

AIX-MARSEILLE UNIVERSITÉ

ED 463 - École Doctorale des Sciences du Mouvement Humain

UMR 7287 - Institut des Sciences du Mouvement
163 Avenue de Luminy, 13009 Marseille, France

COMMISSARIAT À L'ÉNERGIE ATOMIQUE

Institut de Recherche sur la Fusion Magnétique
CEA Cadarache, 13108 St Paul Lez Durance, France

Thèse de Doctorat

Thèse présentée pour obtenir le grade universitaire de docteur en
Sciences du Mouvement Humain

Céphise LOUISON

Apport de la simulation de mannequins virtuels biologiquement
réalistes pour l'étude de la faisabilité de tâches d'assemblage et
de maintenance d'une installation industrielle complexe

*Contribution of biologically realistic virtual human simulation to study the
feasibility of assembly tasks and maintenance of a complex industrial
installation*

Soutenue le 05/09/2017 devant le jury composé de :

Indira THOUVENIN	Heudiasyc CNRS Lab/UTC	Rapporteur
Anatole LÉCUYER	Inria Rennes/IRISA	Rapporteur
Claude ANDRIOT	CEA-LIST Saclay	Examineur
Jean-Louis VERCHER	Aix-Marseille Université	Examineur
Fabien FERLAY	CEA-IRFM Cadarache	Invité
Daniel MESTRE	CNRS/ISM Marseille	Directeur de thèse



Cette oeuvre est mise à disposition selon les termes de la [Licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International](#).

*À la mémoire
d'Eugène Louison*

Résumé

Le domaine de la réalité virtuelle offre de formidables opportunités tout le long de la conception d'assemblage complexe. L'un des avantages est la possibilité de mettre en situation écologique des utilisateurs dès les premières étapes de conception. Ceci est d'autant plus important dans la conception d'installation industrielle complexe. Il est possible de valider rapidement des tâches d'accessibilité, d'assemblage, de maintenance, voire de démantèlement. L'obtention de la validité écologique des études réalisées en environnement virtuel demande cependant que les interfaces homme-machine soient capables de transmettre des informations réalistes. À l'heure actuelle, les systèmes virtuels ne sont pas capables de fournir une interaction haptique complète, notamment les contacts/collisions entre l'utilisateur et les objets virtuels de l'environnement ne résultent pas en un retour haptique. Ceci peut devenir la cause de comportement inapproprié par rapport à la réalité. L'objectif de cette thèse est de proposer un moyen de renforcer la compréhension spatiale en environnement virtuel. Plus particulièrement, nous souhaitons substituer les informations kinesthésiques par des informations tactiles pour augmenter la conscience spatiale et la cohérence visuo-proprioceptive. Nous avons développé une plateforme vibrotactile capable de fournir des informations spatiales sur l'environnement. Nous avons également commencé à interroger le rôle de la représentation du corps en environnement virtuel. Plusieurs études expérimentales ont été réalisées de manière à valider les développements que nous avons mis en avant.

Mots clés : Réalité Virtuelle, Vibrotactile, Conscience des Collisions, Compréhension Spatiale, Cohérence Visuo-Proprioceptive, Humain Virtuel.

Abstract

The virtual reality field offers astounding opportunities throughout the design of complex assembly. One of the advantages is the possibility of immerse users in an ecological situation in the early stages of design. It's even more important during the design of complex industrial plant. It allows to validate accessibility, assembly, maintenance or even dismantling tasks. The ecological validity of the studies carried out in a virtual environment, requires the human-machine interfaces capable of transmitting and rendering realistic information. At present, virtual systems are not capable of providing a complete haptic interaction, in particular contact/collision between the user and virtual objects in the environment do not result in haptic feedback. This can become the cause of inappropriate behavior compared to reality. The aim of this thesis is to propose a way to reinforce spatial awareness in virtual environment. More specifically, we wish to substitute kinesthetic information with tactile information to increase spatial awareness and visuo-proprioceptive consistency. We developed a vibrotactile platform capable of providing spatial information on the environment. We also studied the role of the representation of the body in a virtual environment. Several experimental studies have been carried out in order to validate the developments we proposed.

Keywords: Virtual Reality, Vibrotactile, Collision Awareness, Spatial Awareness, Visuo-Proprioceptive Consistency, Virtual Human.

Remerciements

Si mon projet de thèse a pu se dérouler dans d'aussi bonnes conditions, c'est en partie dû à l'accueil chaleureux des membres de l'[Institut de Recherche sur la Fusion Magnétique \(IRFM\)](#) de la [Direction de la Recherche Fondamentale \(DRF\)](#) du [Commissariat à L'Énergie Atomique et aux énergies alternatives \(CEA\)](#) et de l'[Institut des Sciences du Mouvement \(ISM\)](#) de l'[Université Aix-Marseille \(AMU\)](#).

Je tiens d'abord à exprimer ma reconnaissance à mon directeur Daniel MESTRE qui a su me guider tout au long de la thèse et dont j'ai pu apprécier les qualités scientifiques et humaines.

Je souhaite ensuite présenter ici le témoignage de ma reconnaissance à Fabien FERLAY, tuteur de thèse et ami pour m'avoir accompagné dans ce travail dans les bons moments comme dans les plus difficiles.

Pour m'avoir fait l'honneur de participer au jury de cette thèse, je remercie Indira THOUVENIN, Anatole LÉCUYER, Claude ANDRIOT et Jean-Louis VERCHER.

Je voudrais également remercier :

Madame Delphine KELLER, responsable de la salle de réalité virtuelle.

Monsieur Philippe MAGAUD, chef de service.

Monsieur Reinoud BOOTSMA, directeur de l'école doctorale.

Monsieur Louis DOCEUL et Lionel MEUNIER, chefs de groupe.

Monsieur Laurent CHODORGE, responsable du Laboratoire de Simulation Interactive au CEA LIST

Messieurs M. BOSSARD, C. DENIAUD, C. GOULON, JC. LEPECQ, P. MALLET, J-M. PERGANDI que j'ai côtoyé au [Centre de Réalité virtuelle de la Méditerranée \(CRVM\)](#) ou à l'[ISM](#) pour leur accueil, leurs précieux conseils, leur amitié et leur joie de vivre dans les moments partagés.

Messieurs C. ANDRIOT, F. BERGEZ, P. EVRARD, V. LANQUEPIN et V. WEISTROFFER du CEA LIST pour le temps qu'ils m'ont accordé, leur aide et leur contribution.

Madame C. CHABAL et messieurs Y. SOULABAILLE et V. PERROT de l'équipe du CEA Marcoule pour l'intérêt qui ont porté à mes travaux et leur contribution.

Messieurs J-J. CORDIER, B. MANFREO, J. REICH, L. SCHERRER d'ITER Organization, pour l'attention portée à ma thèse.

Je salue tous les collègues et étudiants anonymes qui ont bien voulu se prêter à mes expériences et sans qui ce travail n'aurait pu aboutir.

Je témoigne toute ma gratitude pour leur aide dans la réalisation de mon prototype à Marc BOYRON, Alain BARBUTI et Benoît VINCENT pour les aspects électroniques, et les deux couturières de *Unlimited Age* et de *Tout à Fée Moi*. Je remercie chaleureusement Brigitte, Caroline, Jacqueline et Nathalie pour le temps qu'elles ont passé à la relecture de ce manuscrit.

Je remercie tous mes collègues de l'[IRFM](#) et de l'[ISM](#) pour l'ambiance de travail très agréable à laquelle ils ont contribué. Parmi lesquels je remercie, tout particulièrement, mes collègues qui sont passés par la salle RV et avec qui j'ai travaillé : Romain DOS SANTOS, Florian JEANNE, Pierre GUEDON, Tianchao HU, Kevin PAVY et Arnaud PILIA.

Je voudrais saluer les membres de l'[Association des THésards de Cadarache \(ASTHEC\)](#) et de DocSMH, associations de doctorants qui m'ont permis de faire de belles rencontres et qui m'ont poussé à l'ouverture scientifique.

Je ne peux terminer ces lignes sans avoir une pensée particulière pour mes amis. Tout d'abord mes colocataires Clément et Antoine pour les moments partagés quotidiennement. Ensuite pour la *DTaM* et les *Etc.*, dont leurs soutiens, leur amitié et les moments partagés ont permis de m'épanouir pendant toute la période de mon doctorat. Plus particulièrement, j'ai une pensée pour Arthur, Coralie, Desi, Huong, Jack, Lilou et Robien. Pour finir, je n'oublie pas ma famille qui m'a soutenu et permis d'entreprendre des études enrichissantes et passionnantes.

Table des matières

Résumé	4
Abstract	5
Remerciements	7
Liste des figures	11
1 Introduction	13
1.1 Contexte	13
1.2 Objectifs et Problématiques	15
1.3 Contributions	16
1.4 Plan de Thèse	17
2 Cadre Théorique et Méthodologique	19
2.1 Cadre Théorique et Fondement Technique	20
2.1.1 Réalité Virtuelle	20
2.1.2 Sens du Toucher	29
2.1.3 Humain Virtuel	43
2.1.4 Conscience Spatiale et Cohérence visuo-proprioceptive	48
2.2 Propositions	49
2.2.1 Stimulation Vibrotactile	49
2.2.2 Humain Virtuel	51
3 Conception et Évaluation du Dispositif de Retour Vibrotactile	52
3.1 Introduction	53
3.2 Travaux connexes	54
3.3 Développement du dispositif	56
3.3.1 Prototype de dispositif retour vibrotactile	56
3.4 Hypothèses	58
3.5 Expérimentation	59
3.5.1 Matériel et méthode	59
3.5.2 Résultats	66
3.5.3 Discussion	66
3.6 Conclusion	69
4 Cohérence de Comportement Spatial en Tâche de Navigation	71
4.1 Introduction	72
4.2 Travaux connexes	73
4.3 Développement du dispositif	75

4.3.1	Développement de l'avatar	75
4.4	Hypothèses	77
4.5	Expérimentation	78
4.5.1	Matériel et méthode	78
4.5.2	Résultats	88
4.5.3	Discussion	90
4.6	Conclusion	92
5	Cohérence Visuo-Proprioceptive en Tâche d'Intervention	94
5.1	Introduction	95
5.2	Travaux connexes	96
5.2.1	Illusions sensorielles	96
5.3	Développement du dispositif	99
5.3.1	Mise à jour du dispositif retour vibrotactile	99
5.3.2	Moteur physique et Algorithme de rendu vibrotactile	100
5.4	Hypothèses	102
5.5	Expérimentation	103
5.5.1	Matériel et méthode	103
5.5.2	Résultats	115
5.5.3	Discussion	123
5.6	Conclusion	126
6	Conclusion	128
6.1	Bilan	128
6.1.1	Synthèse des objectifs et hypothèses	129
6.1.2	Synthèse des résultats des expériences	130
6.2	Limitations et perspectives	134
6.2.1	Limites	134
6.2.2	Perspectives	134
	Bibliographie	138
	Glossaire	153
	Acronymes	155
	ANNEXES	157
A	Annexe : Articles	158
A.1	Vibrotactile feedback for collision awareness	158
A.2	Plasma facing components integration studies for the WEST divertor	158
A.3	Use of virtual reality for optimizing the life cycle of a fusion component	159

A.4	The Contribution of a Virtual Self and Vibrotactile Feedback to Walking Through Virtual Apertures	160
A.5	Spatialized vibrotactile feedback contributes to goal-directed movements in cluttered virtual environments	160
A.6	Operators' accessibility studies for assembly and maintenance scenarios using virtual reality	161
A.7	Design and construction of the first ELM resilient long pulse ICRH antenna for WEST	162
A.8	Spatialized Vibrotactile Feedback Improves Goal-directed Movements in Cluttered Virtual Environments	162
B	Annexe : Interfaces de stimulation tactile mécanique	164
C	Annexe : Carte fille de contrôle des vibreurs	167
D	Annexe : DataSheet Vibromoteur - Parallax Inc. ref. 28822	168
E	Annexe : Protocole de communication	172
E.1	Protocole de communication Version 1	172
E.2	Protocole de communication Version 2	173

Liste des figures

2.1	Sensorama	21
2.2	Sketchpad	22
2.3	Visiocasque	23
2.4	Boucle « perception, cognition, action »	25
2.5	Schéma technico-centrique de référence en réalité virtuelle	29
2.6	Sens du toucher	30
2.7	Caractéristiques tactiles des mécanorécepteurs	33
2.8	Schéma des mécanorécepteurs	33
2.9	Résolution spatiale relative et absolue	35
2.10	Résolution temporelle	37
2.11	Temps de réponse des vibromoteurs	38
2.12	Expérimentation de Bloomfield et Badler	41
2.13	Méthode RB et IM	47
2.14	Positionnement de la technique CALM	48
2.15	Fonctionnement des modes de retour Radar et contact	50
3.1	Tactile-Television system	54
3.2	VibroTac	55
3.3	Prototype du contrôleur vibrotactile	57
3.4	Logiciel de test de communication avec contrôleur vibrotactile	58
3.5	Constellation de capture de mouvements	60
3.6	Environnement Virtuel	61
3.7	Dispositif expérimental	62
3.8	Sujet en situation expérimentale	64
3.9	Schéma du calcul de l'erreur de positionnement	66
3.10	Résultat - Moyenne des RMSE	67
4.1	Avatar et combinaison de capture de mouvements	76
4.2	Sujet en situation expérimentale	80
4.3	Dispositif expérimental	82
4.4	Avatar de l'expérimentation	83
4.5	Vue subjective de l'expérimentation	84
4.6	Vue globale de l'expérimentation	86
4.7	Résultat - Rotation maximale des épaules	89
4.8	Résultat - Probabilité de collision	90
5.1	Illustration de l'illusion Funneling	97
5.2	Perception de la modulation de l'illusion Funneling	98
5.3	Manche équipée du dispositif vibrotactile	100
5.4	Sujet en situation expérimentale	105

5.5	Environnement d'entraînement	106
5.6	Environnement expérimental	107
5.7	Logiciel ART-Human	109
5.8	Vue Globale et subjective	110
5.9	Tracé des trajectoires des sujets	113
5.10	Schéma du calcul de l'erreur de colocalisation	113
5.11	Schéma du calcul de la déviation de colocalisation	114
5.12	Résultat - Erreur de colocalisation (RMSE)	116
5.13	Résultat - Déviation de la colocalisation (RMSD)	117
5.14	Résultat - Mean Contact time	118
5.15	Résultat - Durée de l'essai	120
5.16	Résultat - Ratio de temps de contact	121
5.17	Résultat - Moyenne du nombre de contacts	122
5.18	Résultat - Questionnaires	123
6.1	Rappel des hypothèses	131
.2	Actionneur Pneumatique	164
.3	Buzzers électromagnétiques	165
.4	Actionneurs piézoélectriques	165
.5	Vibromoteurs	166
.6	Schéma carte fille	167
.7	Carte fille	167
.8	DataSheet Vibromoteur (p. 1)	168
.9	DataSheet Vibromoteur (p. 2)	169
.10	DataSheet Vibromoteur (p. 3)	170
.11	DataSheet Vibromoteur (p. 4)	171

1. Introduction

Table des matières

1.1	Contexte	13
1.2	Objectifs et Problématiques	15
1.3	Contributions	16
1.4	Plan de Thèse	17

1.1. Contexte

Les travaux présentés dans cette thèse contribuent aux problématiques des deux laboratoires de recherche aux quels elle est rattachée. D'un côté, elle est liée à la problématique « étude d'assemblage et de maintenance » autour du projet [WEST](#) de l'[Institut de Recherche sur la Fusion Magnétique \(IRFM\)](#) du [Commissariat à L'Énergie Atomique et aux énergies alternatives \(CEA\)](#). En particulier, elle s'inscrit dans la politique du [Service d'Ingénierie, des Internes et des Projets \(SI2P\)](#) qui a décidé d'améliorer ses outils de conception, en utilisant la [Réalité Virtuelle \(RV\)](#) dans le cycle de vie des composantes de fusion. La plate-forme de [RV](#) est utilisée dans les études de conception et d'assemblage des composants des projets des réacteurs de fusion [WEST](#) et [ITER](#) sur lesquels travaille l'[IRFM](#). Notamment, la faisabilité des scénarios d'assemblage et de maintenance est évaluée par les opérateurs impliqués dans le véritable travail d'assemblage.

De l'autre côté, la thèse est liée à l'étude des facteurs et des comportements humains ; thèmes de recherche de L'[Institut des Sciences du Mouvement \(ISM\)](#). Plus particulièrement, le travail présenté a été réalisé sur la plateforme technologique de [RV](#) de l'institut : le [Centre de Réalité virtuelle de la Méditerranée \(CRVM\)](#). Le [CRVM](#) est dédié à l'étude du comportement humain en situation immersive.

La conception et la réalisation des réacteurs de fusion par confinement magnétique (Tokamak) impliquent d'énormes contraintes d'intégration, de maintenance et d'exigences de sécurité. On retrouve généralement ces contraintes dans toute installation industrielle complexe. Le cas du projet [ITER](#) (pour [International Thermonuclear Experimental Reactor](#)) est un exemple emblématique des complexités que peut présenter la conception d'une telle installation. Les

composants sont conçus en parallèle par des équipes disséminées aux quatre coins du monde, pour lesquels il faut ensuite considérer les problèmes d'intégration, d'assemblage et de maintenance, qui peuvent avoir un impact énorme sur la conception globale. L'évaluation de la faisabilité des processus d'accessibilité et de maintenance est donc un point capital. Suivant les contraintes, ces opérations peuvent être robotisées ou faire intervenir des opérateurs humains (KELLER, DOCEUL, FERLAY, JIOLAT et al. 2013 ; KELLER, DOCEUL, FERLAY, LOUISON et al. 2015 ; FERLAY, MISSIRLIAN, GUILHEM et al. 2015).

La RV comme outil de prototypage numérique est dorénavant devenue courante dans les industries (S. JAYARAM, WANG, U. JAYARAM et al. 1999 ; DEWAR, CARPENTER, RITCHIE et al. 1997 ; ANGSTER 1996 ; KUEHNE et J. OLIVER 1995 ; ANGSTER 1996). Elle offre de nombreux avantages : cycles de conception courts, coûts de prototypage faibles, apprentissage efficace, outil de diffusion et de discussion pour le travail collaboratif. Entre autres, les étapes d'assemblage constituent une part importante des coûts d'un produit et la majorité des coûts dépend de décisions prises dans les étapes préliminaires de la conception (PRATT 1995 ; BOOTHROYD et DEWHURST 1983). La simulation de tâches d'assemblage reste cependant l'une des applications les plus difficiles de la RV, car elle demande un haut niveau d'interactivité (SA et ZACHMANN 1999). En effet, les interactions peuvent être nombreuses et doivent être aussi naturelles ou intuitives que possible pour refléter la réalité (ZACHMANN et RETTIG 2001). Les interactions font intervenir l'environnement et la personne. Leur validité repose donc sur une compréhension des propriétés de l'espace et des rapports de soi à l'environnement.

Les informations qu'offre le système sensoriel haptique humain lors de l'interaction avec le monde sont très riches. Elles comprennent la prise de conscience de la position de ses membres, la puissance et la direction des forces exercées sur le corps (kinesthésie), et également des données de perception cutanée (par exemple, la température, la pression, les vibrations). De plus, les données vestibulaires sont parfois incluses dans le système haptique humain. Ces informations sont pour la plupart combinées avec l'apport des autres systèmes sensoriels donnant lieu à une expérience du monde multimodale. Cette perception haptique combinée à la vision de notre corps en interaction avec l'environnement joue un rôle important dans la construction mentale d'un modèle spatial de l'environnement. Alors que nous disposons de cette richesse d'information du sens du toucher dans le monde réel, les systèmes virtuels ne sont pas capables de fournir une interaction haptique complète. Par exemple, dans la majorité des simulations de RV, les contacts/collisions entre l'utilisateur et les objets virtuels de l'environnement ne résultent pas en un retour haptique : notamment, rien ne vient bloquer le mouvement du sujet. Ce déficit sensoriel pouvant conduire d'une part à une réduction du sentiment de présence et d'autre part être la cause de comportement inapproprié en rapport à la réalité. La raison de cette absence de perception haptique est avant tout technologique, cependant les recherches dans

les technologies haptiques et les interfaces de substitution progressent continuellement.

Les travaux qui seront présentés dans le cadre de cette thèse visent à proposer des outils et méthodes pour permettre d'améliorer la validité des études d'assemblage et de maintenance impliquant des opérateurs humains en [Environnement Virtuel \(EV\)](#).

1.2. Objectifs et Problématiques

L'objectif de cette thèse est d'approfondir les aspects humains liés à l'étude de tâches de montage en [RV](#). Le contexte est plus particulièrement lié aux opérations d'assemblage et de maintenance en installations industrielles complexes. Nous souhaitons examiner les interactions entre l'opérateur et l'environnement, point fondamental, pour la validité écologique des études. La compréhension spatiale est déterminante dans les comportements et dans la réalisation des interactions. Notre expérience du monde est multimodale. Elle est le résultat de la combinaison des perceptions de nos différents systèmes sensoriels. En particulier, la perception haptique combinée à la vision de notre corps en interaction avec l'environnement joue un rôle important dans la construction mentale d'un modèle spatial de l'environnement. Il est cependant difficile, voire impossible, compte tenu de la technologie actuelle d'avoir une perception sensorielle complète au sein d'[Environnement Virtuel](#). L'absence de certaines informations haptiques en [EV](#) conduit à une perception sensorielle incomplète pouvant nuire à la compréhension et à la fidélité des comportements et ainsi réduire la validité des études. C'est aussi le cas de l'absence de repère égocentrique, tel que la vision de son propre corps. Nous avons souhaité proposer des outils et méthodes pour compenser le problème de perception de l'espace. Cette problématique nous a conduits à nous intéresser aux retours vibrotactiles comme substitut aux informations kinesthésiques. L'usage des informations vibrotactiles a fait l'objet de nombreuses études dans un large éventail de contexte. Les stimulations vibrotactiles présentent un certain nombre d'avantages et elles ont montré des résultats intéressants en tant que canal de transmission d'informations spatiales. Nous avons souhaité axer nos études autour de l'apport que ce type de perception sensorielle peut fournir. Face à l'émergence d'une nouvelle génération de casque immersif, nous nous sommes attachés à une des spécificités de ces dispositifs : l'absence de vision directe sur son corps. Nous avons souhaité savoir si cette contrainte technique pouvait avoir un effet sur la compréhension spatiale et si, comme nous le pensons, une représentation virtuelle du corps est un élément important dans le processus de perception de l'espace.

Nos principaux objectifs de recherche tournent autour de trois points centraux :

- Le premier point montre que la transmission d'informations spatiales sous forme d'information vibrotactile est un moyen de se substituer à une partie des perceptions haptiques manquantes dans les mondes virtuels. Ces informations spatiales devraient permettre d'améliorer la compréhension spatiale et le maintien d'une cohérence visuo-proprioceptive.
- Le second point doit permettre d'observer que l'augmentation de la résolution de transmission des informations vibrotactiles, c'est-à-dire la possibilité de stimuler une position précise, augmente la cohérence visuo-proprioceptive par le biais d'une meilleure compréhension des collisions.
- Le dernier point concerne l'apport de la présence d'une représentation du corps sur la compréhension spatiale. Plus particulièrement, nous proposons une représentation adaptée géométriquement à la morphologie du sujet et [colocalisée](#) avec celui-ci, dans le but d'offrir un repère égocentrique de référence pour la calibration spatiale du comportement.

1.3. Contributions

Afin de contribuer à l'étude du comportement humain en situation immersive dans un contexte industriel, nous proposons dans cette thèse des contributions sur le plan théorique, méthodologique et expérimental. Notre première contribution est une revue de la littérature sur la question du sens haptique et plus particulièrement sur l'usage du vibrotactile comme canal de transmission d'informations spatiales. Nous présentons également une revue sur la place des avatars en [RV](#). La deuxième contribution que nous proposons est méthodologique. Au fur et à mesure de notre étude, nous avons proposé un cadre d'utilisation des retours vibrotactiles et des avatars. Nous proposons deux fonctionnements de retours vibrotactiles et identifions les contextes d'utilisation les plus adaptés à chacun d'eux. De plus, nous proposons l'utilisation du principe de cohérence visuo-proprioceptive comme objectif de validité écologique des comportements en environnements immersifs et suggérons des indices de mesure afin de l'analyser. La troisième contribution est expérimentale. Nous avons dans un premier temps réalisé une première expérimentation afin de confirmer nos premières intuitions et valider nos développements. Ces résultats nous ont permis d'élaborer un plan expérimental pour tester nos hypothèses. Nous avons expérimenté l'usage d'avatar et leur influence sur la connaissance spatiale. Nous avons également abordé l'influence du retour vibrotactile sur la compréhension spatiale dans les différentes catégories de scénario d'études d'assemblage et de maintenance. Nous avons progressivement poussé les expérimentations vers des cas d'étude concrets rencontrés dans le cadre du projet [W \(Tungstene\) Environment in Steady-state Tokamak \(WEST\)](#). Cette dernière contribution nous a permis d'analyser les effets des retours sensoriels sur la compréhension spatiale et la

cohérence visuo-proprioceptive. Elle a également permis de faire émerger de nombreuses perspectives quant aux applications futures.

1.4. Plan de Thèse

Le mémoire de thèse présentant ces travaux est organisé en quatre principaux chapitres.

L'objectif du deuxième chapitre (Chapitre 2) est d'apporter de manière concise un cadre théorique permettant la compréhension des travaux présentés. Nous ouvrirons ce chapitre par un rappel de l'historique de la RV et une présentation des concepts clés. Dans une deuxième partie nous réaliserons une revue de la littérature du sens du toucher que nous approfondirons en nous focalisant sur les stimulations vibrotactiles, aspect central de cette thèse. Les recherches bibliographiques nous mèneront ensuite à définir les notions gravitant autour de l'utilisation d'humains virtuels en EV. Pour finir l'état de l'art, nous détaillerons les concepts fondateurs de ce manuscrit : « compréhension spatiale » et « cohérence visuo-proprioceptive ». Cette base théorique nous permettra de présenter les propositions d'étude considérée dans cette thèse.

Dans le troisième chapitre (Chapitre 3), nous présenterons une première approche expérimentale et proposerons les paradigmes d'utilisation des retours vibrotactiles pour les études d'accessibilité et assemblage. Au sein d'une première partie, nous présenterons un aperçu des dispositifs vibrotactiles existants. Sur cette base, la conception d'un dispositif vibrotactile répondant à nos besoins sera détaillée. Un premier jeu d'hypothèses sera établi, avant d'être testé expérimentalement. En nous appuyant sur les résultats, nous établirons les lemmes pour la suite de l'étude.

Le quatrième chapitre (Chapitre 4) attachera de l'importance à la navigation en EV et aux comportements d'adaptation. Les travaux connexes à ce chapitre seront présentés en ouverture ainsi que les développements spécifiques qui ont été réalisés. Avant de présenter l'étude expérimentale et ces résultats, nous donnerons les hypothèses sur lesquelles elle est basée. La dernière partie permettra de conclure sur les résultats observés et de faire le pont vers le chapitre suivant.

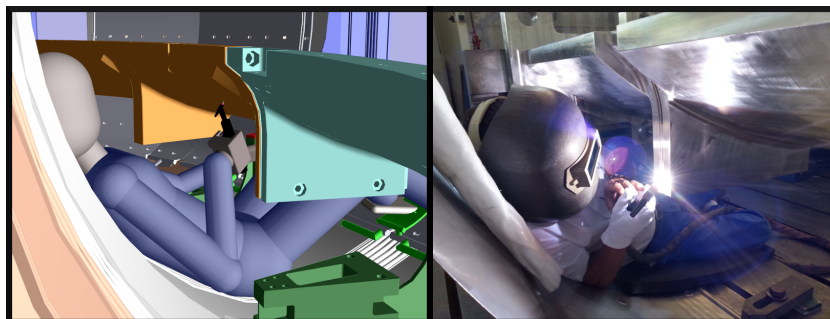
Le cinquième chapitre (Chapitre 5) de cette thèse poursuivra et conclura nos études sur l'analyse du retour vibrotactile. Nous nous focaliserons sur la question de la cohérence visuo-proprioceptive et le cas des tâches d'interventions. Le chapitre commencera par la présentation de l'état de l'art spécifique à cette partie, suivie de la présentation des développements logiciel et matériel réalisés. Les sous-hypothèses de ce chapitre seront exprimées. L'étude expérimentale mise en place pour la validation des hypothèses et ses résultats seront détaillés. La dernière partie permettra de conclure sur les éléments du chapitre.

Le dernier chapitre (Chapitre 6) conclura ce mémoire. Dans une première partie, nous ferons le bilan de nos études. Pour cela, nous reviendrons sur les objectifs et les hypothèses qui ont animé nos recherches. Une synthèse des principaux résultats et des contributions scientifiques sera réalisée. La deuxième partie tentera de définir les limites de l'étude actuelle et ouvrira sur les nombreuses perspectives futures.

2. Cadre Théorique et Méthodologique

Table des matières

2.1	Cadre Théorique et Fondement Technique	20
2.1.1	Réalité Virtuelle	20
2.1.1.1	Bref Historique	20
2.1.1.2	Définition de la Réalité Virtuelle	22
2.1.1.3	Notions Clés	25
2.1.2	Sens du Toucher	29
2.1.2.1	Perception Kinesthésique/Proprioception	30
2.1.2.2	Perception Cutanée/Tactile	32
2.1.2.3	Stimulation Vibrotactile	38
2.1.2.4	Interfaces de Stimulation Tactile	42
2.1.3	Humain Virtuel	43
2.1.3.1	Avatar et Réalisme	44
2.1.3.2	Avatar et Colocalisation	45
2.1.3.3	Avatar et Interaction	45
2.1.4	Conscience Spatiale et Cohérence visuo-proprioceptive	48
2.2	Propositions	49
2.2.1	Stimulation Vibrotactile	49
2.2.1.1	Fonctionnement Radar	50
2.2.1.2	Fonctionnement Contact	50
2.2.2	Humain Virtuel	51



2.1. Cadre Théorique et Fondement Technique

L'objectif de ce chapitre est de fournir les fondements théoriques et techniques de tous les thèmes abordés permettant une bonne compréhension des travaux présentés dans cette thèse. L'état de l'art sera complété dans les chapitres suivants pour les éléments spécifiques.

Pour commencer, nous aborderons l'histoire de la [Réalité Virtuelle](#) et reprendrons les principaux concepts et définitions (section 2.1.1).

L'approche prise dans ce travail repose sur l'utilisation d'information tactile pour substituer une partie des données proprioceptives. Nous détaillerons (section 2.1.2) dans un premier temps le sens du toucher et les moyens techniques de le stimuler. Nous présenterons ensuite le cadre d'utilisation des interfaces vibrotactiles.

Le travail réalisé dans le cadre de ce manuscrit est centré autour des opérations humaines. Nous présenterons certains aspects liés à la représentation humaine en [Environnement Virtuel](#) (section 2.1.3).

Pour finir l'état de l'art, nous présenterons les concepts clés de : conscience spatiale et de cohérence visuo-proprioceptive (section 2.1.4).

Sur la base du cadre théorique que nous aurons défini, les propositions d'étude que nous souhaitons considérer dans cette thèse seront présentées (section 2.2).

2.1.1. Réalité Virtuelle

2.1.1.1. Bref Historique

Si le domaine de la [Réalité Virtuelle](#) (RV) a vu son émergence durant les années 80-90, elle fut créée bien avant. Avant même que le terme de [RV](#) ne soit « inventé ». On peut attribuer la paternité moderne de ce domaine à Morton Heiling (1926-1997) qui travailla dès la fin des années 50 sur le premier média multisensoriel : le Sensorama (HEILIG 1962) (Figure 2.1). Celui-ci simulait une visite urbaine grâce à des images et des sons, préalablement enregistrés, des odeurs et des vibrations. Il peut être considéré comme la première ébauche de système de [RV](#).

On peut ensuite citer les travaux importants menés par Ivan Sutherland qui conçut de 1961 à 1963 le Sketchpad, premier dispositif de création graphique interactif utilisant un moniteur et un crayon optique (Figure 2.2). Puis jusqu'en 1968, avec son étudiant Bob Sproull, ils mettent au point le premier [Head-Mounted Display](#) (HMD) (aussi appelé visiocasque ou casque immersif) relié à un système



Figure 2.1. – Sensorama (Heilig [1962](#))

informatique fournissant en temps réel tous les éléments graphiques pour l'affichage. Avant cela, les visiocasques étaient seulement reliés à des caméras (COMEAU et BRYAN 1961). « *The Incredible Helmet* » était aussi surnommé « L'épée de Damoclès », car le dispositif était tellement lourd qu'il devait être accroché au plafond (Figure 2.3) (SUTHERLAND 1968).



Figure 2.2. – Sketchpad, Ivan Sutherland, 1963

Il conviendrait d'effectuer un historique plus complet de la naissance et du développement de ce domaine. Heiling et Sutherland ne sont pas les seuls précurseurs et il faudrait revenir sur l'ensemble des travaux marquants jusqu'à aujourd'hui dans le domaine ainsi que dans d'autres domaines (du fait de la pluridisciplinarité de la [Réalité Virtuelle](#)) pour en faire un véritable historique exhaustif. Nous invitons le lecteur intéressé à se diriger vers des études épistémologiques et de l'histoire de la réalité virtuelle avec CARLSON (2003), SEGURA (2012) et TISSEAU et NÉDÉLEC (2003).

2.1.1.2. Définition de la Réalité Virtuelle

L'oxymore [Réalité Virtuelle](#) n'apparaît que tardivement. Il vient de l'expression anglaise *Virtual Reality*, introduite aux États-Unis en 1989 par Jaron Lanier, alors responsable de la société VPL Research spécialisée dans les périphériques d'immersion. Même si l'appellation est maintenant couramment utilisée, cette traduc-

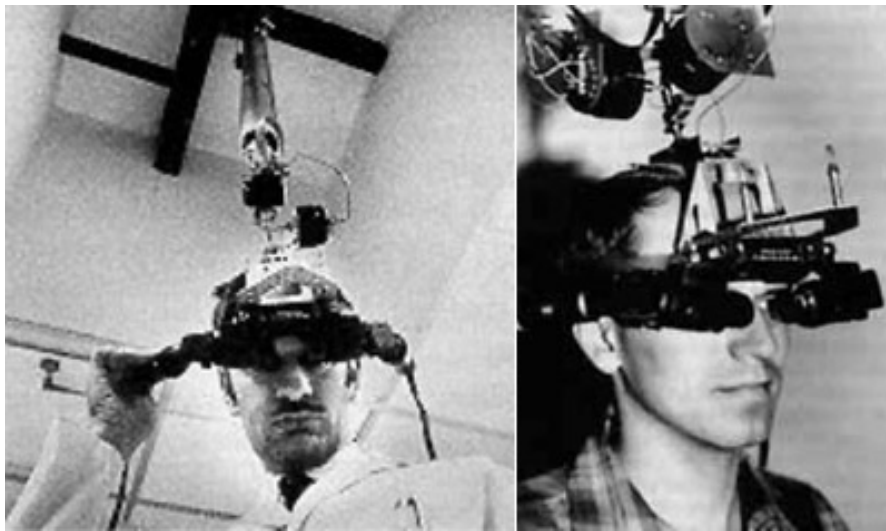


Figure 2.3. – Visiocasque : « L'épée de Damoclès » (Sutherland 1968)

tion fut controversée, car ambiguë (TISSEAU 2001 ; FUCHS, MOREAU, BERTHOZ et al. 2006).

La **Réalité Virtuelle** mêle par essence plusieurs domaines. Elle couple sciences de l'ingénieur et sciences humaines. D'une part dans le domaine des sciences et des techniques comme l'informatique, la **téléopération** et la robotique, mais encore la mécanique, l'optique et acoustique... D'autre part, dans le domaine des sciences humaines et des sciences du vivant : psychologie expérimentale et sciences du comportement, ergonomie, psychologie cognitive, physiologie, neurobiologie, etc. La **RV** a à ce titre une position particulière dans le schéma habituel des sciences. Cette pluridisciplinalité est à la fois un avantage et une difficulté à surmonter : difficulté de la formation des acteurs du domaine, besoin de la reconnaissance de ce fondement multidisciplinaire par les diverses disciplines qui la fécondent.

Il semble important de distinguer la finalité de la **RV**, ses fonctions, ses applications ou encore les techniques sur lesquelles elle repose. Par exemple, la **RV** ne peut être définie par le simple fait d'utiliser certains dispositifs d'interaction (comme un casque immersif, gant de donnée...). Une telle approche pour définir la **RV** serait trop orientée vers des technologies particulières et trop restrictives vis-à-vis de l'enjeu scientifique lié à la complexité des dimensions soulevées par l'interaction entre l'humain et les **EVs**. FUCHS (1996) appuie sur l'importance de l'interaction et laisse apparaître la boucle « perception-cognition-action » lorsqu'il définit la finalité de la **RV** :

*La finalité de la **RV** est de permettre à une personne (ou à plusieurs) une activité sensori-motrice et cognitive dans un monde artificiel, créé*

numériquement, qui peut être imaginaire, symbolique ou une simulation de certains aspects du monde réel. (FUCHS 1996)

Dans cette proposition, il met en valeur la nature de l'interaction de l'utilisateur avec l'environnement. Le terme « *activité sensori-motrice* » souligne l'idée que l'utilisateur perçoit et agit physiquement avec l'EV. L'interaction implique également une activité cognitive, créant une boucle entre l'utilisateur et l'environnement présenté. Par ailleurs, il présente les différentes origines des mondes virtuels. Ils peuvent être totalement imaginaires, symboliques (c'est-à-dire qu'il exploite des représentations symboliques pour améliorer la compréhension du monde simulé) ou être une simulation du monde réel. Le degré de réalisme n'est donc pas ici la finalité de la RV. L'atout de la *Réalité Virtuelle* étant justement la possibilité de modifier des aspects de la réalité.

Arnaldi propose la définition suivante de la RV, celle-ci comporte deux mots fondamentaux de la *Réalité Virtuelle* : l'immersion et l'interaction. S'il existe un certain nombre de définitions différentes, toutes les définitions de la RV se rejoignent sur ces deux seules fonctionnalités.

*La *Réalité Virtuelle* est un domaine scientifique et technique exploitant l'informatique (1) et des interfaces comportementales (2) en vue de simuler dans un monde virtuel (3) le comportement d'entités 3D, qui sont en interaction en temps réel (4) entre elles et avec un ou des utilisateurs en immersion pseudo-naturelle (5) par l'intermédiaire de canaux sensori-moteurs. (FUCHS, MOREAU, BERTHOZ et al. 2006)*

Cette définition introduit une terminologie de la RV. Arrêtons-nous sur quelques termes utilisés et qui semblent important de mettre en avant :

1. La *Réalité Virtuelle* exploite l'informatique comme support pour la réalisation de l'environnement interactif, qui est une simulation dynamique. Les aspects logiciel et matériel de l'informatique sont exploités.
2. Les interfaces comportementales ou interfaces matérielles de la RV sont composées « d'interfaces sensorielles », « d'interfaces motrices » et « d'interfaces sensori-motrices ». Les interfaces sensorielles informent l'utilisateur par ses sens de l'évolution du monde virtuel. Les interfaces motrices informent l'ordinateur des actions motrices de l'homme sur le monde virtuel. Les interfaces sensori-motrices informent dans les deux sens.
3. L'utilisateur est immergé au sein d'un monde virtuel. Ce monde nécessite d'être créé/modélisé, numérisé, puis demande un traitement des informations de celui-ci en temps réel.
4. L'interaction en temps réel est un point clé d'une application de RV, il faut que l'utilisateur ne perçoive pas de décalage temporel (latence) entre son action sur l'EV et la réponse sensorielle.

5. Un autre point clé est lié à immersion pseudo-naturelle. Il faut en effet offrir une immersion le plus efficace possible. La sensation d'immersion pseudo-naturelle est une notion subjective et dépend de beaucoup de facteurs (logiciel, interface...).

On peut désormais mettre en évidence le principe fondamental de la [RV](#). Le principe étant de mettre l'utilisateur au centre de l'application, d'établir une relation circulaire entre lui et l'[EV](#) et ainsi faire passer la boucle perception-cognition-action par le monde virtuel (Figure 2.4). Cette boucle doit être réalisée sous des contraintes technologiques, physiologiques et cognitives. Sans prise en compte de ces contraintes, des perturbations latence et incohérences sensori-motrices peuvent apparaître. La latence est un décalage temporel entre les actions de l'utilisateur et leur prise en compte sur l'environnement. Les incohérences sensori-motrices viennent d'une utilisation des interfaces non compatible avec le comportement sensori-moteur de l'utilisateur dans le monde réel. Ces perturbations peuvent perturber le comportement du sujet et influencer sur la qualité de l'application de [RV](#).

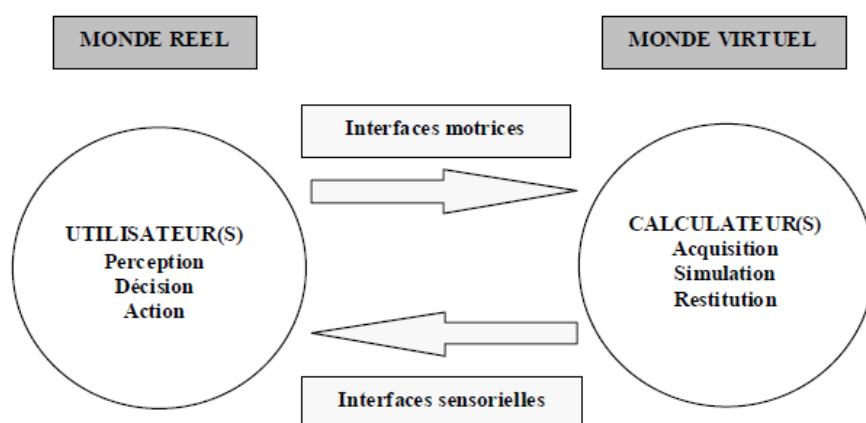


Figure 2.4. – Schématisation de la boucle « perception, cognition, action » passant par le monde virtuel (Fuchs, Moreau, Berthoz et al. 2006)

2.1.1.3. Notions Clés

Les définitions citées précédemment mettent en exergue des notions importantes telles que *l'immersion* et *l'interaction*. Elles se trouvent être des points clefs de la [RV](#), il convient de les définir plus en profondeur. D'autres notions sont intrinsèquement liées à la [Réalité Virtuelle](#) : la *présence* et le *réalisme*.

L'interaction : Une interaction dans le langage courant se définit comme une action réciproque de deux (ou plus) choses ou personnes. Toute interaction est suivie d'un ou plusieurs effets. On peut voir l'interaction en [RV](#) comme

un langage correspondant à l'ensemble des actions/réactions réciproques entre l'homme et l'ordinateur par l'intermédiaire d'interfaces sensori-motrices.

L'immersion : L'immersion ou état immersif est un état psychologique où le sujet cesse de percevoir le monde physique. On trouve énormément d'acceptations différentes dans la littérature. Nous nous sommes intéressés à celles retenues par BURKHARDT, BARDY et LOURDEAUX (2003).

Le terme d'immersion est compris dans le langage courant comme « *l'exposition de l'utilisateur à un EV au moyen de dispositifs occultant en partie la perception* ». Cette occultation est surtout visuelle et remplace l'environnement autour de l'utilisateur par une image du monde virtuel. Dans cette première acceptation, l'immersion est vue comme l'action de plonger un utilisateur, sans prendre en considération son point de vue. Cette vision se centre sur le problème de réactivité et met de côté les éventuelles interactions avec les éléments du monde physique qui pourraient persister.

Une deuxième définition plus formelle de l'immersion vise à établir le degré et la qualité avec lesquels l'interface du système contrôle les entrées sensorielles pour chaque modalité de perception et d'action ; l'immersion peut alors se décrire dans les termes des dispositifs logiciels et matériels particuliers utilisés. Le degré d'immersion est caractérisé entre autres par la réactivité des informations livrées à l'utilisateur, les propriétés des dispositifs d'interaction, mais aussi par les propriétés de l'environnement physique dans lequel se déroule l'expérimentation. Cette définition ouvre la possibilité d'une métrique permettant de comparer et étudier les effets de l'immersion sur la [cognition](#), les performances et la satisfaction des utilisateurs.

Les notions d'immersion et d'interaction sont indissociables lorsqu'il s'agit de définir un EV, nous reviendrons par la suite sur les niveaux d'[Immersion et Interaction](#) (I²).

La présence : La présence est un terme souvent utilisé pour qualifier la RV, du point de vue de l'utilisateur. Elle caractérise l'expérience cognitive et perceptive de l'utilisateur pendant son activité dans l'EV. Le sentiment de présence se concrétise dans le fait de réagir physiquement, physiologiquement et émotionnellement comme si les événements et objets virtuels présentés étaient réels. C'est le sentiment appelé dans la littérature du « *being there* », qui renvoie principalement à la notion de présence spatiale (SLATER, LOTTO, ARNOLD et al. 2009).

Le sentiment de présence est conditionné par les niveaux d'immersion, d'interaction et de réalisme/fidélité définis en rapport aux objectifs et aux besoins de la simulation. Ce sentiment est susceptible d'avoir des effets physiologiques ([mal de simulation](#)) et des effets psychologiques (motivation, niveau d'implication dans la réalisation de la tâche, satisfaction) sur les utilisateurs.

Le réalisme : Le réalisme est fréquemment utilisé pour caractériser les EVs, il devient même pour certains une finalité. Comme nous l'avons dit précédem-

ment, le réalisme n'est pas forcément un objectif pertinent. Dans certains cas, une exagération de la réalité dans l'EV peut permettre de mieux appréhender la complexité d'une situation. C'est par exemple l'option prise dans certaines applications de formation. Par ailleurs, les études tendent à montrer que le degré de réalisme de la représentation visuelle n'a pas d'effet sur l'apprentissage (MORENO, MAYER, SPIRES et al. 2001). D'autres cas font part de situations abstraites qui n'ont pas de représentation dans la réalité. Cependant, le recours à cette notion de réalisme traduit une réelle nécessité dans de nombreuses applications (conception, expérimentation, simulation, etc.), de décrire le rapport entre la simulation du monde virtuel et des aspects du monde réel. La difficulté de l'utilisation de cette notion est qu'elle est en réalité intuitive et peu formelle et prend plusieurs sens. On peut trouver cinq acceptations de la notion de réalisme.

La première traduit l'usage courant, elle traduit un jugement personnel de l'utilisateur (ou du concepteur). C'est donc une évaluation subjective du degré de la ressemblance au réel ou de la crédibilité d'une situation/objet pour un observateur donné.

La deuxième acceptation fait référence à l'utilisation de modèle et lois formelles de la biologie/physiologie de la perception (c'est-à-dire la façon de calculer une scène visuelle tridimensionnelle) ou de la physique.

La troisième acceptation de la notion de réalisme est la fidélité perceptive. Elle fait référence à la question : « *Est-ce que l'expérience perceptive serait crédible si elle était vécue dans le monde réel ?* » Cette acceptation est en lien avec la précédente dans le sens où la construction de la simulation proche des mécanismes perceptifs « naturels » s'accompagnerait d'un plus haut degré de fidélité de l'expérience subjective.

La fidélité psychologique est une autre acceptation de cette notion. Elle se définit comme « *la mesure selon laquelle le simulateur produit un comportement semblable à celui exigé dans la situation réelle* » (LEPLAT 1997). Pour pouvoir évaluer ce niveau de fidélité, il est nécessaire d'analyser les performances et les comportements des sujets pendant l'expérimentation.

La dernière acceptation fait référence à l'illusion d'une réalité qui n'existe pas, associée à la notion de présence, c'est-à-dire l'effet de faire percevoir comme réels ou vivants les objets, événements ou personnages avec lequel l'utilisateur interagit dans le monde virtuel.

Immersion et Interaction (I²) : Le processus d'interfaçage nécessite d'être analysé selon trois niveaux d'immersion et d'interaction selon FUCHS, MOREAU, BERTHOZ et al. (2006) :

Le premier niveau d'immersion et d'interaction sensori-motrice permet de schématiser l'interfaçage entre l'homme et le monde virtuel du point de vue physique. Cette immersion et interaction physique se fait par une connexion directe entre l'ordinateur et l'utilisateur au niveau de ses sens et de ses réponses motrices.

Symétriquement à ce niveau, l'ordinateur doit au moyen du logiciel temps réel permettre une réalisation physique du monde virtuel.

Le deuxième niveau est une analyse des processus cognitifs de l'interfaçage, appelé niveau de l'immersion et de l'interaction cognitives. Il est indispensable de comprendre les processus mentaux d'action et de pensée qui seront utilisés par l'utilisateur pour pouvoir réaliser l'interfaçage. Il s'agit alors de savoir quelles sont les catégories de processus cognitifs qui seront impliqués pour permettre une interaction et une immersion efficace et les plus naturelles possibles. Il existe deux catégories de processus cognitifs différents pouvant être exploitées : les **Schémes Comportementaux Importés (SCI)** (C'est-à-dire la transposition dans un **EV** de processus assimilés et utilisés par l'individu de manière automatique dans un environnement réel pour l'exécution de tâches spécifiques) et les métaphores (c.-à-d., l'utilisation d'une image symbolique de l'élément perçu et de l'action à effectuer). Les métaphores sont utilisées lorsqu'il n'est pas possible d'importer les schémas comportementaux acquis en l'environnement réel ou lorsque ceux-ci sont moins performants. Les métaphores se divisent en deux sous-classes suivant si elles sont avec ou sans substitution sensori-motrice. Du point de vue technique, parallèlement à ce niveau, la partie logicielle spécifique à la **RV** doit assurer la modélisation comportementale du monde virtuel.

Le troisième niveau s'intéresse aux objectifs mêmes de l'application de **RV**. Il s'intéresse aux activités (fonctions) que doit réaliser l'utilisateur. Une application de **Réalité Virtuelle** n'a pas pour but une simple immersion de l'homme dans un **EV**, mais elle doit avoir un objectif d'immersion de l'homme pour une activité donnée. Ces activités sont décomposables en quelques comportements de base, appelés **Primitives Comportementales Virtuelles (PCV)**. Il faut donc du point de vue des **I²** fonctionnels bien définir les **PCV** et leur spécificité. Elles peuvent toujours être regroupées en quatre catégories :

- observer le monde virtuel ;
- se déplacer dans le monde virtuel ;
- agir sur le monde virtuel ;
- communiquer avec autrui ou avec l'application.

La hiérarchisation de ces trois niveaux d'immersion et d'interaction permet d'établir le schéma de référence de la **RV** (Figure 2.5).

