *Acta oto-laryngologica*, 125(3) :280–285, 2005.