L'objectif des études que nous souhaitons réaliser est d'offrir une plateforme permettant de valider la faisabilité des tâches de maintenance et d'assemblage en environnement complexe. L'activité de l'homme dans l'**Environnement Virtuel** est la réalisation d'un scénario de maintenance. Il nous paraît nécessaire que les comportements observés dans le monde virtuel soient écologiquement valides. Le processus qui nous intéresse particulièrement est celui des **SCI**. Afin d'obtenir des comportements valides, il est nécessaire de fournir à l'utilisateur des interfaces sensori-motrices adéquates. Lors de la réalisation de tâche en environ-

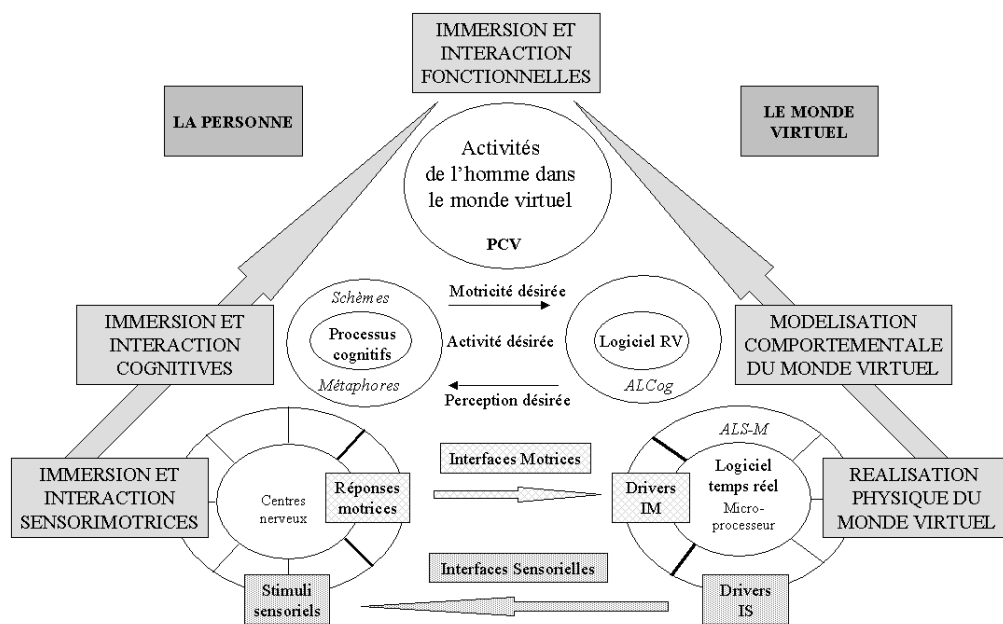


Figure 2.5. – Schéma technico-centrique de référence en RV (Fuchs, Moreau, Berthoz et al. 2006)

nement contraint, l'aspect nous paraissant le plus déterminant est la perception spatiale. Le processus de perception d'un environnement nécessite la perception de différentes informations du système sensoriel humain : la vision, le toucher et l'ouïe. . . . À l'heure actuelle, les technologies de représentation graphique permettent de fournir une perception visuelle de haut niveau. En revanche, la perception haptique reste encore difficile à mettre en place en EV. L'absence de certaines informations du toucher conduit à une perception sensorielle incomplète pouvant nuire la compréhension et la fidélité des comportements, réduisant ainsi la validité des études. C'est dans ce contexte que nous avons décidé de nous intéresser au sens du toucher.

2.1.2. Sens du Toucher

Le système sensoriel humain acquiert des informations sur l'environnement à travers ses sens (la vision, le toucher et l'ouïe), elles sont complétées par des données internes : position et mouvements du corps. Les signaux sensoriels alimentent la chaîne de traitement du **Système Nerveux Central (SNC)** qui permet à tout moment la perception et l'exécution des (ré-)actions motrices (volontaires et involontaires).

Le sens du toucher ou haptique est sans doute le plus complexe des sens. Cela est dû au fait qu'il regroupe plusieurs types/sortes de sensation. En effet, il intègre les éléments extéroceptifs (donnée d'origine extérieure au corps) :

perception tactile/cutanée et des éléments intéroceptifs (donnée provenant du corps) : perception kinesthésique/proprioceptive (HALE 2006 ; LOOMIS et LEDERMAN 1986)(Figure 2.6). Le lecteur peut se référer à HALE (2006) pour plus de détails sur l'historique des principes physiologiques et **psychophysiques** lié à ce sens. Par la suite, les deux éléments sont traités de manière distincte. Néanmoins l'interaction et combinaison des données sensorielles cutanée et kinesthésique est nécessaire dans le processus de toucher actif qui intervient notamment lors de l'exploration d'un environnement. Nous présenterons dans un premier temps la perception kinesthésique et les moyens de stimuler ce sens en **Environnement Virtuel**. Puis nous détaillerons plus en profondeur la perception tactile et plus particulièrement la stimulation vibrotactile, élément central de ce manuscrit.

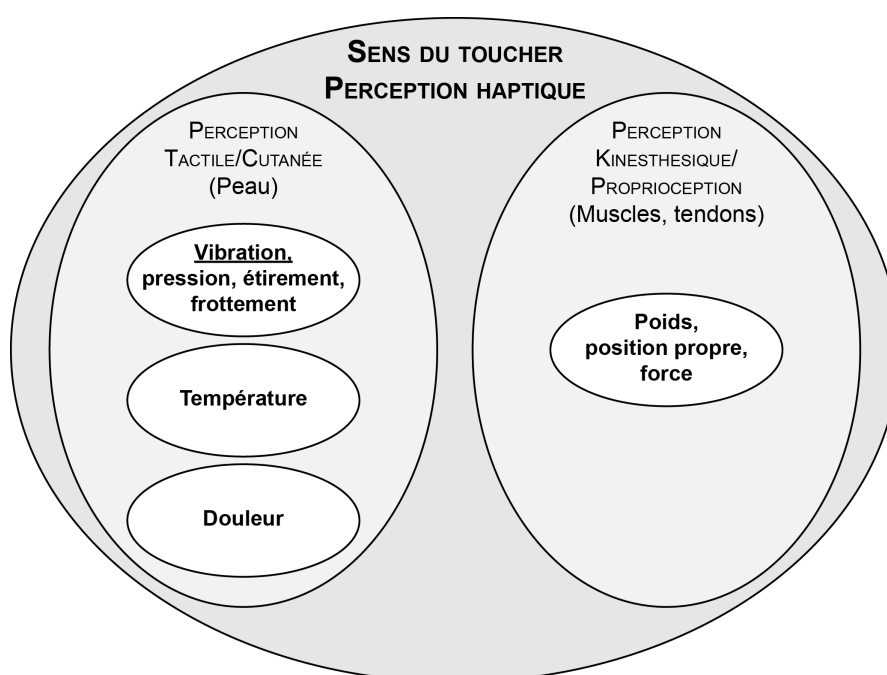


Figure 2.6. – Définition des relations entre les sens du toucher (adapté de Van Erp et Self 2008)

2.1.2.1. Perception Kinesthésique/Proprioception

La perception kinesthésique aussi appelée proprioception. Elle peut généralement être définie, comme le fait d'avoir la perception de soi-même, c'est-à-dire connaître la position de ses différents membres et sentir le poids d'un objet tenu à bout de bras. Le sens de l'équilibre (système vestibulaire) est parfois inclus dans le terme proprioception. La perception kinesthésique est liée aux récepteurs des articulations, tendons et muscles. Ces mécanorécepteurs traduisent des déformations mécaniques de tissus spéciaux en signaux neuronaux modulés en fréquence.

Le [SNC](#) utilise cette information sensorielle pour calculer la posture du corps entier : l'état spatial des membres (orientation et position). La connaissance de l'état actuel du système est nécessaire pour la création de commandes motrices souhaitées.

Il est possible de stimuler le sens kinesthésique en réalité virtuelle. Les technologies qui le permettent sont appelées système à retour d'effort ou à retour de force. Ces dispositifs ont la capacité de générer une grande force de retour et peuvent bloquer de manière réaliste les mouvements. Ils permettent de reproduire la perception du toucher et du retour de force exercé par un objet sur l'utilisateur (rétroaction haptique). On trouve deux principaux types d'équipements : les bras haptiques à retour d'effort ([MASSIE et SALISBURY 1994](#)) et les exosquelettes. Il existe aussi des interfaces mécaniques à câbles comme le [SPIDAR \(SATO, HIRATA et KAWARADA 1992\)](#), ceux-ci sont plus rares. Si ces dispositifs sont les plus naturels (vis-à-vis du retour sensoriel) lorsqu'il s'agit de percevoir la forme d'un objet et de simuler les contacts/collisions en [EV](#), ils ne permettent généralement que peu de points de contact. Ils sont généralement volumineux et d'amplitude de mouvement limitée ([LINDEMAN, YANAGIDA, HOSAKA et al. 2006](#)). Ils sont par exemple difficilement applicables dans le cas d'un retour sur le corps complet. C'est un constat que l'on retrouve dans la littérature :

One of the natural applications and capabilities of haptic devices may be to simulate collision with the environment objects, however, most haptic devices provide only few contact points and thus deployed for special applications rather than general navigation with the whole body. (Ryu and G. J. Kim [2004](#))

Malgré les limitations liées à l'amplitude du mouvement, certaines applications se prêtent complètement à leur utilisation. Les bras à retour d'effort ont montré de bons résultats pour la simulation de tâche de téléopération ([BARROS, LINDEMAN et WARD 2011](#) ; [STONE 2001](#) ; [CHABAL, SOULABAILLE, GARNIER et al. 2014](#)), dans le cadre médical avec les simulations chirurgicales ([KÜHNAPFEL, ÇAKMAK et MAASS 2000](#))...

D'autres alternatives aux interfaces de retour de force existent. Les Interfaces tangibles ou interfaces haptiques passives reposent sur le principe d'ajouter des éléments réels coïncidant avec l'élément virtuel (de manière absolue ou en partie) dans l'environnement de l'utilisateur. L'idée est de créer une réalité mixte ([INSKO 2001](#) ; [MILGRAM et KISHINO 1994](#) ; [HOFFMANN 1998](#)) où les éléments virtuels sont renforcés par les éléments réels. Par exemple, l'utilisateur peut travailler sur une tablette dans le monde virtuel. Celle-ci est affichée graphiquement (virtuellement) sur une plaque de plexiglas transparente. L'utilisateur peut ainsi sentir son contact et la forme de la tablette virtuelle. Une autre possibilité est l'utilisation d'interface pseudo-haptique ([LÉCUYER 2001](#) ; [ACHIBET, MARCHAL, ARGELAGUET et al. 2014](#)). Le but étant de restituer des informations haptiques

(frottement, raideur) sans utiliser d'interface haptique active en combinant un retour visuel avec une information haptique passive liée à une action de l'utilisateur.

Une autre possibilité est de substituer les informations kinesthésiques par les informations cutanées. Cette solution est celle que nous souhaitons étudier. Nous présenterons dans les parties suivantes les éléments intervenant dans la perception tactile, puis nous présenterons les différentes applications dans lesquelles la stimulation tactile est utilisée et plus précisément la stimulation vibrotactile. Nous reviendrons enfin sur la substitution des informations proprioceptives par des données tactiles qui est l'une de ces applications.

2.1.2.2. Perception Cutanée/Tactile

La perception cutanée est une perception extéroceptive. Elle est liée à plusieurs types de récepteurs. Chacun d'eux permet la perception de différents types de stimuli : propriété thermique (thermorécepteurs), vibration et pression (mécanorécepteurs), douleur (nocicepteurs). Nous nous concentrerons sur la contribution des mécanorécepteurs permettant de sentir les vibrations. Plusieurs études se sont focalisées sur la sensibilité et l'acuité de la perception tactile. La capture de signaux électriques lors de la stimulation mécanique de la peau (mécanotransduction) révèle quatre types de messages afférents. Ils sont classés selon deux attributs : la vitesse d'adaptation aux événements mécaniques et la taille et la netteté du champ réceptif. La vitesse d'adaptation peut être lente (*Slowly Adaptive (SA)*) ou rapide (*Rapidly Adaptive (RA)*). Les champs réceptifs peuvent être restreints (Type I) ou étendus (Type II). Il existe plusieurs mécanorécepteurs, chacun étant adapté à la réception d'un type de signal en fonction de ses propriétés (vitesse d'adaptation, champ réceptif). La répartition des mécanorécepteurs dépend du type de surface : glabre (c'est-à-dire dépourvu de poil : doigt, paume, la plante des pieds. . .) ou velue. Les surfaces glabres font intervenir quatre types de mécanorécepteurs : terminaisons de Pacini (RA I), corpuscules de Ruffini (SA II) et de Meissner (RA I) et disques de Merkel (SA I). Les zones poilues du corps font intervenir trois types de récepteurs : terminaisons de Pacini (RA I), corpuscules de Ruffini (SA II) et les récepteurs du follicule pileux.

La sensibilité des mécanorécepteurs dépend de leur taille, densité, plage de fréquence et densités d'innervation. La sensibilité s'exprime principalement en termes de résolution temporelle (fréquence de réponse) et de résolution spatiale (taille du champ réceptif). Les zones glabres du corps présentent une grande sensibilité, qui leur permet notamment la détection de texture et de forme 2D. Les zones poilues ont une plus faible sensibilité, mais peuvent être utilisées pour la transmission d'informations vibrotactiles (Figure 2.7 et 2.8).

Les aspects à prendre en considération pour connaître les capacités de perception de la peau sont la résolution spatiale (qui peut être étudiée de façons relative

Type de mécanorécepteurs	Corpuscules de Pacini (RA II)	Corpuscules de Ruffini (SA II)	Corpuscules de Meissner (RA I)	Disques de Merkel (SA I)	Récepteurs du follicule pileux
Type de peau	Glabre et velue	Glabre et velue	Velue	Velue	Velue
Type de perception	Vibration	Étirement	Frottement	Pression	Toucher
Résolution spatiale	Très faible (2 cm)	Faible (1cm)	Moyenne (3-5 mm)	Bonne (0,5 cm)	-
Résolution temporelle Hz	10 - 1000	0,4 - 100	2 - 40	0,4 - 10	-

Figure 2.7. – Caractéristiques tactiles des mécanorécepteurs de la peau (d'après Hale 2006 ; Johnson et Hsiao 1992)

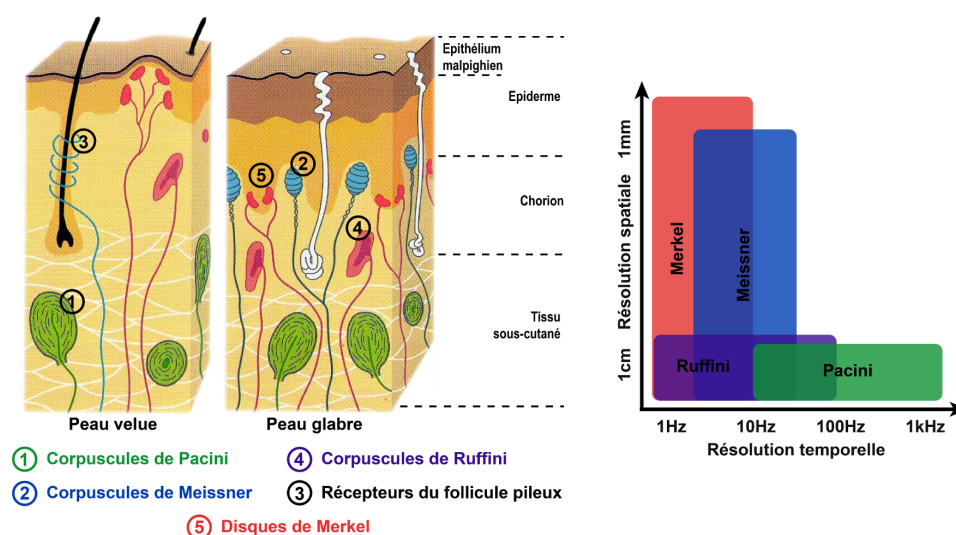


Figure 2.8. – Représentation des quatre types de récepteurs principaux (gauche), réponse spatiale et temporelle des récepteurs (d'après Yem et Kajimoto 2017)

ou absolue) et la résolution temporelle. Si la résolution spatiale tactile pour des stimuli de pression a été largement étudiée (WEBER 1834; WEBER 1978; VIÉRODT 1870; WEINSTEIN 1968...), la résolution de la peau vis-à-vis des stimuli vibrotactiles n'a été l'objet d'étude que plus récemment (CHOLEWIAK, A. A. COLLINS et BRILL 2001; CHOLEWIAK, BRILL et SCHWAB 2004; VAN ERP 2007...). Lors de l'utilisation de stimuli vibrotactiles, il a été montré que la fréquence de vibration joue un certain rôle. L. A. JONES, NAKAMURA et LOCKYER (2004) ont lors de leurs tests préliminaires établi que la fréquence optimale de stimulation (là où la sensibilité est la plus grande) pour le torse est entre 120-250 Hertz (Hz).

Il est à noter que plusieurs facteurs peuvent jouer un rôle sur la résolution spatiale. Le temps de stimulation (ci-dessous), la température de l'élément touchant l'observateur et celle de sa peau (PROVINS et MORTON 1960; STEVENS 1982). L'âge est aussi un paramètre d'influence de la résolution spatiale (VEGA-BERMUDEZ et JOHNSON 2004; CHOLEWIAK, A. A. COLLINS et BRILL 2001). La propagation des ondes de vibration à travers et sur la peau peuvent aussi être des facteurs influençant la résolution, ainsi il y aura des différences entre la perception de la vibration perpendiculaire ou parallèle à la surface de la peau.

2.1.2.2.i. Sensibilité - Résolution Spatiale Relative

La résolution spatiale est définie par VAN ERP (2007) comme étant l'habileté d'un observateur de sentir la position relative à deux stimulations vibrotactiles consécutives sur la peau. Celle-ci est définie comme la distance sur la peau entre deux stimuli (en millimètre) pour lesquels l'observateur ressent distinctement la position du deuxième stimulus (avec un taux de 75 à 84 % de succès suivant les études). La méthode la plus commune pour mesurer la sensibilité est appelée « *the two-point touch* ». Elle consiste à demander à un observateur soumis à des stimulations s'il perçoit un ou deux points. Cette mesure est utile lors de la conception afin de savoir la densité de vibreur qui peut être utilisée en fonction de la partie du corps sur laquelle le dispositif est installé.

Il faut noter que la résolution spatiale du corps diverge grandement en fonction de la partie du corps étudiée. Comme expliqué précédemment, cela est dû à la quantité et au type de mécanorécepteurs. WEINSTEIN (1968) a mesuré la répartition des sensibilités spatiales sur l'ensemble du corps pour des stimulations de pression. On trouve la plus petite valeur de séparation qui peut être détectée pour le bout des doigts. On note un seuil pour le bout des doigts de l'ordre de 2 mm, celui du torse est entre 30 et 40 mm et de l'ordre de 40 à 50 mm pour les bras. La Figure 2.9 regroupe les seuils suivant les différentes parties du corps. Les valeurs correspondent au moyen des valeurs pour le côté droit et gauche, qui à quelques exceptions près ne présente pas d'effet de latéralité. Les données présentées correspondent au seuil chez la femme, il apparait que les femmes sont

légèrement plus sensibles, cependant les seuils pour l'homme suivent une même répartition et un même ordre de grandeur.

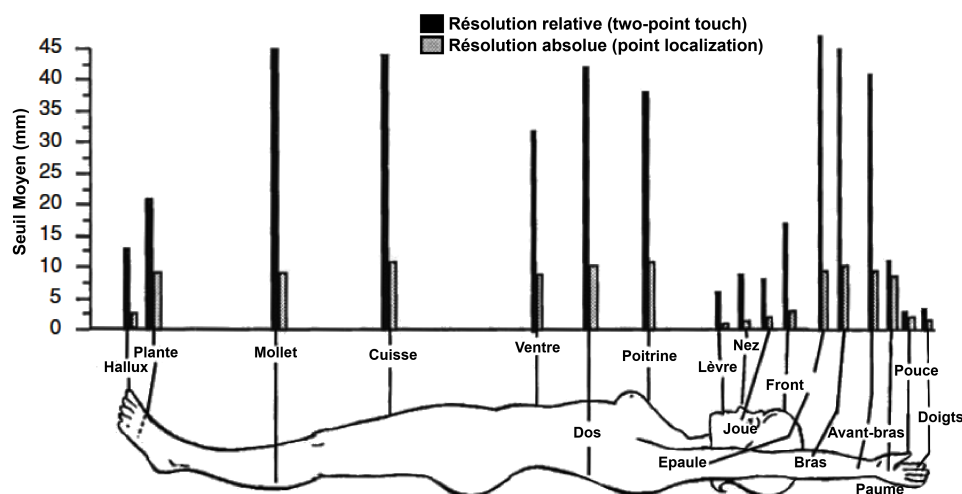


Figure 2.9. – Seuils de sensibilité relative (*two-point touch*) et absolue (*point localization*) en fonction de la localisation sur le corps. Les valeurs moyennes obtenues pour le côté droit et gauche du corps. (adapté de Weinstein 1968 ; Lederman 1991)

La sensibilité pour les stimuli vibrotactiles est légèrement différente par rapport aux stimuli de pression. Ceci est dû au fait que les mécanorécepteurs adaptés aux stimuli de vibration ne sont pas les mêmes et donc ont des sensibilités différentes. De plus, les vibrations ont tendance à se propager à travers la peau. Il en résulte une résolution plus faible pour les vibrations, avec cependant un ordre de grandeur équivalant aux stimulations de pression. Plusieurs études ont étudié la sensibilité aux stimulations vibrotactiles (CHOLEWIAK, BRILL et SCHWAB 2004 ; CHOLEWIAK, A. A. COLLINS et BRILL 2001 ; SOFIA et L. JONES 2013 ; VAN ERP 2007). VAN ERP (2007) s'est particulièrement intéressé à la précision pour les stimuli vibrotactiles sur le torse. Il utilise une méthode assez similaire à celle du « *two-point touch* » où l'observateur doit dire si le second stimulus est à droite ou à gauche du premier (respectivement en dessus ou en dessous pour l'axe vertical). Les résultats montrent une précision uniforme à travers le torse de 30 à 40 mm, à l'exception des positions sur la ligne médiane du corps pour orientation horizontale (à savoir la colonne vertébrale et le nombril) où la résolution est plus importante : 10 – 20 cm (« *middle line effect* »).

2.1.2.2.ii. Sensibilité - Positionnement Absolu

Nous avons préalablement présenté la capacité à distinguer relativement à une première stimulation une seconde stimulation. L'autre question importante

est celle du positionnement absolu d'une simple stimulation. La méthode utilisée, appelée « *point localization task* », évalue la précision (en millimètre) avec laquelle un stimulus appliqué sur la peau peut être localisé. Le seuil de valeur varie en fonction de la position sur le corps de la même manière que pour le seuil de la localisation relative (Figure 2.9). On obtient une plage d'erreur de localisation pour les stimulations de pression d'environ 1,5 mm sur le bout du doigt et 12.5 mm pour le dos. VAN ERP (2007) dans son étude a obtenu une capacité de localisation absolue pour le torse plus importante avec une erreur de l'ordre de 5 cm de leur emplacement véridique.

2.1.2.2.iii. Sensibilité - Seuils Temporels

Les paramètres temporels sont aussi des facteurs importants, car la performance de localisation dépend également de ceux-ci. Plusieurs effets dus aux stimulations simultanées et successives de deux points ont été découverts et peuvent interférer avec un comportement voulu (voir Limitations).

Le travail effectué par GESCHIEDER (1974) s'est porté sur la mesure de la capacité à faire la distinction entre des événements successifs et simultanés. Il a montré que deux stimuli de 1 ms, présentés à la même position sur un doigt, doivent être séparés par 5,5 ms pour être perçus comme deux stimuli distincts. Concernant la résolution temporelle des autres parties du corps, on note les travaux de VAN ERP (2007) sur l'étude du torse. Il a montré que la durée de la salve (*Burst Duration* (BD)) et surtout l'intervalle entre deux stimulations ou intervalle inter-stimulus (en anglais, *Stimulus Onset Asynchrony* (SOA), aussi appelé *Inter-Stimulus Onset Interval* (ISOI)) dans une application vibrotactile affectaient les performances de localisation.

La Figure 2.10, tirée de l'étude de VAN ERP (2007), montre qu'il existe une dépendance des deux paramètres temporels sur les performances de localisation. La performance augmente lorsque le SOA augmente. De façon moins marquée, les performances s'améliorent avec l'augmentation de la BD. Ce résultat montre que les applications vibrotactiles nécessitant une grande précision de localisation doivent s'appuyer sur de plus longues valeurs de BD et de SOA. D'autre part, les applications qui nécessitent des stimulations rapides doivent faire en sorte que la position entre les vibreurs soit plus importante. En effet, cet intervalle interfère avec la position entre les stimulations : une valeur de SOA plus faible (c'est-à-dire une séquence plus rapide de stimulation) nécessite une distance entre les stimuli plus grande pour que la distinction des localisations se fasse.

Des études définissaient comme 200 ms la durée de stimulation optimale nécessaire pour un point (SHERRICK et ROGERS 1966 ; L. A. JONES, NAKAMURA et LOCKYER 2004). Cependant, comme l'évoquent YANAGIDA, KAKITA, LINDEMAN et al. (2004), cette durée peut être amenée à varier. Lors de l'utilisation de vibromoteur, le temps nécessaire pour atteindre la pleine amplitude de vibration

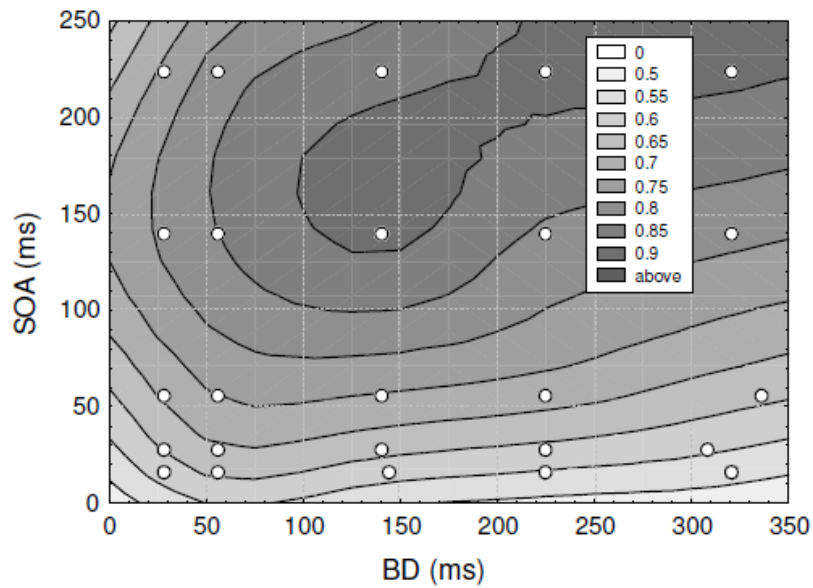


Figure 2.10. – Graphique indiquant la performance en fonction de la durée de la salve (*Burst Duration* (BD)) et de l'intervalle entre deux stimulations (*Stimulus Onset Asynchrony* (SOA)). Les couleurs plus foncées indiquent une meilleure performance. (Van Erp 2007)

varie. Dans le cas de l'équipe de Yanagida, cette durée est de 100 à 200 ms (Figure 2.11). Ils ont donc décidé d'avoir des stimulations d'une durée de 500 ms. Une durée identique était utilisée comme intervalle inter-stimulus.

2.1.2.2.iv. Limitations

En plus des paramètres précédemment présentés qui peuvent limiter la détection des stimuli, il est aussi nécessaire de prendre en compte l'adaptation et le masquage.

L'adaptation apparaît quand une stimulation est présentée pendant une période de temps importante. Elle se caractérise par une réduction de la perception de l'intensité de la stimulation (ceci étant valable pour tous types de stimuli : pression, vibration...). Pour éviter l'adaptation, les stimulations doivent être présentées de manière relativement brève et il faut laisser temps de repos entre deux stimulation (GEMPERLE, HIRSCH, GOODE et al. 2003).

Le masquage intervient lorsqu'un stimulus écrase la perception d'un autre de par son chevauchement temporel ou spatial. Comme expliqué précédemment (Figure 2.10) la présentation de deux stimulations trop rapprochées temporellement nécessite un espacement spatial plus important pour éviter les masquages.

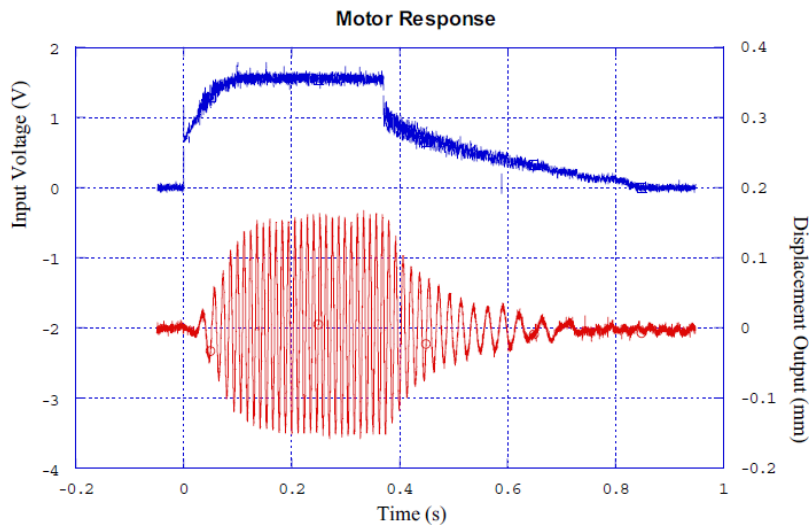


Figure 2.11. – Réponse de vibration d'un moteur (courbe rouge) en fonction du courant en entrée (courbe bleu). (Yanagida, Kakita, Lindeman et al. 2004)

Il est possible de jouer sur les paramètres spatiaux et temporels pour créer un caractère particulier à un stimulus. On appelle cela des effets **psychophysiques** ou illusions sensorielles. Elles permettent de créer des illusions perceptuelles en jouant sur des motifs spatio-temporels des stimulations. Par exemple, la saltation sensorielle est une méthode qui peut être utilisée pour susciter une perception de mouvement sur la peau en stimulant deux sites distincts sur la peau avec un timing particulier. Nous reviendrons sur ces effets dans le Chapitre 5, notamment sur l'un d'eux appelé « *effet entonnoir* » (« *Funneling effect* »).

Depuis très longtemps, il semble naturel de « *tapoter* » l'épaule de quelqu'un pour indiquer sa présence, ou donner des instructions de direction aux chevaux à l'aide d'indices tactiles. La perception tactile est aussi utilisée pour fournir des informations pour les personnes malvoyantes ou aveugles (braille, alphabet de Moon). Les premières applications des dispositifs tactiles apparaissant dans les années 70. Nous souhaitons nous intéresser plus particulièrement à l'utilisation des dispositifs vibrotactiles, celles-ci ont pris de nombreuses formes et dans de nombreux contextes. Dans la partie suivante, nous présenterons les principaux domaines d'application de la stimulation vibrotactile.

2.1.2.3. Stimulation Vibrotactile

La vibration en tant que médium d'information a été depuis longtemps utilisée pour différentes applications. Bien que l'application historique de la stimula-

tion vibrotactile soit l'assistance aux utilisateurs visuellement déficients (BACH-Y-RITA, C. C. COLLINS, SAUNDERS et al. 1969; GOLDISH et TAYLOR 1974), la stimulation vibrotactile ne s'est pas limitée à ce sujet. En particulier, il a pris une place importante dans les Interfaces Homme-Machine (IHM), notamment en RV. Les dispositifs de retour vibrotactile peuvent être divisés en trois principaux domaines d'application (CHOI et KUCHENBECKER 2013) :

2.1.2.3.i. Multimédia et Divertissement

Le retour vibrotactile est fréquemment utilisé dans l'industrie du jeu vidéo. La première mise en œuvre apparaît avec les « *rumble packs* » pour les contrôleurs des consoles de salon Nintendo 64 et Sega Dreamcast. L'incorporation de retour vibrotactile dans les contrôleurs est maintenant devenue un usage courant et reste un sujet de recherche actuel (ISRAR et POUPYREV 2011). Par ailleurs, avec l'émergence de films 4-D et des jeux de RV, de nombreux nouveaux appareils utilisant des vibrations ont vu le jour.

2.1.2.3.ii. Information Abstraite

Les recherches dans ce domaine sont actives depuis plus d'une décennie. La communication et l'orientation sont les principaux objectifs. Comme indiqué ci-dessus, l'usage le plus traditionnel des stimulations vibrotactiles est le développement de dispositifs de communication pour les personnes souffrant de déficiences sensorielles (BACH-Y-RITA, C. C. COLLINS, SAUNDERS et al. 1969; GOLDISH et TAYLOR 1974). Les dispositifs vibrotactiles ont également été exploités pour le guidage du geste (par exemple pour l'apprentissage de bonne posture pour des joueurs de violon débutant (LINDEN, SCHOONDERWALDT, BIRD et al. 2011), la formation au Ryukyu Kempo (BLOOMFIELD et BADLER 2008)...) et l'orientation spatiale (FLORES, KURNIAWAN, MANDUCHI et al. 2015; VAN ERP, H. A. H. C. VAN VEEN, JANSEN et al. 2005; RUPERT 2000; LI, JEON et NAM 2015). La stimulation vibrotactile est aussi utilisée pour transmettre des informations : interface utilisateur pour terminaux mobiles (comme le retour sous forme de vibration lors de la saisie sur écran tactile), informations d'avertissement (par exemple dans la conduite automobile avec des avertissements de situations dangereuses durant la conduite (MENG, GRAY, HO et al. 2014)).

2.1.2.3.iii. Information Physique

Les informations physiques peuvent être transmises à l'aide des interfaces vibrotactiles. On retrouve souvent cette utilisation en RV. Dans ce cas, l'interface fournit des vibrations en réponse à un mouvement ou une action effectuée

par l'utilisateur dans l'EV. Cette zone peut être divisée en deux thèmes : transmettre les propriétés des objets physiques (ROMANO et KUCHENBECKER 2012) et la conscience spatiale (*spatial awareness*).

Nos études s'articulent principalement autour de ce dernier thème de recherche : la conscience spatiale ou perception de l'espace. Dans ce contexte, fournir via les vibrations des informations de la présence physique (perception de l'espace) à un utilisateur dans un [Environnement Virtuel](#), nous nous sommes focalisés sur l'étude de deux informations : les informations de contact avec l'environnement et les informations de proximité. Le premier type d'information, la prise de conscience des contacts/collision potentielles (*collision awareness*), est généralement perçue par le sens cutané (information de pression) et kinesthésique (blocage du mouvement). Il est donc question de substituer les informations kinesthésiques par des informations purement tactiles. Le second type d'information que nous souhaitons étudier ne correspond pas à des informations naturellement perçues par le sens du toucher. La perception de l'espace, notamment les informations de proximité d'objet est généralement basées sur la modalité plutôt visuelle. L'utilisation de la modalité vibrotactile permet d'éviter la surcharge d'information de la modalité visuelle. FERSCHA, EMSENHUBER, RIENER et al. (2008) ont par exemple proposé l'utilisation d'une ceinture fournissant des vibrations modulées en fonction de la distance et de la direction d'obstacle pour un usage dirigé vers la sécurité en environnement réel des travailleurs de la construction.

On retrouve dans la littérature plusieurs études d'utilisations d'interface vibrotactile dans le contexte « de rendre compte des collisions » (*collision awareness*). Parmi les études qui ont structuré nos recherches, on trouve :

- YANO, OGI et HIROSE (1998) ont développé une interface vibrotactile composée de 12 vibreurs (positionnés sur le front, mains, coudes, genoux, cuisses, abdomen et dos). Ils ont étudié l'efficacité de l'interface vibrotactile pour une tâche qui demandait à un utilisateur immergé dans un [Cave Automatic Virtual Environment \(CAVE™\)](#), de marcher à travers un EV représentant un corridor. Leur étude a montré que l'utilisation d'indices tactiles pour représenter les collisions entre l'utilisateur et l'environnement améliorerait le sentiment de présence.
- RYU et G. J. KIM (2004) ont aussi exploré l'utilisation d'un dispositif vibrotactile sur le corps entier. Leur objectif était d'augmenter le sentiment de présence en fournissant des informations de contact localisées. De plus, ils ont étudié l'effet d'un modèle pour rendre la matière de l'objet avec lequel l'utilisateur entre en contact (bois, métal, pierre, feuillage) et ils ont testé l'apport de l'utilisation de phénomènes psychophysiques (saltation sensorielle). Leurs résultats montraient que le retour vibrotactile sur le corps améliore le sentiment de présence. L'utilisation multimodale (son + vibration) et saltation ont amélioré la sensation de présence et la perception des

collisions. Le modèle pour permettre de distinguer les différents matériaux n'a quant à lui pas montré de résultats positifs lors de l'expérimentation.

- LINDEMAN, PAGE, YANAGIDA et al. (2004) ont beaucoup étudié les interfaces tactiles pour de nombreux contextes. Les travaux ont été réalisés autour du développement de leur dispositif vibrotactile : la TactaBoard. Dans l'une de leurs études, le dispositif a été utilisé pour l'entraînement des soldats en EV. Une veste (TactaVest) dans laquelle étaient repartis 16 vibreurs était utilisée pour améliorer la sensation des collisions avec l'environnement.
- BLOOMFIELD et BADLER (2007) ont étudié l'utilisation de retour vibrant lors des collisions dans une tâche d'exploration avec le bras. Leur étude permettait le contrôle d'un bras virtuel devant passer dans une série de puzzles (Figure 2.12). Le système était composé de 24 vibreurs repartis du bout des doigts jusqu'en haut du bras. Les résultats de leur expérimentation ont montré pour cette tâche que l'utilisation de retour vibrotactile sur tout le bras améliore la performance par rapport à un retour purement visuel.

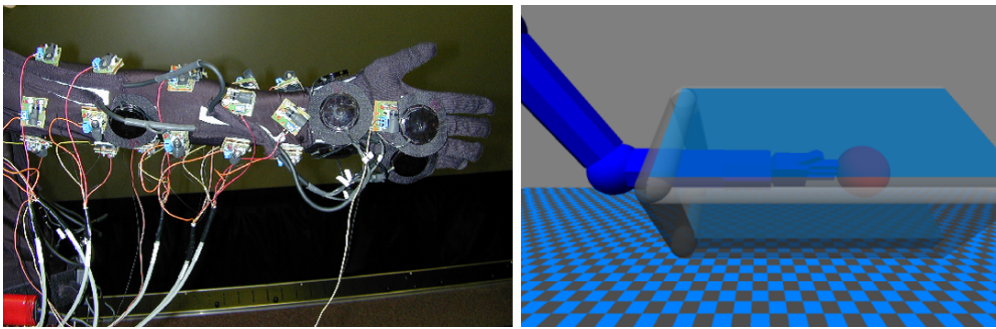


Figure 2.12. – Bras équipé de système de capture de mouvements et de retour vibrotactile (gauche), expérimentation puzzle (droite). (Bloomfield et Badler 2007)

Toutes ces études ont apporté des réponses sur l'utilisation du retour vibrotactile dans le contexte de l'amélioration de la présence, la *collision awareness* ou pour la *spatial awareness*. Ces études ont en commun d'utiliser des dispositifs vibrotactiles localisés pour fournir des informations de contact avec l'environnement. Nos travaux sont directement basés sur ces résultats et nous avons souhaité continuer l'investigation de l'usage d'information spatiale délivré au travers du canal tactile dans notre contexte .

Comme pour les technologies permettant de stimuler la perception proprioceptive, il existe plusieurs possibilités pour la stimulation de la perception tactile et vibrotactile.

2.1.2.4. Interfaces de Stimulation Tactile

En comparaison aux technologies utilisées pour stimuler le sens kinesthésique (2.1.2.1), les systèmes tactiles (cutanés) génèrent une faible force et ne permettent pas de bloquer le mouvement de l'utilisateur, mais ils ont une grande capacité pour fournir des informations (texture, température, rigidité du matériau...). Ils offrent une polyvalence dans le positionnement des actionneurs, permettant de stimuler différentes positions sur le corps en fonction de l'application. Ces systèmes plus modulables ont fait l'objet de nombreuses études notamment en tant que substitut aux interfaces haptiques à retour d'effort lorsque ceux-ci ne sont pas applicables. Nous nous intéresserons aux interfaces tactiles et plus particulièrement aux systèmes vibrotactiles qui sont l'un des types de signaux tactiles.

On trouve trois types de transducteurs pour réaliser des stimulations tactiles : les interfaces tactiles statiques, le système vibrotactile et ceux électro-tactiles [KaB95]. Le choix d'une approche technique plutôt qu'une autre se fait suivant le stimulus recherché, l'acceptation, le prix et l'environnement mécanique et électrique. On peut distinguer deux catégories de technique : celle consistant à appliquer des stimulations électriques et celle appliquant une force physique à la peau (VAN ERP 2007).

Les actionneurs électro-tactiles permettent de présenter une sensation de vibration par des électrodes fixées directement sur la peau. Cette technologie a plusieurs désavantages qui nécessitent d'être résolus avant d'être utilisée. L'un des principaux désavantages est que la sensation produite n'est pas stable entre les individus, voire pour un même individu au cours du temps. Il est donc possible qu'une charge électrique confortable pour un individu un jour devienne douloureuse la fois suivante (VAN ERP 2007). Pour des raisons d'acceptation, nous nous focaliserons sur la deuxième catégorie. C'est aussi l'approche généralement prise dans la littérature.

Concernant le dispositif basé sur une stimulation mécanique, le fonctionnement général est basé sur la transformation d'une énergie électrique en un faible mouvement mécanique. Ce mouvement de l'ordre du micromètre au millimètre permet de créer une stimulation vibrotactile. Il existe plusieurs systèmes avec ces caractéristiques : hautparleur, piézoélectrique bimorphe, alliage à mémoire de forme, vibromoteur... .REGENBRECHT, HAUBER, SCHOENFELDER et al. (2005) ont effectué une évaluation de différents systèmes de stimulation tactile dans le cadre du développement d'un dispositif fournissant des informations directionnelles manuelles par retour vibrant. Vous pouvez vous référer à l'annexe B pour une rapide présentation de ces systèmes.

La majorité des dispositifs vibrotactiles s'orientent vers l'utilisation des vibromoteurs en raison de leur prix abordable, de leur faible consommation d'énergie et de leur facilité d'utilisation (ne nécessite pas de circuit imprimé complexe). S'il

est possible de moduler le couple amplitude et fréquence à partir de la tension, la [modulation de largeur d'impulsions \(PWM\)](#) (en anglais *Pulse-width modulation*) est généralement utilisée pour des raisons de simplicité.

Nous avons présenté le rôle du sens du toucher ainsi que les moyens et l'utilité de fournir un retour sensoriel haptique en [Environnement Virtuel](#). Le retour sensoriel est avant tout la conséquence d'une action effectuée dans l'environnement. Il est essentiel de se demander comment l'utilisateur va agir sur l'environnement. La création du monde virtuel implique que l'humain prenne aussi une forme virtuelle. L'humain virtuel ou avatar est l'incarnation de la personne réelle dans le monde virtuel. L'utilisateur interagit avec l'[EV](#) par l'intermédiaire de l'avatar. C'est donc à travers les sens de l'avatar que nous allons pouvoir définir le retour sensoriel qui doit être fourni à l'utilisateur. Il est nécessaire de définir comment l'utilisateur contrôle l'avatar. Également, il faut se demander comment définir cet avatar pour qu'il soit un bon intermédiaire entre l'utilisateur et l'[EV](#). Dans la prochaine partie, nous soulèverons la question de la représentation virtuelle de l'utilisateur, des moyens de contrôle de celui-ci et des règles d'interagir entre l'avatar et l'[EV](#).

2.1.3. Humain Virtuel

L'humain joue un rôle central dans les études de maintenance et d'assemblage. Un personnage, mannequin, humain virtuel ou avatar (nous ne ferons pas de distinction entre ces termes) est une représentation de l'utilisateur au sein du monde virtuel. Cette représentation peut être symbolique ou être une représentation plus ou moins réaliste de l'utilisateur. Le personnage peut avoir des actions prédéfinies sous forme d'animations pré-calculées qui seront jouées au déclenchement d'événements de l'utilisateur ou de l'environnement (par exemple l'utilisation d'un clavier, joystick). Il peut être autonome, ou semi-autonome (COLLETTE, MICAELLI, ANDRIOT et al. 2007 ; LIU, MICAELLI, EVRARD et al. 2011 ; COLLETTE, MICAELLI, ANDRIOT et al. 2008). Il peut aussi suivre les mouvements de l'utilisateur grâce à un système de capture de mouvements (*motion tracking*).

Les systèmes de visualisation non occlusifs permettent une vue directe sur son propre corps ([CAVE™](#), écran immersif...). Cette vision directe de son propre corps est absente avec l'utilisation des systèmes occlusifs (casque immersif). Dans ces dispositifs-là, l'utilisation d'une représentation virtuelle est généralement mise en place. Les représentations peuvent aller de pointeurs figuratifs statiques à l'utilisation d'un avatar dynamique, voire l'intégration de capture vidéo. Cette représentation dans l'[EV](#) est primordiale dans le mécanisme d'interaction et la sensation de présence. La vision de sa main (réelle ou virtuelle) joue un rôle clé dans les mouvements d'atteinte ou de pointage. En effet, la vision de notre main permet la création d'une boucle d'observation/correction par notre cerveau pour compenser les erreurs d'atteinte et/ou les modifications de la cible

(PAILLARD 1996). HEETER (1992) et SLATER et USOH (1993) ont montré que la présence d'un avatar augmente le sentiment de présence d'un utilisateur. La représentation de l'avatar et la manière d'interagir avec l'environnement soulèvent plusieurs problématiques : réalisme, co-localisation, interaction avec les objets.

2.1.3.1. Avatar et Réalisme

La question du besoin de réalisme notamment dans la représentation d'un avatar a été souvent étudiée. YUAN et STEED (2010) ont montré qu'un avatar réaliste permettait un plus grand sentiment d'identification par rapport à une représentation abstraite (flèche représentant la main). Cependant, l'utilisation d'avatar non réaliste (par exemple constitué de primitives, possédant tout de même une cinématique identique à l'humain) semble permettre d'avoir un même niveau d'illusion d'identification du corps virtuel (illusion of virtual body ownership - IVBO) que des avatars réalistes (LUGRIN, LATT et LATOSCHIK 2015). L'utilisation d'avatars trop réalistes pourrait même créer un phénomène perceptif de vallée dérangeante (*Uncanny Valley*) (MORI, MACDORMAN et KAGEKI 2012) où l'augmentation du réalisme n'augmente pas l'impression d'appartenance voire la dégrade (MCDONNELL, BREIDT et BÜLTHOFF 2012). Ce fait peut être expliqué qu'avec augmentation de la ressemblance, la moindre petite invraisemblance aura tendance à briser l'immersion. Cependant, plusieurs études ont montré une préférence des utilisateurs pour une représentation de plus grande fidélité (PUSCH 2008). Il faut d'ailleurs prendre en considération les améliorations considérables de la technologie dans le domaine qui impose une remise en question constante sur le sujet.

Il a été montré que la perception corporelle de soi peut être temporairement transférée vers un corps virtuel d'un avatar de genre différent (SLATER, SPANLANG, SANCHEZ-VIVES et al. 2010), d'âge (BANAKOU, GROTEN et SLATER 2013), la forme du corps (NORMAND, GIANNOPOULOS, SPANLANG et al. 2011) ou avec des membres de longueurs différentes (KILTENI, GROTEN et SLATER 2012). La grande plasticité du cerveau et la prédominance visuelle par rapport aux autres sens (notamment proprioceptif) expliquent cette grande capacité d'adaptation. Cependant il a été montré que la taille du corps virtuelle pouvait influencer la perception de la taille des objets de l'EV (LINKENAUER, LEYRER, BÜLTHOFF et al. 2013).

Nous pensons que lors des études d'accessibilité et de maintenance, le niveau de fidélité visuel (texture, forme) n'est pas un point déterminant et qu'un avatar abstrait est suffisant. L'anthropomorphisme et la fidélité morphologique de l'avatar par rapport à l'utilisateur semblent par contre importants pour avoir une grande fidélité de mouvement et de l'espace occupé. Ce sentiment est généralement partagé (LOK, NAIK, M. WHITTON et al. 2003).

2.1.3.2. Avatar et Colocalisation

Les dispositifs de visualisation non occlusifs fournissent naturellement une correspondance exacte entre les indices visuels et la proprioception. Lorsqu'il est nécessaire d'ajouter une représentation virtuelle du corps, la correspondance spatiale et temporelle entre l'information visuelle et la proprioception doit être respectée. La notion d'avatar ou corps virtuel **colocalisé** reflète cet alignement spatio-temporel entre le visuel (virtuel) et la proprioception du membre de l'utilisateur (réel). La colocalisation joue un certain rôle dans le sentiment de présence (SLATER, USOH et STEED 1995 ; SLATER et STEED 2000) :

The relationship between presence and body movement follows from the notion that one of the most important determinants for presence is the requirement for a match between proprioception and sensory data. (Slater and Steed 2000)

De plus, la manipulation colocalisée semble demander une charge cognitive réduite du fait d'un accès plus intuitif aux objets virtuels. Il a été montré dans (MINE, BROOKS et SEQUIN 1997) que le contrôle direct d'objet été préféré et montrait de meilleures performances qu'un contrôle avec un offset.

Comme dit auparavant, la grande plasticité du cerveau et la prédominance visuelle sur les autres perceptions permettent une grande capacité d'adaptation. À titre d'exemple, l'adaptation du prisme (*Prism Adaptation*) est une adaptation sensorielle-motrice qui se produit après que le champ visuel ait été déplacé artificiellement sur le côté ou verticalement. Cette adaptation est valable en condition réelle (GROEN et WERKHOVEN 1998) comme virtuelle (BODENHEIMER, CREEM-REGEHR, STEFANUCCI et al. 2017). Elle montre les capacités de réadaptation de la boucle visuo-proprioceptive. Cependant, malgré les capacités d'adaptation qui font que l'utilisateur n'aura pas conscience des incohérences, elles peuvent avoir un impact sur le comportement et la validité écologique des observations réalisées en EV. Il a été montré que la manipulation spatiale et spatio-temporelle de la **colocalisation** pouvait changer la perception de l'espace (KOKKINARA, SLATER et LÓPEZ-MOLINER 2015).

2.1.3.3. Avatar et Interaction

Lors de l'utilisation d'un avatar (plus ou moins réaliste), la façon dont celui-ci interagit avec l'environnement n'est pas simple. Dans de nombreux EVs, il n'est pas aisé/possible d'offrir un retour de force. En l'absence de données proprioceptives, rien n'empêche l'utilisateur de déplacer son corps de telle sorte qu'il occupe l'espace réel correspondant à l'emplacement d'un objet virtuel dans la VE. Cette problématique a fait naître plusieurs méthodes d'interaction : interpénétration, *Rubber Band (RB)* et *Incremental Motion (IM)*.

La méthode la plus simple et souvent utilisée est celle de l'interpénétration. Imaginons le cas d'un utilisateur contrôlant un avatar et tentant d'atteindre une position se trouvant dans un objet virtuel statique. Dans le cas de l'interpénétration, le membre de l'avatar ne sera pas bloqué à la surface de l'objet virtuel et entrera à l'intérieur de celui-ci. Cette solution est la plus simple, car elle ne demande pas un moteur physique pour la détection des collisions. Elle a aussi l'avantage de ne pas briser la [colocalisation](#) et donc de garder une [cohérence visuo-proprioceptive \(CVP\)](#). Cependant, le fait de voir son corps virtuel traverser un objet est incompatible avec notre expérience du monde réel. SLATER et STEED (2000) ont montré que cette interpénétration peut rompre le sentiment de présence.

Par analogie au monde réel, un avatar venant en contact avec un objet statique devrait être bloqué à la surface de celui-ci. Cette solution nécessite un moteur physique pour la détection de collision. Cette méthode pose la question du conflit visuo-proprioceptif : sans dispositif de retour de force ou d'interfaces haptiques passives permettant de bloquer le mouvement, rien n'empêche l'utilisateur de poursuivre le mouvement alors que le retour visuel lui reste bloqué à la surface de l'obstacle. Le lien entre retour visuel et retour proprioceptif est alors rompu. Lorsque l'utilisateur fait le mouvement inverse (rétroaction) pour revenir dans un état cohérent plusieurs méthodes peuvent être utilisées (ZACHMANN et RETTIG 2001 ; PUSCH 2008).

La première méthode dite de « l'élastique » ou [Rubber Band \(RB\)](#) (BOTVINICK et COHEN 1998) cherche à minimiser le décalage de positions. Si on prend le cas de la main, cette méthode fonctionne comme si un élastique liait la position de la main réelle et la main visuelle/virtuelle. Lorsque la main de l'avatar entre en contact avec un objet virtuel, un élastique va s'étirer entre la position où devrait être la main et la position où la main virtuelle reste bloquée. Lors du mouvement retour, l'élastique va se détendre jusqu'au moment où le contact est annulé, la [colocalisation](#) est à nouveau effective (Figure 2.13). Cette méthode minimise la distance entre la représentation et la position réelle en gardant la représentation, en cas de contrainte avec une surface virtuelle, au plus près possible de la position réelle. Cette méthode a l'inconvénient de créer une incohérence du mouvement. En effet lors du mouvement retour, la main visuelle ne bouge pas tant que la contrainte n'est pas annulée, c'est-à-dire que le mouvement de l'utilisateur ne traduit pas un mouvement de sa représentation.

La seconde méthode appelée [Incremental Motion \(IM\)](#), cherche à maintenir la cohérence du mouvement. Elle se base notamment sur la pré-dominance du sens visuel par rapport au sens proprioceptif. Lors du mouvement retour, la représentation va suivre le mouvement (Figure 2.13). On a donc la création d'un offset entre la position réelle de la main et la position de la main visuelle (Δd sur la figure). Cette méthode présente l'inconvénient de créer des offsets dans la [colocalisation](#), qui peuvent se cumuler. Lorsque l'offset et donc la distance de ma-

nipulation deviennent trop importants, les performances d'interaction peuvent se détériorer (PALJIC, COQUILLART, BURKHARDT et al. 2002).

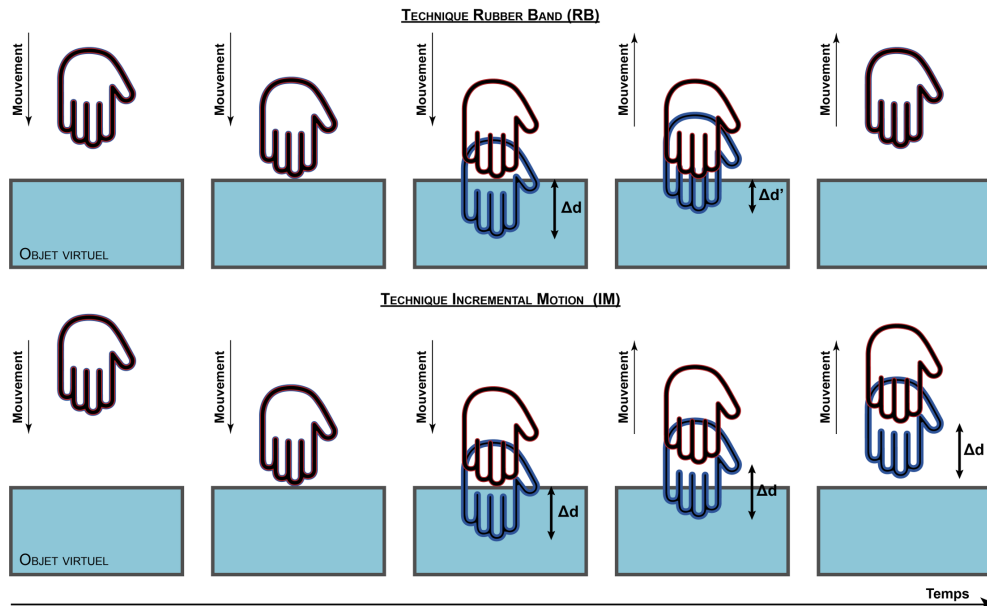


Figure 2.13. – Méthode RB et IM dans un mouvement d'introduction puis de mouvement arrière (bleu : main réel, rouge : main visuelle) (adapte de Pusch 2008)

Une technique alternative a été proposée par Burns et al., nommée *Credible Avatar Limb Motion technique (CALM)* ou *Management of Avatar Conflict By Employment of Technique Hybrid (MACBETH)* (E. BURNS, M. C. WHITTON, RAZZAQUE et al. 2005 ; E. BURNS, RAZZAQUE, M. C. WHITTON et al. 2007). Elle a également été utilisée sous le nom de *Hand Feedback Convergence process (HFC)* (PUSCH 2008). Elle se situe entre les deux méthodes précédentes (Figure 2.14). Elle est basée sur la technique IM, mais l'écart créé suite à un contact est réduit progressivement. Le but étant de minimiser l'incohérence de positionnement et de mouvement (incohérence visuo-proprioceptive) le plus rapidement, sans que l'utilisateur ne s'en aperçoive et sans que cela ne perturbe la réalisation de la tâche. Plusieurs solutions peuvent être adoptées pour rendre transparente la réduction de l'offset telles que : jouer sur la direction et la vitesse de déplacement, attendre les moments où l'attention est portée sur autre chose ou lors de la sortie du membre du champ visuel de l'utilisateur. Les comparaisons entre les trois méthodes RB, IM et MACBETH par E. BURNS, RAZZAQUE, M. C. WHITTON et al. (2007) ont montré de meilleures performances pour les modèles RB et MACBETH par rapport au modèle IM. De plus, les utilisateurs avaient une préférence et trouvaient plus naturelle l'utilisation de la méthode MACBETH pour la manipulation par rapport aux deux autres.

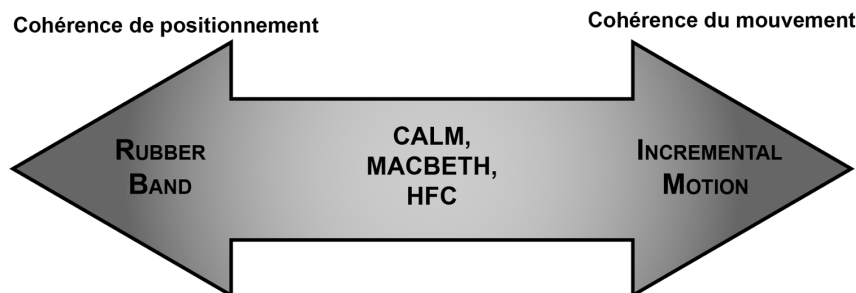


Figure 2.14. – Positionnement de la technique [CALM/MACBETH/HFC](#) par rapport aux [RB](#) et [IM](#) (adapté de Pusch 2008).

La technique consistant à ne pas bloquer les mouvements de l’avatar lors d’interaction avec des objets crée des incohérences perceptives, brisant l’immersion. Les autres techniques quant à elles créent des incohérences visuo-proprioceptives plus ou moins importantes. Nous allons revenir sur cette notion ainsi que sur le principe de conscience spatiale.

2.1.4. Conscience Spatiale et Cohérence visuo-proprioceptive

La conscience spatiale (*spatial awareness*) est la capacité d’être conscient de soi-même dans l’espace. Il s’agit d’une compétence cognitive complexe. C’est la connaissance organisée des objets par rapport à soi-même dans un espace donné. La conscience spatiale implique également la compréhension de la relation de ces objets quand il y a un changement de position. On peut donc dire que la prise de conscience des relations spatiales est la capacité de voir et de comprendre deux ou plusieurs objets les uns par rapport aux autres et à soi-même. La conscience spatiale est importante en [RV](#), notamment dans les tâches de navigation et d’accessibilité, car il est primordial d’avoir conscience de son positionnement par rapport aux objets qui nous entourent pour avoir un comportement réaliste. Une calibration spatiale peut être nécessaire dans les [EVs](#), car les propriétés de ceux-ci peuvent différer de notre expérience du monde réel. Un des problèmes connus est la perception des distances en [EV](#). Plusieurs études, notamment avec l’utilisation de casque immersif, ont trouvé une sous-estimation des distances : égo-centrique (distance absolue depuis soi) et exocentrique (distance relative entre deux objets) (WITMER et KLINE 1998; WITMER et SADOWSKI 1998; LOOMIS et KNAPP 2003; DURGIN, FOX, LEWIS et al. 2002; THOMPSON, WILLEMSSEN, GOOCH et al. 2004; KNAPP et LOOMIS 2004; WILLEMSSEN et GOOCH 2002). Il semble donc nécessaire de trouver un moyen de compenser ce problème pour réussir à

réajuster ces erreurs de perception. Le fait de ne pas avoir une perception sensorielle complète, la mauvaise estimation des distances, la présence d'un avatar remplaçant la vision de son corps... sont autant d'éléments demandant une réadaptation. Cette calibration est une étape d'ajustement au cours de laquelle la relation entre l'environnement et nous-mêmes va être reconstruite. Elle mène à une construction mentale d'un modèle spatial basé sur la perception des propriétés de l'environnement et de nos propres capacités d'action.

Nous avons mis en évidence des cas d'incohérences visuo-proprioceptives. Elles correspondent à des divergences de positionnement ou de mouvement entre l'utilisateur (proprioception) et son avatar (visuel). À l'inverse, nous définissons le concept de consistance ou **cohérence visuo-proprioceptive (CVP)** (en anglais *Visuo-Proprioceptive Consistency*). Il réfère à la cohérence spatio-temporelle entre la cinématique de l'utilisateur et celle de l'avatar. Ce concept décrit un lien bidirectionnel d'action/interaction. Dans un sens, l'avatar ou représentation virtuelle doit adopter la même posture que l'utilisateur, être **colocalisé** avec l'utilisateur. Mais en même temps, l'utilisateur doit intégrer les limitations de posture imposée par l'EV à l'avatar. L'enjeu de la **CVP** est de maintenir un conflit visuo-proprioceptif le plus faible possible, afin de garder une cohérence de mouvement et de placement par rapport à l'environnement. Pusch propose l'utilisation des conflits visuo-proprioceptifs pour créer une illusion de retour haptique (pseudo-haptique) (PUSCH 2008). Nous utilisons pour notre part le **CVP** comme un indicateur du comportement que nous souhaitons observer en simulation et non comme un outil. Les apports que nous souhaitons proposer ont pour objectif d'augmenter la conscience spatiale et la cohérence visuo-proprioceptive.

Ces deux aspects nous semblent primordiaux dans le contexte des simulations d'opération d'accessibilité ou de maintenance, ils sont nécessaires à la validité écologique des simulations.

2.2. Propositions

L'état de l'art précédent a permis de définir le contexte actuel sur lequel se basent nos travaux. Dans la partie suivante, nous présenterons les propositions de concept que nous souhaitons utiliser dans le contexte de l'utilisation de retour vibrotactile pour obtenir une compréhension spatiale et optimiser la **cohérence visuo-proprioceptive**.

2.2.1. Stimulation Vibrotactile

Nous avons imaginé deux concepts de retour sensoriel visant à fournir des informations sur l'environnement physique de l'EV. L'un offre une capacité extra-

sensorielle, il donne une information sur la proximité et s'active à l'approche d'un objet, avant qu'un contact ne se produise. Nous désignerons ce premier système par mode Radar. L'autre, substitue l'information de contact et s'active la vibration à partir du contact entre l'utilisateur/avatar et l'objet virtuel. Nous l'appellerons mode Contact.

2.2.1.1. Fonctionnement Radar

Le principe de ce type de retour sensoriel est de fournir une information d'approche d'obstacle avant que le contact entre l'environnement et l'avatar n'ait lieu. Le fonctionnement est similaire à ce qu'on retrouve dans certaines voitures avec le radar de recul. Une vibration de plus en plus intense est envoyée à l'utilisateur lorsqu'il se rapproche d'un objet. On peut présenter le fonctionnement du mode radar sous forme d'une sphère englobant le membre de l'utilisateur (par exemple le bout du doigt) (Figure 2.15). Cette sphère correspond à la zone où la détection d'objet se fait. Si la sphère rencontre un objet, l'information est alors envoyée au sujet pour informer de la proximité avec celui-ci. Cette information est transmise par retour vibrotactile. Cette vibration peut être modulée suivant la distance entre l'objet et le centre des sphères de détection. Nous proposons de moduler la vibration par son intensité : une vibration de plus en plus intense sera transmise au sujet plus l'objet sera proche.

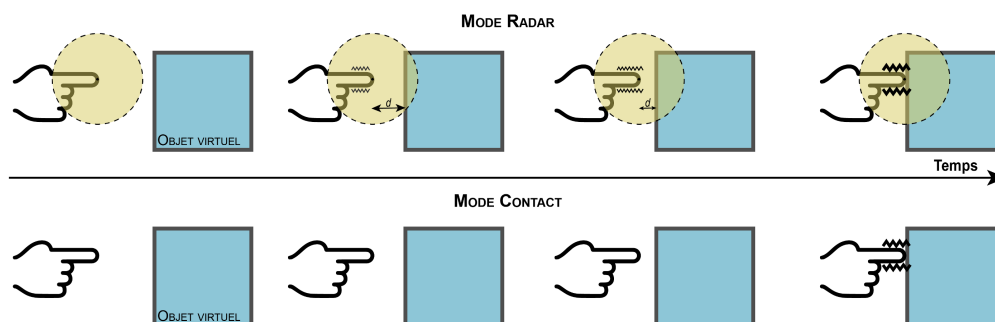


Figure 2.15. – Détail de fonctionnement des modes retour vibrotactile Radar et Contact

2.2.1.2. Fonctionnement Contact

Ce type de retour sensoriel fournit des informations lors d'un contact ou d'une pénétration avec un obstacle de l'EV. Nous proposons de moduler l'information transmise en fonction des types de contact : effleurement, pénétration. Plus l'utilisateur entre en collision avec un objet (pénètre dans l'objet virtuel), plus la vibration retournée à l'utilisateur sera grande. Pour se faire, on peut par exemple

calculer la distance entre le point de collision à la surface de l'objet et celui de l'avatar. Plus cette distance est importante plus la vibration générée sera intense. Nous proposons l'étude de ces deux systèmes pour substituer les informations proprioceptives, dans le but d'améliorer la prise de conscience des contacts et la compréhension spatiale. Le tout devrait permettre une meilleure [cohérence visuo-proprioceptive](#) et ainsi offrir des comportements comparables en terme de mouvement et de compréhension de l'environnement physique à ce qui serait le cas en condition réelle.

2.2.2. Humain Virtuel

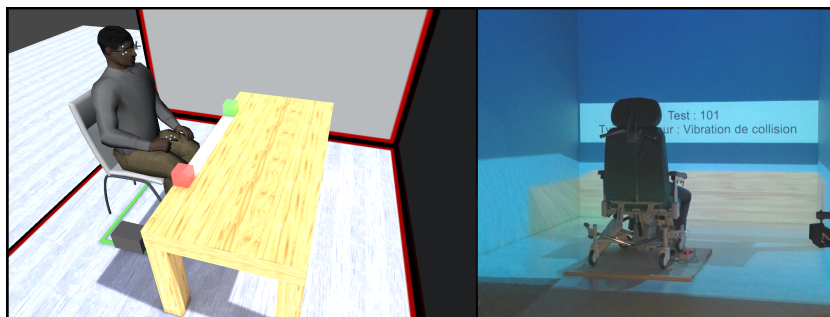
Le second aspect que nous proposons est l'usage d'avatar [colocalisé](#) dans le cas des dispositifs immersifs sans vision directe sur le corps. Cette représentation devra être contrôlée par capture de mouvements afin de répéter en temps réel les gestes de l'utilisateur. La morphologie de l'avatar respectera celle de l'utilisateur afin d'une part de respecter la cinématique des mouvements du sujet et d'autre part pour avoir une occupation identique de l'espace. Cet avatar devrait offrir une meilleure perception de l'espace en créant un référentiel pour avoir une meilleure estimation des distances et donc de l'espace, et améliorer la présence.

Au cours de ce chapitre, nous avons dans un premier temps présenté un état de l'art des éléments englobant notre sujet d'étude. Nous avons introduit la [RV](#) et apporté les définitions clés de ce domaine. Puis nous avons présenté la perception haptique en partant d'une vision générale de ce sens, pour nous concentrer ensuite sur la sensation tactile et la sensibilité aux stimuli. Nous avons poursuivi en nous focalisant plus précisément sur la sensation vibrotactile. Nous avons abordé le sujet de l'humain virtuel en lien avec la problématique de réalisme, de [colocalisation](#) et en terme d'interaction avec l'environnement. Nous avons par la suite défini la notion clé de conscience spatiale et de [CVP](#). Ce sont au sein de cette étude deux éléments fondamentaux concernant les simulations de [RV](#) vis-à-vis de la validité écologique d'étude d'accessibilité et de manutention. Ces deux éléments sont les indicateurs que nous souhaitons améliorer. Pour cela, nous avons proposé d'une part l'utilisation de retour vibrotactile pour permettre l'amélioration de la prise de conscience des collisions, pour combler l'absence de retour proprioceptif, et pour améliorer la compréhension spatiale de l'environnement, d'autre part, la présence d'une représentation du corps de l'utilisateur dans les cas où le retour direct sur le corps de l'utilisateur n'est pas disponible (cas des casques immersifs). Cette représentation nous semble essentielle pour calibrer la relation corps/environnement et ainsi permettre une bonne cohérence de comportement. Dans les chapitres suivants, nous proposerons plusieurs études expérimentales afin d'éprouver les propositions formulées.

3. Conception et Évaluation du Dispositif de Retour Vibrotactile

Table des matières

3.1	Introduction	53
3.2	Travaux connexes	54
3.3	Développement du dispositif	56
3.3.1	Prototype de dispositif retour vibrotactile	56
3.4	Hypothèses	58
3.5	Expérimentation	59
3.5.1	Matériel et méthode	59
3.5.1.1	Sujets	59
3.5.1.2	Dispositif	59
3.5.1.3	Environnement virtuel	60
3.5.1.4	Condition Expérimentale	61
3.5.1.5	Procédure	62
3.5.1.6	Données enregistrées et analysées	65
3.5.2	Résultats	66
3.5.3	Discussion	66
3.6	Conclusion	69



Dans le chapitre précédent, nous avons introduit les fondements théoriques et proposé deux modes d'utilisation du retour vibrotactile, en tant que substitut à la perception kinesthésique. Ce chapitre présentera une première approche du sujet et proposera les paradigmes d'utilisation des retours vibrotactiles pour les

études d'accessibilité et assemblage. Dans une première partie, la présentation des dispositifs vibrotactiles existants sera faite (voir section 3.2). La conception du dispositif vibrotactile répondant à nos besoins sera détaillée (section 3.3). Par la suite, les hypothèses de ce chapitre seront développées (section 3.4), elles seront ensuite testées expérimentalement (section 3.5). Pour clore ce chapitre, la conclusion et les propositions pour la suite des travaux seront présentées (voir section 3.6).

3.1. Introduction

Dans le (Chapitre 2) précédent, nous avons présenté le contexte et nous avons donné les axes de recherche que nous comptons suivre. Lors d'études d'accessibilité et de maintenance en RV, l'absence de retour haptique (kinesthésique et tactile) conduit à une perception sensorielle incomplète dès l'instant où le sujet doit interagir avec l'environnement. Nous nous sommes orientés vers l'utilisation de vibrations pour aider à compenser le problème de perception de l'espace et le manque d'information kinesthésique dont souffrent de nombreuses utilisations de la RV. Plus particulièrement, nous souhaitons compenser le manque de compréhension spatiale en EV dans le but d'obtenir un comportement de l'opérateur identique à celui observé en condition réelle. Nous avons proposé deux modes d'utilisation du retour vibrotactile dont le but est d'augmenter la présence physique, c'est-à-dire la compréhension spatiale d'un EV. Dans cette partie, nous souhaitons valider les fondements de nos recherches. Notre hypothèse générale est que le retour vibrotactile (signalant l'approche ou le contact avec l'environnement physique virtuel) contribue à la prise de conscience des collisions (« *Collision Awareness* ») de manière naturelle et participe à la perception spatiale d'un EV.

Dans la première partie, nous avons proposé deux modes de retour sensoriel. Un retour vibrotactile extrasensoriel donnant des informations sur la proximité des éléments de l'environnement (« radar ») et un mode standard traduisant les informations de contact avec l'environnement (« contact »). Nous souhaiterions dans un premier temps tester ces deux fonctionnements et connaître la contribution de chacun dans la calibration spatiale.

L'un des avantages des dispositifs vibrotactiles est leur grande versatilité. Il est possible d'adapter à chaque cas les stimulations fournies : information transmise, nombre de vibreurs utilisé, positionnement des vibreurs... . Nous souhaitons dans cette partie analyser l'impact du positionnement du retour sensoriel vibratoire sur le comportement.

Dans le but de répondre aux besoins d'étude listés ci-dessus et de nos travaux futurs, nous avons entrepris de réaliser un dispositif de retour vibrotactile. Nous détaillerons dans cette partie les éléments de sa conception.

3.2. Travaux connexes

Concernant la construction des dispositifs vibrotactiles, on distingue deux approches. La première se focalise sur la stimulation d'une petite région du corps avec une densité (nombre d'actionneurs) importante, elle prend la forme de matrice de vibreurs. On retrouve cette approche notamment dans la recherche sur la substitution sensorielle en particulier la substitution visuelle : [Tactile-Vision Substitution System \(TVSS\)](#) (BACH-Y-RITA 1972) ou les substitutions auditives/tactiles. La région du corps généralement stimulée est le dos à l'aide de matrice vibrotactile. BACH-Y-RITA (1972) et C. C. COLLINS (1970) ont utilisé des matrices à haute résolution : 400 points (matrice de 20 par 20) pour permettre une substitution visuelle/tactile (Figure 3.1). On trouve aussi des matrices de résolution réduite utilisées comme interface d'information. Par exemple, YANAGIDA, KAKITA, LINDEMAN et al. (2004) ont montré qu'une matrice 3x3 pouvait fournir une précision suffisante pour la reconnaissance de lettres et arrive à fournir des résultats de reconnaissance proches de ce qui est obtenu avec une matrice plus importante. ISRAR et POUPYREV (2011) proposent une interface composée d'une matrice 4x3 et s'appuient sur des phénomènes [psychophysiques](#) pour offrir une résolution en apparence plus importante, avec comme finalité le divertissement.

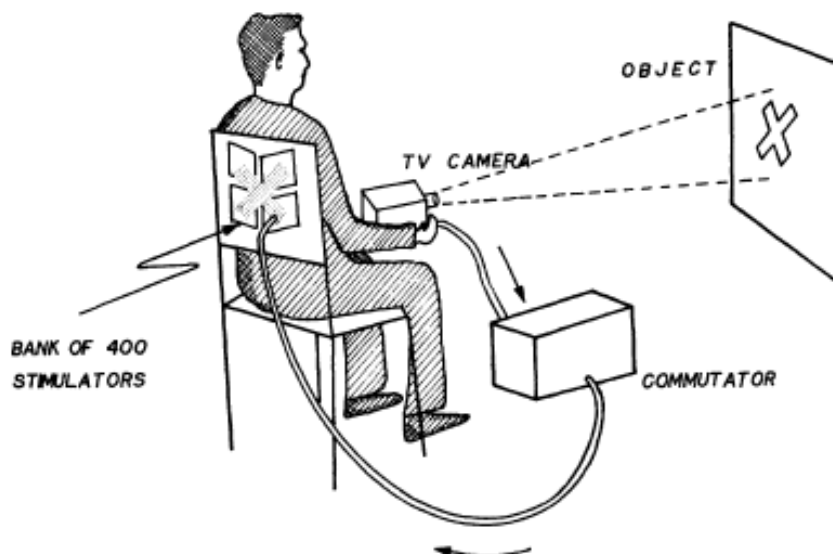


Figure 3.1. – Tactile-Television system, l'image capturé par une caméra est convertie en information tactile affiché sur une matrice de 400 points disposés dans le dos du sujet (C. C. Collins 1970).

La seconde approche cherche à tirer parti d'une plus large partie du corps en répartissant et localisant les actionneurs sur un ou plusieurs membres. On

trouve peu de systèmes commercialisés. Le gant de donnée équipé de retour vibrotactile comme le CyberTouch de Virtual Technology Inc. ([CyberTouch II 2017](#)) et le brassard VibroTac (Figure 3.2) commercialisé par Sensodrive ([SENSODRIVE 2017](#); [SCHATZLE, ENDE, WUSTHOFF et al. 2010](#)) en sont des exemples. On voit néanmoins avec la démocratisation de la RV grand public et des financements participatifs de plus en plus deancements de projets, comme récemment le projet Gloveone ([Gloveone 2017](#)) ou Hardlight VR Suit ([Hardlight VR 2017](#)). Outre ces systèmes commercialisés, plusieurs laboratoires ont développé leurs propres systèmes pour répondre à leurs besoins d'étude. Ce sont généralement des systèmes versatiles permettant des applications diverses (TactaBoard ([LINDEMAN, PAGE, YANAGIDA et al. 2004](#)), VibroTac ([SCHATZLE, ENDE, WUSTHOFF et al. 2010](#))). Ils sont basés sur un système tentaculaire ([LINDEMAN et CUTLER 2003](#)) : plusieurs modules vibrants reliés par fils à un contrôleur. On trouve cependant quelques modules indépendants et sans fil ([LINDEMAN, YANAGIDA, NOMA et al. 2005](#)). Ils peuvent ensuite prendre différentes formes suivant les applications. On trouve par exemple des systèmes de type brassard ([LINDEMAN, SIBERT, LATHAN et al. 2004](#); [SCHATZLE, ENDE, WUSTHOFF et al. 2010](#)), des vestes ([L. A. JONES, NAKAMURA et LOCKYER 2004](#); [GEMPERLE, OTA et SIEWIOREK 2001](#); [CARDIN et THALMANN 2008](#); [VAN ERP et H. VAN VEEN 2003](#)), de type ceinture ([BARROS, LINDEMAN et WARD 2011](#); [RIGHETTI, CARDIN, THALMANN et al. 2007](#)) ou sous forme d'objets instrumentés (ex chaise) ([TAN, LU et PENTLAND 1997](#); [REGENBRECHT, HAUBER, SCHOENFELDER et al. 2005](#)). Dans le chapitre précédent, nous avons présenté différents actionneurs disponibles pour la création d'une excitation vibrotactile. En général, les dispositifs vibrotactiles utilisent des vibromoteurs (moteur avec masse excentrée, identique à ceux utilisés dans les téléphones portables) pour leur facilité d'utilisation, la variété de taille existante et leur faible coût.



Figure 3.2. – VibroTac, brassard vibrotactile ([Schatzle, Ende, Wusthoff et al. 2010](#)).

Dans notre cas, la deuxième approche est plus pertinente, étant donné que nous souhaitons donner les informations tactiles localisées. Il nous semble aussi pertinent de développer un dispositif versatile. Nous avons axé nos développements sur le modèle des dispositifs généralement présenté dans les précédents

travaux : système tentaculaire, basé sur des vibromoteurs et sur un contrôleur léger. La partie suivante présentera le dispositif vibrotactile qui a été développé pour répondre à nos besoins d'études.

3.3. Développement du dispositif

3.3.1. Prototype de dispositif retour vibrotactile

Pour étudier les effets du retour vibrotactile, un prototype de stimulation vibrotactile a été réalisé. Il a été conçu en nous basant des solutions proposées dans la littérature (REGENBRECHT, HAUBER, SCHOENFELDER et al. 2005 ; LINDEMAN et CUTLER 2003 ; MARTÍNEZ, GARCÍA, M. OLIVER et al. 2014 ; GEMPERLE, OTA et SIEWIOREK 2001).

Celui-ci est basé sur un système tentaculaire et permet le contrôle d'un ou plusieurs vibreurs de type vibromoteur. Ce prototype est composé d'un microcontrôleur basé sur l'architecture Arduino (ChipKit Max32™), auquel est attaché un support (Arduino wireless proto shield) donnant la possibilité d'ajouter un module Bluetooth (Microchip RN41XVC-I/RM) permettant une connexion sans fil à un PC contrôlant à distance le dispositif (Figure 3.3). Un second module, carte fille, permet le passage des entrées/sorties du microcontrôleur vers alimentation des vibreurs (Annexe C). Ce module possède des borniers sur lesquels sont branchés les vibreurs de manière à contrôler indépendamment jusqu'à 20 vibreurs branchés. Deux alimentations rechargeables sont nécessaires pour le fonctionnement du dispositif. La première permet l'alimentation du microcontrôleur (Energizer XP2200, 2200 mAh, 5 V, micro USB), la seconde permet l'alimentation des vibreurs (deux piles NiMH en serie, 2500 mAh, 1.2 V). Les vibreurs utilisés sont des vibromoteurs cylindriques (moteur à courant continu avec une masse excentrée, 12 000 tr/min, 3 V CC, Parallax Inc. ref. 28822) protégés par une gaine en plastique (Figure 3.3) (Annexe D). Les bornes positives et négatives des vibreurs sont rallongées avec des fils électriques et branchées aux borniers de la carte fille du microcontrôleur. À une distance de 10 cm, le bruit généré par le moteur du vibreur est de 50 **décibels (dBs)** max. Le bruit généré par le vibreur était négligeable une fois installé sur les sujets.

Le microcontrôleur exécute le programme embarqué de contrôle des vibreurs. Réalisé avec le logiciel MPIDE qui permet de compiler et de charger une image d'un programme dans la mémoire du microprocesseur. Ce programme est exécuté à chaque démarrage du microcontrôleur. Le programme a pour rôle de recevoir les commandes reçues par Bluetooth, de les interpréter et d'activer les vibreurs. Les commandes sont de plusieurs natures : demande d'information, configuration, activation des vibreurs, etc. Un protocole de communication léger a été établi pour définir les commandes que peut recevoir le contrôleur (Annexe E.2). Le

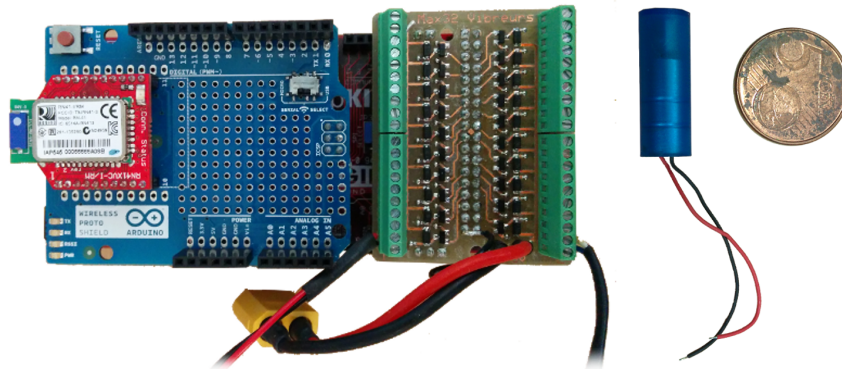


Figure 3.3. – Prototype de dispositif vibrotactile et vibreur cylindrique

système vibrotactile commande l'activation et l'intensité des vibreurs. Il n'est pas possible de contrôler indépendamment l'amplitude et la fréquence pour ces vibreurs. La modulation de l'intensité (couple amplitude et fréquence) de vibration peut être effectuée à partir de la tension par PWM. L'intensité de vibration est modulée par le contrôleur en PWM (logiciel) avec un cycle de 10 millisecondes (100 Hz). Dans sa première version, le contrôleur pouvait générer onze niveaux d'intensité différente et un mode de vibration alternatif, chaque intensité était identifiée par un nombre allant de 0 à 11 :

- 0 : aucune vibration, vibreur à l'arrêt,
- 1 : vibration continue à 10 % de l'intensité maximale du vibreur,
- 2 : vibration continue à 20 % de l'intensité maximale du vibreur,
- ...
- 10 : vibration continue à 100 % de l'intensité maximale du vibreur,
- 11 : vibration cadencée (fréquence de 2 Hz) à 100 % de sa puissance,

Le dispositif est versatile et peut s'adapter suivant les utilisations. Il peut contrôler jusqu'à 20 vibreurs branchés au bornier. En plus de la partie intégrée, il est nécessaire d'avoir une partie client dans l'application de la simulation. Un package Unity3D a été développé pour proposer une interface de communication avec le contrôleur. De plus, un logiciel client de test a été développé (en python) pour pouvoir tester le protocole et le bon fonctionnement des vibreurs (Figure 3.4).

En raison de l'utilisation d'une connexion sans fil Bluetooth entre le PC de simulation et le dispositif vibrotactile, il existe un certain délai entre le moment où l'instruction est envoyée et le moment où la vibration apparaît. OKAMOTO, KONYO, SAGA et al. (2009) ont défini que la latence devait être en dessous de 60 ms pour que l'utilisateur ne détecte pas les délais et de moins de 40 ms lors de la représentation d'une texture. Nous avons réalisé une estimation de la latence du système avec une configuration spéciale à l'aide d'une caméra vidéo 240 Hz. Le délai global a été mesuré à partir du déclenchement de l'action d'envoi de la commande (utilisation d'un bouton) via Bluetooth jusqu'à la mise en marche de la vibration. Nous avons répété 55 fois la mesure et obtenons un délai d'environ

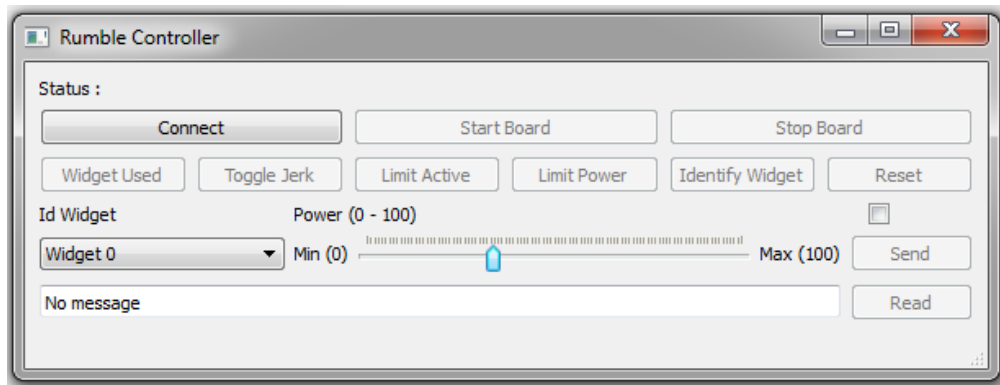


Figure 3.4. – Programme client de test de la communication avec le contrôleur vibrotactile

80 ms ($M = 80,7$ ms, $SD = 10,5$). Lors de l'utilisation de notre dispositif, le délai a été considéré comme négligeable et n'a pas été perçu par les utilisateurs.

3.4. Hypothèses

L'hypothèse principale est que le retour vibrotactile conduit à une meilleure précision des mouvements vis-à-vis de l'environnement.

L'hypothèse principale H1 aborde le rôle du retour vibrotactile dans une tâche de toucher d'objet virtuel. Conformément aux études présentées dans le chapitre précédent, nous nous attendons à ce que l'utilisation de vibrations pour fournir des informations sur l'environnement physique virtuel permette une amélioration dans le suivi de l'objet virtuel. L'objectif est de montrer que les informations vibrotactiles puissent être intégrées pour permettre le contrôle du mouvement de manière naturelle. Il est attendu une meilleure stabilité dans le suivi d'un bord d'objet virtuel.

L'hypothèse H2 vise à étudier deux paradigmes de rendus d'information spatiale avec des vibrations. Un niveau d'information extra-sensoriel (radar) devrait permettre, en raison de la plus grande quantité d'informations transmise à l'utilisateur, une meilleure compréhension de l'environnement par rapport à un retour actif seulement au contact.

Pour finir l'hypothèse H3 investigate l'influence de la localisation de la rétroaction vibrotactile par rapport à l'organe acteur de l'action. Il est attendu que la délocalisation de la rétroaction vibrotactile (c'est-à-dire que le retour tactile n'est pas généré à la position où devrait être le récepteur) devrait permettre le même niveau de précision du suivi de la trajectoire par rapport à une rétroaction localisée.

L'expérimentation visant à étudier ces questions est décrite dans la section suivante.

3.5. Expérimentation

Afin de tester les hypothèses établies dans la section précédente, une expérimentation a été conduite impliquant une tâche répétée de gestes de glisser, à la surface d'un objet. Par ailleurs, en plus des hypothèses précédemment exposées, cette expérimentation a aussi pour objectif de valider le fonctionnement du dispositif de retour vibrotactile et de tester différents paramétrages de retour vibrotactile.

3.5.1. Matériel et méthode

3.5.1.1. Sujets

Six sujets (dont une femme) ont pris part à l'expérimentation. Ils ont été choisis parmi les étudiants et membres du personnel de l'université. La répartition des âges était entre 20 et 35 ans (moyenne = 23.2, SD = 5.9). Tous les participants ont donné leur consentement écrit avant l'étude, conformément à la Déclaration d'Helsinki de 1964. L'étude a été approuvée par le [Comité de Protection des Personnes \(CPP\)](#) de l'Institut des Sciences du Mouvement.

Les sujets étaient naïfs vis-à-vis du but de l'expérimentation. Tous les sujets ont déclaré avoir une vision et un sens du toucher normaux et ils étaient exempts de tout trouble locomoteur. Leur acuité stéréoscopique a été préalablement testée en utilisant le test Randot® Graded Circles (Stereo Optical Company Inc, Chicago, IL, USA). L'[écart pupillaire](#) des sujets était mesuré. Celui-ci allait de 57.0 à 65.5 mm (moyenne = 63 ; SD = 3.1). La valeur de chaque sujet était utilisée pour ajuster le rendu stéréoscopique à celui-ci.

3.5.1.2. Dispositif

L'expérimentation a été réalisée avec le dispositif cube immersif aussi appelé [CAVE™](#) (CRUZ-NEIRA, SANDIN et DEFANTI 1993) se trouvant au [CRVM](#). Le système de visualisation est un [CAVE™](#) composé de quatre faces (frontal, côté et sol). Le système permet une visualisation stéréoscopique de l'[EV](#) à l'aide d'un système passif. Le sujet est équipé d'une paire de lunettes infitec. Un cluster de PC composé d'un PC maître (calcul physique et coordination), 8 ordinateurs esclaves (calcul du rendu des images de chaque écran) et un ordinateur pour le contrôle du système de capture de mouvements (ARTTrack®). Le logiciel de distribution

VRdistrib, développé par J.M. Pergandi au [CRVM](#), permet la synchronisation et le calcul des rendus nécessaire pour le dispositif [CAVE™](#). Le dispositif de capture de mouvements équipant le [CAVE™](#) a été utilisé. Il est constitué de huit caméras infrarouges [Advanced Realtime Tracking \(ART\)](#), permettant le suivi de constellation de marqueurs passifs. Le dispositif a été utilisé pour capturer les mouvements de la tête et du doigt du sujet (Figure 3.5). La position et l'orientation de la tête du sujet permettaient la mise à jour de l'image stéréoscopique par rapport au point de vue de celui-ci.

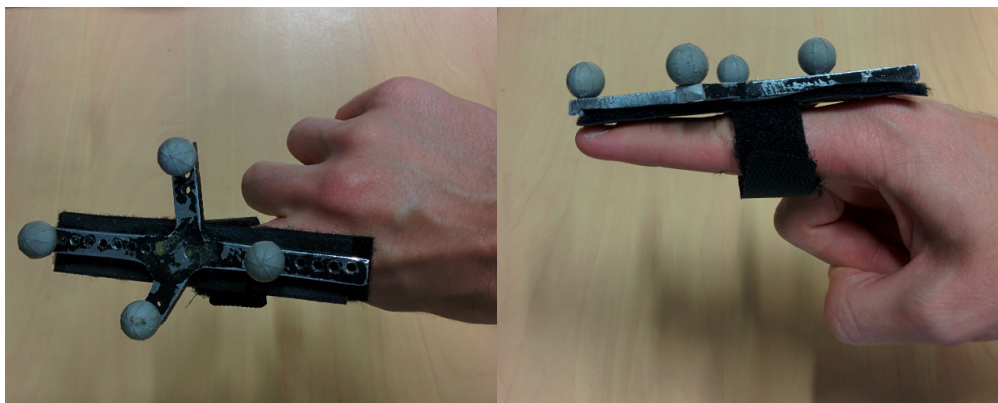


Figure 3.5. – Constellation de marqueurs passifs du système de capture de mouvements.

Le retour visuel par défaut : [EV](#), pouvait être accompagné d'un retour vibrotactile. Le dispositif vibrotactile (voir Prototypage de dispositif retour vibrotactile) permettait la génération de retour vibratoire. Le vibreur était positionné en fonction de la condition sur le doigt du sujet ou sur le dos de sa main. Aucune métaphore visuelle supplémentaire n'a été utilisée.

L'ensemble du dispositif de [RV](#) fonctionnait à une fréquence de 60 [Hz](#). L'application utilisée au cours de l'expérimentation a été développée avec le logiciel [Unity3D](#). Elle permettait le rendu graphique, le contrôle de l'expérimentation, l'enregistrement des données et les différentes actions liées au scénario.

3.5.1.3. Environnement virtuel

L'[EV](#) de l'expérimentation a été modélisé avec le logiciel de modélisation 3D Blender®. L'[EV](#) était composé d'une table couleur bois (Figure 3.7). Deux cibles, des cubes semi-transparents (de 10 cm), étaient positionnées sur le bord de la table, face au sujet. Une bande blanche d'une longueur de 80 cm était présente sur la table entre les deux cibles. Un panneau d'affichage était disposé face à l'utilisateur, derrière la table, pour permettre l'affichage de consigne avant la passation, ainsi que l'affichage du numéro de l'essai et des informations sur la

condition en cours d'utilisation pendant la passation. Une marque, un cadre vert, était affichée sur le sol pour indiquer la position où devait être placé l'utilisateur au cours de l'expérimentation (Figure 3.7). L'utilisateur était assis sur une chaise. La chaise était suffisamment reculée par rapport à la table virtuelle de sorte que les genoux ne passent pas sous la table. Cette précaution a été prise en raison d'un problème existant dans les dispositifs de type CAVE™, les objets virtuels deviennent « transparents » quand un objet réel pénètre ou est censé être derrière l'objet virtuel (par exemple la main du sujet) du fait que l'objet réel n'est pas masqué par l'objet virtuel. Ce problème compromet la présence.

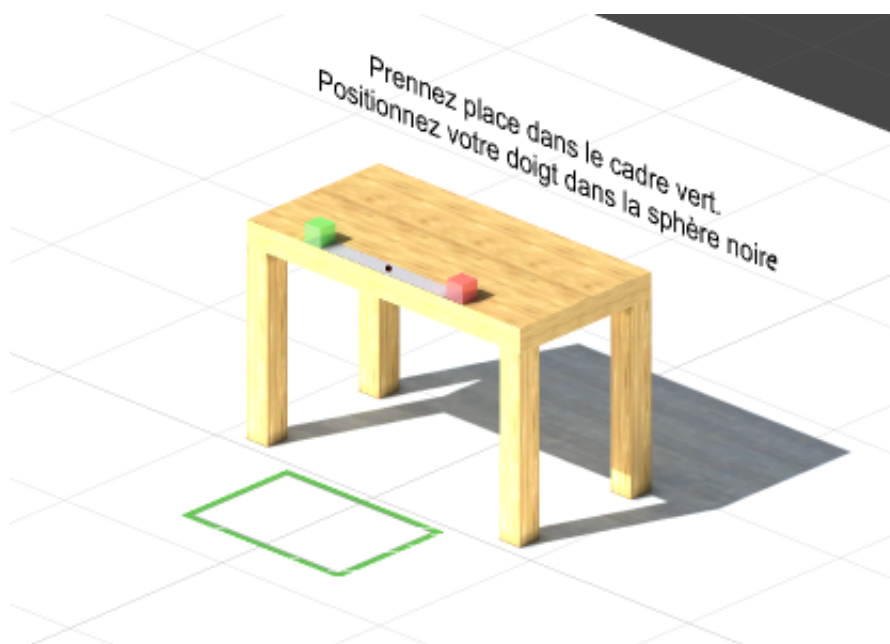


Figure 3.6. – Environnement Virtuel au commencement de l'expérimentation.

3.5.1.4. Condition Expérimentale

Deux variables indépendantes croisées étaient étudiées dans cette expérimentation. Le premier facteur était le mode de retour sensoriel. Trois modes de retour vibrotactile, plus une condition par défaut sans retour vibrotactile ont été étudiés. En ce qui concerne le fonctionnement « contact », deux versions étaient testées :

- Mode sans retour vibrotactile (visuel) : seul le retour visuel.
- Mode retour vibrotactile Radar (radar) : vibration graduée à l'approche d'un obstacle (similaire à ce qu'on retrouve dans les voitures)
- Mode retour vibrotactile Contact normal (contact-normal) : vibration seulement à partir du contact avec un obstacle, vibration continue d'intensité graduée en fonction de la pénétration dans l'obstacle, vibration cadencée lorsque l'intensité max est atteinte.

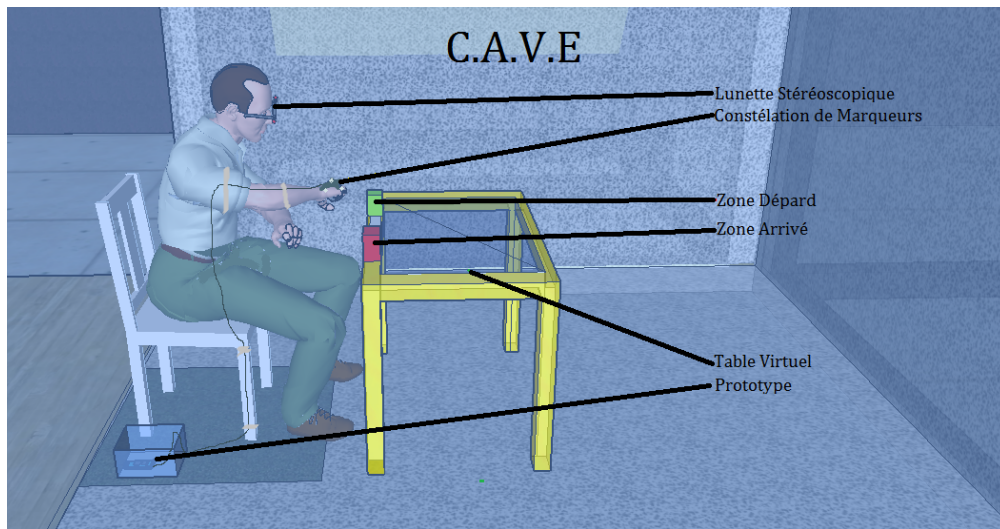


Figure 3.7. – Dispositif expérimental : Le participant est assis dans le **CAVE™** sur une chaise (réelle), face à une table virtuelle. Il porte une paire de lunettes passive stéréoscopique trackées et réalise la tâche avec sa main équipée d'un vibreur et d'un marqueur passif pour la capture de mouvements.

- Mode retour vibrotactile Contact alternatif (contact-alternatif) : vibration seulement à partir du contact avec un obstacle, vibration cadencée au moment du contact puis vibration continue d'intensité graduée en fonction de la pénétration dans l'obstacle.

Le second facteur était l'effet du positionnement du retour sur la compréhension des informations transmises. Nous avons étudié deux positions différentes sur la main de l'utilisateur : une localisée et une délocalisée. La tâche faisant intervenir le doigt, nous avons étudié un retour directement appliqué au doigt (localisé) et l'autre sur le dos de la main (délocalisé).

Les différents modes de retour vibrotactile (radar, contact-normal et contact-alternatif) étaient testés avec plusieurs sensibilités. Cette sensibilité correspond à la distance nécessaire pour passer d'un niveau de vibration à un autre :

- Faible : intervalle attribué à une intensité de vibration de 5 cm,
- Moyen : intervalle attribué à une intensité de vibration de 1 cm,
- Forte : intervalle attribué à une intensité de vibration de 0.5 cm,
- Très forte : intervalle attribué à une intensité de vibration de 0.1 cm.

3.5.1.5. Procédure

Les sujets étaient reçus dans une salle d'accueil, où l'expérimentateur lisait les instructions. Chaque sujet donnait ensuite son consentement écrit. L'acuité stéréoscopique du sujet était testée et leur **distance inter-pupillaire** était mesurée.

Le sujet était par la suite conduit dans le **CAVE™** où il était convié à s'asseoir sur un siège placé au milieu du **CAVE™**. Il était équipé d'une paire de lunettes passive Infitec (équipée d'une constellation de capture de mouvements) pour la stéréoscopie, d'une autre constellation au niveau du doigt et du dispositif vibrotactile. Une fois équipé, le sujet était immergé dans l'**EV** avec la table face à lui. Au commencement d'une session, une étape de calibration était nécessaire pour mettre en corrélation la position du doigt du sujet dans l'espace réel avec la position du doigt virtuel dans l'**EV**. Pour réaliser cette calibration, il était demandé au sujet de placer son index au niveau d'une petite sphère noire symbolisant le bout du doigt virtuel. Cette sphère était initialement immobile, positionnée sur le bord de la table et était centrée face au sujet de telle sorte qu'une fois le bout du doigt de l'utilisateur positionné dans la sphère, il ait l'impression de poser son doigt sur la table (Figure 3.6). Une fois en position, l'expérimentateur enregistrerait la calibration. La sphère suivait alors les mouvements du sujet et restait **colocalisée** avec le bout de son doigt. Il était alors demandé au sujet de réaliser des mouvements de la main afin de vérifier la bonne calibration de la sphère par rapport au doigt. Une fois cette contrainte satisfaite, la sphère disparaissait visuellement et restait invisible pour toute la suite de la session.

La session commençait avec une phase d'entraînement durant laquelle l'expérimentateur détaillait la tâche à réaliser et les différents retours. L'entraînement consistait à réaliser la tâche en testant deux fois (avec deux sensibilités différentes, pour les conditions vibrotactiles) chacune des quatre conditions de retour vibrotactile (visuel, radar, contact-normal, contact-alternatif). L'expérimentateur redonnait à chaque essai des détails sur le fonctionnement du retour vibrotactile. À la fin de l'entraînement et lorsque le sujet était prêt, la passation pouvait commencer (Figure 3.8). Le sujet pouvait demander à tout moment de faire une pause. Un essai était constitué des étapes suivantes :

- Le numéro de l'essai et le type de retour présentement utilisé étaient affichés sur l'interface se trouvant face à l'utilisateur.
- Le sujet plaçait son doigt dans le bloc de départ (vert) pour commencer l'essai.
- Le sujet réalisait le mouvement de glisser sur la table. L'enregistrement de l'essai commençait quand le sujet sortait du bloc de départ (vert) et s'achevait lorsqu'il entrait dans le bloc d'arrivée (rouge).
- À la sortie du doigt du bloc d'arrivée (rouge), les modalités de l'essai suivant étaient activées. Le numéro de l'essai et le mode de retour sensoriel pour l'essai suivant étaient mis à jour dans l'interface. Un nouvel essai pouvait alors commencer. Le sujet pouvait tester la modalité du prochain essai avant de commencer l'essai. Il était libre de faire une courte pause avant de commencer l'essai suivant afin d'éviter toute fatigue physique.

L'expérimentation était découpée, pour chaque sujet, en deux sessions, une pour chaque modalité de localisation : une session avec le vibreur attaché au doigt et une session avec le vibreur sur le dos de la main.

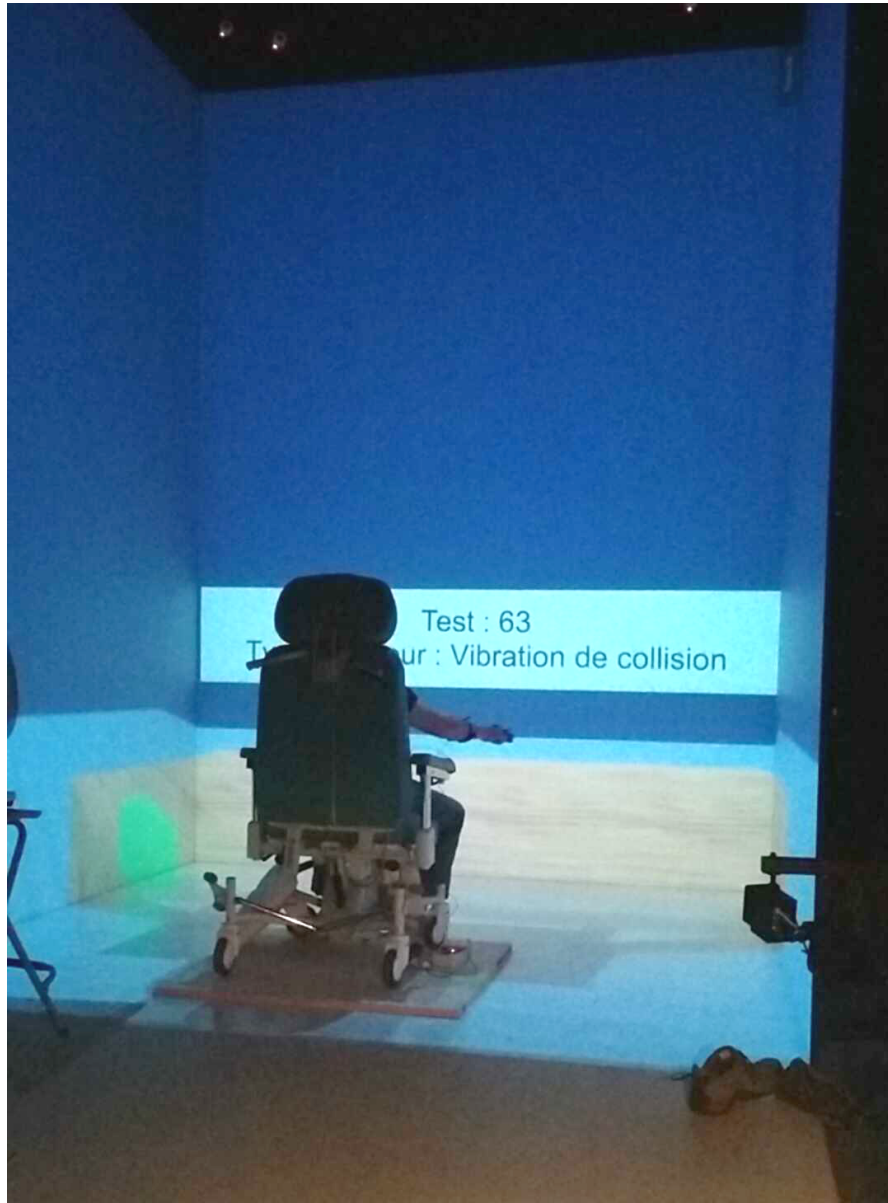


Figure 3.8. – Sujet dans le CAVE™ du CRVM en cours de passation

Au sein d'une session et pour éviter d'éventuelles confusions : tous les essais d'un même mode de retour vibrotactile étaient regroupés au sein d'un bloc d'essai. Afin de contrôler d'éventuels effets d'ordre ou de répétition (fatigue, apprentissage, etc.), les sujets étaient répartis en six groupes d'ordre de bloc de modes de retour différents :

- Groupe 1 : Visual, Contact, Radar
- Groupe 2 : Visual, Radar, Contact
- Groupe 3 : Contact, Visual, Radar
- Groupe 4 : Contact, Radar, Visual
- Groupe 5 : Radar, Visual, Contact
- Groupe 6 : Radar, Contact, Visual

Les deux versions de fonctionnement du mode contact (normal et alternatif) étaient regroupées au sein du même bloc d'essai. La condition Visual comptait dix-huit répétitions. Les conditions radar, contact-normal et contact-alternative comptaient neuf répétitions pour chacune des sensibilités. Au sein d'un bloc, l'ordre d'apparition des sensibilités (et le fonctionnement normal ou alternatif pour la modalité contact) était assigné de manière aléatoire.

3.5.1.6. Données enregistrées et analysées

Au cours de l'expérimentation, plusieurs indicateurs de comportement et événements étaient enregistrés. Ils étaient constitués des coordonnées dans l'espace [trois dimensions \(3D\)](#) du doigt virtuel du sujet (correspondant à la position de la sphère [colocalisée](#) avec le doigt du sujet) et des coordonnées de la projection du doigt virtuel sur la table à chaque pas de temps. L'intensité de vibration était aussi enregistrée.

La mesure principale sur laquelle nous nous sommes concentrés est le positionnement du doigt du sujet par rapport à la table. Nous avons plus précisément calculé le [Root Mean Square \(RMS\)](#) de l'erreur de positionnement du doigt en rapport à la surface de la table. Cet indicateur (appelé [Root Mean Square Error \(RMSE\)](#), Équation (3.1)) nous renseigne sur le comportement du sujet vis-à-vis de l'environnement physique virtuel.

$$RMSE = \sqrt{\sum_{t=1}^n (error(P_{doigt,t}, P_{table,t}))^2} \quad (3.1)$$

Avec pour fonction *error* le calcul de la distance entre la position du doigt de l'utilisateur par rapport à la position de la table à un instant t (Figure 3.9).

L'analyse a été réalisée à l'aide d'une [analyse de la variance \(ANOVA\)](#) à mesures répétées. Nous avons par la suite réalisé une analyse Post-Hoc avec ajustement de Bonferroni.

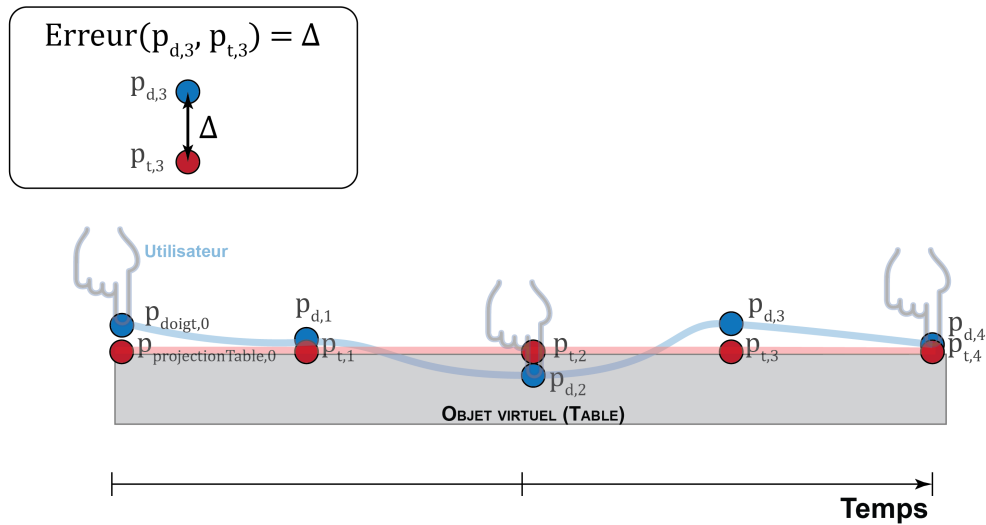


Figure 3.9. – Exemple de trajectoire du doigt de l'utilisateur (bleu) et de sa projection sur la surface de la table (rouge) pour le calcul de l'erreur de positionnement.

3.5.2. Résultats

L'**ANOVA** effectuée sur les données individuelles regroupées pour les répétitions d'essai du **RMSE** de positionnement révèle une tendance ($p=.11$) de différence de performance entre les conditions de retour et aucune différence entre les conditions de position ($p> 0,4$). Les analyses Post-Hoc (avec ajustement de Bonferroni) révèlent que le retour « visuel » a entraîné des scores significativement plus élevés ($p < 0,001$) par rapport aux modes de retour « contact » et « radar » et aucune différence entre ces derniers modes n'a été révélée (Figure 3.10).

3.5.3. Discussion

Le premier résultat observé dans l'analyse de l'erreur de positionnement (via le **RMSE**) montre un meilleur suivi de l'objet virtuel lors de la présence du retour vibrotactile par rapport au retour visuel seul. Ce premier résultat valide notre première hypothèse H1. Le retour vibrotactile permet une transmission d'informations spatiales sur l'**EV** et ainsi permet de compenser l'absence de retour haptique (proprioceptif et tactile).

Lors de l'analyse de notre indicateur principal, nous avons observé l'absence de différence entre le positionnement du vibreur localisé ou délocalisé (doigt

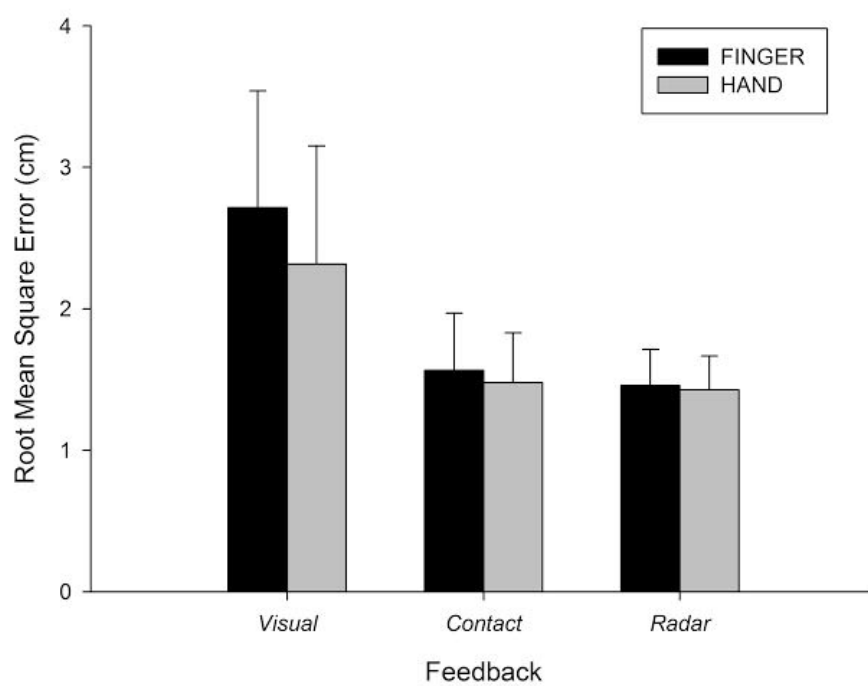


Figure 3.10. – Moyenne des [RMSE](#) (avec Écart type) en fonction du type de retour et en fonction de la position du vibreur.

ou main) ainsi que l'absence de différence entre les modes de rétroaction tactile « radar » et « contact ». Nous nous attendions cependant à de meilleurs résultats en ce qui concerne le mode radar par rapport au mode contact. En effet, le fonctionnement extrasensoriel permet la transmission d'une plus grande quantité d'informations à l'utilisateur sur l'environnement. Ce résultat remet en question l'hypothèse H2. Les informations supplémentaires fournies pour la réalisation de cette tâche ne semblent pas nécessaires. Il est possible que le mode radar soit moins naturel que le mode contact. Le retour contact se rapproche des informations de contact réel fourni par le retour tactile. Le mode radar pourrait demander une plus grande charge cognitive pour être interprété. De plus, la tâche était simple et réalisée rapidement, ce qui peut expliquer l'absence d'effet. Le mode radar pourrait nécessiter un entraînement à ce type d'information pour que l'utilisateur puisse en tirer pleinement parti.

L'absence de différence entre les conditions de localisation du retour sensoriel va dans le sens de l'hypothèse H3. On peut expliquer ce phénomène grâce au mécanisme d'association de l'information reçue. L'information perçue sur la main est associée comme étant perçue sur le doigt, car c'est le membre-acteur de l'action. La fusion des informations multimodales : visuel et tactile, joue un rôle dans ce mécanisme. Si l'on considère également l'absence de différence entre les deux paradigmes de rétroaction, ces résultats suggèrent que le retour vibrotactile agit comme un « catalyseur de prise de conscience » ou « *awareness enhancer* » dans la réalisation de la tâche, plutôt qu'une aide de positionnement de précision. Le positionnement et le fonctionnement du retour seraient des facteurs secondaires. Cependant, l'absence d'amélioration à la fois pour le retour localisé et pour le mode radar pourrait être simplement due à un effet de seuil. Cet effet pourrait être en particulier dû à la résolution du système de capture de mouvements. De plus, pour cette expérimentation, nous avons utilisé un nombre limité de modulations d'intensité du retour vibrotactile (onze niveaux d'intensité différents). L'augmentation de la discrétisation du retour tactile pourrait offrir une meilleure appréciation des distances lors de l'utilisation du mode radar.

Nous avons donc vu que le retour vibrotactile, sous les deux formes proposées, permettait une meilleure compréhension de l'environnement. Si les deux modes proposés ne se différencient pas par des performances différentes, on peut d'ores et déjà se demander s'il se prête mieux à un contexte d'utilisation. Le mode radar donne des informations globales sur l'environnement. Il permet d'amplifier la perception de l'espace. Il donne des informations de distance entre l'utilisateur et les objets proches (et potentiellement de direction lors de l'utilisation de plusieurs vibreurs). C'est donc un formidable outil pour augmenter la compréhension de l'espace virtuel et ainsi permettre à l'utilisateur de se faire une représentation mentale de l'[Environnement Virtuel](#). Cependant, ces données peuvent rapidement devenir difficiles à interpréter dans des environnements complexes et réduits. Le risque de saturation, vibration continue, dû au confinement de

l'environnement, peut conduire à une surcharge d'informations qui finirait par être ignorée, voire qui pourrait dans certains cas dégrader les performances. Ce mode radar semble plus adapté à des environnements suffisamment « aérés » pour éviter une saturation. À l'opposé, le mode contact utilise un schéma d'interaction naturel. Il tente de substituer la perception haptique en donnant des informations sur les contacts. Il permet l'amélioration de la compréhension spatiale en [EV](#) en donnant des indications de sa propre position au moment d'un contact. On peut imaginer une répartition plus répandue de vibreurs sur le corps de l'utilisateur afin de localiser les contacts. En cela, il semble mieux convenir à des conditions d'utilisation d'environnement plus complexe, réduit par rapport au mode radar.

3.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons commencé à nous intéresser à l'utilisation du retour vibrotactile comme support d'information spatiale en [EV](#). Nous avons établi trois hypothèses de base sur l'apport du vibrotactile et son fonctionnement que nous avons éprouvé au travers d'une première expérimentation.

Cette expérimentation nous a permis de tester le dispositif vibrotactile que nous avons conçu ainsi que les modes de fonctionnement que nous avons proposés. Ce premier retour d'expérience nous montre des possibilités d'amélioration du dispositif vibrotactile. Par exemple, il pourrait être intéressant de fournir une plus grande gamme d'intensité de vibrations et ainsi permettre d'avoir un rendu plus continu en ce qui concerne l'intensité.

Il a été mis en évidence, au cours de cette expérimentation, que le retour vibrotactile permettait une amélioration du suivi de l'objet virtuel. Les informations spatiales sur l'[EV](#) fournies par le retour vibrotactile ont permis l'obtention d'une meilleure stabilité dans le mouvement. Conformément au résultat attendu, la localisation de l'information ne joue pas un rôle important. Il semblerait que l'utilisateur puisse associer l'information au membre réalisant l'action grâce au mécanisme de fusion des perceptions sensorielles, mécanisme renforcé par la prédominance visuelle. Les résultats de l'expérimentation montrent aussi un apport du retour vibrotactile identique selon les deux modes de fonctionnement : radar et contact. Ces résultats semblent suggérer un apport d'information globale du retour vibrotactile, qui ne serait donc pas un outil de calibration précis. Les deux modes fournissent des niveaux d'information spatiale différents, mais conduisent à un même niveau de performance.

La tâche réalisée au cours de cette expérimentation était simple. Il faut se demander si les résultats obtenus s'appliquent dans des conditions plus proches des cas d'étude rencontrés, et notamment dans le cas où plusieurs contacts simultanés peuvent se produire. En analysant les scénarios d'étude rencontrés dans le

contexte d'assemblage et de maintenance dans un environnement industriel complexe faisant intervenir un opérateur, on distingue deux catégories : l'accessibilité jusqu'à la zone d'intervention et l'intervention. La première catégorie étudie l'accessibilité jusqu'à la zone de travail, c'est avant tout une tâche liée à la navigation, déplacement global d'une personne dans un environnement plus ou moins large. L'opération qui peut être simulée en [RV](#) permettra d'en vérifier les accès : y a-t-il suffisamment de place pour se déplacer ? La seconde catégorie est liée aux tâches d'assemblage ou de maintenance à réaliser sur un lieu d'intervention. Elle fait moins intervenir de mouvements globaux (déplacements), mais des manipulations et opérations manuelles : observation de l'état d'un composant ou de son accessibilité, opération de soudage, manutention... Il est alors question de la faisabilité d'une opération.

Nous proposons l'utilisation suivante. Dans le cadre des tâches de navigation, nous estimons que le retour vibrotactile fonctionnant avec le mode Radar est à privilégier. Ces cas d'étude sont généralement des environnements plus spacieux. Les contacts sont rares, mais une bonne représentation spatiale est nécessaire afin de bien analyser les enjeux de la tâche et avoir un comportement spatial réaliste, en fonction des propriétés de l'environnement.

Lors des tâches de manipulation et d'intervention, l'opérateur est concentré sur la tâche. La zone d'interaction concernée est généralement réduite, voire exiguë. Afin d'éviter une charge cognitive importante due à un trop grand nombre d'informations tactiles, nous proposons d'utiliser un retour vibrotactile avec le mode contact. Il permet de calibrer ces mouvements en ayant des informations spatiales sur l'environnement. Ce fonctionnement offrant un schéma d'interaction naturel ne demande pas un temps de formation important et devrait augmenter l'efficacité et la précision des interactions. De ce fait, on peut envisager une utilisation plus large de la stimulation vibrotactile : le nombre et la répartition des vibreurs peuvent être variables suivant la tâche.

Nous avons dans ce chapitre réalisé une première étude sur l'utilisation d'un retour vibrotactile dans le but de substituer des informations kinesthésiques. Nous avons au cours de cette étude testé le dispositif vibrotactile ainsi que deux paradigmes de fonctionnement. Nous avons par la suite proposé des contextes d'utilisation de ces deux modes de fonctionnement couvrant le spectre des cas d'étude rencontrés dans le cas de tâche d'accessibilité et de faisabilité lors d'opérations humaines d'assemblage et de maintenance. Les chapitres suivants auront pour objectif de mettre en pratique ces propositions. Dans le chapitre [4](#), nous étudierons le cas des tâches de navigation en [EV](#).

4. Cohérence de Comportement Spatial en Tâche de Navigation

Table des matières

4.1	Introduction	72
4.2	Travaux connexes	73
4.3	Développement du dispositif	75
4.3.1	Développement de l'avatar	75
4.4	Hypothèses	77
4.5	Expérimentation	78
4.5.1	Matériel et méthode	78
4.5.1.1	Sujets	78
4.5.1.2	Dispositif	79
4.5.1.3	Environnement virtuel	79
4.5.1.4	Conditions Expérimentales	81
4.5.1.5	Procédure	84
4.5.1.6	Tâche	86
4.5.1.7	Données enregistrées et analysées	87
4.5.2	Résultats	88
4.5.2.1	Rotation des épaules	88
4.5.2.2	Collision avec l'environnement	90
4.5.3	Discussion	90
4.6	Conclusion	92

Dans ce chapitre, nous proposons d'aborder la question du comportement d'adaptation dans le cadre d'une tâche de navigation. Nous utiliserons un avatar [colocalisé](#) et un retour vibrotactile pour tenter d'améliorer la précision des comportements spatiaux, en permettant une calibration de la relation corps/environnement. La présentation des travaux connexes spécifiques à ce chapitre sera discutée (voir section [4.2](#)) et suivie de la présentation des développements réalisés (voir section [4.3](#)). Les hypothèses centrales de ce chapitre seront formulées (voir section [4.4](#)). Une expérimentation a été réalisée dans le but d'évaluer le paradigme proposé (voir section [4.5](#)). La section [4.6](#) présentera les conclusions sur la question et proposera des pistes de futurs travaux.



4.1. Introduction

Comme nous l'avons présenté précédemment (Chapitre 3), les scénarii d'étude rencontrés dans un contexte d'assemblage et de maintenance dans un environnement industriel complexe peuvent être séparés en deux catégories. Dans la première, nous plaçons les cas d'étude de navigation dans un environnement (pouvant aller de l'échelle d'une pièce à celle d'un bâtiment). Dans ces cas, la question qui se pose est avant tout de savoir si un opérateur est dans la capacité de se rendre jusqu'au lieu d'opération. La deuxième catégorie regroupe les scénarii d'opération en tant que tels, une fois l'opérateur arrivé sur le lieu d'intervention. L'aspect étudié est la faisabilité de la réalisation d'une tâche précise (établissement d'un diagnostic, manutention, assemblage...). Dans ce chapitre, nous nous intéresserons plus particulièrement à la première catégorie. Nous aborderons la question des études de navigation en EV en nous intéressant à la validité écologique des comportements observés.

La question évidente qui se pose lors de l'utilisation des EVs pour étudier des comportements humains est de savoir dans quelle mesure le comportement observé en EV est comparable à celui rencontré en condition réelle. Quelle est la validité écologique des EVs ? Il a notamment été observé que la perception des distances en EV souffrait d'une sous-estimation (LOOMIS et KNAPP 2003 ; WILLEMSSEN et GOOCH 2002). Une mauvaise estimation des distances implique une représentation mentale spatiale de l'environnement faussée, pouvant générer des comportements inappropriés par rapport à la réalité.

Dans l'étude, présentée en Chapitre 3, nous avons investigué l'effet d'une stimulation vibrotactile lors de l'interaction avec un objet virtuel et nous nous sommes demandés si celle-ci pouvait agir comme un substitut de stimulation proprioceptive (voir aussi BLOOMFIELD et BADLER 2008 ; LINDEMAN, PAGE, YANAGIDA et al. 2004). Notre hypothèse est que le retour vibrotactile (signalant l'approche ou le contact avec l'environnement physique virtuel) améliore la prise de

conscience des collisions potentielles (« *Collision Awareness* ») et la perception spatiale de manière générale. Nous supposons que son utilisation peut permettre une meilleure calibration spatiale dans une tâche de navigation. Par calibration spatiale, nous désignons le processus d'ajustement de la relation entre l'environnement et nous-mêmes. Elle se base sur une construction mentale d'un modèle spatial lié à la perception des propriétés de l'environnement et de nos propres propriétés corporelles.

Nous avons proposé deux modes : un retour vibrotactile extrasensoriel fournissant des informations sur la proximité des éléments de l'environnement (« radar ») et un mode standard fournissant des informations de contact avec l'environnement (« contact »). Dans le chapitre précédent, ces deux modes de fonctionnement ont montré des contributions équivalentes dans la calibration spatiale de l'utilisateur. Nous avons suggéré des contextes d'utilisation qui nous paraissent les plus adaptés pour chacun des retours sensoriels. L'utilisation du mode « radar » nous semble plus pertinent dans les environnements ouverts et peu encombrés dans lesquels l'utilisateur doit effectuer une navigation. Tandis que nous pensons privilégier l'utilisation du fonctionnement « contact » à des environnements confinés, dans lesquels l'utilisateur doit effectuer une opération précise.

Dans un dispositif immersif de type [CAVE™](#), comme celui utilisé dans l'étude précédente (Chapitre 3), le sujet a une vision directe de son propre corps. Cependant, lorsque le sujet s'approche d'un objet virtuel (et encore plus lorsqu'il passe à travers), l'objet a tendance à paraître transparent. Alors que la main de l'utilisateur devrait être cachée par l'objet, celle-ci reste visible, comme si l'objet était transparent. Ce phénomène a pour conséquence de rompre le sentiment de présence. Lors de l'utilisation d'un casque immersif, l'utilisateur perd la vision directe sur son corps. Cet équipement offre donc la possibilité d'étudier la question du rôle de la perception de son propre corps (ou d'une réplique virtuelle de celui-ci) dans l'ajustement du comportement vis-à-vis des propriétés de l'environnement. De plus, avec l'utilisation d'un avatar, le phénomène de transparence observé dans le [CAVE™](#) disparaît. Nous choisissons donc ici de tirer parti des possibilités d'étude sur la représentation corporelle qu'offrent les casques immersifs. Notre hypothèse est que lors de l'utilisation de casques immersifs, la présence d'une représentation de soi (visuel et [colocalisé](#)) a une influence dans le mécanisme de calibration perceptuelle de la relation corps/environnement.

4.2. Travaux connexes

Le concept d'affordance décrit les possibilités d'action offertes par un objet ou une situation (GIBSON 2014). Ces possibilités d'action sont déterminées à la fois par les propriétés de l'environnement (objet) et par les propriétés d'action de

l'utilisateur. Par exemple, un objet offre la possibilité d'être attrapé (affordance offerte par l'objet) si sa taille, sa forme et sa composition, etc. sont compatibles avec la morphologie du membre préhensile de la personne. Un autre exemple présenté par WARREN et WHANG (1987) est qu'une ouverture a comme affordance le passage de celle-ci si l'ouverture est suffisamment large vis-à-vis des dimensions de l'organisme.

Warren propose qu'une affordance soit déterminée par la bonne relation des propriétés de l'environnement et de l'organisme (ou acteur). Celle-ci peut être caractérisée par un point optimal où l'action est alors la plus confortable ou efficace. Il existe aussi un seuil critique où apparaît une phase de transition vers une nouvelle action. Ceci implique que pour percevoir une affordance, c'est-à-dire les actions possibles dans une situation/objet donnée, il est nécessaire de pouvoir percevoir la relation existant entre l'environnement et nous-même. Dans le cas d'une tâche de navigation à travers une ouverture, Warren propose d'étudier la relation entre la largeur de l'ouverture A (propriété de l'environnement) et la largeur d'épaules S (propriété propre à l'acteur) (ratio A/S). Le fait de pouvoir juger de la possibilité de passer par l'ouverture réside donc dans notre capacité à percevoir la relation corps/environnement, ici définie par la largeur de l'ouverture par rapport à la perception de notre propre « largeur » (d'épaule en l'occurrence).

Dans une étude réalisée par LEPECQ, BRINGOUX, PERGANDI et al. (2009), il a été suggéré qu'un comportement d'ajustement aux caractéristiques de l'environnement était un indicateur de présence en EV. Cette étude basée sur le protocole expérimental proposé par WARREN et WHANG (1987) étudiait le comportement d'un sujet lors de la traversée d'une ouverture de porte (de largeur variable) en marchant. Dans cette affordance, les sujets montraient un comportement transitoire entre une marche frontale (lorsque l'ouverture était importante) vers une rotation du corps et une marche latérale (pour les ouvertures plus étroites). Le seuil critique de ce comportement transitoire advenait lorsque $A/S = 1,3$. Le même comportement d'ajustement et le même seuil ont été observés en EV dans un dispositif CAVE™ par LEPECQ, BRINGOUX, PERGANDI et al. (2009) qu'auparavant par WARREN et WHANG (1987) en condition réelle.

La compréhension spatiale est un critère important dans la perception des affordances. Il est donc nécessaire que la calibration spatiale se déclenche. Comme nous l'avons noté précédemment (voir Chapitre 2.1.3), la vision de son corps semble jouer un rôle important dans les tâches spatiales. Par exemple, il a été montré que la vision de la main est essentielle dans les mouvements de pointage (PAILLARD 1996). Du reste, il a été mis en évidence que la taille du corps virtuel pouvait influencer la perception de la taille des objets de l'EV (LINKENAUER, LEYERER, BÜLTHOFF et al. 2013). Cette représentation semble donc intervenir dans le processus de calibration spatiale. Nous proposons donc d'étudier l'impact de la présence d'un avatar sur ce mécanisme de réajustement.

Par ailleurs, il a été montré que les modalités proprioceptives et tactiles jouent un rôle important dans la construction mentale d'un modèle spatial (BERTHOZ 2000). L'absence de modalité haptique pourrait porter atteinte à la performance de la calibration spatiale. LINDEMAN, PAGE, YANAGIDA et al. (2004) notent, en parlant d'utilisateurs s'entraînant en RV à l'exploration de bâtiment (contexte militaire) :

[...] users found it difficult to maintain an adequate sense of where their body was in relation to the environment and hence often bumped into, or became hung up on, immovable objects.

On retrouve là cette problématique de mauvaise appréciation de la relation entre notre corps et l'environnement. Sans en étudier les tenants et aboutissants, LINDEMAN, PAGE, YANAGIDA et al. (2004) ont l'intuition d'utiliser le retour vibrotactile pour résoudre ce problème dans leur cas d'utilisation pratique. L'utilisation d'indices vibrotactiles pour substituer une partie des perceptions haptiques manquantes pour des tâches de navigation, a fait l'objet de plusieurs études. Elles s'orientent vers le concept de « collision awareness » c'est-à-dire la (prise de) conscience des collisions. Par exemple, RYU et G. J. KIM (2004) et YANO, OGI et HIROSE (1998) ont utilisé un dispositif vibrotactile sur l'ensemble du corps pour informer l'utilisateur des collisions au cours de la navigation à travers un corridor. Cependant, ces études s'orientent vers l'amélioration du sentiment de présence sans considérer la calibration spatiale. Nous pensons que l'effet du vibrotactile dans le contexte de *collision awareness* n'a pas seulement un impact sur la présence, mais qu'il peut également dynamiser le processus de calibration spatiale. Nous avons proposé l'usage d'un retour vibrotactile fonctionnant comme un radar pour les tâches de navigation et nous pensons qu'il pourrait avoir un impact sur la calibration de la perception corps/environnement. FERSCHA, EMMENHUBER, RIENER et al. (2008) abordent une problématique comparable dans le cadre de la sécurité des travailleurs dans la construction en environnement réel. Ils proposent l'utilisation d'une ceinture vibrotactile permettant d'amplifier ou de réajuster la perception de l'espace. Pour cela, la ceinture donne des informations sur la direction et la distance d'objets se trouvant à proximité de l'utilisateur. Nous proposons une démarche similaire dans le cadre d'un EV.

4.3. Développement du dispositif

4.3.1. Développement de l'avatar

L'objectif de l'avatar, en particulier dans les dispositifs immersifs (masquant la vue directe sur son corps), est de venir compenser cette absence par une représentation virtuelle. Si l'on a pu considérer que le réalisme graphique était un paramètre secondaire dans l'identification du corps réel à un corps virtuel (voir

Chapitre 2), le réalisme dans les mouvements et notamment la fidélité de la boucle action-réaction semble être la clé de l'identification. Pour les besoins d'expérimentation, nous avons mis en place un algorithme d'animation d'un avatar en temps réel, basé sur les données du système de capture de mouvements. L'algorithme est principalement basé sur les données d'orientation de constellations de capteurs. Chaque segment du squelette de l'avatar (l'enveloppe graphique est attachée à ce squelette) est associé au trièdre d'une constellation. Les segments de l'avatar sont orientés selon l'orientation des marqueurs associés auxquels est ajouté un offset. Cette offset correspond à l'écart de l'orientation initiale entre l'orientation des segments et l'orientation de l'utilisateur. Une étape de calibration est nécessaire pour déterminer ces offsets. Elle est réalisée en demandant à l'utilisateur de se mettre dans la même position que l'avatar. L'écart (rotation) pour chaque paire de segments est enregistré puis utilisé pour animer l'avatar. L'avatar est initialement positionné en pose en « T » : position debout avec les bras tendus sur le côté perpendiculairement au corps (Figure 4.1). Pour le bon fonctionnement de l'algorithme, l'avatar doit être construit de telle sorte que les référentiels de chaque segment soient bien les mêmes que le référentiel initial du système de capture de mouvements.

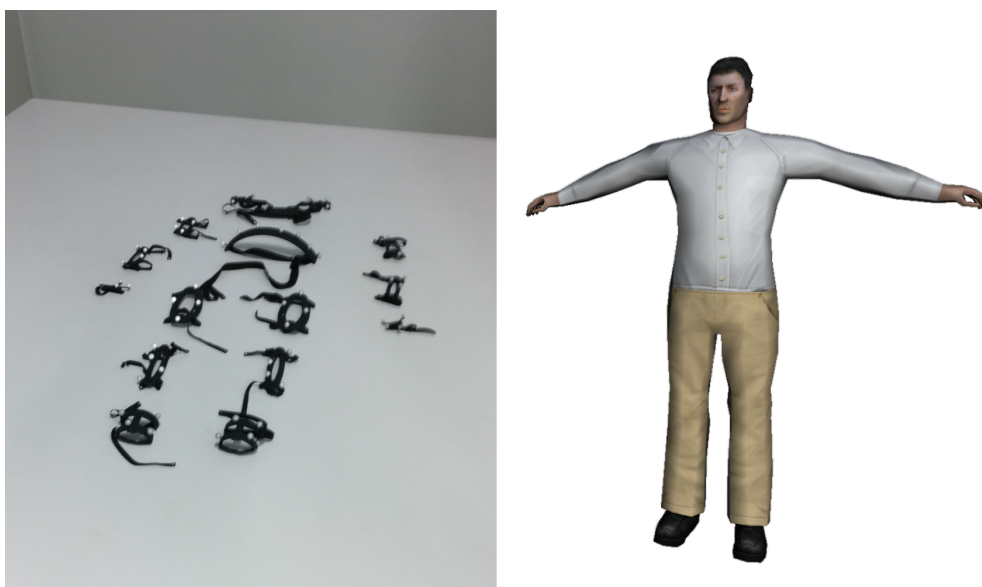


Figure 4.1. – Gauche, combinaison de constellation de captures de mouvement. Droite, avatar en position en initial : en « T ».

Cet algorithme n'étant pas basé sur un modèle biomécanique, il peut être sujet à des instabilités, par exemple lors d'une perte momentanée de capture de mouvements. Lorsqu'une constellation du dispositif de capture de mouvements n'est plus reconnue par les caméras de capture (obstruction d'une constellation par une autre partie du corps de l'utilisateur), le logiciel de capture de mouvements utilise alors la dernière position connue. Il en résulte que le membre du

mannequin lié à cette constellation reste figé dans la dernière position. Ce genre de situation reste exceptionnel lorsque l'environnement de capture de mouvements est bien défini. L'algorithme a l'avantage d'être léger et permet le rendu en temps réel sans délai perceptible. Aucun mécanisme d'interaction physique entre l'avatar et l'environnement n'a été mis en place. Il en résulte que l'avatar pouvait pénétrer les objets de l'environnement s'il tentait de passer à travers (voir Chapitre 2.1.3.3).

4.4. Hypothèses

Nous posons tout d'abord une hypothèse générale H1. Il est attendu que le comportement d'ajustement aux caractéristiques de l'environnement d'un utilisateur dans une situation d'affordance, lors de l'utilisation d'un casque immersif, soit comparable à celui pouvant être observé avec d'autres moyens d'immersion, tel que le CAVE™ et que celui observé en condition naturelle. Pour effectuer ces comparaisons, nous souhaitons comparer le seuil critique d'observation d'un comportement d'affordance.

L'hypothèse H2 se concentre sur l'influence de la représentation de soi en environnement immersif. L'hypothèse est qu'avec l'utilisation d'un casque immersif, la présence d'une représentation de soi (visuel et colocalisé) favorise la calibration perceptuelle de la relation corps/environnement. La mise à jour continue des positions des segments de corps crée un cadre de référence égocentrique, permettant d'étalonner un référentiel moteur spatial. Le problème de perception de profondeur visuelle peut être éliminé grâce à l'interaction des membres de l'utilisateur avec l'environnement. Par exemple, la possibilité de déterminer la proximité des objets proches en se basant sur la connaissance anthropométrique de la longueur de son bras permet l'acquisition de la conscience de distance. Une bonne perception de cette relation est nécessaire pour adopter un comportement adéquat face à une affordance.

L'hypothèse H3 concerne l'augmentation de la conscience spatiale via la stimulation vibrotactile. L'hypothèse est que le retour vibrotactile (signalant l'approche ou le contact avec l'environnement physique virtuel « radar ») permet une amélioration de la prise de conscience des collisions/contacts (« Collision awareness ») et la perception spatiale de manière générale. En effet, la perception visuelle de son entourage spatial peut être couplée à des indices tactiles qui aident au développement d'une référence spatiale calibrée, augmentant ainsi la conscience spatiale. Ainsi le retour vibrotactile pourrait jouer un rôle de catalyseur de la calibration perceptuelle de la relation corps/environnement.

En accord avec les hypothèses H2 et H3, il est attendu que l'aspect multimodal visuel et tactile offert par l'avatar et le retour vibrotactile permet une améliora-

tion générale de la représentation de soi dans l'espace et du comportement vis-à-vis de l'environnement. L'expérimentation qui a été développée afin d'étudier ces questions est décrite dans la section suivante. Elle est basée sur l'expérimentation développée de (LEPECQ, BRINGOUX, PERGANDI et al. (2009) elle-même basé sur les travaux présentés par (WARREN et WHANG (1987)).

4.5. Expérimentation

4.5.1. Matériel et méthode

4.5.1.1. Sujets

Vingt sujets mâles ont pris part à l'expérimentation. Ils ont été choisis parmi les étudiants et membres du personnel de l'université. La répartition des âges était entre 20 et 39 ans (moyenne = 24.15, SD = 5.1). Tous les participants ont donné leur consentement écrit avant l'étude, conformément à la Déclaration d'Helsinki de 1964. L'étude a été approuvée par le Comité de protection des personnes (CPP) de l'Institut des Sciences du Mouvement. La logique derrière le choix de sujets mâles uniquement est la même que dans celle présentée par LEPECQ, BRINGOUX, PERGANDI et al. (2009), qui est uniquement une raison morphologique :

In males, the body rotation while walking through an aperture is known to depend upon the shoulder width, i.e., the widest frontal body dimension. In females, the same behavior is potentially more complex since it could depend not only on the shoulder width but also on the bust size. (citation de LEPECQ, BRINGOUX, PERGANDI et al. 2009).

Les sujets étaient naïfs vis-à-vis du but de l'expérimentation. Tous les sujets ont déclaré avoir une vision et un sens du toucher normaux et ils étaient exempts de tout trouble moteur. Leur acuité stéréoscopique a été testée en utilisant le test Randot® Graded Circles (Stereo Optical Company Inc, Chicago, IL, USA). L'écart pupillaire de chaque sujet a été mesuré en utilisant le logiciel utilitaire de configuration de l'Oculus Rift. Leur distance inter-pupillaire allait de 61.4 à 67.8 mm (moyenne = 64.1 ; SD = 1.4). La valeur était utilisée pour ajuster le rendu stéréoscopique aux sujets. Les sujets n'étaient pas sélectionnés en fonction de leur taille. Leur taille d'épaule allait de 42.5 à 51 cm (moyenne = 45.9 ; SD = 2.2) et leur taille variait entre 168 et 185 cm (moyenne = 177.1 ; SD = 5.1).

4.5.1.2. Dispositif

L'expérimentation a été réalisée dans un espace de 3 x 3m, correspondant à l'intérieur du CAVE™ du CRVM. Le dispositif de projection vidéographique du CAVE™ n'était pas utilisé, seul l'espace qu'il définit était utilisé. Les sujets étaient équipés d'un casque immersif Oculus Rift DK2. Ce casque HMD permet une vision stéréoscopique 3D d'un EV. Il possède une résolution de 960×1080 pixels par œil. La capture des mouvements du casque est réalisée par un ensemble de gyroscope, accéléromètre et magnétomètre intégrés. Le casque était connecté par câble à l'ordinateur, qui exécutait l'application de l'expérimentation. Lors de l'expérimentation, le sujet pouvait se déplacer librement dans la zone définie par le CAVE™. Pour diminuer d'éventuelles gênes dans les déplacements de l'utilisateur, le câble du casque arrivait par-dessus avec suffisamment de mou pour ne pas être en tension (voir Figure 4.2). Le dispositif de capture de mouvements (ARTTrack®) équipant le CAVE™ était utilisé. Il est constitué de huit caméras infrarouges, permettant une reconnaissance de marqueurs passifs. Le dispositif permettait de capturer les mouvements de translation et de rotation du sujet. En particulier, la position de la tête du sujet était utilisée pour calculer l'image stéréoscopique par rapport au point de vue du sujet (pour cela, une configuration de marqueurs a été placée sur le HMD du sujet, voir Figure 4.2). Par ailleurs, le système ART était utilisé pour capturer la position de l'ensemble du corps du sujet. Un ensemble de quinze constellations de marqueurs passifs était placé sur le corps du sujet (les pieds, les jambes, les cuisses, la taille, les mains, les bras, les avant-bras et les épaules). Les mouvements du sujet enregistré pouvaient être connectés en temps réel à la représentation virtuelle (avatar/humain virtuel) co-localisée de son corps (voir Figure 4.6).

Le retour visuel (EV et l'éventuelle représentation de soi, sous forme d'avatar) pouvait être accompagné d'un retour vibrotactile. Le dispositif vibrotactile précédemment développé (Chapitre 3.3) contrôlait deux vibreurs. Ils étaient positionnés au niveau des épaules du sujet (voir Figure 4.2, Figure 4.4). Aucune métaphore visuelle supplémentaire n'a été utilisée.

L'ensemble du dispositif de RV fonctionnait à 60 Hz. Il était contrôlé par un PC équipé d'un système de son multicanal 5.1 pour un rendu spatialisé du son (bruit de glissement de la porte lors de son ouverture/fermeture). L'application servant à l'expérimentation a été développée avec le logiciel Unity3D. Elle permettait le rendu graphique, le contrôle de l'expérimentation, l'enregistrement des données et les différentes actions liées au scénario.

4.5.1.3. Environnement virtuel

L'Environnement Virtuel a été modélisé avec le logiciel de modélisation 3D (3DSmax®) par l'équipe du CRVM, puis importé dans le logiciel Unity3D où le



Figure 4.2. – Un sujet dans le dispositif expérimental. Il porte le [HMD](#), équipé d'une constellation [ART](#) pour le suivi des mouvements de translation de la tête. Il porte également un ensemble de marqueurs [ART](#) pour la capture de l'ensemble des mouvements du corps.

contrôle du scénario expérimental a été mis en place. L'EV était composé d'un petit couloir, fermé d'un côté par un grillage et ouvert vers un hangar de l'autre (Figure 4.3). Différents objets étaient disposés derrière la clôture et dans le hangar, afin de fournir des indices de profondeur statiques et dynamiques. La taille du couloir accessible était de 3 mètres de long et de large. Cette taille correspond à l'espace réel dans le CAVE™. Une porte coulissante était disposée au milieu du couloir. La correspondance de la taille entre l'EV et l'espace physique (réel) a été conçue pour permettre une marche réelle du sujet dans l'expérimentation. Ce moyen permet d'éviter l'utilisation d'interfaces de locomotion, réduisant l'apparition de mal de simulation, en plus de favoriser la présence (LEPECQ, BRINGOUX, PERGANDI et al. 2009).

La porte coulissante était composée de deux battants mobiles (hauteur = 250 cm, épaisseur = 20 cm). Elle pouvait être ouverte et refermée par translation latérale. Cinq ouvertures de porte différentes ont été utilisées, allant de 40 cm à 80 cm, avec des pas de 10 cm (40, 50, 60, 70, 80 cm). Un son de glissement de porte métallique spatialisé était associé à la fermeture et ouverture des battants de la porte. Deux disques gris foncés étaient placés sur le sol virtuel, à 1 m de chaque côté de la porte. Ces disques servaient à indiquer les points de départ et d'arrivée de la tâche.

4.5.1.4. Conditions Expérimentales

L'expérimentation était composée de deux variables indépendantes croisées. La première était le type de retour sensoriel. Les retours sensoriels possibles étaient : visuel seulement ou augmenté de retour vibrotactile. Le retour vibrotactile fonctionnait comme un radar (similaire à ce qu'on retrouve dans les voitures). Lorsque l'une des épaules du sujet approchait d'un objet virtuel (ici les battants de la porte), une vibration discontinue était transmise par le vibreur positionné sur cette épaule. Plus l'épaule du sujet s'approchait de l'objet, plus l'intensité de la vibration était importante. Lorsque l'épaule venait en contact (collision) avec la porte, une vibration continue était alors générée avec l'intensité maximale du vibreur. La zone d'effet du radar correspond à une sphère de 10 cm de rayon. Elle était située sur chaque épaule (voir Figure 4.4, Figure 4.2). Cette taille a été choisie, car correspond environ à la distance minimale de sécurité que les sujets adoptent dans LEPECQ, BRINGOUX, PERGANDI et al. (2009). La proximité d'objets des épaules du sujet et les contacts/collisions étaient détectés par le système de détection de collision du moteur physique Unity3D. La détection des collisions était réalisée entre l'épaule et le bras de l'avatar avec l'environnement. Le système de détection et d'enregistrement des collisions était toujours actif que la condition expérimentale soit avec ou sans le retour vibrotactile. Toutes les collisions et toutes les détections du radar étaient enregistrées au cours de l'expérimentation. Le niveau d'intensité du retour vibrotactile était lui aussi enregistré.



Figure 4.3. – Vue globale de l'[EV](#) : couloir avec une porte au milieu. Le bout du couloir s'ouvre d'un cote sur un hangar (haut) et de l'autre un grillage (bas).

La valeur enregistrée allait de 0 à 11 : « 0 » correspondant à aucune détection (distance entre les épaules et la porte supérieures à 10 cm) et les valeurs de « 1 » à « 10 » correspondant aux différents niveaux d'intensité de vibration du mode radar et « 11 » correspondant à un contact.



Figure 4.4. – L'enregistrement des mouvements du corps est utilisé pour animer un avatar *colocalisé* (la tête de l'avatar n'était pas représentée pendant l'expérience). Les centres des sphères sur chaque épaule correspondent à la position des vibreurs sur le sujet. Leur taille représente la zone dans laquelle la détection de proximité avec l'environnement et l'activation des vibreurs était effectuée.

La seconde condition expérimentale était la présence ou non de la représentation du corps virtuel du sujet. La représentation du corps était réalisée par un avatar, dont les dimensions : hauteur et largeur d'épaules étaient adaptées à celles du sujet. L'avatar était *colocalisé* et reproduisait les mouvements de l'utilisateur en temps réel. Comme pour la détection utilisée pour le retour sensoriel, l'avatar était toujours actif et animé suivant les mouvements du sujet. Cependant, suivant la condition de rendu de l'avatar, il pouvait être visible ou non. Lorsque l'avatar n'était pas présent, l'utilisateur ne pouvait pas voir son corps, il avait l'impression de flotter dans les airs (Figure 4.5). L'avatar n'avait pas de mécanisme d'interaction physique avec l'environnement. Il pouvait entrer en interpénétration avec les objets de l'environnement. Le choix de laisser cette pos-

sibilité a été fait, car nous souhaitons une [colocalisation](#) permanente de l'avatar afin d'étudier l'effet du retour visuel de la représentation de soi et non les conflits visuo-proprioceptifs.

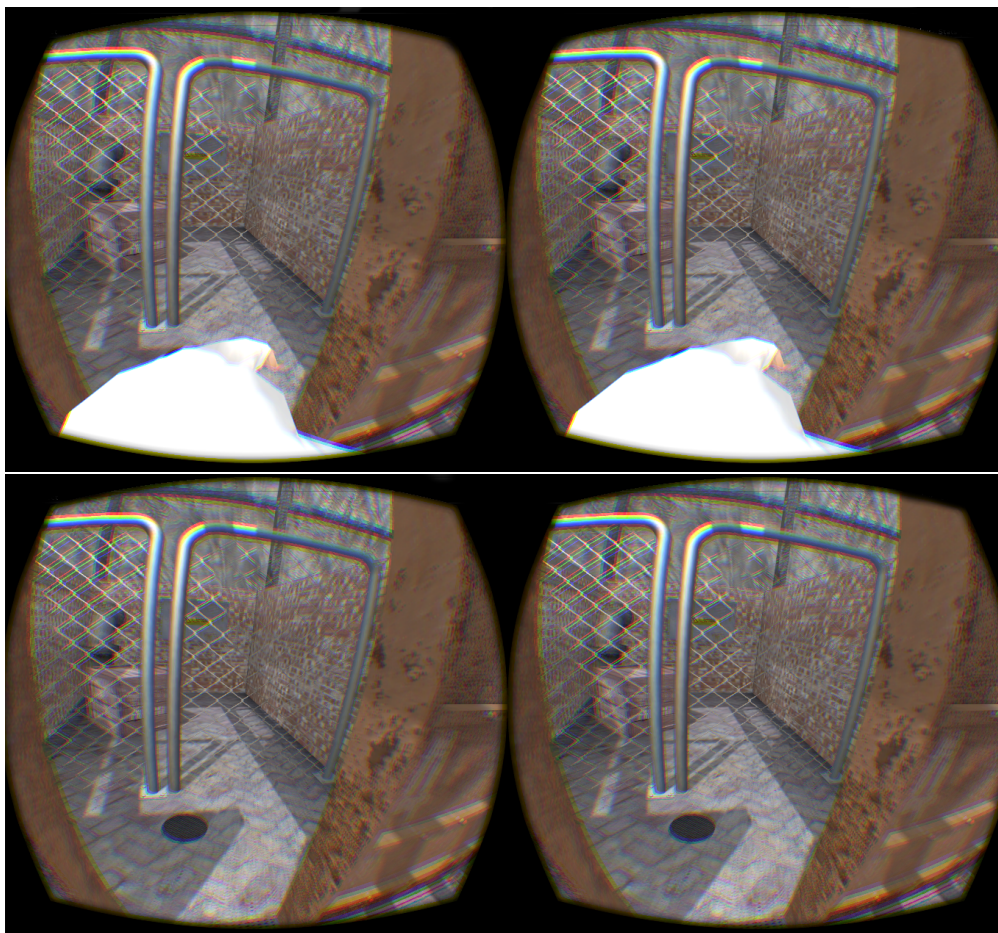


Figure 4.5. – Vue subjective (première personne) de l'intérieur du casque immersif (avec et sans représentation du corps virtuel).

4.5.1.5. Procédure

Les sujets étaient dans un premier temps reçus dans une salle d'accueil où l'expérimentateur lisait les instructions. Chaque sujet devait ensuite donner son consentement par écrit. L'acuité stéréoscopique du sujet était testée et il lui était demandé de remplir un questionnaire sur la susceptibilité au mal des transports (Motion Sickness Susceptibility Questionnaire Short-form (GOLDING 2006)). Cette procédure était utilisée afin de rejeter les personnes hautement sujettes aux cinétoses (mal des transports) en temps normal, afin d'éviter d'éventuel [mal de simulation](#) (KENNEDY, STANNEY et DUNLAP 2000). Une fois le sujet recruté, sa

largeur d'épaules était mesurée avec un anthropomètre entre le bord de l'humérus gauche et droit (épaules relaxées). La [distance inter-pupillaire](#) du sujet était mesurée en utilisant l'utilitaire de configuration de l'Oculus Rift. Cette donnée était utilisée pour calibrer le rendu stéréoscopique de l'[EV](#) à l'utilisateur.

Le sujet était équipé pour l'expérimentation de la combinaison de constellations passives pour la capture de mouvements et du dispositif vibrotactile. Les deux vibreurs étaient placés sur les côtés des humérus droit et gauche à l'aide d'un bandeau élastique. Une fois équipé, le sujet était amené dans l'espace d'expérimentation (à l'intérieur du [CAVE™](#) inactif) et il était équipé du casque immersif. L'[EV](#) était alors initialisé et affiché dans le casque. L'environnement initial montrait le couloir avec les portes complètement ouvertes et l'avatar au milieu du couloir en position en « T ». Plusieurs étapes de calibration et de configuration étaient réalisées :

- L'orientation du champ de vision du casque immersif était calibrée pour correspondre avec l'orientation du repère du système de capture de mouvements. Pour cela, le sujet effectuait un mouvement de balayage de la tête de droite à gauche. Lorsque l'orientation de la tête était dans l'alignement du [CAVE™](#), le repère du casque était réinitialisé, ainsi la vision du casque était alignée avec le couloir.
- La connexion Bluetooth entre l'application de l'expérience et le contrôleur du dispositif vibrotactile était établie et testée. C'est par celle-ci que les instructions de vibration étaient envoyées depuis la simulation vers le contrôleur. Le bon fonctionnement des vibreurs était testé en demandant au sujet de valider le ressenti de la vibration.
- La morphologie de l'avatar était ensuite calibrée de sorte que la largeur d'épaules et la taille soient identiques à celles du sujet. Les données utilisées étaient tirées des mesures anthropométriques initiales et des mesures prises à partir du système de capture de mouvements.
- Pour finir, le sujet prenait la même pose que l'avatar : une pose en T. Une fois le sujet en position, l'avatar était calibré pour être [colocalisé](#) avec le corps du sujet et suivre ces mouvements en temps réel.

Après ces étapes de calibration, la phase d'entraînement était initialisée. Il était demandé au sujet de réaliser la tâche : marcher en ligne droite à partir d'une position de départ jusqu'à une position d'arrivée. Une fois au point d'arrivée, le sujet devait faire demi-tour sur place et réaliser à nouveau un déplacement en ligne droite dans l'autre sens. À ce stade, la porte était toujours complètement ouverte. Pendant cette phase, le sujet pouvait se familiariser avec la tâche et prendre possession de l'avatar : se rendre compte que celui-ci suivait tous ses mouvements et réagissait comme son propre corps. La suite de l'entraînement permettait au sujet de se familiariser au système vibrotactile. L'expérimentateur actionnait la fermeture complète de la porte. Il était alors demandé au sujet de se rapprocher doucement de celle-ci en marchant sur le côté de manière à approcher une de ces épaules de la porte, jusqu'au contact. Il pouvait alors lors

de l'approche, puis du contact sentir les différentes intensités de vibration du retour vibrotactile en fonctionnement (voir ci-dessous). Le sujet pouvait tester les deux épaules aussi longtemps qu'il le souhaitait.

À la suite de cet entraînement, il était demandé au sujet de retourner en position de départ. La porte était de nouveau ouverte complètement et le premier essai pouvait commencer. Un essai était constitué de la séquence d'action suivante :

- Le sujet était positionné, debout, sur l'une des marques au sol, dans l'alignement du couloir face à la marque située de l'autre côté du couloir.
- L'expérimentateur actionnait le mouvement de la porte et celle-ci se fermait en partie, jusqu'à avoir la taille d'ouverture définie pour l'essai.
- Un signal sonore (bip) retentissait lorsque la porte était à la bonne ouverture, à ce moment-là le sujet devait marcher en ligne droite jusqu'à la marque se trouvant de l'autre côté de la porte (Figure 4.6).
- Une fois le sujet arrivé à la marque, la porte s'ouvrait automatiquement et complètement.
- Le sujet réalisait alors un demi-tour sur lui-même. Un nouvel essai pouvait alors commencer avec un déplacement dans le sens retour et avec nouvelle ouverture de porte.



Figure 4.6. – Vue globale de l'EV pendant la passation avec l'avatar du sujet en train de traverser une petite ouverture de porte.

4.5.1.6. Tâche

La tâche qui était demandée de réaliser au sujet était de marcher en ligne droite d'un point de départ à un point d'arrivée représenté par deux marques sur le sol virtuel de chaque côté du couloir. La porte dont l'ouverture était contrôlée

se trouvait à mi-distance. Aucune instruction particulière n'était donnée vis-à-vis du comportement à prendre face à la porte. Chaque sujet réalisait quatre sessions : une pour chaque combinaison résultant du croisement des conditions « Avatar » (avec ou sans la représentation visuelle du corps de l'avatar [colocalisé](#)) et des deux conditions « vibrotactiles » (avec ou sans l'activation du retour vibrotactile) :

- Session A : Avec Avatar/Avec Vibrotactile
- Session B : Sans Avatar/Avec Vibrotactile
- Session C : Avec Avatar/Sans Vibrotactile
- Session D : Sans Avatar/Sans Vibrotactile

L'expérimentation était interrompue par une pause entre chaque session. Pendant ce temps de pause, le sujet pouvait se reposer et devait remplir un questionnaire sur le [cyber-malaise](#) (SSQ (KENNEDY, LANE, BERBAUM et al. 1993)). Chaque session était constituée de 20 essais. Pour chaque essai, une ouverture de porte parmi les cinq possibles était sélectionnée : 40, 50, 60, 70, 80 cm. Chaque ouverture de porte était répétée quatre fois au cours d'une session. À l'intérieur d'une session, l'ordre de sélection des ouvertures de porte était tiré aléatoirement pour chaque sujet. Les sujets étaient répartis en quatre groupes. Ils étaient assignés de manière aléatoire à chaque groupe. Chaque groupe correspondait à un ordre de sessions différent (donc des conditions expérimentales) afin de contrôler d'éventuels effets d'ordre ou de répétition (fatigue, apprentissage, etc.). Les quatre groupes étaient :

- Groupe 1 : ABCD
- Groupe 2 : BDAC
- Groupe 3 : CADB
- Groupe 4 : DCBA

4.5.1.7. Données enregistrées et analysées

Au cours de l'expérimentation, plusieurs indicateurs de comportement et événements étaient enregistrés : la position des épaules dans l'espace, l'angle de rotation des épaules (du buste) du sujet au cours du temps. Les données de détection du radar vibrotactile étaient aussi recueillies. Nous avons utilisé l'angle maximal de rotation des épaules du sujet au moment du passage de porte comme indicateur qualificatif de comportement approprié vis-à-vis de l'ouverture de la porte. Nous avons également étudié les occurrences de contact/collision entre les épaules et la porte, en tant qu'indicateur du comportement adaptatif du sujet.

Parmi les vingt sujets ayant réalisé l'expérimentation, les jeux de données de deux sujets ont été supprimés de l'analyse des données en raison de problèmes lors de l'enregistrement des données au cours de l'expérimentation.

L'analyse statistique a été réalisée à l'aide d'une ANOVA à mesures répétées. Nous avons par la suite réalisé une analyse post-hoc avec ajustement de Bonferroni.

4.5.2. Résultats

4.5.2.1. Rotation des épaules

Les résultats montrent que dans toutes les conditions, la largeur de l'ouverture de la porte a un effet significatif sur la rotation des épaules du sujet (comprise entre 0 et 90 degrés). On observe une augmentation significative de la rotation des épaules pour une valeur approximative du ratio A/S=1,4, correspondant au rapport largeur de l'ouverture sur largeur d'épaules (Ratio A/S) (Figure 4.7).

Ce résultat est cohérent avec les résultats d'études antérieures (LEPECQ, BRINGOUX, PERGANDI et al. 2009 ; WARREN et WHANG 1987). Plus précisément, LEPECQ, BRINGOUX, PERGANDI et al. (2009) ont trouvé une largeur d'ouverture critique (largeur d'ouverture de la porte pour laquelle une rotation des épaules significative est observée) d'environ 1,3. Une valeur critique identique avait été observée par WARREN et WHANG (1987). Nous avons calculé la moyenne de rotation des épaules pour chaque sujet en fonction des quatre conditions expérimentales et des cinq ouvertures de porte (Figure 4.7). Nous avons ensuite ajusté ces valeurs avec une fonction logistique à quatre paramètres (Équation (4.1)).

$$y = \min + \frac{\max - \min}{1 + \left(\frac{x}{ec}\right)^{slope}} \quad (4.1)$$

Le coefficient de régression obtenu était supérieur à 0,999. Le paramètre *ec* (voir équation 1) représente le point d'inflexion de la courbe ajustée. Nous l'avons considérée comme une approximation de la largeur d'ouverture critique. Elle est représentée sur la Figure 4.7 par la droite discontinue verticale.

Au fur et à mesure que la largeur d'ouverture diminue, les sujets changent systématiquement leur position d'une marche frontale (rotation de l'épaule proche de zéro pour des rapports A/S supérieurs à 1,6) à une marche latérale (rotation de l'épaule proche de 80-90 degrés pour les ratios A/S inférieurs à 1). Ce premier résultat montre que, dans les quatre conditions expérimentales, les sujets ont présenté un comportement adapté, en commençant à pivoter leur épaule pour passer la porte lorsque le rapport entre la largeur de l'ouverture et leur largeur d'épaules est devenu inférieur à environ 1,4.

Ce résultat indique que, dans l'ensemble, les sujets ont montré un comportement adapté à l'aide d'information de référence donnée par leur corps « *body-scaled information* » (WARREN et WHANG 1987), et que notre configuration expérimentale a déclenché un comportement de présence. En utilisant une ANOVA à

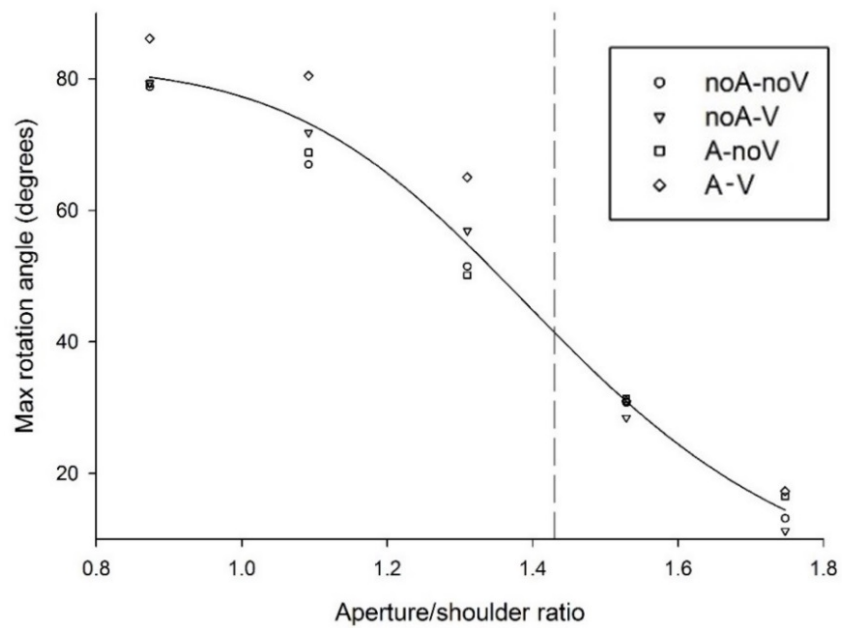


Figure 4.7. – Représentation de la rotation des épaules maximale moyenne lorsque le sujet traverse l'ouverture, en fonction du rapport entre la largeur d'ouverture et la largeur d'épaules (A/S) du sujet. Les données pour les valeurs moyennes observées dans les quatre conditions expérimentales ont été ajustées avec une fonction logistique (noA-noV : pas d'avatar, pas de feedback vibrotactile, noA-V : pas d'avatar, feedback vibrotactile, A-noV : avatar, pas de feedback vibrotactile, A-V : avatar, feedback vibrotactile).

mesures répétées, un effet significatif de la largeur de porte a été, comme prévu, observé. Aucun effet simple significatif des conditions expérimentales n'a été observé sur la rotation des épaules. Cependant, on observe un effet d'interaction entre la condition « vibrotactile » et la largeur d'ouverture de la porte. La rotation de l'épaule est sensiblement plus élevée (près de 90 degrés) lorsque la largeur de l'ouverture devient faible, pour les conditions avec retour vibrotactile ($p < 0,01$).

4.5.2.2. Collision avec l'environnement

Nous avons par la suite analysé le pourcentage de collisions entre les épaules des sujets et la porte, au moment de traverser l'ouverture (Figure 4.8). Pour les faibles ouvertures, les résultats montrent que les deux conditions ont significativement affecté la survenue des collisions, celles-ci étant minimales lorsque le retour vibrotactile et la représentation du corps virtuel étaient présents ($p < 0,01$), sans interaction significative entre les deux facteurs. En d'autres termes, les effets positifs de ces facteurs semblent être additifs.

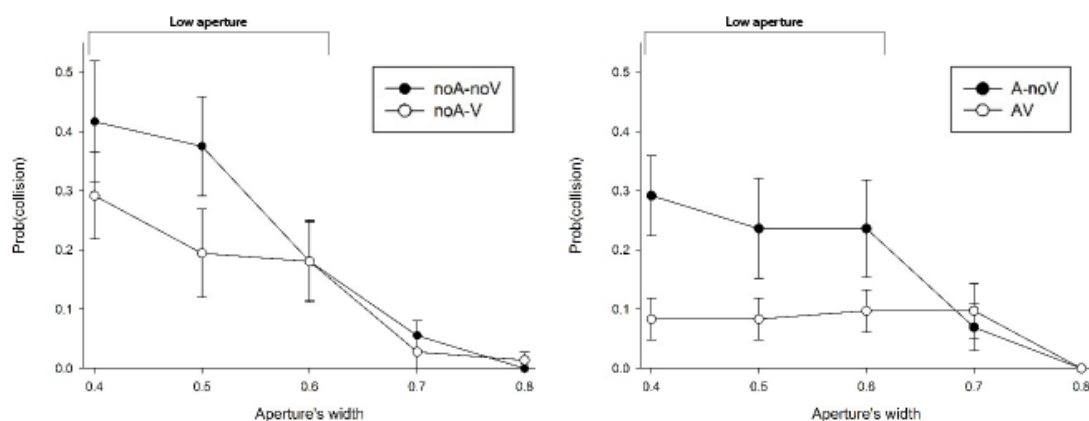


Figure 4.8. – Probabilité moyenne d'une collision entre le corps et la porte (avec écart-type), en fonction de la largeur d'ouverture. Gauche : sans avatar, le retour vibrotactile réduit l'occurrence de collisions (pour les faibles ouvertures). Droite : le même effet est observé en présence d'un avatar : les collisions sont minimales lorsque l'avatar et le retour vibrotactile sont présents (AV).

4.5.3. Discussion

Le résultat observé dans l'analyse de la rotation des épaules montre qu'on retrouve un comportement adapté aux contraintes de l'environnement : changement de position pour passer à travers les faibles ouvertures. Les sujets changent

systématiquement leur position d'une marche frontale lorsque l'ouverture est large à une marche latérale lorsque la largeur de l'ouverture devient faible. Ce comportement est apparu naturellement chez les sujets sans qu'il leur soit demandé dans la consigne. Le changement de comportement s'observe autour d'un seuil critique. Ce seuil est proche de celui observé lors d'études antérieures (A/S proche de 1.3). Le comportement observé ici lors de l'utilisation d'un casque immersif est en accord à celui observé en conditions naturelles et dans un dispositif de type [CAVE™](#). Ce résultat valide notre hypothèse générale H1. De plus, on retrouve ce comportement d'adaptation, peu importe la condition expérimentale. Ce résultat n'est pas surprenant et va dans le sens de notre première hypothèse. Il confirme que la présence est obtenue avec l'utilisation d'un casque immersif, même sans la présence d'une représentation de soi.

Toutefois, on observe une rotation des épaules au passage de la porte légèrement plus importante lors de la présence du retour vibrotactile. Une possible explication de ce phénomène est que la taille de détection du radar du retour vibrotactile était de taille fixe (10 cm). Or, comme nous avons vu, le comportement fait intervenir le rapport A/S et non une valeur fixe. Il serait intéressant d'intégrer une taille de radar variable dépendante de la largeur d'épaules et de la largeur d'ouverture. Du fait de la taille de la zone de détection fixe, le retour vibrotactile a pu dans le cas des faibles ouvertures de porte se déclencher de manière excessive alors même que le comportement du sujet était correct. Incitant le sujet à pivoter davantage son corps en pensant être trop proche de l'environnement.

Les résultats portant sur le nombre de contacts entre l'utilisateur et l'environnement vont dans le sens de nos hypothèses H2, H3. Lorsqu'on regarde la condition par défaut : absence d'avatar et de retour vibrotactile ; on s'aperçoit que les sujets se heurtent au montant de porte dans presque 50 % des essais (Figure 4.8, gauche). L'ajout du retour vibrotactile « radar » permet de réduire le nombre de collisions. Les informations offertes par le « radar » permettant aux sujets de calibrer la perception de leur relation corps-environnement. Ce résultat peut être considéré comme une preuve supplémentaire de la compression visuelle de perception de distance dans des [EVs](#) (MESSING et DURGIN 2005).

La présence d'un avatar [colocalisé](#) permet également une amélioration de la perception des distances par rapport à la condition de défaut. En effet, on retrouve une réduction du nombre de collisions du même ordre que pour l'ajout du retour vibrotactile. Les meilleures performances sont toutefois observées quand l'avatar et le retour vibrotactile sont tous deux présents. L'apport des deux éléments semble être additif, montrant l'apport des démarches multimodales dans la construction mentale d'un modèle spatial du monde (BERTHOZ 2000 ; KAMMERMEIER, BUSS et SCHMIDT 2001).

L'amélioration apportée par la présence de l'avatar peut être permis à l'aide qu'il offre dans le sentiment de présence dans l'[EV](#), ce qui par conséquent, amélio-

rerait la perception des distances (INTERRANTE, RIES et ANDERSON 2006). Bien que le sentiment de présence puisse être éprouvé lors de l'utilisation de casque immersif sans représentation de soi, les sujets ont tendance à se plaindre d'avoir la sensation de « flotter » : ceci en raison de l'absence de vision de ses pieds et donc la difficulté à connaître sa position par rapport au sol.

Cependant, les données de collision ont montré que l'appropriation d'un corps dans l'EV n'est pas suffisante pour se débarrasser de l'effet de compression de la profondeur en EV. Les informations apportées par le retour vibrotactile seraient nécessaires pour calibrer davantage la perception spatiale.

4.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés aux tâches de navigation en EV en nous appuyant sur la cohérence de comportement spatial. Nous avons établi trois hypothèses et avons mis en place une expérimentation afin de les tester. Les hypothèses prédisaient un comportement réaliste lors de l'utilisation d'un casque immersif. De plus, il était attendu une amélioration des comportements spatiaux lors de la présence d'un mannequin colocalisé et de l'utilisation de retour vibrotactile. Comme proposé dans le Chapitre III, nous avons souhaité proposer un retour vibrotactile agissant comme un radar afin d'améliorer la compréhension spatiale.

Nous avons pu mettre en évidence la cohérence d'un comportement d'ajustement lié aux caractéristiques d'un EV (rotation du corps pour passer à travers une ouverture étroite) lors de l'utilisation d'un casque immersif. Ce comportement a été auparavant observé en condition naturelle ainsi que dans un dispositif immersif de type CAVE™. Les comportements observés face à cette situation d'affordance ont montré être basés sur la même relation liant les propriétés de l'environnement et de l'organisme que dans les autres situations observées. L'observation de ces actions liée à une affordance peut être indicatrice de présence en EV. Comme attendu, les casques immersifs permettent l'obtention d'un sentiment de présence et ce, même sans représentation de son propre corps.

L'un des intérêts expérimentaux de l'utilisation des casques immersifs est que par défaut, l'utilisateur n'a pas de vision directe sur son corps. Ceci offre la possibilité d'étudier : l'effet sur l'interaction de la présence d'une représentation de soi et l'adaptation à une représentation plus ou moins fidèle. Nous avons souhaité étudier l'influence de la représentation d'un corps dynamique virtuel et colocalisé avec les actions de l'utilisateur sur le comportement vis-à-vis de l'environnement dans une tâche de navigation. Nous avons pu montrer que l'avatar permet de calibrer la perception de soi. L'avatar permet donc de renforcer la calibration de la relation corps/environnement nécessaire pour appréhender les affordances.

Nous avons également poursuivi nos études (Chapitre 3) sur l'utilisation du retour vibrotactile pour fournir des informations spatiales. Nous avons précédemment proposé l'utilisation quand cela le permet, d'un retour extrasensoriel substituant à la fois le sens du toucher, mais également donnant des informations de proximité spatiale. Nous avons montré que ce retour permet également de calibrer la relation corps/environnement en offrant des informations sur l'environnement permettant de se faire mentalement une modélisation spatiale de l'environnement. Le retour vibrotactile fournit également des données sur la propre perception de soi.

L'étude des scénarios de navigation et d'accessibilité forme une part importante des études nécessaires dans la conception d'environnement industriel complexe. C'est le cas dans le cadre du projet [International Thermonuclear Experimental Reactor \(ITER\)](#) où de par la complexité de l'environnement, il est indispensable d'étudier l'accessibilité d'un opérateur jusqu'à la zone d'opération. Plus particulièrement, il peut être nécessaire d'étudier des zones précises où l'environnement implique une attention particulière. La validité écologique des [EVs](#) est un point important pour la validation des scénarios en [RV](#). Ainsi les comportements de l'opérateur en [EV](#) doivent être similaires à ceux qu'il aurait en environnement réel. Notre approche mixe une représentation dynamique et [co-localisé](#) du corps et l'utilisation d'un retour vibrotactile extra-sensoriel pour les tâches de navigation. Cette méthode permet un comportement spatial réaliste. Un cas particulier rencontré dans des environnements nucléaires est celui de la navigation en zone radioactive. Lors d'opérations dans ce genre d'environnement les scénarios doivent être optimisés de sorte que l'opérateur soit le moins possible exposé à la dose et à la contamination. Dans ces cas-là, la validité du comportement spatial doit être associée au risque présenté par l'environnement. Ce sujet commence à être étudié (NAISH et A. BURNS [2017](#)). L'utilisation du retour vibrotactile pourrait être un outil avantageux dans l'étude de ce scénario, le retour tactile pourrait être utilisé pour alerter l'opérateur des risques.

Après avoir étudié l'accès jusqu'à la zone d'intervention, nous souhaitons étudier la faisabilité des opérations de maintenance ou d'assemblage. Dans la majorité des simulations de [RV](#), les interactions avec les objets virtuels de l'environnement ne résultent pas en un retour haptique (proprioceptif ou tactile) : notamment, rien ne vient contraindre les mouvements du sujet. Ce déficit peut conduire : d'une part à une perte du sentiment de présence de l'utilisateur dans l'[EV](#) et d'autre part à des comportements inappropriés pouvant poser des problèmes sur la validation des scénarios. Ceci est d'autant plus important lorsque l'environnement, en raison de sa complexité, rend la réalisation de la tâche délicate. Nous pensons que le retour vibrotactile est l'un des moyens permettant de répondre à ce problème. Le chapitre [5](#) étudie et propose une solution d'usage général.

5. Cohérence Visuo-Proprioceptive en Tâche d'Intervention

Table des matières

5.1	Introduction	95
5.2	Travaux connexes	96
5.2.1	Illusions sensorielles	96
5.3	Développement du dispositif	99
5.3.1	Mise à jour du dispositif retour vibrotactile	99
5.3.2	Moteur physique et Algorithme de rendu vibrotactile	100
5.4	Hypothèses	102
5.5	Expérimentation	103
5.5.1	Matériel et méthode	103
5.5.1.1	Sujets	103
5.5.1.2	Dispositif	104
5.5.1.3	Environnement virtuel	106
5.5.1.4	Condition Expérimentale	107
5.5.1.5	Procédure	108
5.5.1.6	Données enregistrées et analysées	112
5.5.2	Résultats	115
5.5.2.1	Erreur de colocalisation (RMSE)	115
5.5.2.2	Déviation de la colocalisation (RMSD)	115
5.5.2.3	Durée moyenne des contacts	116
5.5.2.4	Durée de l'essai	119
5.5.2.5	Ratio de temps de contact	119
5.5.2.6	Moyenne du nombre de contacts	119
5.5.2.7	Questionnaires	122
5.5.3	Discussion	123
5.6	Conclusion	126

Au cœur de ce chapitre, nous souhaitons traiter la question de la **cohérence visuo-proprioceptive (CVP)** dans le cadre d'une tâche d'intervention en environnement contraint. Notre approche mixe l'utilisation d'un avatar **colocalisé** subissant les contraintes de l'**EV** et un retour vibrotactile spatialisé afin d'obtenir un comportement spatial cohérent. Le chapitre commencera par la présentation de



l'état de l'art spécifique à cette partie (voir section 5.2), suivie de la présentation des développements logiciel et matériel réalisés (voir section 5.3). Les hypothèses de ce chapitre seront exprimées (voir section 5.4). L'étude expérimentale mise en place pour la validation des hypothèses et ses résultats seront détaillés (voir section 5.5). La dernière section (voir section 5.6) conclura ce chapitre.

5.1. Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons traité des tâches de navigation visant à valider l'accessibilité aux zones d'intervention. Ces tâches représentent la première partie des scénarios d'étude rencontrés dans un contexte d'assemblage et de maintenance dans un environnement industriel complexe. Nous souhaitons dans ce chapitre traiter du second volet lié aux tâches d'intervention. Plus spécifiquement, nous verrons la question de la compréhension des interactions avec l'environnement et de la **cohérence visuo-proprioceptive (CVP)**.

Lors d'étude de faisabilité de tâche de maintenance ou d'assemblage, l'aspect principal de la validation des scénarios concerne l'interaction entre l'opérateur et l'environnement. L'absence de retour haptique (kinesthésique et tactile) conduit à une perception sensorielle incomplète. Cependant, les informations proprioceptives sont essentielles pour un comportement spatial cohérent.

Dans le chapitre précédent, nous avons montré l'apport d'une représentation de soi dans le mécanisme de calibration spatiale. Lors de l'utilisation d'un casque immersif, la vue directe de son propre corps est occultée. L'utilisation d'une représentation virtuelle, c'est-à-dire un avatar, est alors proposée. Nous pensons que l'avatar doit jouer un double rôle. D'une part, il doit reproduire parfaitement les mouvements de l'utilisateur quand celui-ci est libre de toute contrainte. Une représentation **colocalisée** avec la morphologie de l'utilisateur et reproduisant fidèlement les mouvements permet une bonne appropriation de l'avatar. D'autre part, cet avatar doit rendre compte des contraintes imposées par l'environnement.

Le modèle d'interaction appelé Rubber Band (Chapitre 2.1.3.3), qui permet de prendre en compte les contraintes en cherchant à minimiser le décalage de position, nous semble pertinent. Cependant, la prise en compte des contraintes de l'EV sur l'avatar est incompatible avec la colocalisation parfaite de l'avatar. Cette façon de procéder entraînant des incohérences visuo-proprioceptives. C'est-à-dire que le retour visuel offert à l'utilisateur ne correspond pas à sa perception proprioceptive. Nous pensons que l'utilisation d'un retour vibrotactile peut se substituer au retour proprioceptif et jouer un rôle coercitif pour maintenir une cohérence visuo-proprioceptive.

Nous avons proposé l'utilisation d'un retour vibrotactile extrasensoriel (mode « radar ») dans le cas des études de navigation (Chapitre 4). Dans le contexte des études d'intervention en environnement confiné, dans lesquels l'utilisateur doit effectuer une opération précise, nous souhaitons privilégier un retour vibrotactile transmettant des informations de contact. L'environnement multimodal, visuel avec les contraintes appliquées à l'avatar et vibrotactile, améliore la compréhension spatiale. D'une part, le feedback tactile devrait permettre une prise de conscience des collisions et favoriser la construction d'un modèle spatial. D'autre part, l'information vibratoire devrait permettre une amélioration de la CVP. Nous pensons également qu'une information spatialisée des informations de contact offre une meilleure lisibilité et une transparence dans les comportements. L'augmentation de la résolution d'affichage des contacts offre une fidélité de rendu.

5.2. Travaux connexes

5.2.1. Illusions sensorielles

Un des aspects particulièrement intéressant des perceptions tactiles est l'existence d'effet psychophysique permettant de créer des illusions perceptuelles. Ces illusions se produisent en fonction du pattern spatio-temporel des stimuli vibratoires, qui conduisent à des interprétations perceptives spécifiques (FLORES, KURNIAWAN, MANDUCHI et al. 2015). Plusieurs effets de stimulations simultanées et/ou successives de deux points (sur la peau) ont été découverts, pouvant créer des sensations de mouvement « fantômes ». Ces illusions permettent, à partir d'une répartition discrète d'actionneurs, d'induire une sensation continue de stimulation tactile. Il existe plusieurs effets sensoriels bien connus. Dans l'illusion appelée « saltation sensorielle » ou « du lapin qui saute » (« *cutaneous rabbit illusion* » en anglais) basé sur l'effet Tau, l'application d'une série de courte stimulations appliquée successivement à trois positions alignées fait ressentir une sensation de mouvement sur la peau (GELDARD et SHERRICK 1972). Il est également possible de percevoir un mouvement tactile en jouant sur la succession

de stimuli en contrôlant les temps d'activation des actionneurs. Un autre de ces phénomènes perceptuels est appelé « *Funneling illusion* » (ALLES 1970 ; BÉKÉSY 1958). Cette illusion permet la création d'une sensation fantôme entre les positions de deux stimulations réelles. De plus, la position de la sensation fantôme peut être contrôlée en modulant l'amplitude des deux stimulations (Figure 5.1) (CHA, RAHAL et EL SADDIK 2008).

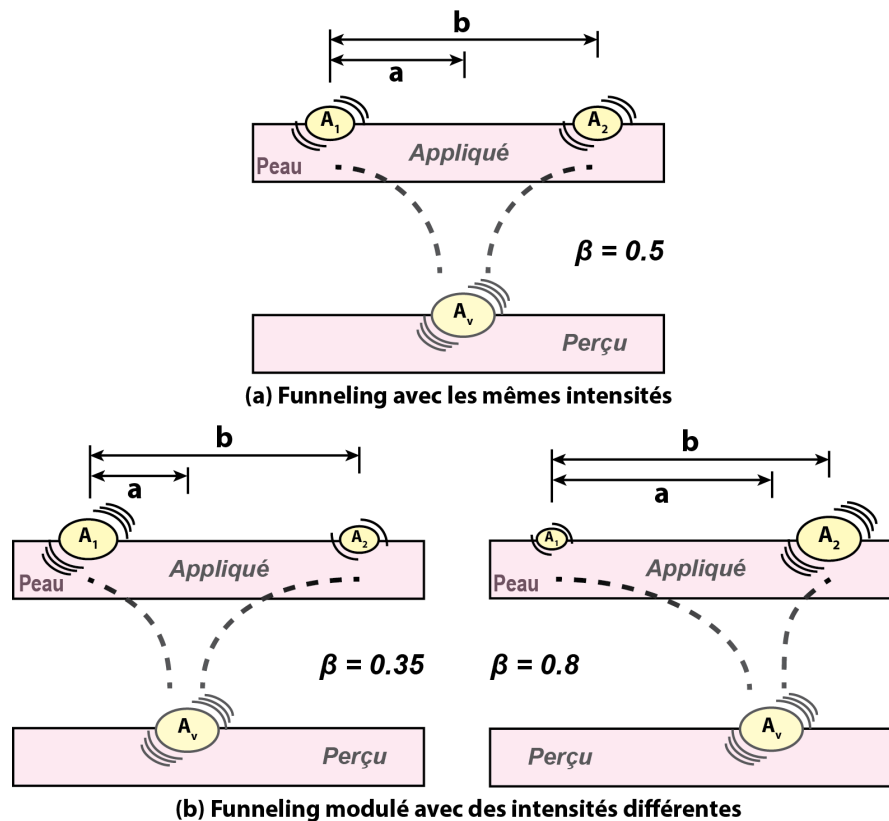


Figure 5.1. – Illustration de l'illusion Funneling. deux stimuli sont perçus comme un stimulus unique, dont la position est contrôlable en modulant l'amplitude des deux stimuli. Adapté de (Cha, Rahal et El Saddik 2008 ; Israr et Poupyrev 2011).

Pour que l'effet *funneling* soit perçu, la distance entre les deux actionneurs/-stimuli doit être comprise entre 40 et 80 mm (CHA, RAHAL et EL SADDIK 2008). Le contrôle de la position et de l'amplitude de la sensation fantôme ressentie a fait l'objet d'études et a donné naissance à plusieurs modèles. La modulation peut être réalisée en utilisant un modèle linéaire, c'est-à-dire que l'intensité de stimulation des deux contrôles varie linéairement l'un par rapport à l'autre. Néanmoins, il a été montré qu'une perte d'intensité de la sensation fantôme peut se faire sentir pour les positions médianes (Figure 5.2). ALLES (1970) proposait l'utilisation d'une variation logarithmique plutôt que linéaire, pour garder la même inten-

sité perçue, peu importe, où la sensation fantôme est. SEO et CHOI (2010) ont montré que le modèle logarithmique était meilleur pour le contrôle de l'intensité ressentie de la sensation fantôme, tandis que la modulation linéaire offrait un meilleur contrôle de la prédiction de la position de la sensation fantôme. ISRAR et POUPYREV (2011) proposent un modèle « énergétique » (« *energy model* ») permettant un meilleur contrôle à la fois de l'intensité et de la localisation de la sensation fantôme (Figure 5.2).

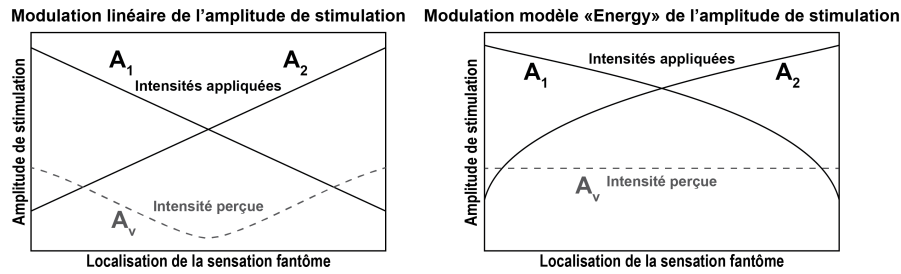


Figure 5.2. – La modulation linéaire de l'amplitude des stimuli provoque une perte de l'intensité ressentie au milieu. Les modulations logarithmique et « énergétique » permettent une perception constante. Adapté de (Alles 1970).

ISRAR et POUPYREV (2011) définissent le modèle « energy ». A_1 et A_2 représentent l'intensité des deux vibreurs de stimulation et A_v l'intensité de la sensation fantôme désirée. La position de la sensation fantôme voulue est représentée par la variable β définie comme le ratio entre la distance de la position du fantôme par rapport à l'écartement de la paire de vibreurs (Figure 5.1). La formule (Équation (5.1)) pour calculer l'intensité de la paire A_1 et A_2 est :

$$A_1 = \sqrt{(1 - \beta) \cdot A_v} \quad \text{et} \quad A_2 = \sqrt{\beta \cdot A_v} \quad (5.1)$$

On trouve dans la littérature quelques exemples d'utilisation de phénomène **psychophysique**. TAN, LIM et TRAYLOR (2000) ont examiné l'effet de la « saltation sensorielle » pour afficher des informations directionnelles. Des séquences spatio-temporelles de stimuli étaient présentées par une matrice (3x3) de capteurs vibrotactiles équipant le dossier d'une chaise de bureau pour représenter des tracés (ligne droite horizontale, verticale ou diagonale). ISRAR et POUPYREV (2011) ont poursuivi cette voie en combinant l'effet offert par le *funneling* à celui de la saltation sensorielle dans le but d'offrir une haute résolution de stimulation à partir d'une matrice de vibreurs réduite (4 x 3). La matrice permettait d'afficher des mouvements sans la contrainte de la position des vibreurs. RYU et G. J. KIM (2004) ont testé l'apport de la saltation sensorielle pour permettre une meilleure localisation de point de contact dans une tâche de navigation. L'utilisation de saltation aidait l'utilisateur à détecter et localiser plus correctement

le point de contact. J. LEE, S. LEE et G. J. KIM (2013) ont pu observer la possibilité de créer des sensations fantômes (produites par l'illusion *funneling* et la saltation) pour des objets détachés du corps (par exemple, un ballon se déplace entre deux doigts. L'utilisateur parvient à sentir la position du ballon entre ses doigts grâce à la position de la sensation fantôme). Dans leur étude, l'utilisation du *funneling* montre de meilleurs résultats que la saltation.

Récemment, LAWSON, ROPER et ABDULLAH (2016) ont exprimé les mêmes préoccupations que dans nos travaux et ont annoncé vouloir réaliser des études dans ce sens. Ils veulent proposer un environnement multimodal avec comme objectif d'améliorer la compréhension de l'environnement 3D pour des applications de conception. Leur démarche se rapproche de la nôtre. Notamment, ils souhaitent tester l'utilisation d'illusion sensorielle et d'un nombre réduit de vibreurs pour donner des informations de contact spatialisé.

5.3. Développement du dispositif

5.3.1. Mise à jour du dispositif retour vibrotactile

Nous avons souhaité mettre à niveau le dispositif de retour vibrotactile afin de prendre en compte des aspects mis en évidence lors des expérimentations précédentes. La modification principale que nous avons effectuée sur le contrôleur a été la mise à jour du protocole de communication et la partie logicielle embarquée pour permettre une plus grande gamme de modulation de l'intensité de vibration. L'intensité de vibration est modulée par le contrôleur en PWM (logiciel) avec un cycle de 10 millisecondes (100 Hz). Le contrôleur peut générer 100 niveaux d'intensité de vibrations différentes avec deux modes de vibration : continu ou alternatif (cadencé à une fréquence de 2 Hz) (Annexe E.2). L'intégration logicielle de communication et l'application de test ont été mises à jour pour prendre en compte les modifications du protocole.

Une veste permettant d'équiper facilement plusieurs vibreurs à l'utilisateur a été réalisée. Elle a été réalisée à partir de t-shirt de sport moulant afin de bien plaquer à la peau des sujets. Plusieurs tailles de t-shirt étaient disponibles (allant de S à XL) afin de s'adapter parfaitement aux morphologies des sujets. Les vibreurs étaient glissés dans des petites poches ajustées qui les maintenaient en position. Ils étaient disposés de chaque côté du membre supérieur droit avec un espacement maximum entre eux de 8 cm à l'exception des vibreurs n° 6 et n° 7 espacés de 16 cm (Figure 5.3). Ceux de la main étaient attachés à un brassard élastique. Les fils des vibreurs étaient maintenus plaqués à la veste par des passe-fils. Lors de l'utilisation du t-shirt, le contrôleur était attaché à la ceinture du sujet.

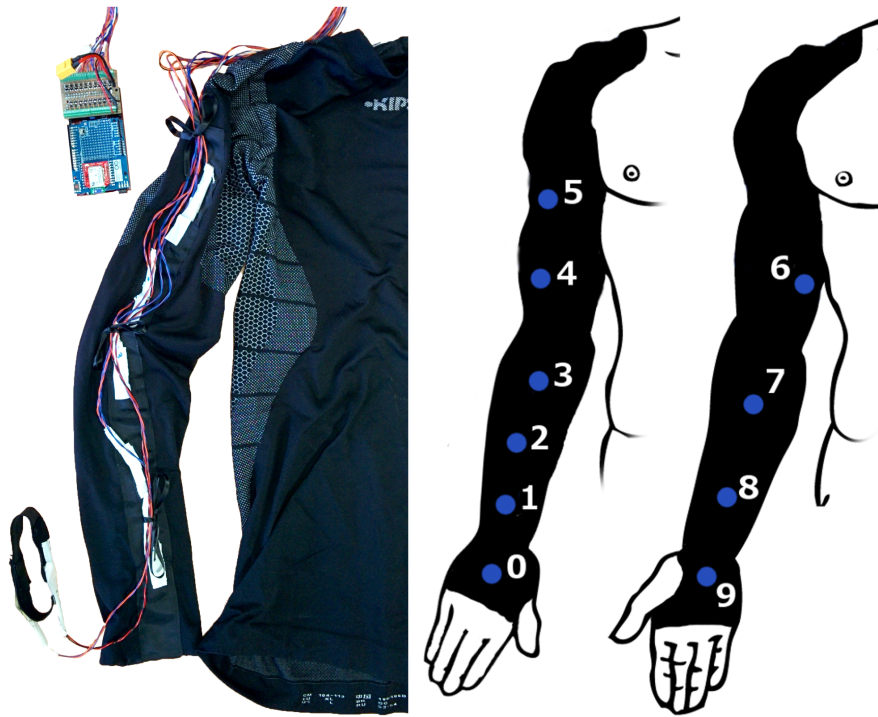


Figure 5.3. – Manche équipée du dispositif vibrotactile avec dix vibreurs disposés le long du bras et Contrôleur

5.3.2. Moteur physique et Algorithme de rendu vibrotactile

Le moteur physique XDE développé par le [Commissariat à L'Énergie Atomique \(CEA\) Laboratoire d'Intégration de Systèmes et des technologies \(List\)](#) permet la gestion des interactions physiques entre des objets rigides en temps réel. Ces objets peuvent être des objets 3D, des robots ou des avatars. Les avatars proposés par le moteur physique sont composés de primitives. Ces avatars peuvent s'adapter à la morphologie des sujets, soit avec une méthode automatique, soit en définissant les dimensions de l'ensemble des segments du squelette. Certains logiciels de capture de mouvements permettent de mesurer automatiquement le modèle anthropomorphique du sujet. L'avatar créé par le moteur physique peut être contrôlé à partir des données de capture de mouvements en temps réel.

Le moteur physique peut, au choix, être paramétré pour avoir une gestion des interactions : autorisant l'interpénétration entre les objets ou les empêchant en proposant une interaction de type [Rubber Band](#) (voir Chapitre 2.1.3.3). Par exemple, dans le cas d'une interaction entre un objet de l'environnement et un avatar contrôlé par un utilisateur par ces mouvements, si l'utilisateur essaie de marcher à travers un mur dans l'EV, l'avatar sera arrêté par le mur virtuel. De manière schématique, un ressort (ou bande élastique) est créé entre la position du corps du sujet et celle de l'avatar lorsque l'avatar est en contact avec un ob-

jet. Ceci permet de calculer la force exercée lors du contact et de retrouver sa position lorsque le conflit avec l'obstacle n'existe plus. Le moteur physique offre la possibilité de récupérer les données concernant les contacts entre des objets. Les informations fournies par le moteur sont pour chaque point de contact : la position, la normale au contact et la force appliquée. Rapportées à notre cas, ces données permettent de connaître l'emplacement de contact entre l'EV et l'enveloppe de l'avatar.

Nous avons intégré le module de retour vibrotactile pour qu'il fonctionne avec le moteur physique XDE. Ces données sont utilisées pour restituer les contacts sous forme de vibration. Nous avons mis en place trois méthodes de rendu vibrotactile des contacts. Chaque mode a un algorithme spécifique pour sélectionner le ou les vibreurs et leur intensité de vibration en fonction du contact détecté par le moteur physique. Ces algorithmes nécessitent de connaître la position des vibreurs sur le corps de l'utilisateur. Pour cela, des vibreurs virtuels sont positionnés sur l'avatar de manière à coïncider avec la position de ceux placés sur l'utilisateur. Les vibreurs virtuels sont invisibles à l'utilisateur et ne servent qu'au fonctionnement des algorithmes.

Single : Dans ce mode de rendu, un unique vibreur est utilisé pour informer l'utilisateur de la présence d'un contact entre l'avatar et l'EV. Quelle que soit la position du contact, un vibreur unique est utilisé. Le fonctionnement se rapproche de celui d'un avertissement général de contact, comme le serait un bip sonore lors d'un contact. L'amplitude de vibration est calculée en fonction de la force du contact. Si plusieurs contacts sont présents au même instant, l'amplitude correspond à la valeur maximale de toutes les forces de contact. L'intensité de vibration est sélectionnée en fonction de la force du contact. Si plus d'un contact est détecté simultanément, ils sont tous représentés par le même vibreur avec une intensité de vibration basée sur la force de contact la plus importante.

Nearest : Ce mode de rendu permet une représentation localisée/spatialisée basée sur plusieurs vibreurs. Le vibreur sélectionné pour représenter un contact est le vibreur le plus proche du point de contact. L'intensité de vibration est calculée en fonction de la force du contact. Si plus d'un contact doit être représenté par le même vibreur, l'intensité est basée sur la force de contact la plus importante. Plusieurs contacts distincts peuvent être représentés simultanément si ceux-ci sont attribués à différents vibreurs.

Funneling : Ce mode de rendu permet une représentation localisée/spatialisée basée sur plusieurs vibreurs. Le « *funneling effect* », phénomène [psychophysique](#) permettant la création de sensations fantômes localisées entre deux points de stimulation, est utilisé. Nous avons décidé d'utiliser cet effet pour créer une sensation de contact qui serait ressentie au plus proche de la position réelle du contact. Pour pouvoir utiliser l'algorithme de rendu *funneling*, il est nécessaire de trouver une paire de vibreurs telle que le point de

contact se trouve entre les deux vibreurs de la paire. Lorsqu'aucune paire de vibreurs ne peut être trouvée, l'algorithme de rendu « *nearest* » est utilisé. Si une paire peut être trouvée l'algorithme de rendu *funneling* peut être utilisé. L'un des trois modèles de rendu de l'effet *funneling* précédemment présenté (linéaire, logarithmique et « *energy* » (ISRAR et POUPYREV 2011)) est utilisé pour calculer l'intensité de vibration de la paire en fonction de l'intensité et de la position de la sensation fantôme voulue.

L'intensité de vibration ou l'intensité désirée pour la sensation fantôme dans le cas de l'application du *funneling*, est définie à partir de la force de contact donnée par le moteur physique. Cette valeur est un nombre réel. Cette intensité correspond à la force du contact normalisée par rapport à une valeur limite. Cette variable 'limite' est mise à jour au cours de la simulation, elle prend comme valeur la valeur maximale des forces de contact détecté. De plus, cette valeur limite décroît lors que la moyenne des forces de contact enregistrées est très fortement inférieure à celle-ci. Ce mappage permet de profiter de l'ensemble de la gamme d'intensité de vibration qu'offre le dispositif vibrotactile. De plus, il permet de s'adapter rapidement et en continu au sujet. Lorsque l'avatar « caresse » un objet dans l'EV, l'intensité de vibration est faible tandis que l'impact d'un mouvement brusque dans un objet délivrera une vibration de forte intensité. Le comportement de l'algorithme a été testé pendant une phase de prétest et a montré un rendu en accord aux attentes.

L'intégration de ces algorithmes de rendu dans l'environnement de développement Unity3D et la connexion avec le moteur physique XDE engine (fonctionne aussi avec le moteur natif d'Unity3D) a été réalisée pour offrir une grande capacité de configuration. Le module comprend un outil de configuration de la topologie des vibreurs : nombre et position des vibreurs, possibilité de lier chaque vibreur à un ou plusieurs éléments segment de l'avatar (ou objet de l'environnement). Il est possible de choisir entre les algorithmes de rendu (*Single*, *Nearest*, *Funneling*) et les modèles d'effet *funneling* (Linear, Logarithmic, « *energy* »). Il offre également des outils de débogage et de journal d'événement pour l'archivage des données d'utilisation.

5.4. Hypothèses

Nous proposons une première hypothèse H1 dans la continuation des études précédentes. L'ajout de retour vibrotactile pour donner des informations de contact offre une meilleure compréhension des contacts en EV (« *Collision awareness* »). Les indices tactiles devraient substituer les informations proprioceptives manquantes et ainsi aider au développement d'une référence spatiale calibrée, augmentant ainsi la conscience spatiale. Dans le cas de l'utilisation d'un avatar colo-

calisé mais respectant les contraintes de l'EV, la conscience des contacts avec l'environnement ainsi que le développement d'un modèle spatial devrait permettre une meilleure CVP.

Notre seconde hypothèse H2 aborde la question de la spatialisation de l'information de contact. L'utilisation d'un système de stimulation vibrotactile utilisant plusieurs vibreurs pour donner des informations de contact localisé permet une meilleure compréhension des contacts. L'information spatialisée conduit à des comportements plus naturels dans l'EV et une meilleure CVP.

Pour finir, l'hypothèse H3 s'intéresse à la résolution des informations spatialisées. L'augmentation de la résolution de localisation, notamment à travers l'utilisation d'illusion sensorielle, permet un rendu plus réaliste et transparent des informations de contact. Elle devrait permettre une meilleure compréhension des contacts et un comportement d'interaction plus précis.

Dans la section suivante, nous présentons l'étude expérimentale qui a été réalisée afin de prouver nos hypothèses.

5.5. Expérimentation

5.5.1. Matériel et méthode

5.5.1.1. Sujets

Vingt-huit sujets (dont huit femmes) ont pris part à l'expérimentation. Ils ont été choisis parmi les étudiants et membres du personnel de l'université. La répartition des âges était entre 20 et 34 ans (moyenne = 23.6, SD = 3.4). Les sujets étaient majoritairement droitiers (3 sujets gauchers), aucune différence n'a été trouvée à ce propos. Tous les participants ont donné leur consentement écrit avant l'étude, conformément à la Déclaration d'Helsinki de 1964. L'étude a été approuvée par le Comité de Protection des Personnes de l'Institut des Sciences du Mouvement. Les sujets étaient naïfs vis-à-vis du but de l'expérimentation. Tous les sujets ont déclaré avoir une vision et un sens du toucher normaux et ils étaient exempts de tout trouble locomoteur. Leur acuité stéréoscopique a été vérifiée en utilisant le test Randot® Graded Circles (Stereo Optical Company Inc, Chicago, IL, USA). Leur écart pupillaire a été mesuré en utilisant le logiciel utilitaire de configuration de l'Oculus Rift. Leur distance inter-pupillaire allait de 60,6 à 67,9 mm (moyenne = 64,1 ; SD = 2,2). La valeur était utilisée pour ajuster le rendu stéréoscopique pour chaque sujet. Les sujets n'étaient pas sélectionnés en fonction de leur taille. Leur taille variait entre 163 et 190 cm (moyenne = 177,6 ; SD = 7,1).

5.5.1.2. Dispositif

L'expérimentation a été réalisée dans un espace de 3 x 3m, correspondant à l'intérieur du [CAVE™](#) du [CRVM](#). Le dispositif [CAVE™](#) n'était pas utilisé, seul son espace était utilisé. Les sujets étaient équipés d'un casque immersif Oculus Rift DK2. Le suivi des mouvements du casque était réalisé par la caméra infrarouge externe de l'oculus. La caméra capture les mouvements grâce à la reconnaissance d'une constellation de [diodes électroluminescentes \(DEL\)](#) infrarouge disposées sur le casque. La capture des mouvements de la tête du sujet était utilisée pour mettre à jour l'image stéréoscopique par rapport au point de vue de celui-ci. Le casque immersif était connecté par câble au ordinateur graphique, qui exécutait l'application de l'expérimentation. Pour diminuer d'éventuelles gênes dans les déplacements de l'utilisateur, le câble du casque arrivait par en dessus avec suffisamment de mou (Figure 5.4).

Le dispositif de capture de mouvements (ARTTrack®) à huit caméras équipant le [CAVE™](#) était utilisé. Dix-sept constellations de marqueurs passifs étaient placées sur le corps du sujet (les pieds, les jambes, les cuisses, la taille, le torse, les mains, les bras, les avant-bras et les épaules) permettant au système de capture d'avoir l'intégralité des mouvements du corps du sujet. Le logiciel ART-Human® a été utilisé au cours de l'expérimentation pour reconstruire le squelette des sujets et permettre une capture des mouvements plus précise. ART-Human® permet la calibration du squelette d'une personne capturée en calculant la taille de chaque segment. Il utilise un modèle biomécanique et un système de cinématique inverse pour reconstruire et visualiser, en temps réel, la posture du corps de l'utilisateur. Cette reconstruction du corps de l'utilisateur était utilisée pour animer un avatar [colocalisé](#) et en temps réel dans l'application de l'expérimentation avec le moteur physique XDE (Figure 5.8, gauche).

Le retour visuel par défaut ([Environnement Virtuel](#) et avatar) pouvait être accompagné d'un retour vibrotactile. Le dispositif vibrotactile précédemment développé contrôlait simultanément dix vibreurs. Ils étaient positionnés tout le long du bras droit du sujet à l'aide de la veste spécialement développée pour le maintien en position des vibreurs (voir Mise à jour du dispositif retour vibrotactile).

L'ensemble du dispositif de [RV](#) fonctionnait à une fréquence de 60 [Hz](#). Il était contrôlé par un ordinateur équipé d'un système de son. L'application servant à l'expérimentation a été développée avec le logiciel [Unity3D](#). Elle permettait le contrôle de l'expérimentation, l'enregistrement des données et les différentes actions liées au scénario. Le moteur physique XDE développé par le [CEA List](#), intégré à [Unity3D](#), a été utilisé. Il permet une simulation physique réaliste et en temps réel, ainsi que des moyens de détecter les collisions et le contrôle d'un avatar basé sur les données de ARTHuman. Le module de rendu vibrotactile (Moteur physique et Algorithme de rendu vibrotactile) était utilisé.



Figure 5.4. – Sujet en situation expérimentale. Il porte un casque immersif avec le capteur infrarouge externe pour la capture de mouvements face à lui. Il est aussi équipé d'une combinaison ART pour la capture de mouvements.

5.5.1.3. Environnement virtuel

L'expérimentation comptait deux environnements virtuels : un pour la session d'entraînement du sujet et un pour l'expérimentation. L'environnement d'entraînement a été réalisé à partir de primitive 3D d'Unity3D et de modèle 3D simple modélisé avec le logiciel de modélisation 3D Blender®. L'EV était composé d'une table de un mètre de hauteur et d'une boîte avec une paroi transparente et une ouverture face au sujet (Figure 5.5). Quatre cibles (sphères bleues de 7 cm de diamètre) étaient positionnées à l'intérieur de la boîte à différentes positions. Seulement une cible était affichée à la fois. Cette table était placée dans une salle de 3x3m (correspondant à la taille réelle de l'espace du CAVE™). La correspondance de la taille entre l'EV et l'espace physique (réel) a été conçue pour permettre une marche réelle du sujet.



Figure 5.5. – Environnement d'entraînement. L'avatar est dans sa position initiale (pose en T) avant l'ajustement au participant.

L'environnement expérimental a été modélisé sous le logiciel de Conception Assistée par Ordinateur (CAO) CATIA®, puis importé dans le logiciel Unity3D. Cet environnement représente une partie de ToreSupra/West, le réacteur expérimental de fusion par confinement magnétique du CEA. L'environnement était composée d'une plateforme d'accès à l'arrière d'une antenne de chauffage, composé de poutres de support et de tuyaux. Quatre cibles (sphères bleues, de la même taille que dans l'entraînement) étaient positionnées à différentes positions dans l'environnement, au milieu de la forêt de tuyaux. Elles étaient positionnées à portée de bras (Figure 5.6, droite). Au cours de l'expérience, une seule était affichée à la fois. Les cibles étaient positionnées entre 1 m et 1.6 m de hauteur tel que :

- cible 1 centrée en bas,
- cible 2 à droite,

- cible 3 centrée en haut,
- cible 4 à gauche.

Cette distribution a été choisie pour diversifier les mouvements. La position et la taille des cibles ont été sélectionnées pendant les prétests.

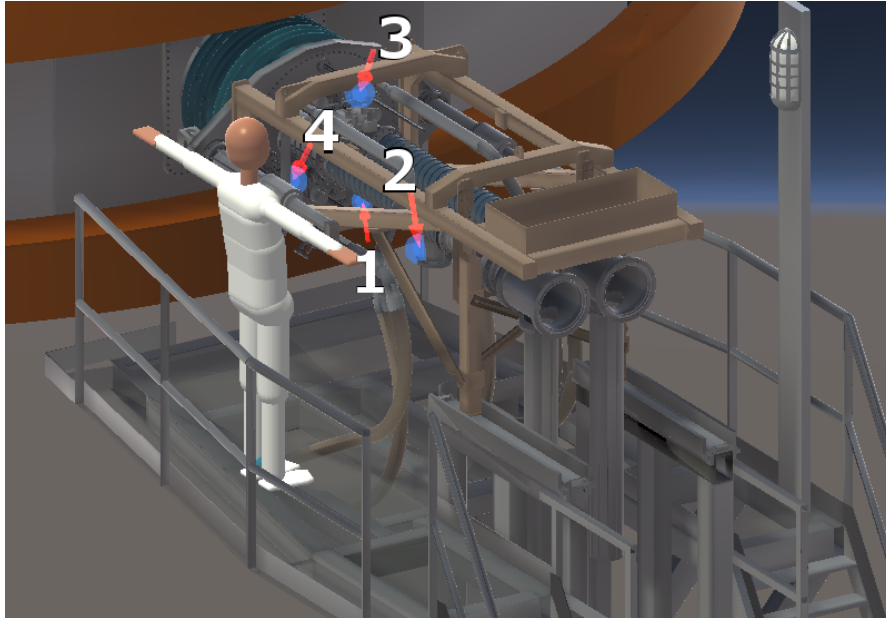


Figure 5.6. – Environnement expérimental. L'avatar est dans sa position initiale (pose en T) avant l'ajustement au participant.

5.5.1.4. Condition Expérimentale

Pour cette expérience, il y avait une variable indépendante : le type de retour sensoriel des contacts, avec quatre conditions. Le retour pouvait être visuel seulement (condition *visual*) ou augmenté de stimulation vibrotactile. Le retour vibrotactile était utilisé pour représenter les contacts entre le membre supérieur droit de l'avatar et l'environnement. Il y avait trois conditions vibrotactiles différentes. La première utilisait dix vibreurs distribués tout le long du bras pour offrir un rendu localisé des points de contact en activant le vibreur le plus proche (condition *nearest*) du point de contact (voir algorithme de rendu vibrotactile « *nearest* »). La seconde condition utilisait également les dix vibreurs. Elle tirait avantage du phénomène [psychophysique](#) appelé « *funneling effect* » pour rendre la position des contacts avec une plus grande précision (condition *funneling*) (voir algorithme de rendu vibrotactile « *funneling* »). Pour la dernière condition, un vibreur unique (condition *single*) était utilisé. Il était positionné sur le dessus de la main (vibreur numéroté '0', voir Figure 5.3) pour représenter tous contacts avec l'environnement, peu importe la position sur le bras (voir algorithme de

rendu vibrotactile « *single* »). Dans les conditions vibrotactiles, quand le bras du sujet venait en contact avec un objet de l'EV, une vibration continue était activée sur le dispositif vibrotactile. Plus la force du contact appliqué par le sujet sur l'objet était importante, plus l'intensité de la vibration était importante. Ces trois modes de retour vibrotactile offraient différents niveaux de finesse de rendu, allant d'une répartition du rendu unique à un rendu virtuellement « continu » sur l'ensemble du bras. La détection de collision était réalisée par le moteur physique XDE. Le système détectait continuellement les contacts, peu importe la condition. Tous les contacts étaient enregistrés durant l'expérience. Pour chaque vibreur, la puissance d'activation était enregistrée de 0 à 100. Aucune métaphore visuelle (par exemple flèche de contact (SRENG, LECUYER, MEGARD et al. 2006)) ni de retour sonore n'ont été utilisés quelle que soit la condition.

5.5.1.5. Procédure

Les sujets étaient reçus dans une salle d'accueil, où l'expérimentateur leur lisait les instructions. chaque sujet devait ensuite donner son consentement écrit. L'acuité stéréoscopique du sujet était testée et il lui était demandé de remplir un questionnaire sur la susceptibilité au mal des transports (Motion Sickness Susceptibility Questionnaire Short-form (GOLDING 2006)). Cette procédure était utilisée pour rejeter les personnes hautement sujettes aux cinétoses (mal des transports) en temps normal, pour éviter un éventuel mal de simulation. Une fois accepté, le sujet était équipé des constellations nécessaires à la capture de mouvements (dix-sept constellations de marqueurs passifs) et du dispositif de retour vibrotactile (Figure 5.4). Les vibreurs étaient répartis sur l'avant-bras, le bras et la main droite (Figure 5.3) à l'aide qu'une veste prévue à cet effet. Une fois équipé, le sujet était conduit à l'espace d'expérimentation et équipé du casque immersif.

Une étape de calibration était requise afin de construire un modèle biomécanique du sujet. Le sujet devait suivre la procédure de calibration du logiciel ART-Human®, commençant par demander au sujet de se tenir en pose en « T ». Ensuite, le sujet devait bouger tous ses membres en effectuant des rotations de chacune de ses articulations dans tous les degrés de liberté possible pour que le système calcule la taille de chaque segment du corps de l'utilisateur et la position des constellations par rapport à ceux-ci. À la fin de la calibration, le logiciel calculait le squelette correspondant à l'utilisateur (Figure 5.7). Un fichier de configuration avec les informations sur ce squelette : taille des membres, position des articulations, etc. était généré. Celui-ci était utilisé par le moteur XDE pour créer un avatar à la morphologie du sujet dans l'EV. Cet avatar était constitué de primitives (cylindres) (Figure 5.6).

Après cette phase de calibration, l'expérimentation pouvait commencer. Elle était divisée en quatre sessions, une pour chaque condition expérimentale. Une

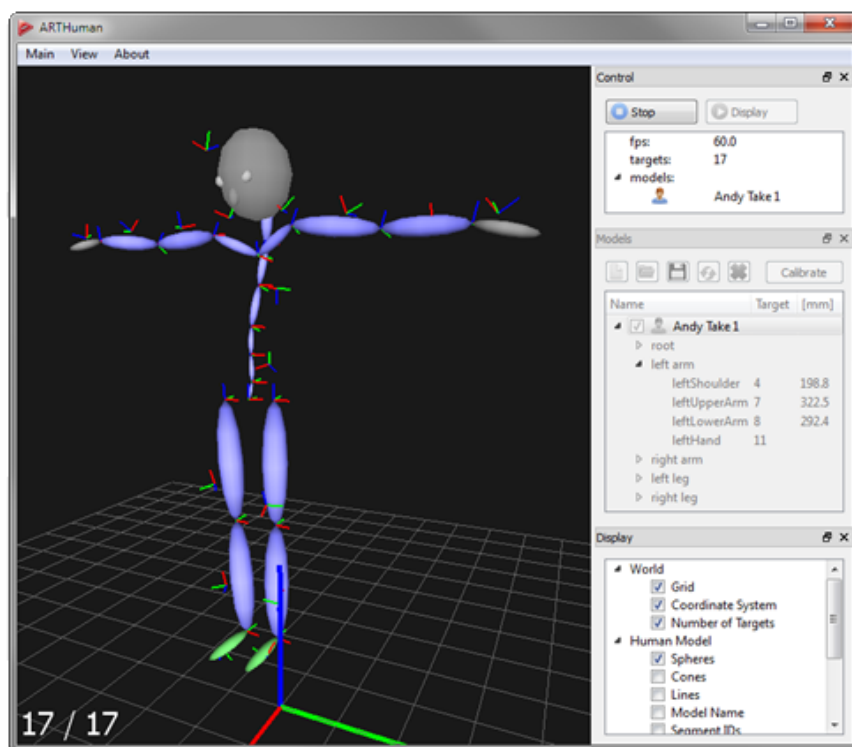


Figure 5.7. – Squelette créé par le logiciel ART-Human

session était composée de deux étapes : un entraînement, suivi d'une phase expérimentale enregistrée. Au lancement des EVs, l'avatar à la morphologie du sujet était immobile en position en « T », face à l'environnement (table ou antenne). Plusieurs étapes succinctes d'ajustement et de configuration étaient réalisées au début de chaque session :

- L'orientation du champ de vision du casque immersif était calibrée pour correspondre au référentiel du système de capture de mouvements ART. Pour cela, le sujet effectuait un mouvement de balayage de la tête de droite à gauche. Lorsque l'orientation de la tête était face à l'écran du fond : dans l'alignement du CAVE™, la vision était automatiquement recentrée pour que la personne soit bien alignée avec l'EV.
- La connexion Bluetooth entre l'application de l'expérience et le contrôleur du dispositif vibrotactile était établie et testée. C'est par celle-ci que les instructions de vibration étaient envoyées depuis la simulation vers le contrôleur. Pour tester le bon fonctionnement des vibreurs, ils étaient activés un à un en demandant à l'utilisateur d'indiquer la position de vibration. Cela permettait d'une part d'en vérifier le bon fonctionnement, et de changer immédiatement d'éventuels vibreurs défectueux. D'autre part, cela permettait de s'assurer que le sujet ressentait suffisamment la vibration de chaque vibreur.
- L'avatar était ensuite « attaché » au sujet. L'avatar était calibré pour être colocalisé avec le corps du sujet et pour suivre tous les mouvements du sujet en temps réel. Le sujet voyait l'avatar comme son propre corps depuis la vue subjective à la première personne (Figure 5.8, droite).

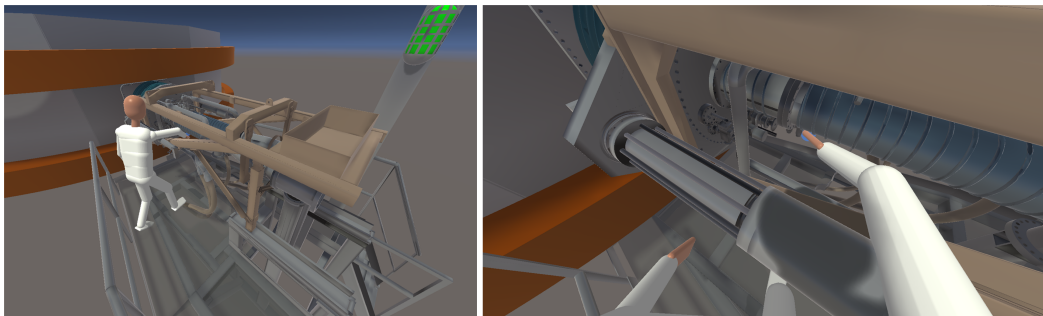


Figure 5.8. – Gauche. Vue globale de l'environnement expérimental avec l'avatar en train de réaliser la tâche. La capture de mouvements permet d'animer l'avatar colocalisé. Droite. vue subjective présentée au sujet à l'intérieur du casque immersif.

Le sujet était dans un premier temps immergé dans la session d'entraînement, pour s'exercer à la tâche et comprendre le fonctionnement du rendu vibrotactile et du contrôle de son corps virtuel. Il lui était demandé d'atteindre les points d'intérêts (cibles) dans l'EV avec la main droite, puis de maintenir la position pendant une seconde afin de la valider. Ces cibles se présentaient sous forme de

sphères bleues semi-transparentes, dont l'intensité de couleur changeait lorsque la main du sujet pénétrait la cible et disparaissait après validation. Il était demandé au sujet d'atteindre les cibles avec des mouvements les plus naturels et les plus fluides possible, comme il le ferait dans le monde réel. Aucune instruction particulière n'était donnée concernant le comportement à avoir vis-à-vis des contacts.

Après chaque session d'entraînement, le second environnement était affiché ; les étapes de configuration et d'ajustement étaient répétées. Lorsque le sujet se sentait prêt, il pouvait commencer le premier essai. Chaque essai consistait en la séquence suivante :

- Le sujet se tenait debout, les bras le long du corps.
- L'expérimentateur faisait apparaître une nouvelle cible et un signal sonore était émis, le sujet était alors autorisé à commencer l'atteinte de la cible.
- Une fois la cible atteinte, il devait maintenir la position pendant une seconde pour la valider.
- Une fois validée, la cible disparaissait et un nouveau signal sonore était joué, validant la fin de l'essai.
- Le sujet devait alors reprendre sa position initiale avant qu'un nouvel essai puisse commencer. Il pouvait prendre une courte pause avant de continuer afin d'éviter toute fatigue physique.

Chaque sujet réalisait quatre sessions : une pour chacune des quatre conditions :

Session A : retour vibrotactile avec dix vibreurs fonctionnant avec l'algorithme « *funneling* »

Session B : retour vibrotactile avec dix vibreurs fonctionnant avec l'algorithme « *nearest* »

Session C : retour vibrotactile avec un vibreur unique sur la main, l'algorithme « *single* »

Session D : aucun retour vibrotactile (condition *visual*).

L'expérimentation était interrompue par une pause entre chaque session. Pendant ce temps de pause, le sujet pouvait se reposer. Il devait également remplir trois questionnaires : le cyber-malaise SSQ (KENNEDY, LANE, BERBAUM et al. 1993) pour évaluer le [cyber-malaise](#), le NASA-TLX (HART et STAVELAND 1988) mesurant la charge de travail perçue et le SUS (BROOKE 1996) abordant la facilité d'utilisation du dispositif. Chaque session était constituée de 20 essais. Un essai correspondant à une des quatre positions de cible. Chaque condition de cible était répétée cinq fois. Pour une session donnée, l'ordre de succession des cibles était tiré aléatoirement pour chaque sujet.

Les sujets étaient répartis de manière aléatoire en quatre groupes. L'ordre des sessions était différent pour chaque groupe dans le but de contrôler d'éventuels effets d'ordre ou de répétition (fatigue, apprentissage, etc.). Les quatre groupes étaient :

Groupe 1 : ABCD

Groupe 2 : BDAC

Groupe 3 : CADB

Groupe 4 : DCBA

Après avoir réalisé les quatre sessions de l'expérimentation, il était demandé aux sujets de compléter un questionnaire IPQ qui permet d'évaluer la présence, puis de répondre à quelques questions posées par l'expérimentateur à propos de leur sentiment sur l'immersion, l'avatar ou encore le retour vibrotactile.

5.5.1.6. Données enregistrées et analysées

Au cours de l'expérimentation, plusieurs indicateurs comportementaux et événements ont été enregistrés en vue d'être post-traités et analysés. Ils étaient constitués des coordonnées dans l'espace 3D des constellations du membre droit supérieur, en fonction du temps. Ces positions étaient récupérées à partir des données calculées par le logiciel ARTHuman. Elles correspondaient au centre des segments : avant-bras, bras et main. Les données enregistrées incluaient aussi les coordonnées 3D des segments du membre droit supérieur (avant-bras, bras et main) de l'avatar. Ces deux jeux de coordonnées (marqueur et avatar) étaient dans le même référentiel. À partir de ces données de positionnement, la distance entre le bras du sujet (données marqueur) et le bras virtuel (donnée de l'avatar) était calculée. Simultanément, le nombre de points de contact détectés à chaque instant par le moteur physique était enregistré.

Afin de réduire le bruit dans les données, certains jeux de données ont été tronqués. Dans certains cas, les sujets tentaient de prendre un chemin avant de s'apercevoir qu'il leur était impossible d'atteindre la cible. Dans ces cas, ils revenaient à une position proche de celle initiale (en dehors de l'environnement) avant d'essayer une autre trajectoire, et ceci jusqu'à en trouver un passage permettant d'atteindre la cible et la validation de l'essai. Les données correspondant aux parties de trajectoire de tentatives ratées au cours d'un même essai ont été supprimées. Seul le mouvement final d'atteinte a été gardé pour chaque essai (partant d'une position extérieure à l'environnement jusqu'à la validation) (Figure 5.9)

Les mesures principales sur lesquelles nous nous sommes concentrés sont liées à la notion de CVP. Nous pensons que cette cohérence peut être qualifiée en mesurant les différences de posture et de mouvement de l'utilisateur et de sa représentation virtuelle. Pour l'analyser, nous avons d'abord calculé le RMS de la distance entre la position du sujet et celle de l'avatar. Nous appellerons par la

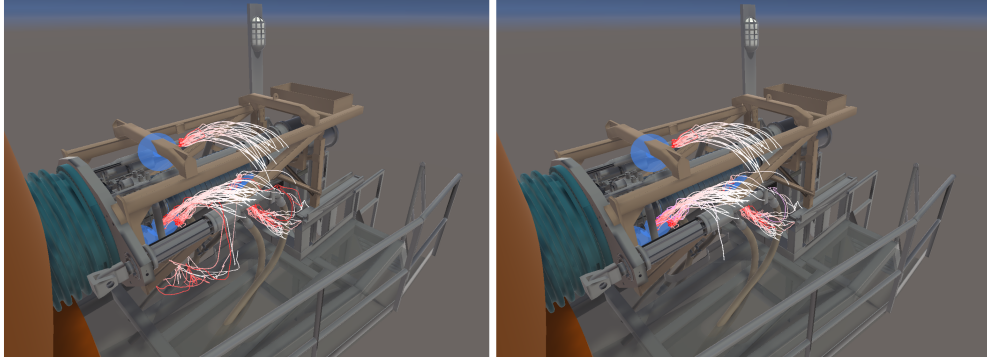


Figure 5.9. – Gauche : représentation de la trajectoire complète des mouvements de la main de l'avatar pour un sujet. Droite : mêmes jeux de donnée sans les tentatives d'atteinte non finale.

suite cet indicateur l'erreur de colocalisation (RMSE), définit par l'Équation (5.2).

$$RMSE = \sqrt{\sum_{t=1}^n (error(P_{avatar,t}, P_{user,t}))^2} \quad (5.2)$$

Avec pour fonction *error* la distance entre la position de l'avatar à celle du sujet à chaque instant. Nous avons combiné les erreurs des trois segments du bras (main, bras et avant-bras) (Figure 5.10).

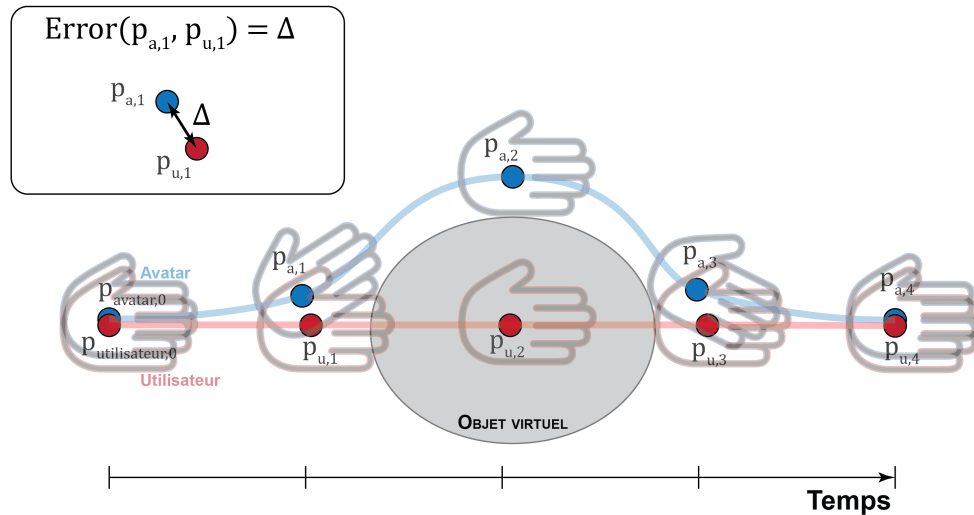


Figure 5.10. – Exemple de trajectoire de la main de l'utilisateur (rouge) et de l'avatar (bleu) pour le calcul de l'erreur de colocalisation.

Puis nous avons analysé le **RMS** de l'écart angulaire entre la trajectoire de l'utilisateur et de l'avatar par segments. Nous appellerons par la suite cet indicateur la déviation de colocalisation (RMSD), défini par l'Équation (5.3).

$$RMSD = \sqrt{\sum_{t=1}^n (deviation(\vec{v}_{avatar,t}, \vec{v}_{user,t}))^2} \quad (5.3)$$

Avec pour fonction *deviation* l'angle (en radian) entre le vecteur directeur du mouvement de l'avatar par rapport à celui du sujet à chaque instant. Nous avons combiné les déviations des trois segments du bras (Figure 5.11).

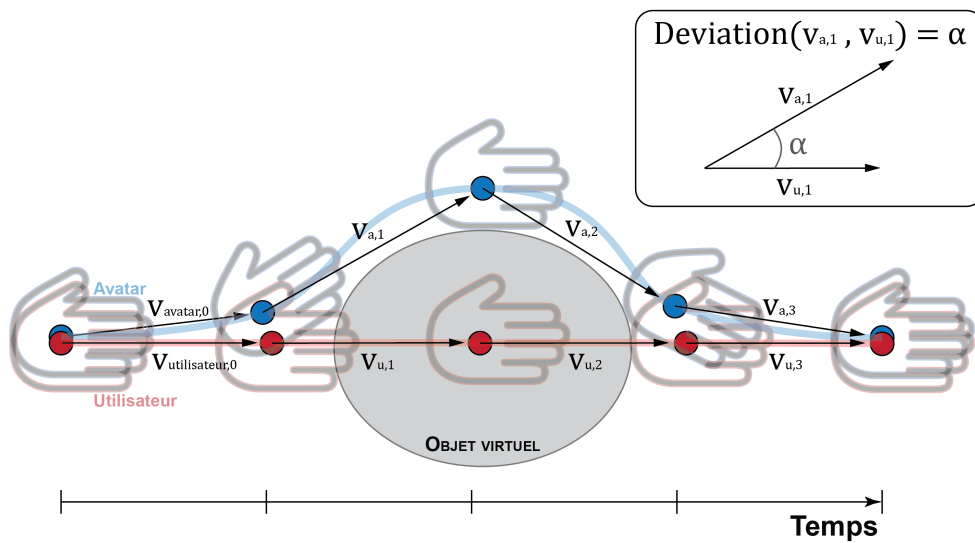


Figure 5.11. – Exemple de trajectoire de la main de l'utilisateur (rouge) et de l'avatar (bleu) pour le calcul de la déviation de colocalisation.

Ces variables sont des indicateurs directs du comportement du sujet vis-à-vis de l'environnement physique virtuel. En d'autres termes, cela nous permet d'évaluer la **colocalisation** du bras du sujet et celle de l'avatar pendant le mouvement d'atteinte de cible.

En tant qu'indice de comportement global, nous avons également calculé la durée des essais. Nous avons ensuite calculé le temps moyen de contact, le nombre de points de contact pendant le mouvement et le rapport entre le temps passé en contact et de la durée d'essai totale. Ces indicateurs ont été conçus pour analyser la façon dont les sujets traitent les informations de contacts en fonction des conditions expérimentales. Pour finir, les questionnaires ont été également pris en compte afin d'avoir des informations sur la charge de travail et l'utilisabilité du système.

L'analyse a été réalisée à l'aide de mesures répétées d'ANOVA. Nous avons par la suite réalisé des analyses post-hoc avec ajustement de Bonferroni et des tests de comparaison planifiée.

5.5.2. Résultats

5.5.2.1. Erreur de colocalisation (RMSE)

Nous avons calculé dans un premier temps le RMSE de colocalisation. L'erreur de colocalisation fait référence à l'écart entre la position réelle du sujet (obtenu avec le système de capture de mouvements) et la position de l'avatar (dont la posture est sujet aux contraintes dû à l'environnement). Nous avons calculé cet indicateur pour les segments du membre droit supérieur (incluant l'avant-bras, le bras et la main du sujet). La mesure répétée d'ANOVA avec les conditions expérimentales comme facteur révèle un effet significatif ($F(3, 81) = 7,5127$; $p = 0,00017$). Les analyses post-hoc avec l'ajustement de Bonferroni ont montré que les valeurs de RMSE dans les trois conditions vibrotactiles étaient plus faibles que dans la condition visuelle ($p < 0,005$). Ces trois conditions vibrotactiles n'étaient pas statistiquement différentes l'une de l'autre (Figure 5.12). Ce résultat suggère que la CVP a été améliorée par le retour vibrotactile. Cependant, la spatialisation du retour (conditions *funneling* et *nearest*) n'a pas montré d'effet significatif, par rapport à un retour unique. Nous poursuivons ensuite l'analyse de la CVP avec un indicateur lié à la colocalisation, mais prenant en compte la cinématique de mouvement.

5.5.2.2. Déviation de la colocalisation (RMSD)

Nous avons calculé le Root Mean Square de la Déviation de direction du mouvement (RMSD). L'erreur se réfère à l'écart en radian entre le vecteur direction de la trajectoire réelle du sujet (obtenue à partir de la position des cibles du système de capture) et la direction de trajectoire du mouvement de l'avatar. Nous avons calculé le RMSD pour le bras droit (qui comprend trois segments : bras, avant-bras et main). L'ANOVA avec les conditions expérimentales comme facteur interne révèle un effet significatif ($F(3, 81) = 11,020$; $p = 0,000004$). Par rapport au résultat du RMSE ci-dessus, nous trouvons la tendance d'un effet linéaire (Figure 5.13). Les analyses post-hoc subséquentes avec l'ajustement de Bonferroni ont montré que la déviation dans les conditions vibrotactiles était plus faible que dans la condition « *visual* » ($p < 0,05$). Les conditions « *funneling* » et « *nearest* » ne différaient pas statistiquement l'une de l'autre ($p > 0,50$). Les tests de comparaisons planifiées montrent que la condition « *single* » était statistiquement différente de la condition de « *funneling* » ($p < 0,05$). Nous avons également trouvé la tendance d'un effet entre la condition « *single*

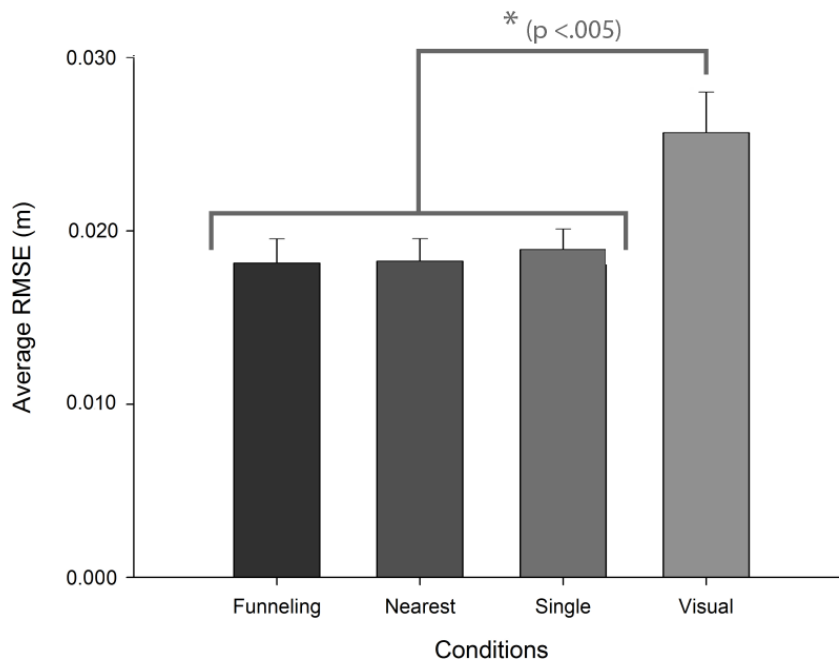


Figure 5.12. – Valeur moyenne (Avec déviation standard) de l'erreur de colocalisation (RMSE), en fonction des conditions expérimentales.

» et le groupe « *nearest* », « *funneling* » ($p = 0,054$). Comme les précédents résultats du RMSE, cela suggère que la CVP a été globalement améliorée par le feedback vibrotactile. En outre, les analyses montrent un effet partiel du retour spatialisé, par rapport à un vibreur unique. Nous avons poursuivi notre analyse en examinant la réaction des sujets aux collisions.

5.5.2.3. Durée moyenne des contacts

Nous avons analysé le temps de réaction lorsqu'un contact a été détecté avec la durée moyenne des contacts pendant un essai. Nous avons mesuré le temps de contact à partir du moment où un point de contact a été détecté le long du bras jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de points de contact détectés. Un effet significatif des conditions expérimentales a été trouvé ($F(3, 81) = 7,2249$, $p < 0,001$). Nous observons, comme pour l'analyse RMSD, une tendance d'effet linéaire (Figure 5.14). L'analyse post-hoc (Bonferroni) montre que la condition « *single* » n'est pas statistiquement différente de la condition « *visual* » ($p = 0,49$). Cependant, les conditions « *funneling* » et « *nearest* » donnent des valeurs significativement plus faibles de temps de contact moyen par rapport à la condition visuelle ($p < 0,005$). Les conditions « *funneling* » et « *nearest* » ne diffèrent pas statistiquement significativement l'une de l'autre ($p > 0,50$). Enfin, les tests

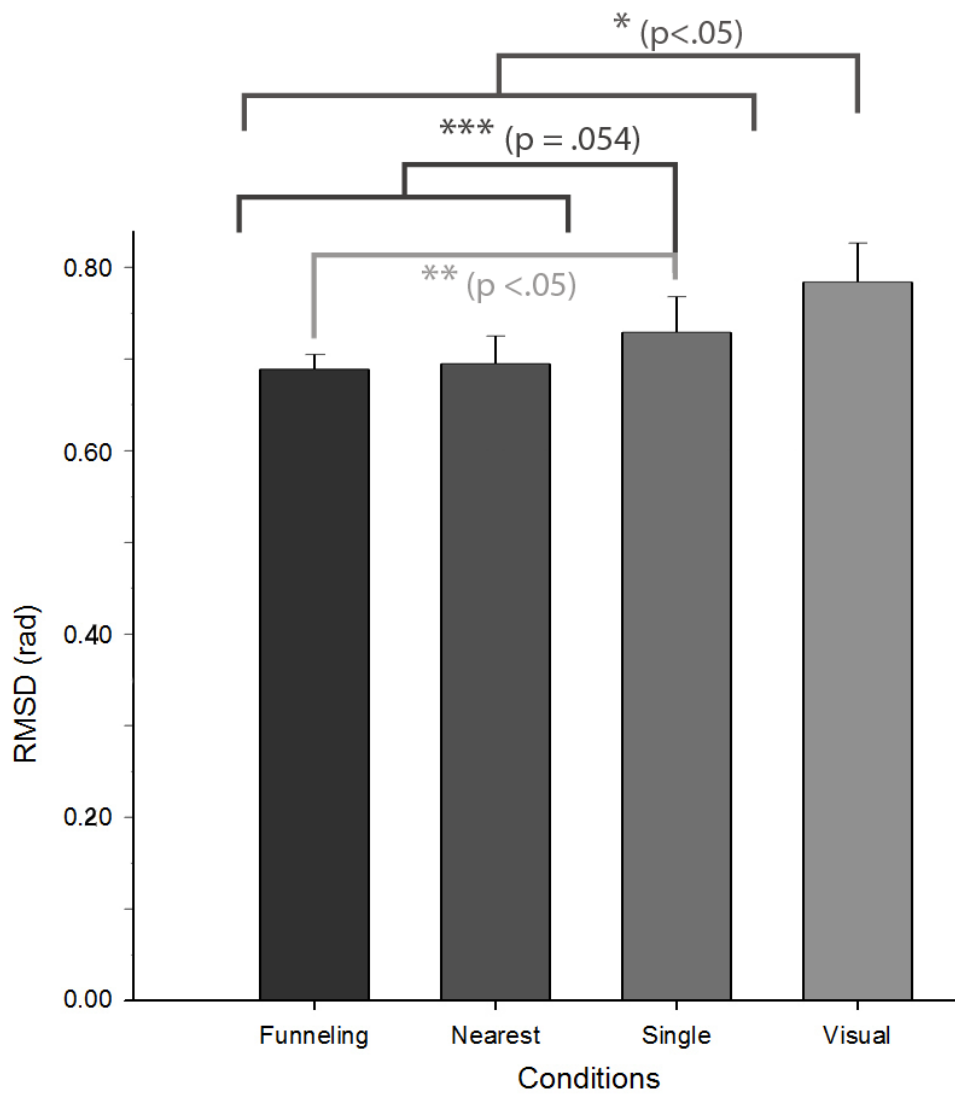


Figure 5.13. – Valeur moyenne (Avec déviation standard) de la déviation de colocalisation ([RMSD](#)), en fonction des conditions expérimentales.

de comparaisons planifiées ont révélé que la condition « *single* » était statistiquement différente du groupe « *nearest* », « *funneling* » ($p < 0,05$). Ce schéma de résultats suggère que le vibreur unique, non localisé, informe les sujets de l'apparition d'un contact, mais que les sujets doivent encore rechercher l'emplacement du contact, comme c'est le cas dans la condition visuelle pure. Alors que le rendu vibratoire spatialisé (*funneling* ou *nearest*) donne directement une indication sur l'emplacement du contact, réduisant ainsi le temps de réaction et donc le temps de contact.

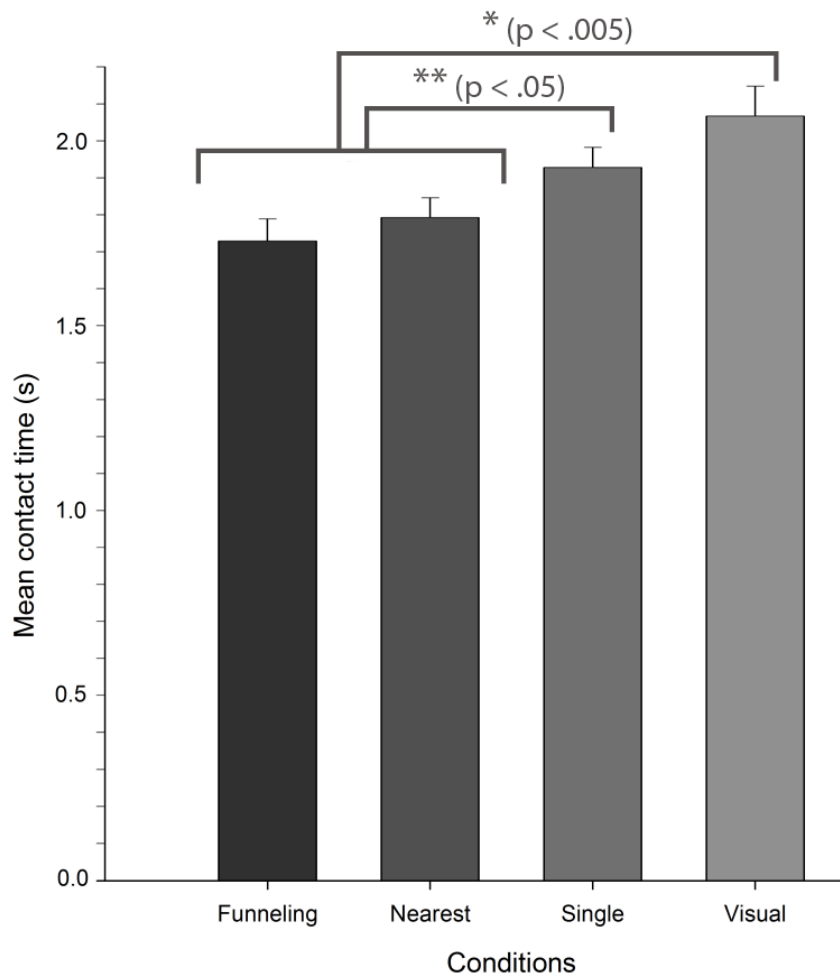


Figure 5.14. – Valeur moyenne (avec déviation standard) de la durée moyenne de contact pendant un essai, en fonction des conditions expérimentales.

Nous avons analysé ensuite, différents indicateurs globaux sur le comportement des sujets afin de mieux comprendre ces effets déjà observés.

5.5.2.4. Durée de l'essai

Nous avons analysé la durée des essais pour comparer la vitesse d'exécution en fonction des conditions. Un effet significatif de nos conditions expérimentales sur la durée de l'essai individuel a été trouvé ($F(3, 81) = 11.186, p < .001$). Les analyses post-hoc réalisées ensuite avec l'ajustement de Bonferroni ont montré que le temps nécessaire pour réaliser la tâche était plus court dans la condition visuelle seule, par rapport aux conditions avec retour vibrotactile ($p < .05$). Ces trois conditions vibrotactiles n'étaient pas statistiquement différentes les unes des autres (Figure 5.15). Ce résultat suggère une exécution plus rapide de la tâche en l'absence de feedback vibrotactile. Au vu des résultats déjà présentés, on peut expliquer cet effet par le fait que dans la condition visuelle, les sujets prennent moins conscience des erreurs de positionnement et des contacts. En conséquence, ils passent moins de temps à corriger leur posture. Cette diminution de la conscience des collisions (*collision awareness*) conduit à un affaiblissement de la validité écologique de l'interaction. Nous avons ensuite examiné différents aspects liés aux collisions pendant un essai.

5.5.2.5. Ratio de temps de contact

Nous avons calculé, pour chaque essai, le rapport entre la durée totale du contact et la durée totale de l'essai. Nous avons constaté que les conditions expérimentales avaient un effet significatif sur ce ratio ($F(3, 81) = 10.432, p < .001$). Malgré le fait que la durée de l'essai est plus courte dans la condition visuelle (Figure 5.15, ci-dessus), les sujets passaient proportionnellement plus de temps à heurter l'EV dans cette condition ; par rapport aux conditions avec retour vibrotactile (Figure 5.16). Le ratio de temps de collision était plus faible avec le feedback tactile : *Funneling* : $M = 0.559$; $SD = 0.083$ ($p < .005$), *Nearest* : $M = 0.585$; $SD = 0.074$ ($p < .005$), *Single* : $M = 0.582$; $SD = 0.061$ ($p < .005$) que dans le cas de la condition visuelle ($M = 0.645, SD = 0.093$). Aucune différence significative n'a été trouvée entre les trois conditions vibrotactiles. Comme proposé précédemment, les sujets ont une meilleure compréhension des contacts, ce qui influe sur leur comportement.

5.5.2.6. Moyenne du nombre de contacts

Le nombre moyen de points de contact le long du bras au cours d'un essai a été analysé. Comme attendu au regard des analyses précédentes, l'ANOVA avec les conditions expérimentales comme facteur montre un effet significatif ($F(3, 81) = 13.744, p < .001$). Le nombre de points de contact était plus élevé pour la condition « *visual* » par rapport aux conditions avec retour vibrotactile (Figure 5.17). Aucune différence entre les données des conditions vibrotactiles n'a

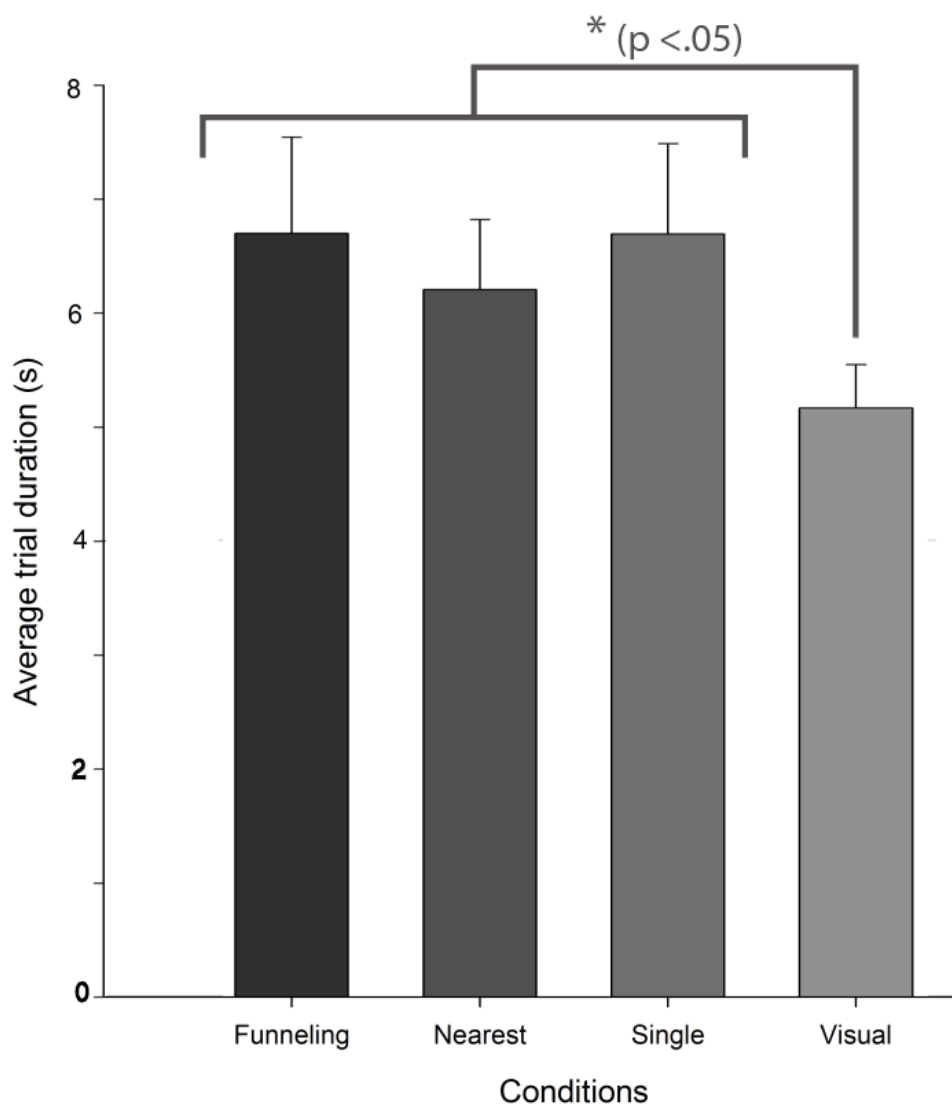


Figure 5.15. – Valeur moyenne (avec déviation standard) de la durée moyenne d'un essai, en fonction des conditions expérimentales.

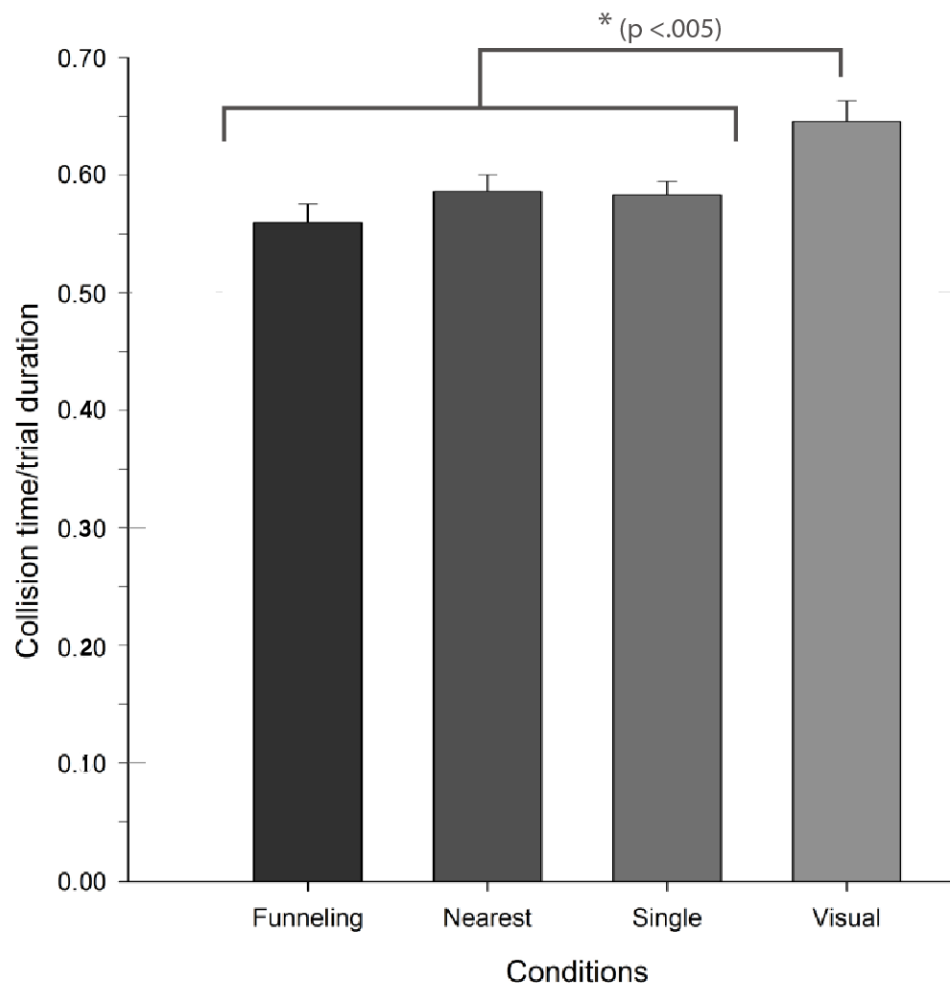


Figure 5.16. – Valeur moyenne (avec déviation standard) du ratio entre la durée passée en contact sur à la durée totale d'un essai, en fonction des conditions expérimentales.

été trouvée. Ce résultat suggère que, par rapport à la rétroaction visuelle pure, l'information vibrotactile permet d'augmenter la conscience spatiale des sujets, permettant d'éviter le contact avec des objets environnementaux. Le fait que nous trouvions peu de preuves de la différence entre l'utilisation d'un vibreur unique (non localisé) et la spatialisation du retour suggère que la rétroaction vibrotactile agit avant tout comme un signal d'avertissement, cette information suffit à renforcer la conscience spatiale.

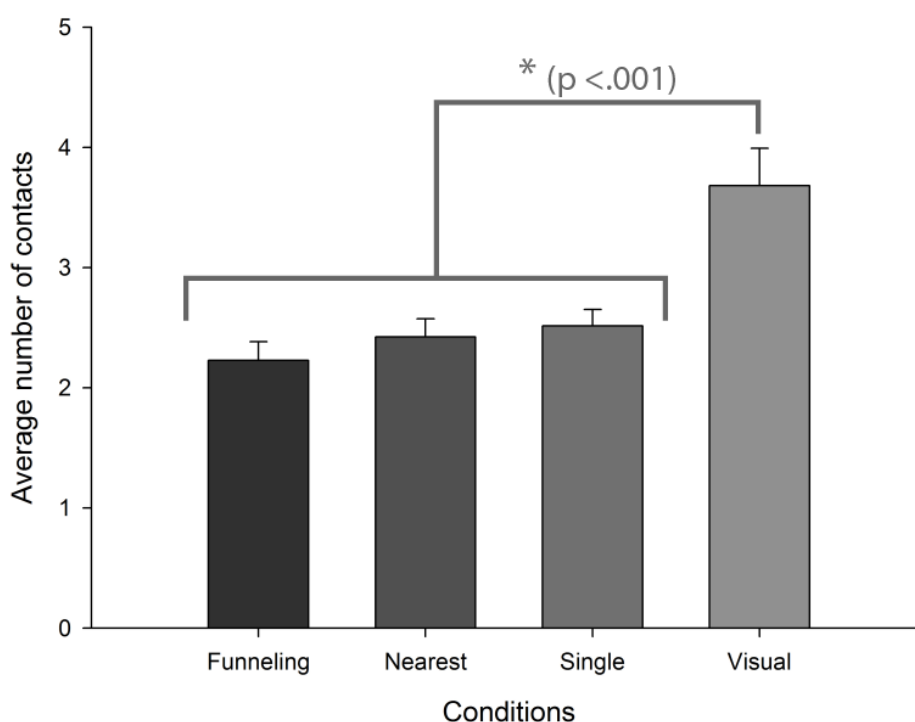


Figure 5.17. – Valeur moyenne (avec déviation standard) du nombre moyen de contacts pour un essai, en fonction des conditions expérimentales.

5.5.2.7. Questionnaires

Pour finir, nous avons analysé les données subjectives offertes par les questionnaires. Le score global des questionnaires sur la charge de travail (Nasa-TLX) et l'utilisabilité du système (SUS) a été analysé en fonction des conditions expérimentales. L'ANOVA n'a montré aucune différence statistique entre conditions pour les deux scores (Figure 5.18). Le score d'utilisabilité est supérieur à la moyenne (BANGOR, KORTUM et MILLER 2009) signifiant que le dispositif global (peu importe la condition) a été considéré comme accessible. Le dispositif

et l'ajout d'information vibrotactile n'ont pas non plus d'impact négatif sur la charge de travail.

Conditions	<i>Funneling</i>	<i>Nearest</i>	<i>Single</i>	<i>Visual</i>
SUS Score	70,53 (2,78)	70,71 (2,28)	67,77 (2,56)	69,91 (2,55)
Nasa-TLX Score	23,43 (2,10)	24,78 (2,46)	25,68 (2,74)	22,82 (2,50)

Figure 5.18. – Valeur moyenne (avec déviation standard) des scores des questionnaires SUS et Nasa-TLX, en fonction des conditions expérimentales.

5.5.3. Discussion

Dans cette étude expérimentale, plusieurs conditions de retour vibrotactile ont été étudiées dans un contexte de mouvement d'atteinte de cible en environnement encombré. L'immersion a été réalisée avec un casque immersif et une représentation [colocalisée](#) du corps répondant aux mouvements de l'utilisateur. En comparaison à un retour purement visuel, l'information vibrotactile de contact avait pour objectif d'améliorer la conscience des collisions. Plus particulièrement, nous avons comparé deux retours vibrotactiles spatialisés utilisant dix vibreurs positionnés le long du membre supérieur droit, un retour non spatialisé utilisant un vibreur unique et une condition sans retour vibrotactile. Les participants devaient atteindre des cibles avec la main droite dans un [EV](#) complexe. Ils devaient adopter des mouvements fluides et les plus naturels possible. Aucune instruction de performance temporelle n'était spécifiquement demandée.

Nous nous sommes spécifiquement intéressés à l'amélioration de la perception spatiale et la [CVP](#) dans une tâche d'intervention manuelle. Pour étudier ces aspects plusieurs indicateurs ont été analysés : l'erreur et la déviation de colocalisation, la durée des contacts, la durée des essais, le rapport entre durées passées en contact et durée totale ainsi que le nombre de contacts. Nous avons mis en évidence des preuves de l'apport des informations tactiles sur l'amélioration des aspects physiques de l'immersion.

Tout d'abord, les sujets en présence de stimulation vibrotactile alertant des contacts ont montré moins d'erreur et de déviation de colocalisation ([RMSE](#) et [RMSD](#)). Ces indicateurs sont directement liés à la [CVP](#). Ce premier effet positif peut être expliqué par le fait que l'information tactile permet d'augmenter la conscience spatiale d'une part et d'autre part la [CVP](#), en aidant le sujet à maintenir la [colocalisation](#) spatio-temporelle entre leur bras réel et le bras virtuel. L'incohérence visuo-proprioceptive correspond à une non-intégration des contraintes que devrait avoir l'environnement sur l'utilisateur, la raison principale est l'absence d'information haptique (proprioceptive et tactile) rompant la

boucle d'interaction standard : perception-cognition-action. La substitution des informations proprioceptives par le retour tactile rétablit la boucle d'interaction.

Par ailleurs, nous avons trouvé des indicateurs d'une meilleure conscience des collisions et une meilleure compréhension spatiale à travers l'analyse des contacts. En effet, proportionnellement à la durée des essais les sujets sont moins longtemps en contact : les contacts avec l'environnement sont moins fréquents et moins longs. Ceci étant valable dans toutes les conditions vibrotactiles, la spatialisation des contacts n'est pas nécessaire pour la prise de conscience des collisions. L'information somesthésique joue avant tout un rôle d'avertissement. C'est une information simple qui est à elle seule capable d'accroître la conscience spatiale et le comportement spatial global. Ces observations valident l'hypothèse H1 et sont en accord au résultat des précédentes études.

Les résultats de l'étude de la déviation de colocalisation et de la durée des contacts permettent de mettre en évidence l'apport de la spatialisation des retours vibrotactiles. Comme proposer en hypothèse H2, les deux feedback spatialisés (*nearest* et *funneling*) ont permis aux sujets d'avoir une meilleure cohérence de mouvement et des contacts plus courts. La différence de temps observée n'est pas négligeable dans un contexte de contrôle moteur. Ce temps plus court montre une intégration plus rapide de l'information de collision et de la réaction qui en découle. Les informations localisées permettent une prompte identification de la position des contacts entre son corps et l'environnement. Notamment elles réduisent la nécessité de recherche visuelle, qui est nécessaire dans le cas du retour vibratoire unique. Cette analyse est soutenue par les données subjectives (entrevue ouverte de fin entre l'expérimentateur et le sujet). Les sujets ont généralement indiqué que l'information supplémentaire fournie par le dispositif vibrotactile multi-localisé était pertinente pour trouver l'emplacement des points de contact. Le tout permettant une réaction accrue et une correction directe du mouvement incriminé. L'amélioration de la rapidité de prise de conscience de la collision et de sa position permet une meilleure réactivité et aboutit à une dynamique de mouvement plus cohérente vis-à-vis des contraintes de l'environnement. C'est sans doute la raison pour laquelle on retrouve cet effet dans l'étude de l'indicateur **RMSD** (traduisant la dynamique du mouvement) et non pas avec l'étude du **RMSE** (indicateur plus général). L'apport de la localisation devient d'autant plus important dans le cas d'interaction multiple. Il permet d'identifier plusieurs points de contacts simultanément. Ce phénomène devrait avoir encore plus d'effet dans le cas d'une interaction faisant intervenir plusieurs membres (cas d'interaction corps complet). L'information vibrotactile spatialisée est d'autant plus pertinente dans les cas où la perception visuelle est restreinte : absence de vision directe sur l'interaction. Par exemple, le cas d'un contact dans le dos de l'utilisateur ou d'un membre, dont la vision, est obstrué par l'environnement. Sans la modalité visuelle, l'information transmise par le vibreur unique, informa-

tion non spatialisée, ne donne qu'une information très globale et son apport est plus limité.

En ce qui concerne les questionnaires complétés par les sujets entre les sessions, aucune différence significative n'a été observée concernant la charge de travail (Nasa-TLX) et l'utilisabilité (SUS) du dispositif en fonction des conditions. L'équipement et l'information vibrotactile fournie à l'utilisateur n'ont pas eu d'impact négatif sur la facilité d'utilisation et ni sur la charge de travail.

Pour finir, aucune différence statistique n'a été observée concernant les deux conditions de rétroaction vibrotactile multi-localisées (*funneling* et *nearest*), ceci remettant en question l'hypothèse H3. Le fait qu'il n'y ait pas de différence entre ces deux algorithmes de rendu peut indiquer qu'une augmentation de la résolution de l'affichage spatialisé n'est pas nécessaire. Il est possible qu'en raison de la relative proximité des vibreurs un positionnement plus précis ne soit pas nécessaire pour adapter son comportement. Le rendu *funneling* a avant tout un rôle de confort. Le détail du fonctionnement des retours spatialisés n'était pas donné à l'utilisateur pendant l'expérimentation. Lors de l'entretien final avec l'expérimentateur, les personnes n'ont en général pas su définir la différence entre les deux systèmes. Il semble nécessaire d'approfondir la question en proposant une tâche plus focalisée sur la spatialisation précise de contact. Dans le cas de la tâche actuelle, la connaissance de la position de contact avec une précision moyenne est suffisante à l'utilisateur pour adapter ces mouvements. Il est également possible que cette absence de bénéfice soit due aux limitations du dispositif vibrotactile utilisé dans cette expérience et à une configuration insuffisante de l'algorithme *funneling*. La sensibilité aux stimuli vibrotactiles peut varier considérablement entre les personnes et la localisation de stimulation sur le corps. Un paramétrage individualisé pourrait être nécessaire pour rendre l'algorithme *funneling* plus efficace.

Pour donner suite à cette expérimentation, nous avons souhaité faire passer une population réduite d'opérateurs experts sur le même protocole. Ils ont été pris dans l'équipe d'intégration machine du [CEA IRFM](#). L'objectif était de comparer leurs comportements à ceux observés au cours de l'expérimentation. De plus, cela nous a permis d'analyser l'acceptabilité au dispositif mis en place et d'avoir un retour d'expérience de personnes expertes. La faible taille de la population (trois opérateurs) et le fait que les conditions de passation étaient différentes (les passations ont eu lieu dans les locaux du [CEA](#) et non au [CRVM](#)) rendent l'analyse statistique difficile. Subjectivement, les sujets experts ont montré des comportements similaires aux sujets novices ayant réalisé l'expérimentation. De plus, lors de l'entrevue avec l'expérimentateur, leur retour était positif vis-à-vis de l'environnement d'expérimentation. Ils ont déclaré que le dispositif et le retour tactile localisé permettaient de se sentir présent dans l'environnement et offraient un bon retour des contacts. L'ensemble leur semblait être un bon outil pour vérifier

la réalisation de tâche d'assemblage et qu'ils seraient prêts à l'utiliser pour leur besoin.

5.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes plus particulièrement intéressés à la réalisation de tâches d'intervention manuelle en [EV](#) en nous appuyant sur la [CVP](#). Trois hypothèses ont été proposées puis testées expérimentalement. Les hypothèses estimaient une meilleure conscience des collisions menant à une meilleure compréhension spatiale et un comportement proprioceptif réaliste. Par ailleurs, il était attendu un meilleur comportement lors de l'utilisation d'information de contact spatialisé. Dans la logique de la proposition faite en Chapitre 3, nous avons utilisé un retour vibrotactile substituant seulement les informations de contact.

Notre approche est basée sur une représentation visuelle dynamique et [colocalisée](#) du corps du sujet, mais répondant aux contraintes du monde virtuel et un retour sensoriel vibrotactile multilocalisé comme substitut aux informations proprioceptives. Les résultats suggèrent que le retour tactile améliore la [CVP](#). L'information somesthésique joue un rôle d'avertisseur compensant l'absence d'information kinesthésique. Cette information permet un comportement spatial respectant les contraintes de l'environnement. De plus, la spatialisation des informations permet, en rendant plus transparente la localisation de la position des contacts, un comportement dynamique plus en accord avec l'environnement.

Dans le chapitre précédent, nous avons analysé la première famille de scénarii : la navigation et l'accessibilité. Nous poursuivons avec le second aspect : les gestes d'atteinte de cibles en environnement contraint. La conscience spatiale et le respect des contraintes liées à l'environnement sont encore une fois des paramètres déterminants. Il semble que l'utilisation de la rétroaction vibrotactile pour améliorer la perception des collisions avec les éléments virtuels est une approche très prometteuse pour la promotion de la conscience spatiale de l'opérateur dans un environnement encombré. Avec un avatar soumis aux contraintes du monde virtuel, le retour tactile permet de maintenir une [CVP](#). En tant que tel, il est un facteur important pour la validité écologique des expériences virtuelles. Une grande quantité d'informations peut être fournie par la modalité tactile, notamment en utilisant des illusions perceptives telles que le « *funneling illusion* ». Néanmoins, son utilisation, pour augmenter la résolution de transmission des informations tactiles, n'a pas montré d'apport particulier dans notre cas d'étude. Il reste un formidable élément pour rendre plus confortable l'utilisation de retour spatialisé, sans impact négatif. L'utilisation de ces phénomènes a jusqu'à présent été peu étudiée et mériterait d'être approfondie.

Dans le cas présent, nous avons étudié la situation où les sujets utilisent un casque immersif. En conséquence, ils n'ont pas une vue directe de leurs bras. Celle-ci est compensée par la présence d'une représentation virtuelle. Cet avatar est soumis à la contrainte de l'environnement contrairement au sujet ne percevant pas d'information proprioceptive. Cette asymétrie laisse la possibilité d'incohérence visuo-proprioceptive. Nous avons vu l'importance de l'information vibrotactile dans la perception des incohérences entre le bras réel et virtuel. Une approche différente du problème peut être trouvée en situation de réalité augmentée, telle qu'étudiée par Pusch (Pusch, 2008), dans laquelle l'opérateur pouvait voir son propre bras. La [CVP](#) était alors obtenue en ajoutant un facteur visuo-visuel (entre les bras réel et virtuel). Il serait intéressant de confronter notre installation expérimentale dans un système [CAVE™](#), par exemple, où le sujet a une vision directe de son bras réel. En cela, les études confrontant des configurations [CAVE™](#) et [HMD](#) sont un sujet d'intérêt pour les travaux futurs.

Enfin, si la stimulation vibrotactile est capable d'améliorer la consistance visuo-proprioceptive, elle ne peut pas totalement se substituer à la rétroaction haptique. L'un des exemples les plus frappants est le cas où l'utilisateur a besoin de points d'appui dans l'environnement pour accomplir sa tâche. C'est notamment le cas, lors de la réalisation d'opérations de précision, quand le point d'appui permet de rigidifier la posture. Il serait intéressant de comparer l'utilisation de retour vibrotactile au retour haptique dans des [EVs](#) encombrés, dans lesquels les systèmes de retour de force haptique peuvent être intrusifs, pour analyser les limites. Nous pensons que l'usage d'interfaces tangibles et de feedback vibrotactile est une approche prometteuse pour l'étude de l'accessibilité complexe et de la tâche d'intervention dans la [RV](#).

6. Conclusion

Table des matières

6.1	Bilan	128
6.1.1	Synthèse des objectifs et hypothèses	129
6.1.2	Synthèse des résultats des expériences	130
6.2	Limitations et perspectives	134
6.2.1	Limites	134
6.2.2	Perspectives	134

Les travaux de recherche présentés dans ce manuscrit ont pour objectif d'apporter aux études de faisabilité d'opération de maintenance et d'assemblage une validité écologique. Nous avons abordé cela en déterminant les apports des modalités vibratoires et visuo-proprioceptive sur la compréhension spatiale en [EV](#). Pour cela, nous avons d'abord exploré l'utilisation de retour vibrotactile dans des conditions allant d'un cas abstrait à des conditions proches du réel. Les choix technologiques en matière de dispositif de visualisation nous ont également poussés à étudier les implications de la vision du corps dans les comportements en [EV](#). Cela nous a permis de déterminer des principes de fonctionnement adaptés aux problématiques rencontrées dans les scénarii étudiés.

Dans ce dernier chapitre, nous commencerons par résumer les différents objectifs et les hypothèses soulevées par ce travail. Les principaux résultats de recherches sur l'utilisation de dispositifs vibrotactiles au sein de tâches d'assemblage et de maintenance en [EV](#) seront ensuite exposés et synthétisés (section [6.1](#)). Nous ouvrirons ensuite une discussion sur les limites de l'étude actuelle. Enfin, nous conclurons ce chapitre par un certain nombre de perspectives futures (section [6.2](#)).

6.1. Bilan

Ces travaux de thèse étaient centrés autour de l'étude de tâches de montage et d'intervention qui doivent être étudiés dans la phase de conception d'environnements complexes. Le cadre est celui des réacteurs de fusion, environnement hautement technologique et mécanique dont la conception et l'assemblage proposent

de réels défis. Plus particulièrement, nous nous sommes intéressés à l'intervention des opérateurs humains lors de ces tâches. Lors d'intervention humaine, il est nécessaire d'étudier si la tâche peut être réalisée. Celle-ci est contrainte par l'accessibilité et la possibilité de l'opérateur de se mouvoir correctement dans l'environnement. Lors d'études d'opérations humaines d'accessibilité et de maintenance en RV, l'interaction avec l'environnement est un point crucial. L'absence de retour haptique (kinesthésique et tactile) conduit à une perception sensorielle incomplète dès l'instant où le sujet doit interagir avec l'environnement. Nous nous sommes orientés vers l'utilisation de retour vibrotactile et d'un avatar **colocalisé** pour compenser le problème de perception de l'espace et le manque d'information kinesthésique dont souffrent généralement les simulations de RV. Plus particulièrement, nous souhaitons compenser le manque de compréhension spatiale en EV dans le but d'obtenir un comportement de l'opérateur comparable sinon identique à celui observé en condition réelle.

Dans cette partie, nous synthétiserons les hypothèses et les objectifs. Nous poursuivrons en présentant une synthèse des résultats expérimentaux et des apports de ces travaux.

6.1.1. Synthèse des objectifs et hypothèses

Au cours de nos travaux, nous avons eu comme objectif d'étudier la faisabilité des scénarios d'assemblage et de maintenance dans des installations industrielles complexes pour que celles-ci soient écologiquement réalistes. Plus particulièrement, nous avons examiné dans ce contexte les interactions entre l'opérateur et l'environnement. Nous avons identifié comme point fondamental la compréhension spatiale. Cette compréhension est incomplète en RV en raison du manque de perception haptique (proprioceptive et tactile). Nous avons pour cela proposé l'utilisation de retour vibrotactile pour substituer les données haptiques manquantes. Nous préconisons également l'usage de mannequin virtuel **colocalisé** et morphologiquement adapté au sujet.

Nous nous sommes appuyés sur des études expérimentales. Les études réalisées représentent les problématiques rencontrées dans les cas d'étude des scénarios d'assemblage et de maintenance de manière simplifiée. Elles ont permis de tester nos hypothèses. Les travaux proposés s'appuient sur trois hypothèses principales :

- Hypothèse générale 1 : La transmission d'informations spatiales sous forme d'information vibrotactile est un moyen de substituer une partie des perceptions haptiques manquantes dans le monde virtuel. Elle permet d'améliorer la compréhension spatiale et le maintien d'une cohérence visuo-proprioceptive.

- Hypothèse générale 2 : L'augmentation de la résolution des informations vibrotactiles permet l'augmentation de la cohérence proprioceptive et la compréhension des collisions.
- Hypothèse générale 3 : La présence d'une représentation du corps **colocalisé** permet d'avoir une meilleure compréhension spatiale.

Ces hypothèses générales ont été la base de définition des hypothèses de chaque étude expérimentale réalisée (récapitulatif Figure 6.1). De plus, nous avons étudié d'autres questions d'études plus générales liées au domaine de la RV.

6.1.2. Synthèse des résultats des expériences

Les résultats empiriques de cette étude appuient l'usage de repères tactiles et d'avatar **colocalisé** dans les EVs pour améliorer la compréhension spatiale et de la cohérence visuo-proprioceptive. L'augmentation de la perception du monde virtuel à l'aide d'information vibrotactile a permis, dans les études réalisées, d'augmenter la prise de conscience des collisions et permet de favoriser le mécanisme de calibration spatiale. Nous avons testé deux modes de fonctionnement du feedback vibrotactile donnant des informations spatiales différentes et étudié la localisation et la résolution d'affichage de l'information. L'usage de l'avatar semble également être un facteur catalyseur de la calibration environnement/corps. En nous basant sur les hypothèses générales, nous pouvons synthétiser les résultats obtenus au cours des expériences.

L'une des hypothèses que ces travaux ont posée était de savoir si une perception vibrotactile pouvait remplacer la perception haptique manquante en EV. On retrouve cette problématique dans les hypothèses des expérimentations (voir Figure 6.1 - H1.1, H2.3, H3.1). Nous supposons que les informations spatiales fournies par la perception tactile permettraient d'améliorer la compréhension spatiale et de maintenir une cohérence visuo-proprioceptive. Les résultats expérimentaux ont en effet montré une amélioration de ces deux éléments. Cette amélioration s'explique grâce à deux mécanismes. D'une part, les informations tactiles donnent des indications de référence pour apprécier la relation corps/environnement, ceci permet l'activation de la calibration spatiale permettant de se créer un modèle spatial de l'environnement et de soi même. D'autre part, les informations de contact permettent d'augmenter la « *collision awareness* ». Cette connaissance des contacts permet une connaissance des limites imposées à l'avatar. Le comportement de l'utilisateur va prendre en compte ces informations et ainsi permettre une meilleure cohérence visuo-proprioceptive. De plus, l'usage de ce dispositif n'implique pas d'augmentation de la charge cognitive, son utilisation est transparente et intuitive.

Hypothèse	Observations
H1.1 : Le retour vibrotactile améliore le suivi d'un objet virtuel.	Validée, le retour tactile fournissant des informations spatiales améliore le suivi de l'objet virtuel.
H1.2 : Le retour vibrotactile en mode Radar devrait permettre une meilleure compréhension spatiale.	Non validée : un même niveau de performance a été observé entre les deux modes de vibration.
H1.3 : La rétroaction vibrotactile délocalisée devrait permettre le même niveau de précision du suivi de l'objet virtuel que la rétroaction localisée.	Validée, un niveau similaire de précision dans le suivi de l'objet a été observé dans les conditions localisée et délocalisée.
H2.1 : Le comportement d'ajustement en situation d'affordance est comparable entre le casque immersif, le CAVE™ et condition réelle.	Validée, le seuil critique est proche de celui observé lors d'études antérieures réalisées en condition CAVE™ et réelle.
H2.2 : La présence d'un avatar de même morphologie et co-localisé favorise la calibration spatiale.	Validée, une diminution des collisions a été observée, la présence de l'avatar aide à la calibration spatiale.
H2.3 : les informations spatiales fournies par le retour vibrotactile favorisent la calibration spatiale.	Validée, une diminution des collisions a été observée. La présence du retour vibrotactile aide à la calibration spatiale.
H3.1 : Le retour vibrotactile de contact augmente la compréhension spatiale et la cohérence visuo-proprioceptive.	Validée, les informations tactiles améliorent la cohérence visuo-proprioceptive et offrent une meilleure compréhension des contacts.
H3.2 : La spatialisation des informations vibrotactiles de contact améliore la compréhension des contacts.	Validée, les informations tactiles spatialisées améliorent la cohérence visuo-proprioceptive et le temps de réaction sans augmentation de la charge cognitive.
H3.3 : l'augmentation de la résolution d'affichage de la localisation des contacts améliore la compréhension des contacts.	Non validé, aucune différence n'a été observée entre les deux conditions de retour spatialisé. Une information légèrement délocalisée offre les mêmes performances.

Figure 6.1. – Rappel des hypothèses

Une autre question, qui a été soulevée concernant le retour vibrotactile, était de savoir si l'augmentation de la résolution de transmission des informations avait un impact sur la cohérence visuo-proprioceptive et la compréhension spatiale. Cet aspect a été plus particulièrement étudié avec les hypothèses H1.3, H3.2 et H3.3 lors des expérimentations (voir Figure 6.1). L'augmentation de la résolution, conduisant à la spatialisation de l'affichage des contacts, améliore la rapidité de réaction. On peut expliquer cela par une meilleure compréhension des collisions (*collision awareness*). La localisation des contacts permet de réduire la recherche (visuelle) de la position des contacts. La spatialisation se traduit également par une amélioration de la cohérence visuo-proprioceptive, il est plus facile de corriger une incohérence en connaissant la position du contact. Cependant, l'augmentation de la résolution pour proposer un positionnement plus précis en utilisant des sensations fantômes n'a pas montré d'amélioration. Nous avons mis en évidence (résultat de H1.1) que la délocalisation légère de l'information offrait les mêmes performances, les données tactiles et visuelles sont suffisantes pour avoir une information de localisation précise pour permettre l'adaptation du comportement.

Le dernier point sur lequel nous nous sommes interrogés est le rôle de la représentation du corps de l'utilisateur. Cet élément a été principalement étudié dans la seconde expérimentation présentée autour de l'hypothèse H2.2 (Figure 6.1). Nous avons pu montrer que la compréhension spatiale était influencée par le fait d'avoir ou non un avatar. La représentation du corps *colocalisé* et à la morphologie de l'utilisateur offre un cadre de référence égocentrique permettant d'activer la calibration spatiale. Par exemple, la possibilité de déterminer la proximité des objets proches en se basant sur la connaissance anthropométrique de la longueur de son bras permet l'acquisition de la conscience de distance. Cette amélioration de la calibration spatiale permet une compréhension spatiale plus importante.

Au cours des expérimentations, nous avons également abordé une problématique annexe. Nous avons pu comparer les comportements en fonction du dispositif de visualisation immersif utilisé (Figure 6.1 - H2.1). Les deux types de dispositifs ne sont pas pour nous en concurrence. Ils permettent chacun d'adresser des problématiques de recherche différente. Nous avons par exemple joué de leur différence concernant la vision directe sur le corps pour étudier la représentation du corps en EV. Cette question de comparaisons entre les casques immersifs et les CAVE™ est un terrain d'étude passionnant.

Au cours de ces travaux, nous avons souhaité distinguer deux catégories de scénario de maintenance et d'assemblage. Les scénarios de navigation et d'accessibilité à une zone et les scénarios d'intervention manuelle. Ces deux catégories font intervenir des comportements, des contraintes et des objectifs différents. La première catégorie concernant les navigations demande que le comportement global de l'utilisateur soit réaliste. Entre autres, l'utilisateur doit être en mesure de percevoir les affordances pour adapter son comportement comme il le ferait

dans la réalité. Par exemple, baisser la tête si le plafond est bas dans un couloir. Pour cela, il est nécessaire qu'une compréhension spatiale de l'environnement, mais également de soi, soit acquise. La deuxième catégorie concerne les interventions, les mouvements de certains membres vont avoir plus d'importance que d'autres, la posture pendant la réalisation de la tâche est également importante. Par exemple, les mouvements des mains sont très importants dans les opérations manuelles. Il faut que ces mouvements et les postures prises soient valides au regard de l'environnement et de la cinématique de l'utilisateur. Pour cela, la connaissance spatiale, la conscience des contacts et une bonne symétrie entre les positions de l'utilisateur et de l'avatar sont importants.

Nous avons proposé l'utilisation de retour vibrotactile et d'avatar [colocalisé](#) et nous avons pu montrer une amélioration des comportements. Nous avons plus particulièrement proposé deux modes de retour vibrotactile. L'un fonctionnant comme une indication métaphorique de la distance avec les objets virtuels. L'information de la distance était codée en modulant l'intensité de vibration. Le second fonctionne en délivrant des vibrations représentant le contact avec une modulation en fonction de la force exercée. Cette utilisation est relativement naturelle. Les informations peuvent être spatialisées en utilisant plusieurs vibreurs. La spatialisation des informations tactiles a montré un gain dans la compréhension spatiale. Nous avons attribué à chaque catégorie de scénario un de ces modes de retour vibrotactile. Nous nous sommes basés sur cette méthodologie pour réaliser nos études expérimentales. Le choix de l'utilisation du mode radar dans les cas de navigation et du mode contact pour les scénarios d'intervention repose sur le raisonnement suivant. L'élément qui est déterminant est de ne pas surcharger l'utilisateur d'information tactiles, afin d'éviter une diminution des performances. Les environnements fortement contraints seront alors plus adaptés au mode contact, car le mode radar aurait tendance à être en permanence déclenché. À l'inverse, le mode contact n'offrira que très peu d'information dans des environnements larges, le mode radar permet alors d'offrir, malgré tout, des informations de référence spatiale. Les résultats des expérimentations confirment la pertinence du choix, cependant nous n'avons pas de résultat empirique pour valider que pour chaque catégorie, le mode proposé est plus adapté que l'autre. Nous pourrions également imaginer de basculer de l'un à l'autre suivant les conditions environnementales au cours d'un même scénario afin d'offrir toujours un niveau d'information optimale pour la réalisation de la tâche.

6.2. Limitations et perspectives

6.2.1. Limites

Si les propositions d'utilisation de retour vibrotactile et de représentation du corps ont mis en évidence leur pertinence pour l'amélioration des études en [EV](#), certains points restent à améliorer.

Nous avons proposé des contextes d'utilisation pour les deux modes de retour vibrotactile. Cette proposition découle d'un raisonnement logique, mais n'a pas fait l'objet d'une étude empirique comparative visant à vérifier que le mode proposé dans chaque contexte était bien le plus performant/adapté. Notre choix a tout de même montré les résultats attendus lors de nos expérimentations.

Nous nous sommes, dans la dernière expérimentation, intéressés aux illusions sensorielles tactiles. Plus particulièrement, nous avons utilisé l'effet *funneling*. Les résultats de l'expérimentation n'ont pas montré de différence dans son utilisation. L'une des raisons avancées est une mauvaise configuration du dispositif vibrotactile, notamment à la sensibilité de chaque sujet. Une étude psychophysique du dispositif et des algorithmes de rendu devrait permettre d'avoir une meilleure connaissance du système et assurer un meilleur contrôle de la sensation ressentie. Un contrôle plus précis des informations transférées pourrait rendre l'usage d'illusion sensoriel plus pertinent.

6.2.2. Perspectives

Suite à ces travaux de thèse, de nombreuses perspectives de recherche seraient intéressantes à approfondir. Parmi celles-ci, certaines attirent plus particulièrement notre intérêt.

Certains aspects humains plus haut niveau pourraient être étudiés. Les aspects sécurité avec notamment le versant ergonomique des tâches réalisées pourraient être examinés, mais aussi le cas des environnements radioactif, l'optimisation des scénarios. L'étude actuelle s'est focalisée sur la faisabilité des opérations de maintenance et d'assemblage sans porter d'intérêt au geste expert de l'utilisateur. Le geste expert en [RV](#) est un bloc de recherche très étudié. La suite des travaux de recherche pourrait prendre comme point central l'entraînement et la formation des opérateurs. C'est d'ailleurs ce qui est ressorti des discussions avec les moniteurs experts ayant participé aux expérimentations : le dispositif leur semble être un formidable outil pour l'entraînement à la tâche.

Dans nos études sur l'apport du retour vibrotactile nous nous sommes limités à son étude par rapport à une condition par défaut visuel pur. Il semble intéressant d'analyser le retour spatialisé qu'offre le feedback vibrotactile par rapport à

d'autres modalités de feedback. La comparaison avec l'usage d'éléments sonores, de métaphore visuelle, voire d'information haptique à retour d'effort permettrait de situer le retour vibrotactile dans le spectre des autres technologies. Il serait ensuite intéressant de s'intéresser aux aspects multimodaux. Par exemple, la synergie créée par la combinaison d'un retour vibrotactile et d'un retour sonore est un terrain d'étude déjà abordé, mais dont il reste des territoires à explorer.

L'un des aspects qui nous semblent le plus stimulant et le plus porteur est l'étude de la réalité mixte. Les travaux de cette thèse ont montré la possibilité de substituer des données kinesthésiques par le sens tactile. Cependant, certaines informations proprioceptives sont indispensables notamment dans la réalisation de geste expert. Le point crucial à résoudre est le besoin de point d'appui. Ces points d'appui sont indispensables dans certaines tâches. Par exemple, dans une tâche de soudure, le geste demande une grande dextérité et une grande stabilité. Cette stabilité est obtenue en rigidifiant sa posture. Pour se faire, l'opérateur prend appui, par exemple au niveau du poignet afin de bloquer des degrés de liberté et ne garder que ceux nécessaires à la tâche. L'étude de la faisabilité de telle situation ne peut être faite complètement sans considérer ces aspects. En plus d'avoir une compréhension spatiale de l'environnement qui l'entoure, il doit pouvoir étudier les possibilités d'appui. La réalité mixte consiste à faire correspondre (totalement ou en parti) des éléments de l'EV avec des éléments réels. Les possibilités que pourraient offrir les combinaisons des informations vibrotactiles et les informations haptiques statiques sont grandes.

La RV possède de nombreux avantages pour les études d'assemblage et de maintenance dans des installations industrielles. Elle permet de considérer la question des opérations dès la phase de conception et permet de reboucler rapidement sur la conception. Les possibilités de modification et d'adaptation rapide des EVs offrent un large potentiel pour la validation des études d'assemblage. Les EVs ne permettent cependant pas d'analyser dans leur totalité les manœuvres, compte tenu des avancées technologiques de la RV actuelles. L'incomplétude des perceptions sensorielles en EV, notamment haptique, limite la réalisation de certaines études, ou du moins leur étude est plus aisée en environnement réel. La RV ne permet pas à notre sens de la remplacer complètement les études en environnement réel (maquette physique). Les études sur maquette numérique sont cependant un formidable complément à celles réalisées en environnement réel.

Le sujet qui a été étudié dans le cadre de cette thèse a permis d'aborder des sujets de recherche passionnants, tant sur le plan scientifique, technique que sur le plan personnel. Le potentiel de la RV et des technologies associées a motivé mes recherches. J'ai aussi eu l'opportunité de collaborer avec des personnes d'horizons multiples. Les rencontres et les échanges ont nourri mon raisonnement et m'ont fait découvrir des domaines captivants bien au-delà de mon sujet. Enfin, je

pense avoir pu mener à bien un projet de recherche complet. Les personnes avec lesquelles j'ai travaillé étaient présentes et passionnées par leurs recherches. Les équipes au sein desquelles j'ai été intégré ont été à l'écoute de mes propositions, elles furent un terreau fertile qui m'a permis de m'épanouir et a confirmé mon envie de faire de la recherche.

Bibliographie

- ACHIBET, M., M. MARCHAL, F. ARGELAGUET et al. (2014). « The Virtual Mitten : A novel interaction paradigm for visuo-haptic manipulation of objects using grip force ». In : *3D User Interfaces (3DUI), 2014 IEEE Symposium on*. IEEE, p. 59–66. URL : http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6798843 (cf. p. 31).
- ALLES, D. S. (1970). « Information Transmission by Phantom Sensations ». In : *IEEE Transactions on Man-Machine Systems* 11.1, p. 85–91. ISSN : 0536-1540. DOI : [10.1109/TMMS.1970.299967](https://doi.org/10.1109/TMMS.1970.299967) (cf. p. 97, 98).
- ANGSTER, S. R. (1996). « Virtual Environment for Design and Manufacture ». en. Thèse de doct. Washington State University (cf. p. 14).
- BACH-Y-RITA, P. (1972). *Brain mechanisms in sensory substitution*. New York : Academic Press. ISBN : 0-12-071040-4 (cf. p. 54).
- BACH-Y-RITA, P., C. C. COLLINS, F. A. SAUNDERS et al. (1969). « Vision Substitution by Tactile Image Projection ». en. In : *Nature* 221.5184, p. 963–964. ISSN : 0028-0836. DOI : [10.1038/221963a0](https://doi.org/10.1038/221963a0). URL : <http://www.nature.com/nature/journal/v221/n5184/abs/221963a0.html> (cf. p. 39).
- BANAKOU, D., R. GROTEN et M. SLATER (2013). « Illusory ownership of a virtual child body causes overestimation of object sizes and implicit attitude changes ». en. In : *Proceedings of the National Academy of Sciences* 110.31, p. 12846–12851. ISSN : 0027-8424, 1091-6490. DOI : [10.1073/pnas.1306779110](https://doi.org/10.1073/pnas.1306779110). URL : <http://www.pnas.org/content/110/31/12846> (cf. p. 44).
- BANGOR, A., P. KORTUM et J. MILLER (2009). « Determining what individual SUS scores mean : Adding an adjective rating scale ». In : *Journal of usability studies* 4.3, p. 114–123. URL : <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=2835589> (cf. p. 122).
- BARROS, P. G. de, R. W. LINDEMAN et M. O. WARD (2011). « Enhancing robot teleoperator situation awareness and performance using vibro-tactile and graphical feedback ». In : *2011 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)*, p. 47–54. DOI : [10.1109/3DUI.2011.5759216](https://doi.org/10.1109/3DUI.2011.5759216) (cf. p. 31, 55).
- BÉKÉSY, G. V. (1958). « Funneling in the Nervous System and its Role in Loudness and Sensation Intensity on the Skin ». In : *The Journal of the Acoustical Society of America* 30.5, p. 399–412. ISSN : 0001-4966. DOI : [10.1121/1.1909626](https://doi.org/10.1121/1.1909626). URL : <http://scitation.aip.org/content/asa/journal/jasa/30/5/10.1121/1.1909626> (cf. p. 97).
- BERNARD, J.-M., P. MOLLARD, V. BRUNO et al. (2017). « Design and construction of the first ELM resilient long pulse ICRH antenna for WEST ». In : *Fusion Engineering and Design*. ISSN : 0920-3796. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2017.05.024>. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920379617305689> (cf. p. 162).

- BERTHOZ, A. (2000). *The Brain's Sense of Movement*. en. Google-Books-ID : O7hrgeKScOYC. Harvard University Press. ISBN : 978-0-674-00980-6 (cf. p. 75, 91).
- BLOOMFIELD, A. et N. I. BADLER (2007). « Collision awareness using vibrotactile arrays ». In : *Virtual Reality Conference, 2007. VR'07. IEEE*. IEEE, p. 163–170. URL : http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4161019 (cf. p. 41).
- (2008). « Virtual training via vibrotactile arrays ». In : *Presence : Teleoperators and Virtual Environments* 17.2, p. 103–120. URL : <http://www.mitpressjournals.org/doi/abs/10.1162/pres.17.2.103> (cf. p. 39, 72).
- BODENHEIMER, B., S. CREEM-REGEHR, J. STEFANUCCI et al. (2017). « Prism aftereffects for throwing with a self-avatar in an immersive virtual environment ». In : *2017 IEEE Virtual Reality (VR)*, p. 141–147. DOI : [10.1109/VR.2017.7892241](https://doi.org/10.1109/VR.2017.7892241) (cf. p. 45).
- BOOTHROYD, G. et P. DEWHURST (1983). *Design for Assembly : A Designer's Handbook*. en. Google-Books-ID : 6GugnQAACAAJ. University of Massachusetts (cf. p. 14).
- BOTVINICK, M. et J. COHEN (1998). « Rubber hands' feel'touch that eyes see ». In : *Nature* 391.6669, p. 756–756. URL : <http://www.psychology.mcmaster.ca/bennett/psy720/readings/m5/botvinick.pdf> (cf. p. 46).
- BROOKE, J. (1996). « SUS-A quick and dirty usability scale ». In : *Usability evaluation in industry* 189.194, p. 4–7 (cf. p. 111).
- BURKHARDT, J.-M., B. BARDY et D. LOURDEAUX (2003). « Immersion, Réalisme et Présence dans la conception et l'évaluation des ». In : *Psychologie française* 48.2, p. 35–42 (cf. p. 26).
- BURNS, E., S. RAZZAQUE, M. C. WHITTON et al. (2007). « MACBETH : The avatar which I see before me and its movement toward my hand ». In : *2007 IEEE Virtual Reality Conference*, p. 295–296. DOI : [10.1109/VR.2007.352509](https://doi.org/10.1109/VR.2007.352509) (cf. p. 47).
- BURNS, E., M. C. WHITTON, S. RAZZAQUE et al. (2005). « The hand is slower than the eye : a quantitative exploration of visual dominance over proprioception ». In : *IEEE*, p. 3–10. ISBN : 978-0-7803-8929-8. DOI : [10.1109/VR.2005.1492747](https://doi.org/10.1109/VR.2005.1492747). URL : <http://ieeexplore.ieee.org/document/1492747/> (cf. p. 47).
- CARDIN, S. et D. THALMANN (2008). « Vibrotactile jacket for perception enhancement ». In : *Multimedia Signal Processing, 2008 IEEE 10th Workshop on*. IEEE, p. 892–896. URL : http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4665200 (cf. p. 55).
- CARLSON, W. (2003). *A Critical History of Computer Graphics and Animation*. URL : <http://design.osu.edu/carlson/history/lesson17.html> (cf. p. 22).
- CHA, J., L. RAHAL et A. EL SADDIK (2008). « A pilot study on simulating continuous sensation with two vibrating motors ». In : *Haptic Audio visual Environments and Games, 2008. HAVE 2008. IEEE International Workshop on*. IEEE, p. 143–147. URL : http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4685314 (cf. p. 97).

- CHABAL, C., Y. SOULABAILLE, T. GARNIER et al. (2014). « Drafting of the dismantling operations of the MAR 200 workshop with the help of virtual reality ». French. In : *Revue Generale Nucleaire*, p. 43–48. ISSN : ISSN 0335-5004. URL : http://inis.iaea.org/Search/search.aspx?orig_q=RN:46027559 (cf. p. 31).
- CHOI, S. et K. J. KUCHENBECKER (2013). « Vibrotactile Display : Perception, Technology, and Applications ». In : *Proceedings of the IEEE* 101.9, p. 2093–2104. ISSN : 0018-9219, 1558-2256. DOI : [10.1109/JPROC.2012.2221071](https://doi.org/10.1109/JPROC.2012.2221071). URL : <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6353870> (cf. p. 39).
- CHOLEWIAK, R. W., J. C. BRILL et A. SCHWAB (2004). « Vibrotactile localization on the abdomen : Effects of place and space ». en. In : *Perception & Psychophysics* 66.6, p. 970–987. ISSN : 0031-5117, 1532-5962. DOI : [10.3758/BF03194989](https://doi.org/10.3758/BF03194989). URL : <http://www.springerlink.com/index/10.3758/BF03194989> (cf. p. 34, 35).
- CHOLEWIAK, R. W., A. A. COLLINS et J. C. BRILL (2001). « Spatial factors in vibrotactile pattern perception ». In : *Proceedings of Eurohaptics*, p. 41–47. URL : <http://www.academia.edu/download/41349246/cholewiak.pdf> (cf. p. 34, 35).
- COLLETTE, C., A. MICAELLI, C. ANDRIOT et al. (2008). « Robust balance optimization control of humanoid robots with multiple non coplanar grasps and frictional contacts ». In : *2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, p. 3187–3193. DOI : [10.1109/ROBOT.2008.4543696](https://doi.org/10.1109/ROBOT.2008.4543696) (cf. p. 43).
- COLLETTE, C., A. MICAELLI, C. ANDRIOT et al. (2007). « Dynamic balance control of humanoids for multiple grasps and non coplanar frictional contacts ». In : *Humanoid Robots, 2007 7th IEEE-RAS International Conference on*. IEEE, p. 81–88. URL : <http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4813852/> (cf. p. 43).
- COLLINS, C. C. (1970). « Tactile Television - Mechanical and Electrical Image Projection ». In : *IEEE Transactions on Man-Machine Systems* 11.1, p. 65–71. ISSN : 0536-1540. DOI : [10.1109/TMMS.1970.299964](https://doi.org/10.1109/TMMS.1970.299964) (cf. p. 54).
- COMEAU, C. P. et J. S. BRYAN (1961). « Headsight Television System Provides Remote Surveillance ». In : *Electronics*, p. 86–90 (cf. p. 22).
- CRUZ-NEIRA, C., D. J. SANDIN et T. A. DEFANTI (1993). « Surround-screen projection-based virtual reality : the design and implementation of the CAVE ». In : *Proceedings of the 20th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. SIGGRAPH '93. New York, NY, USA : ACM, p. 135–142. ISBN : 0-89791-601-8 (cf. p. 59).
- CyberTouch II (2017). URL : <http://www.cyberglovesystems.com/cybertouch2/> (cf. p. 55).
- DEWAR, R. G., I. D. CARPENTER, J. M. RITCHIE et al. (1997). « Assembly planning in a virtual environment ». In : *Innovation in Technology Management - The Key to Global Leadership*. PICMET '97 : Portland International Conference on

- Management and Technology*, p. 664–667. DOI : [10.1109/PICMET.1997.653557](https://doi.org/10.1109/PICMET.1997.653557) (cf. p. 14).
- DURGIN, F. H., L. F. FOX, J. LEWIS et al. (2002). « Perceptuomotor adaptation : More than meets the eye ». In : *Psychonomic Society* 7, p. 103–104. URL : <http://www.swarthmore.edu/SocSci/fdurgin1/publications/DurginEtAlPsychonomics2002.pdf> (cf. p. 48).
- FERLAY, F., M. MISSIRLIAN, D. GUILHEM et al. (2015). « Plasma facing components integration studies for the WEST divertor ». In : *Fusion Engineering and Design*. Proceedings of the 28th Symposium On Fusion Technology (SOFT-28) 98–99, p. 1285–1289. ISSN : 0920-3796. DOI : [10.1016/j.fusengdes.2015.02.053](https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2015.02.053). URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920379615001441> (cf. p. 14, 159).
- FERSCHA, A., B. EMSENHUBER, A. RIENER et al. (2008). « Vibro-Tactile Space-Awareness ». In : *on ubiquitous Computing*, p. 117. URL : <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.211.7816&rep=rep1&type=pdf#page=125> (cf. p. 40, 75).
- FLORES, G., S. KURNIAWAN, R. MANDUCHI et al. (2015). « Vibrotactile Guidance for Wayfinding of Blind Walkers ». In : *IEEE Transactions on Haptics* 8.3, p. 306–317. ISSN : 1939-1412. DOI : [10.1109/TOH.2015.2409980](https://doi.org/10.1109/TOH.2015.2409980). URL : <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=7060731> (cf. p. 39, 96).
- FUCHS, P. (1996). *Les interfaces de la réalité virtuelle*. Français. éditeur AJIIMD. ISBN : 2-9509954-0-3. URL : <http://hal-ensmp.archives-ouvertes.fr/hal-00785588> (cf. p. 23, 24).
- FUCHS, P., G. MOREAU, A. BERTHOZ et al. (2006). *Le traité de la réalité virtuelle : Volume 1, l'homme et l'environnement virtuel*. T. 1. Presses des Mines (cf. p. 23–25, 27, 29).
- GELDARD, F. A. et C. E. SHERRICK (1972). « The Cutaneous "Rabbit" : A Perceptual Illusion ». en. In : *Science* 178.4057, p. 178–179. ISSN : 0036-8075, 1095-9203. DOI : [10.1126/science.178.4057.178](https://doi.org/10.1126/science.178.4057.178). URL : <http://www.sciencemag.org/content/178/4057/178> (cf. p. 96).
- GEMPERLE, F., T. HIRSCH, A. GOODE et al. (2003). *Wearable Vibro-Tactile Display*. Report CMU Wearable Group. Carnegie Mellon University (cf. p. 37).
- GEMPERLE, F., N. OTA et D. SIEWIOREK (2001). « Design of a wearable tactile display ». In : *Fifth International Symposium on Wearable Computers, 2001. Proceedings*, p. 5–12. DOI : [10.1109/ISWC.2001.962082](https://doi.org/10.1109/ISWC.2001.962082) (cf. p. 55, 56).
- GESCHIEDER, G. A. (1974). « Temporal relations in cutaneous stimulation ». In : *Cutaneous communication systems and devices*. Austin, Texas : F. A. Geldard (cf. p. 36).
- GIBSON, J. J. (2014). *The Ecological Approach to Visual Perception : Classic Edition*. en. Google-Books-ID : 8BSLBQAAQBAJ. Psychology Press. ISBN : 978-1-317-57938-0 (cf. p. 73).

- Gloveone (2017). *Gloveone : The haptic glove to feel & touch real virtual reality*. URL : <https://www.neurodigital.es/gloveone/> (cf. p. 55).
- GOLDING, J. F. (2006). « Predicting individual differences in motion sickness susceptibility by questionnaire ». In : *Personality and Individual Differences* 41.2, p. 237–248. ISSN : 0191-8869. DOI : [10.1016/j.paid.2006.01.012](https://doi.org/10.1016/j.paid.2006.01.012). URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0191886906000602> (cf. p. 84, 108).
- GOLDISH, L. H. et H. E. TAYLOR (1974). « The Optacon : A Valuable Device for Blind Persons ». en. In : *New Outlook for the Blind* (cf. p. 39).
- GROEN, J. et P. J. WERKHOVEN (1998). « Visuomotor Adaptation to Virtual Hand Position in Interactive Virtual Environments ». In : *Presence : Teleoperators and Virtual Environments* 7.5, p. 429–446. ISSN : 1054-7460. DOI : [10.1162/105474698565839](https://doi.org/10.1162/105474698565839). URL : <http://dx.doi.org/10.1162/105474698565839> (cf. p. 45).
- GRUMBACH, A. (2004). « Cognition virtuelle ». In : *Réflexion sur le virtuel, ses implications cognitives, ses réalisations artistiques* (cf. p. 153).
- HALE, K. S. K. (2006). « Enhancing situational awareness through haptics interaction in virtual environment training systems ». Thèse de doct. University of Central Florida Orlando, Florida. URL : <http://purl.fcla.edu/fcla/etd/CFE0001414> (cf. p. 30, 33).
- Hardlight VR (2017). URL : <http://www.hardlightvr.com/> (cf. p. 55).
- HART, S. G. et L. E. STAVELAND (1988). « Development of NASA-TLX (Task Load Index) : Results of Empirical and Theoretical Research ». In : *Advances in Psychology*. Sous la dir. de P. A. H. a. N. MESHKATI. T. 52. Human Mental Workload. North-Holland, p. 139–183. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166411508623869> (cf. p. 111).
- HEETER, C. (1992). « Being there : The subjective experience of presence ». In : *Presence : Teleoperators & Virtual Environments*, p. 262–271 (cf. p. 44).
- HEILIG, M. L. (1962). *Brevet Sensorama*. URL : <https://www.google.com/patents/US3050870?dq=3050870&hl=en&sa=X&ei=3vJgUunkLe6TOAXWLYCQAw&ved=0CDkQ6AEwAA> (cf. p. 20, 21).
- HOFFMANN, H. G. (1998). « Physically touching virtual objects using tactile augmentation enhances the realism of virtual environments ». In : *Virtual Reality Annual International Symposium, 1998. Proceedings., IEEE 1998*. IEEE, p. 59–63. URL : http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=658423 (cf. p. 31).
- INSKO, B. E. (2001). « Passive Haptics Significantly Enhances Virtual Environments ». Thèse de doct. URL : <http://web4.cs.ucl.ac.uk/research/vr/VE/Papers/01-017.pdf> (cf. p. 31).
- INTERRANTE, V., B. RIES et L. ANDERSON (2006). « Distance Perception in Immersive Virtual Environments, Revisited ». In : *IEEE Virtual Reality Conference (VR 2006)*, p. 3–10. DOI : [10.1109/VR.2006.52](https://doi.org/10.1109/VR.2006.52) (cf. p. 92).

- ISRAR, A. et I. POUPYREV (2011). « Tactile brush : drawing on skin with a tactile grid display ». In : *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. ACM, p. 2019–2028. URL : <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1979235> (cf. p. 39, 54, 97, 98, 102).
- JAYARAM, S., Y. WANG, U. JAYARAM et al. (1999). « Virtual Assembly Design Environment ». In : *Proceedings of the IEEE Virtual Reality Annual International Symposium*, p. 172–179 (cf. p. 14).
- JOHNSON, K. O. et S. S. HSIAO (1992). « Neural Mechanisms of Tactual form and Texture Perception ». In : *Annual Review of Neuroscience* 15.1, p. 227–250. DOI : 10.1146/annurev.ne.15.030192.001303. URL : <http://dx.doi.org/10.1146/annurev.ne.15.030192.001303> (cf. p. 33).
- JONES, L. A., M. NAKAMURA et B. LOCKYER (2004). « Development of a tactile vest ». In : *Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, 2004. HAPTICS'04. Proceedings. 12th International Symposium on*. IEEE, p. 82–89. URL : http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1287181 (cf. p. 34, 36, 55).
- KAMMERMEIER, P., M. BUSS et G. SCHMIDT (2001). « A systems theoretical model for human perception in multimodal presence systems ». In : *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 6.3, p. 234–244. ISSN : 1083-4435. DOI : 10.1109/3516.951361 (cf. p. 91).
- KELLER, D., L. DOCEUL, F. FERLAY, G. JIOLAT et al. (2013). « ITER design, integration and assembly studies assisted by virtual reality ». In : *Fusion Engineering and Design*. Proceedings of the 27th Symposium On Fusion Technology (SOFT-27) ; Liège, Belgium, September 24-28, 2012 88.9–10, p. 1951–1954. ISSN : 0920-3796. DOI : 10.1016/j.fusengdes.2013.02.004. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092037961300118X> (cf. p. 14).
- KELLER, D., L. DOCEUL, F. FERLAY, C. LOUISON et al. (2015). « Use of virtual reality for optimizing the life cycle of a fusion component ». In : *Fusion Engineering and Design* 101, p. 186–191. ISSN : 0920-3796. DOI : 10.1016/j.fusengdes.2015.07.019. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920379615302441> (cf. p. 14, 160).
- KENNEDY, R. S., N. E. LANE, K. S. BERBAUM et al. (1993). « Simulator Sickness Questionnaire : An Enhanced Method for Quantifying Simulator Sickness ». en. In : *The International Journal of Aviation Psychology* 3.3, p. 203–220. ISSN : 1050-8414, 1532-7108. DOI : 10.1207/s15327108ijap0303_3. URL : http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1207/s15327108ijap0303_3 (cf. p. 87, 111).
- KENNEDY, R. S., K. M. STANNEY et W. P. DUNLAP (2000). « Duration and Exposure to Virtual Environments : Sickness Curves During and Across Sessions ». In : *Presence : Teleoperators and Virtual Environments* 9.5, p. 463–472. ISSN : 1054-7460. DOI : 10.1162/105474600566952. URL : <http://dx.doi.org/10.1162/105474600566952> (cf. p. 84).

- KILTENI, K., R. GROTEN et M. SLATER (2012). « The sense of embodiment in virtual reality ». In : *Presence : Teleoperators and Virtual Environments* 21.4, p. 373–387. URL : http://www.mitpressjournals.org/doi/abs/10.1162/pres_a_00124 (cf. p. 44).
- KNAPP, J. M. et J. M. LOOMIS (2004). « Limited Field of View of Head-Mounted Displays Is Not the Cause of Distance Underestimation in Virtual Environments ». In : *Presence : Teleoperators and Virtual Environments* 13.5, p. 572–577. URL : <http://www.mitpressjournals.org/doi/abs/10.1162/1054746042545238> (cf. p. 48).
- KOKKINARA, E., M. SLATER et J. LÓPEZ-MOLINER (2015). « The Effects of Visuomotor Calibration to the Perceived Space and Body, through Embodiment in Immersive Virtual Reality ». en. In : *ACM Transactions on Applied Perception* 13.1, p. 1–22. ISSN : 15443558. DOI : [10.1145/2818998](https://doi.org/10.1145/2818998). URL : <http://dl.acm.org/citation.cfm?doid=2837040.2818998> (cf. p. 45).
- KUEHNE, R. et J. OLIVER (1995). « A virtual environment for interactive assembly planning and evaluation ». In : *Proceedings of the ASME Design Automation Conference* (cf. p. 14).
- KÜHNAPFEL, U., H. K. ÇAKMAK et H. MAASS (2000). « Endoscopic surgery training using virtual reality and deformable tissue simulation ». In : *Computers & Graphics. Dynamic Medical Visualization (special topic)* 24.5, p. 671–682. ISSN : 0097-8493. DOI : [10.1016/S0097-8493\(00\)00070-4](https://doi.org/10.1016/S0097-8493(00)00070-4). URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0097849300000704> (cf. p. 31).
- LAWSON, G., T. ROPER et C. ABDULLAH (2016). « Multimodal "Sensory Illusions" for Improving Spatial Awareness in Virtual Environments ». In : *Proceedings of the European Conference on Cognitive Ergonomics. ECCE '16*. Nottingham, United Kingdom : ACM, 14 :1–14 :4. ISBN : 978-1-4503-4244-5. DOI : [10.1145/2970930.2970945](https://doi.org/10.1145/2970930.2970945). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/2970930.2970945> (cf. p. 99).
- LÉCUYER, A. (2001). *Contribution à l'étude des retours haptique et pseudo-haptique et de leur impact sur les simulations d'opérations de montage/démontage en aéronautique*. Paris 11. URL : <http://www.theses.fr/2001PA112366> (cf. p. 31).
- LEDERMAN, S. J. (1991). « Skin and touch ». In : *Encyclopedia of human biology* 7, p. 51–63 (cf. p. 35).
- LEE, J., S. LEE et G. J. KIM (2013). « Funneling and saltation effects for tactile interaction with “detached” out of the body virtual objects ». In : *Human-Computer Interaction–INTERACT 2013*. Springer, p. 104–121. URL : http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-40483-2_8 (cf. p. 99).
- LEPECQ, J.-C., L. BRINGOUX, J.-M. PERGANDI et al. (2009). « Afforded actions as a behavioral assessment of physical presence in virtual environments ». en. In : *Virtual Reality* 13.3, p. 141–151. ISSN : 1359-4338, 1434-9957. DOI : [10.1007/s10055-009-0118-1](https://doi.org/10.1007/s10055-009-0118-1). URL : <http://link.springer.com/10.1007/s10055-009-0118-1> (cf. p. 74, 78, 81, 88).

- LEPLAT, J. (1997). *Regards sur l'activité en situation de travail : contribution à la psychologie ergonomique*. Le travail humain. Paris : Presses universitaires de France, 1997. ISBN : 2-13-048697-5 (cf. p. 27).
- LI, Y., W. R. JEON et C. S. NAM (2015). « Navigation by vibration : Effects of vibrotactile feedback on a navigation task ». en. In : *International Journal of Industrial Ergonomics* 46, p. 76–84. ISSN : 01698141. DOI : [10.1016/j.ergon.2014.12.008](https://doi.org/10.1016/j.ergon.2014.12.008). URL : <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169814114001759> (cf. p. 39).
- LINDEMAN, R. W. et J. R. CUTLER (2003). « Controller design for a wearable, near-field haptic display ». In : *Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, 2003. HAPTICS 2003. Proceedings. 11th Symposium on*. IEEE, p. 397–403. URL : http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1191323 (cf. p. 55, 56).
- LINDEMAN, R. W., R. PAGE, Y. YANAGIDA et al. (2004). « Towards Full-body Haptic Feedback : The Design and Deployment of a Spatialized Vibrotactile Feedback System ». In : *Proceedings of the ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*. VRST '04. New York, NY, USA : ACM, p. 146–149. ISBN : 1-58113-907-1. DOI : [10.1145/1077534.1077562](https://doi.org/10.1145/1077534.1077562). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/1077534.1077562> (cf. p. 41, 55, 72, 75).
- LINDEMAN, R. W., J. L. SIBERT, C. E. LATHAN et al. (2004). « The Design and Deployment of a Wearable Vibrotactile Feedback System ». In : *Proceedings of the Eighth International Symposium on Wearable Computers*. ISWC '04. Washington, DC, USA : IEEE Computer Society, p. 56–59. ISBN : 0-7695-2186-X. DOI : [10.1109/ISWC.2004.43](https://doi.org/10.1109/ISWC.2004.43). URL : <http://dx.doi.org/10.1109/ISWC.2004.43> (cf. p. 55).
- LINDEMAN, R. W., Y. YANAGIDA, K. HOSAKA et al. (2006). « The TactaPack : A wireless sensor/actuator package for physical therapy applications ». In : *Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, 2006 14th Symposium on*. IEEE, p. 337–341. URL : http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1627117 (cf. p. 31).
- LINDEMAN, R. W., Y. YANAGIDA, H. NOMA et al. (2005). « Design of a wireless tactor system for haptic feedback in virtual reality ». In : *IEEE Virtual Reality*, p. 12–16. URL : http://www.wpi.edu/academics/cs/~gogo/papers/Lindeman_vr2005.pdf (cf. p. 55).
- LINDEN, J. v. d., E. SCHOONDERWALDT, J. BIRD et al. (2011). « MusicJacket - Combining Motion Capture and Vibrotactile Feedback to Teach Violin Bowing ». In : *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 60.1, p. 104–113. ISSN : 0018-9456. DOI : [10.1109/TIM.2010.2065770](https://doi.org/10.1109/TIM.2010.2065770) (cf. p. 39).
- LINKENAUER, S. A., M. LEYERER, H. H. BÜLTHOFF et al. (2013). « Welcome to Wonderland : The Influence of the Size and Shape of a Virtual Hand On the Perceived Size and Shape of Virtual Objects ». In : *PLOS ONE* 8.7, e68594. ISSN : 1932-6203. DOI : [10.1371/journal.pone.0068594](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0068594). URL : <http://>

- journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0068594 (cf. p. 44, 74).
- LIU, M., A. MICAELLI, P. EVRARD et al. (2011). « Interactive dynamics and balance of a virtual character during manipulation tasks ». In : *Robotics and Automation (ICRA), 2011 IEEE International Conference on*. IEEE, p. 1676–1682. URL : <http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5980078/> (cf. p. 43).
- LOK, B., S. NAIK, M. WHITTON et al. (2003). « Effects of Handling Real Objects and Self-Avatar Fidelity on Cognitive Task Performance and Sense of Presence in Virtual Environments ». In : *Presence : Teleoperators and Virtual Environments* 12.6, p. 615–628. ISSN : 1054-7460. DOI : [10.1162/105474603322955914](https://doi.org/10.1162/105474603322955914). URL : <http://dx.doi.org/10.1162/105474603322955914> (cf. p. 44).
- LOOMIS, J. M. et J. M. KNAPP (2003). « Visual perception of egocentric distance in real and virtual environments ». In : *Virtual and adaptive environments* 11, p. 21–46 (cf. p. 48, 72).
- LOOMIS, J. M. et S. J. LEDERMAN (1986). « Tactual perception ». In : *Handbook of perception and human performances* 2, p. 2. URL : <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.92.7635&rep=rep1&type=pdf> (cf. p. 30).
- LOUISON, C., F. FERLAY, D. KELLER et al. (2015). « Vibrotactile Feedback for Collision Awareness ». In : *Proceedings of the 2015 British HCI Conference*. British HCI '15. New York, NY, USA : ACM, p. 277–278. ISBN : 978-1-4503-3643-7. DOI : [10.1145/2783446.2783609](https://doi.org/10.1145/2783446.2783609). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/2783446.2783609> (cf. p. 158).
- LOUISON, C., F. FERLAY, D. KELLER et al. (2017). « Operators' accessibility studies for assembly and maintenance scenarios using virtual reality ». In : *Fusion Engineering and Design* (cf. p. 162).
- LOUISON, C., F. FERLAY et D. R. MESTRE (2017). « Spatialized vibrotactile feedback contributes to goal-directed movements in cluttered virtual environments ». In : *3D User Interfaces (3DUI), 2017 IEEE Symposium on*. IEEE, p. 99–102 (cf. p. 161).
- LUGRIN, J. L., J. LATT et M. E. LATOSCHIK (2015). « Avatar anthropomorphism and illusion of body ownership in VR ». In : *2015 IEEE Virtual Reality (VR)*, p. 229–230. DOI : [10.1109/VR.2015.7223379](https://doi.org/10.1109/VR.2015.7223379) (cf. p. 44).
- MARTÍNEZ, J., A. S. GARCÍA, M. OLIVER et al. (2014). « VITAKI : A Vibrotactile Prototyping Toolkit for Virtual Reality and Video Games ». en. In : *International Journal of Human-Computer Interaction* 30.11, p. 855–871. ISSN : 1044-7318, 1532-7590. DOI : [10.1080/10447318.2014.941272](https://doi.org/10.1080/10447318.2014.941272). URL : <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10447318.2014.941272> (cf. p. 56).
- MASSIE, T. H. et J. K. SALISBURY (1994). « The phantom haptic interface : A device for probing virtual objects ». In : *Proceedings of the ASME winter annual meeting, symposium on haptic interfaces for virtual environment and teleoperator systems*. T. 55. Citeseer, p. 295–300. URL : <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.361.4710&rep=rep1&type=pdf> (cf. p. 31).

- MCDONNELL, R., M. BREIDT et H. H. BÜLTHOFF (2012). « Render Me Real? : Investigating the Effect of Render Style on the Perception of Animated Virtual Humans ». In : *ACM Trans. Graph.* 31.4, 91 :1–91 :11. ISSN : 0730-0301. DOI : [10.1145/2185520.2185587](https://doi.org/10.1145/2185520.2185587). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/2185520.2185587> (cf. p. 44).
- MENG, F., R. GRAY, C. HO et al. (2014). « Dynamic Vibrotactile Signals for Forward Collision Avoidance Warning Systems ». en. In : *Human Factors : The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, p. 0018720814542651. ISSN : 0018-7208, 1547-8181. DOI : [10.1177/0018720814542651](https://doi.org/10.1177/0018720814542651). URL : <http://hfs.sagepub.com/content/early/2014/07/22/0018720814542651> (cf. p. 39).
- MESSING, R. et F. H. DURGIN (2005). « Distance Perception and the Visual Horizon in Head-Mounted Displays ». In : *ACM Trans. Appl. Percept.* 2.3, p. 234–250. ISSN : 1544-3558. DOI : [10.1145/1077399.1077403](https://doi.org/10.1145/1077399.1077403). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/1077399.1077403> (cf. p. 91).
- MESTRE, D. R., C. LOUISON et F. FERLAY (2016). « The Contribution of a Virtual Self and Vibrotactile Feedback to Walking Through Virtual Apertures ». en. In : *Human-Computer Interaction. Interaction Platforms and Techniques*. DOI : 10.1007/978-3-319-39516-6_21. Springer, Cham, p. 222–232. URL : https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-39516-6_21 (cf. p. 160).
- MILGRAM, P. et F. KISHINO (1994). « A taxonomy of mixed reality visual displays ». In : *IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems* 77.12, p. 1321–1329. URL : http://search.ieice.org/bin/summary.php?id=e77-d_12_1321 (cf. p. 31).
- MINE, M. R., F. P. BROOKS Jr. et C. H. SEQUIN (1997). « Moving Objects in Space : Exploiting Proprioception in Virtual-environment Interaction ». In : *Proceedings of the 24th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*. SIGGRAPH '97. New York, NY, USA : ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., p. 19–26. ISBN : 978-0-89791-896-1. DOI : [10.1145/258734.258747](https://doi.org/10.1145/258734.258747). URL : <http://dx.doi.org/10.1145/258734.258747> (cf. p. 45).
- MORENO, R., R. E. MAYER, H. A. SPIRES et al. (2001). « The case for social agency in computer-based teaching : Do students learn more deeply when they interact with animated pedagogical agents? » In : *Cognition and Instruction* 19.2, p. 177–213. URL : http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1207/S1532690XCI1902_02 (cf. p. 27).
- MORI, M., K. F. MACDORMAN et N. KAGEKI (2012). « The Uncanny Valley [From the Field] ». In : *IEEE Robotics Automation Magazine* 19.2, p. 98–100. ISSN : 1070-9932. DOI : [10.1109/MRA.2012.2192811](https://doi.org/10.1109/MRA.2012.2192811) (cf. p. 44).
- NAISH, J. et A. BURNS (2017). « Minimising operator dose during JET shutdown using virtual ». In : *Fusion Engineering and Design*. ISSN : 0920-3796. DOI : [10.1016/j.fusengdes.2017.03.131](https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2017.03.131). URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920379617303496> (cf. p. 93).

- NORMAND, J.-M., E. GIANNOPOULOS, B. SPANLANG et al. (2011). « Multisensory Stimulation Can Induce an Illusion of Larger Belly Size in Immersive Virtual Reality ». en. In : *PLoS ONE* 6.1. Sous la dir. de M. GIURFA, e16128. ISSN : 1932-6203. DOI : [10.1371/journal.pone.0016128](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0016128). URL : <http://dx.plos.org/10.1371/journal.pone.0016128> (cf. p. 44).
- OKAMOTO, S., M. KONYO, S. SAGA et al. (2009). « Detectability and Perceptual Consequences of Delayed Feedback in a Vibrotactile Texture Display ». In : *IEEE Transactions on Haptics* 2.2, p. 73–84. ISSN : 1939-1412. DOI : [10.1109/TOH.2009.17](https://doi.org/10.1109/TOH.2009.17) (cf. p. 57).
- PAILLARD, J. (1996). « Fast and slow feedback loops for the visual correction of spatial errors in a pointing task : a reappraisal ». In : *Canadian Journal of Physiology and Pharmacology* 74.4, p. 401–417. ISSN : 0008-4212. DOI : [10.1139/y96-033](https://doi.org/10.1139/y96-033). URL : <http://www.nrcresearchpress.com/doi/abs/10.1139/y96-033> (cf. p. 44, 74).
- PALJIC, A., S. COQUILLART, J.-M. BURKHARDT et al. (2002). « A Study of Distance of Manipulation on the Responsive Workbench (tm) ». In : *Immersive Projection Technology Workshop IPT* (cf. p. 47).
- PRATT, M. J. (1995). « Virtual prototypes and product models in mechanical engineering ». en. In : *Virtual Prototyping*. Sous la dir. de J. RIX, S. HAAS et J. TEIXEIRA. IFIP Advances in Information and Communication Technology. DOI : [10.1007/978-0-387-34904-6_10](https://doi.org/10.1007/978-0-387-34904-6_10). Springer US, p. 113–128. ISBN : 978-1-5041-2927-5 978-0-387-34904-6. URL : http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-0-387-34904-6_10 (cf. p. 14).
- PROVINS, K. A. et R. MORTON (1960). « Tactile discrimination and skin temperature ». en. In : *Journal of Applied Physiology* 15.1, p. 155–160. ISSN : 8750-7587, 1522-1601. URL : <http://jap.physiology.org/content/15/1/155> (cf. p. 34).
- PUSCH, A. (2008). « Visuo-proprioceptive conflicts of the hand for 3D user interaction in Augmented Reality ». en. Thèse de doct. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG. URL : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00347430/document> (cf. p. 44, 46–49).
- REGENBRECHT, H., J. HAUBER, R. SCHOENFELDER et al. (2005). « Virtual reality aided assembly with directional vibro-tactile feedback ». In : *Proceedings of the 3rd international conference on Computer graphics and interactive techniques in Australasia and South East Asia*. ACM, p. 381–387. URL : <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1101464> (cf. p. 42, 55, 56, 164).
- RIGHETTI, X., S. CARDIN, D. THALMANN et al. (2007). « Immersive flight for surveillance applications ». In : *3D User Interfaces, 2007. 3DUI'07. IEEE Symposium on*. IEEE. URL : http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4142857 (cf. p. 55).
- ROMANO, J. M. et K. J. KUCHENBECKER (2012). « Creating Realistic Virtual Textures from Contact Acceleration Data ». In : *IEEE Transactions on Haptics* 5.2, p. 109–119. ISSN : 1939-1412. DOI : [10.1109/TOH.2011.38](https://doi.org/10.1109/TOH.2011.38) (cf. p. 40).

- RUPERT, A. H. (2000). « An instrumentation solution for reducing spatial disorientation mishaps ». In : *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine* 19.2, p. 71–80. ISSN : 0739-5175. DOI : [10.1109/51.827409](https://doi.org/10.1109/51.827409) (cf. p. 39).
- RYU, J., J. JUNG, S. KIM et al. (2007). « Perceptually transparent vibration rendering using a vibration motor for haptic interaction ». In : *Robot and Human interactive Communication, 2007. RO-MAN 2007. The 16th IEEE International Symposium on*. IEEE, p. 310–315. URL : http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4415100 (cf. p. 166).
- RYU, J. et G. J. KIM (2004). « Using a vibro-tactile display for enhanced collision perception and presence ». In : *Proceedings of the ACM symposium on Virtual reality software and technology*. ACM, p. 89–96. URL : <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1077551> (cf. p. 31, 40, 75, 98).
- SA, A. G. D. et G. ZACHMANN (1999). « Virtual reality as a tool for verification of assembly and maintenance processes ». In : *Computers & Graphics* 23.3, p. 389–403. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0097849399000473> (cf. p. 14).
- SATO, M., Y. HIRATA et H. KAWARADA (1992). « Space interface device for artificial reality—SPIDAR ». en. In : *Systems and Computers in Japan* 23.12, p. 44–54. ISSN : 1520-684X. DOI : [10.1002/scj.4690231204](https://doi.org/10.1002/scj.4690231204). URL : <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/scj.4690231204/abstract> (cf. p. 31).
- SCHATZLE, S., T. ENDE, T. WUSTHOFF et al. (2010). « VibroTac : An ergonomic and versatile usable vibrotactile feedback device ». In : *RO-MAN, 2010 IEEE*. IEEE, p. 670–675. URL : http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5598694 (cf. p. 55).
- SEGURA, J. (2012). *Ce qu'il faut retenir de la réalité virtuelle au XXe siècle*. URL : http://www.jeansegura.fr/imag/img/Segura-7e-J-AFRV-31-10-2012g_.pdf (cf. p. 22).
- SENSODRIVE (2017). *Présentation Vibrotact*. URL : <http://www.vibrotac.com/> (cf. p. 55).
- SEO, J. et S. CHOI (2010). « Initial study for creating linearly moving vibrotactile sensation on mobile device ». In : *Haptics Symposium, 2010 IEEE*. IEEE, p. 67–70. URL : http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5444677 (cf. p. 98).
- SHERRICK, C. E. et R. ROGERS (1966). « Apparent haptic movement ». en. In : *Perception & Psychophysics* 1.3, p. 175–180. ISSN : 0031-5117, 1532-5962. DOI : [10.3758/BF03210054](https://doi.org/10.3758/BF03210054). URL : <http://link.springer.com/article/10.3758/BF03210054> (cf. p. 36).
- SLATER, M., B. LOTTO, M. M. ARNOLD et al. (2009). « How we experience immersive virtual environments : the concept of presence and its measurement ». In : *Anuario de psicología/The UB Journal of psychology* 40.2, p. 193–210. URL : <http://revistes.ub.edu/index.php/Anuario-psicologia/article/view/8249> (cf. p. 26).

- SLATER, M., B. SPANLANG, M. V. SANCHEZ-VIVES et al. (2010). « First person experience of body transfer in virtual reality ». In : *PloS one* 5.5, e10564. URL : <http://dx.plos.org/10.1371/journal.pone.0010564> (cf. p. 44).
- SLATER, M. et A. STEED (2000). « A Virtual Presence Counter ». In : *Presence : Teleoper. Virtual Environ.* 9.5, p. 413–434. ISSN : 1054-7460. DOI : [10.1162/105474600566925](https://doi.org/10.1162/105474600566925). URL : <http://dx.doi.org/10.1162/105474600566925> (cf. p. 45, 46).
- SLATER, M. et M. USOH (1993). « Representations Systems, Perceptual Position, and Presence in Immersive Virtual Environments ». In : *Presence : Teleoperators and Virtual Environments* 2.3, p. 221–233. ISSN : 1054-7460. DOI : [10.1162/pres.1993.2.3.221](https://doi.org/10.1162/pres.1993.2.3.221). URL : <http://dx.doi.org/10.1162/pres.1993.2.3.221> (cf. p. 44).
- SLATER, M., M. USOH et A. STEED (1995). « Taking Steps : The Influence of a Walking Technique on Presence in Virtual Reality ». In : *ACM Trans. Comput.-Hum. Interact.* 2.3, p. 201–219. ISSN : 1073-0516. DOI : [10.1145/210079.210084](https://doi.org/10.1145/210079.210084). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/210079.210084> (cf. p. 45).
- SOFIA, K. O. et L. JONES (2013). « Mechanical and Psychophysical Studies of Surface Wave Propagation during Vibrotactile Stimulation ». In : *IEEE Transactions on Haptics* 6.3, p. 320–329. ISSN : 1939-1412. DOI : [10.1109/TOH.2013.1](https://doi.org/10.1109/TOH.2013.1). URL : <http://ieeexplore.ieee.org/document/6420830/> (cf. p. 35).
- SRENG, J., A. LECUYER, C. MEGARD et al. (2006). « Using Visual Cues of Contact to Improve Interactive Manipulation of Virtual Objects in Industrial Assembly/Maintenance Simulations ». In : *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 12.5, p. 1013–1020. ISSN : 1077-2626. DOI : [10.1109/TVCG.2006.189](https://doi.org/10.1109/TVCG.2006.189) (cf. p. 108).
- STEVENS, J. C. (1982). « Temperature can sharpen tactile acuity ». en. In : *Perception & Psychophysics* 31.6, p. 577–580. ISSN : 0031-5117, 1532-5962. DOI : [10.3758/BF03204192](https://doi.org/10.3758/BF03204192). URL : <http://link.springer.com/article/10.3758/BF03204192> (cf. p. 34).
- STONE, R. J. (2001). « Haptic feedback : a brief history from telepresence to virtual reality ». en. In : *Haptic Human-Computer Interaction*. DOI : [10.1007/3-540-44589-7_1](https://doi.org/10.1007/3-540-44589-7_1). Springer, Berlin, Heidelberg, p. 1–16. URL : https://link.springer.com/chapter/10.1007/3-540-44589-7_1 (cf. p. 31).
- SUTHERLAND, I. E. (1968). « A head-mounted three dimensional display ». In : *Proceedings of the December 9-11, 1968, fall joint computer conference, part I. AFIPS '68 (Fall, part I)*. New York, NY, USA : ACM, p. 757–764 (cf. p. 22, 23).
- TAN, H., I. LU et A. PENTLAND (1997). « The chair as a novel haptic user interface ». eng. In : *Proc. of the Workshop on Perceptual User Interfaces*, p. 56–57 (cf. p. 55).
- TAN, H., A. LIM et R. TRAYLOR (2000). « A psychophysical study of sensory sal-tation with an open response paradigm ». In : *Proceedings of the Ninth (9th) International Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Te-*

- leoperator Systems, American Society of Mechanical Engineers Dynamic Systems and Control Division. T. 69, p. 2 (cf. p. 98).
- THOMPSON, W. B., P. WILLEMSSEN, A. A. GOOCH et al. (2004). « Does the Quality of the Computer Graphics Matter when Judging Distances in Visually Immersive Environments? » In : *Presence : Teleoperators and Virtual Environments* 13.5, p. 560–571. ISSN : 1054-7460. DOI : [10.1162/1054746042545292](https://doi.org/10.1162/1054746042545292). URL : <http://dx.doi.org/10.1162/1054746042545292> (cf. p. 48).
- TISSEAU, J. (2001). « Réalité virtuelle : autonomie in virtuo ». In : *Habilitation à diriger des recherches, Université de Rennes 1*. URL : <http://www.enib.fr/~tisseau/doc/hdr/hdrJT.pdf> (cf. p. 23).
- TISSEAU, J. et A. NÉDÉLEC (2003). « Réalité virtuelle : un contexte historique interdisciplinaire ». In : *Revue internationale de CFAO et d'infographie* 17.3-4, p. 263–278 (cf. p. 22).
- VAN ERP, J. B. F. (2007). « Tactile displays for navigation and orientation : perception and behaviour ». en. In : URL : <http://dspace.library.uu.nl/handle/1874/21442> (cf. p. 34–37, 42).
- VAN ERP, J. B. F. et B. P. SELF (2008). « Introduction to tactile displays in military environments ». In : *Tactile Displays for Orientation, Navigation and Communication in Air, Sea, and Land Environments*, p. 1–1 (cf. p. 30).
- VAN ERP, J. B. F. et H. VAN VEEN (2003). « A multipurpose tactile vest for astronauts in the international space station ». In : *Proceedings of eurohaptics*. T. 2003. Dublin, Ireland : ACM, Press, p. 405–408. URL : <http://eurohaptics.vision.ee.ethz.ch/2003/54.pdf> (cf. p. 55).
- VAN ERP, J. B. F., H. A. H. C. VAN VEEN, C. JANSSEN et al. (2005). « Waypoint navigation with a vibrotactile waist belt ». In : *ACM Transactions on Applied Perception (TAP)* 2.2, p. 106–117. URL : <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1060585> (cf. p. 39).
- VEGA-BERMEDEZ, F. et K. O. JOHNSON (2004). « Fingertip skin conformance accounts, in part, for differences in tactile spatial acuity in young subjects, but not for the decline in spatial acuity with aging ». In : *Perception & Psychophysics* 66.1, p. 60–67. URL : <http://link.springer.com/article/10.3758/BF03194861> (cf. p. 34).
- VIERODT, K. H. (1870). « Abhängigkeit der Ausbildung des Raumsinnes der Haut von der Beweglichkeit der Körpertheile. (Dependence of the development of the skin's spatial sense on the flexibility of parts of the body) ». In : *Zeitschrift für Biologie* 6, p. 53–72. (Cf. p. 34).
- WARREN, W. H. et S. WHANG (1987). « Visual guidance of walking through apertures : body-scaled information for affordances ». eng. In : *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance* 13.3, p. 371–383. ISSN : 0096-1523 (cf. p. 74, 78, 88).
- WEBER, E. H. (1834). *De Pulsu, resorptione, auditu et tactu : Annotationes anatomicae et physiologicae ...* la. C. F. Koehler (cf. p. 34).

- WEBER, E. H. (1978). *E. H. Weber : the sense of touch*. en. Google-Books-ID : CC0pAQAAIAAJ. Academic Press for Experimental Psychology Society. ISBN : 978-0-12-740550-6 (cf. p. 34).
- WEINSTEIN, S. (1968). « Intensive and extensive aspects of tactile sensitivity as a function of body part, sex and laterality ». In : *the First Int'l symp. on the Skin Senses, 1968* (cf. p. 34, 35).
- WILLEMSSEN, P. et A. A. GOOCH (2002). « Perceived egocentric distances in real, image-based, and traditional virtual environments ». In : *Proceedings IEEE Virtual Reality 2002*, p. 275–276. DOI : [10.1109/VR.2002.996536](https://doi.org/10.1109/VR.2002.996536) (cf. p. 48, 72).
- WITMER, B. G. et P. B. KLINE (1998). « Judging Perceived and Traversed Distance in Virtual Environments ». In : *Presence : Teleoperators and Virtual Environments* 7.2, p. 144–167. ISSN : 1054-7460. DOI : [10.1162/105474698565640](https://doi.org/10.1162/105474698565640). URL : <http://dx.doi.org/10.1162/105474698565640> (cf. p. 48).
- WITMER, B. G. et W. J. SADOWSKI (1998). « Nonvisually Guided Locomotion to a Previously Viewed Target in Real and Virtual Environments ». en. In : *Human Factors* 40.3, p. 478–488. ISSN : 0018-7208. DOI : [10.1518/001872098779591340](https://doi.org/10.1518/001872098779591340). URL : <http://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1518/001872098779591340> (cf. p. 48).
- YANAGIDA, Y., M. KAKITA, R. W. LINDEMAN et al. (2004). « Vibrotactile letter reading using a low-resolution tactor array ». In : *Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, 2004. HAPTICS'04. Proceedings. 12th International Symposium on*. IEEE, p. 400–406. URL : http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1287227 (cf. p. 36, 38, 54).
- YANO, H., T. OGI et M. HIROSE (1998). « Development of Haptic Suit for whole human body using vibrators ». In : *Transactions of the Virtual Reality Society of Japan* 3.3, p. 141–147. ISSN : 1344011X. URL : <http://ci.nii.ac.jp/naid/110008746612/en> (cf. p. 40, 75).
- YEM, V. et H. KAJIMOTO (2017). « Wearable tactile device using mechanical and electrical stimulation for fingertip interaction with virtual world ». In : *2017 IEEE Virtual Reality (VR)*, p. 99–104. DOI : [10.1109/VR.2017.7892236](https://doi.org/10.1109/VR.2017.7892236) (cf. p. 33).
- YUAN, Y. et A. STEED (2010). « Is the rubber hand illusion induced by immersive virtual reality? » In : *2010 IEEE Virtual Reality Conference (VR)*. IEEE, p. 95–102. URL : http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5444807 (cf. p. 44).
- ZACHMANN, G. et A. RETTIG (2001). « Natural and Robust Interaction in Virtual Assembly Simulation ». eng. In : *Computer-Graphik-Edition*. OCLC : 48727594 (cf. p. 14, 46).

Glossaire

cognition D. Andler propose comme définition aux sciences cognitives :

Les sciences cognitives ont pour objet de décrire, d'expliquer et le cas échéant de simuler les principales dispositions et capacités de l'esprit humain - langage, raisonnement, perception, coordination sensori-motrice, planification ...

La cognition fait référence étymologiquement à la connaissance et à la faculté de connaître. On peut étendre cette définition à toutes les activités mentales : perception, raisonnement, mémoire, représentation, apprentissage, langage, intention, conscience, affects,... (GRUMBACH 2004). 26

colocalisation La colocalisation consiste à superposer l'environnement de visualisation avec celui manipulé. Lors d'une simulation de réalité virtuelle peut intervenir la présence d'objet réel dans l'environnement. On voit alors la nécessité de colocaliser ce qui est vu et ce qui est manipulé. Prenons le cas simple des mains de l'utilisateur, il faut s'assurer que la capture des mains et leur "virtualisation" soit correctement localisées : d'une part pour le retour visuel, la représentation visuelle, si elle est présente, doit se confondre avec les mains réelles de l'observateur. D'autre part, si l'utilisateur a la possibilité de manipuler des objets, il faut que cette manipulation soit localisée précisément dans l'environnement virtuel à l'endroit où la main réelle aurait son effet. La taille de la représentation virtuelle a aussi une grande importance. 16, 45, 46, 49, 51, 63, 65, 71, 73, 77, 79, 83-85, 87, 91-96, 102, 104, 110, 114, 123, 126, 129, 130, 132, 133

écart pupillaire La distance ou écart pupillaire est la distance entre les pupilles de nos deux yeux. Généralement considérée par défaut pour un adulte mâle autour 63 mm. La plage totale s'étend d'environ 52 mm à 72 mm (enfant, adulte). Il est possible de mesurer cette distance inter-oculaire à l'aide d'un pupillomètre. 59, 62, 78, 85, 103

mal de simulation Le mal de simulation ou cyber-malaise (*simulation sickness* ou *cyber-sickness* en anglais) est une condition où une personne présente des symptômes similaires au mal des transports, provoqué par l'utilisation de simulateur/jeux vidéo... Les symptômes sont semblable à ceux de la cinétose, et peuvent comprendre maux de tête, somnolence, nausées, étourdissements, vomissements et transpiration. La théorie la plus courante de la cause de la maladie de simulation est que l'illusion du mouvement créé par le monde virtuel, combinée à l'absence de mouvement détecté par l'oreille interne, conduit à l'area postrema dans le cerveau humain, à en déduire

que l'on a des hallucinations et conclure que l'hallucination est due à l'ingestion de poison. Le cerveau réagit en provoquant des nausées et des vomissements pour effacer la toxine supposée. Selon cette théorie, la maladie de simulation est simplement une autre forme de mal des transports. [26](#), [81](#), [84](#), [87](#), [108](#), [111](#)

psychophysique La psychophysique concerne l'étude de la relation entre les stimuli physiques et les sensations dans le domaine psychologique. [30](#), [38](#), [54](#), [96](#), [98](#), [101](#), [107](#)

télémanipulation La télémanipulation (ou en anglais *Remote Handling*) permet à un opérateur de faire un travail de manutention manuelle sur un site de travail particulier sans être physiquement présent à ce lieu de travail. Contrairement à la robotique classique, la télémanipulation implique toujours un être humain dans le processus. Le dispositif de traitement principal est un manipulateur, et non pas un robot, car la majorité des tâches de manutention à distance ont besoin de l'intuition et l'intelligence d'un être humain. [23](#)

Unity3D Unity3D, est un logiciel 3D temps réel et multimédia ainsi qu'un moteur 3D et physique utilisé pour la création de contenu interactif comportant de l'audio, de la vidéo et des objets 3D. [57](#), [60](#), [79](#), [81](#), [102](#), [104](#), [106](#)

Acronymes

3D trois dimensions. [65](#), [79](#), [99](#), [100](#), [106](#), [112](#)

AMU Université Aix-Marseille. [6](#)

ANOVA analyse de la variance. [65](#), [66](#), [88](#), [115](#), [119](#), [122](#)

ART *Advanced Realtime Tracking*. [60](#), [79](#), [80](#), [110](#)

ASTHEC Association des THÉsards de Cadarache. [7](#)

BD *Burst Duration* . [36](#), [37](#)

CALM *Credible Avatar Limb Motion technique*. [47](#), [48](#)

CAO Conception Assistée par Ordinateur. [106](#)

CAVE™ *Cave Automatic Virtual Environment*. [40](#), [43](#), [59–64](#), [73](#), [74](#), [77](#), [79](#), [81](#), [85](#), [91](#), [92](#), [104](#), [106](#), [110](#), [127](#), [131](#), [132](#)

CEA Commissariat à L'Énergie Atomique et aux énergies alternatives. [6](#), [13](#), [100](#), [104](#), [106](#), [125](#)

CPP Comité de Protection des Personnes. [59](#), [103](#)

CRVM Centre de Réalité virtuelle de la Méditerranée. [6](#), [13](#), [59](#), [60](#), [64](#), [79](#), [104](#), [125](#)

CVP cohérence visuo-proprioceptive. [46](#), [49](#), [51](#), [94–96](#), [103](#), [112](#), [115](#), [116](#), [123](#), [126](#), [127](#)

dB décibel. [56](#)

DEL diodes électroluminescentes. [104](#)

DRF Direction de la Recherche Fondamentale. [6](#)

EV Environnement Virtuel. [15](#), [17](#), [20](#), [23–31](#), [40](#), [41](#), [43–45](#), [48–50](#), [53](#), [59–61](#), [63](#), [66](#), [68–70](#), [72](#), [74](#), [75](#), [79](#), [81](#), [82](#), [85](#), [86](#), [91–94](#), [96](#), [100–104](#), [106](#), [108](#), [110](#), [119](#), [123](#), [126–130](#), [132](#), [134](#), [135](#)

HFC *Hand Feedback Convergence process*. [47](#), [48](#)

HMD *Head-Mounted Display*. [20](#), [79](#), [80](#), [127](#)

Hz Hertz. [33](#), [34](#), [57](#), [60](#), [79](#), [99](#), [104](#), [164](#)

I² Immersion et Interaction. [26–28](#)

IHM Interfaces Homme-Machine. [39](#)

IM *Incremental Motion*. [45–48](#)

IRFM Institut de Recherche sur la Fusion Magnétique. [6](#), [7](#), [13](#), [125](#)

ISM Institut des Sciences du Mouvement. [6](#), [7](#), [13](#)

ISOI *Inter-Stimulus Onset Interval*. [36](#)

ITER International Thermonuclear Experimental Reactor. [13](#), [93](#)

List Laboratoire d'Intégration de Systèmes et des technologies. [100](#), [104](#)

MACBETH *Management of Avatar Conflict By Employment of Technique Hybrid*. [47](#), [48](#)

PCV Primitives Comportementales Virtuelles. [28](#)

PWM modulation de largeur d'impulsions. [43](#), [57](#), [99](#)

RA *Rapidly Adaptive*. [32](#)

RB *Rubber Band*. [45–48](#), [100](#)

RMS Root Mean Square. [65](#), [112](#), [114](#)

RMSD Root Mean Square de la Déviation de direction du mouvement. [115–117](#), [123](#), [124](#)

RMSE Root Mean Square Error. [65–67](#), [115](#), [116](#), [123](#), [124](#)

RV Réalité Virtuelle. [13–17](#), [20](#), [22–26](#), [28](#), [29](#), [39](#), [48](#), [51](#), [53](#), [55](#), [60](#), [70](#), [75](#), [79](#), [93](#), [104](#), [127](#), [129](#), [130](#), [134](#), [135](#)

SA *Slowly Adaptive*. [32](#)

SCI Schèmes Comportementaux Importés. [28](#)

SI2P Service d'Ingénierie, des Internes et des Projets. [13](#)

SNC Système Nerveux Central. [29](#), [31](#)

SOA *Stimulus Onset Asynchrony*. [36](#), [37](#)

TVSS Tactile-Vision Substitution System. [54](#)

WEST W (Tungstene) Environment in Steady-state Tokamak. [13](#), [16](#)

ANNEXES

Table des matières

A	Annexe : Articles	158
A.1	Vibrotactile feedback for collision awareness	158
A.2	Plasma facing components integration studies for the WEST divertor	158
A.3	Use of virtual reality for optimizing the life cycle of a fusion component	159
A.4	The Contribution of a Virtual Self and Vibrotactile Feedback to Walking Through Virtual Apertures	160
A.5	Spatialized vibrotactile feedback contributes to goal-directed movements in cluttered virtual environments	160
A.6	Operators' accessibility studies for assembly and maintenance scenarios using virtual reality	161
A.7	Design and construction of the first ELM resilient long pulse ICRH antenna for WEST	162
A.8	Spatialized Vibrotactile Feedback Improves Goal-directed Movements in Cluttered Virtual Environments	162
B	Annexe : Interfaces de stimulation tactile mécanique	164
C	Annexe : Carte fille de contrôle des vibreurs	167
D	Annexe : DataSheet Vibromoteur - Parallax Inc. ref. 28822	168
E	Annexe : Protocole de communication	172
E.1	Protocole de communication Version 1	172
E.2	Protocole de communication Version 2	173

A. Annexe : Articles

Liste des articles publiés au cours de la thèse.

A.1. Vibrotactile feedback for collision awareness

Louison, C., Ferlay, F., Keller, D., & Mestre, D. (2015, July). Vibrotactile feedback for collision awareness. In *Proceedings of the 2015 British HCI Conference* (pp. 277-278). ACM.

Abstract : Magnetic Confinement Fusion machines called tokamak (e.g. ITER and WEST projects), as well as many industrial projects, require a high integration level in a confined volume. The feasibility of installation and maintenance by an operator has to be considered in the early stages of the design. Virtual reality technologies have opened new perspectives and solutions to take into account assembly and maintenance constraints, using virtual mock-ups. In our applications, the human factor takes an important role. Since the operator interacts in a very tight and confined environment, he has to pay attention to his whole body relative to the virtual environment, in the absence of haptic feedback. In this context, enriched sensorial information, called "collision awareness feedback", must be defined, to favour an appropriate operator's spatial behavior with respect to the environment. In this paper, we present a preliminary study, testing the effect of vibrotactile feedback in a simple tracking task, compared to a pure visual feedback. (Louison, Ferlay, Keller, et al. [2015](#))

A.2. Plasma facing components integration studies for the WEST divertor

Ferlay, F., Missirlian, M., Guilhem, D., Firdaouss, M., Richou, M., Doceul, L., ... & Proust, M. (2015). Plasma facing components integration studies for the WEST divertor. *Fusion Engineering and Design*, 98, 1285-1289.

Abstract : In the context of the Tokamak Tore-Supra evolution, the CEA aims at transforming it into a test bench for ITER actively cooled tungsten (ACW) plasma facing components (PFC). This project named WEST (Tungsten Environment in Steady state Tokamak) is especially focused on the divertor target. The modification of the machine, by adding two axisymmetric divertors will make feasible an H-mode with an X-point close to the lower divertor. This environment will allow exposing the divertor ACW components up to 20 MW/m² heat flux during long pulse. These specifications are well suited to test the ITER-like ACW target elements, respecting the ITER design.

One challenge in such machine evolution is to integrate components in an existing vacuum vessel in order to obtain the best achievable performance. This paper deals with the design integration of ITER ACW target elements into the WEST environment considering magnetic, electric, thermal and mechanical loads. The feasibility of installation and maintenance has to be strongly considered as these PFC could be replaced several times. The ports size allows entering a 30° sector of pre-installed tungsten targets which will be plugged as quickly and easily as possible. The main feature of steady state operation is the active cooling, which leads to have many embedded cooling channels and bulky pipes on the PFC module including many connections and sealings between vacuum and water channels. The 30° sector design is now finalized regarding the ITER ACW elements specifications. No major modifications are expected. (Ferlay, Missirlian, Guilhem, et al. 2015)

A.3. Use of virtual reality for optimizing the life cycle of a fusion component

Keller, D., Doceul, L., Ferlay, F., Louison, C., Pilia, A., Pavy, K., ... & Andriot, C. (2015). Use of virtual reality for optimizing the life cycle of a fusion component. *Fusion Engineering and Design*, 101, 186-191.

Abstract : Efficient development of a complex system such as a fusion component needs a stringent integration of standard and new constraints. For example, compared to the previous fusion experimental devices, remote handling (RH) and safety requirements are in ITER key parameters which must be integrated since the earliest design. For optimizing such integration studies, CEA, IRFM decided in 2010 to implement the use of virtual reality (VR) tools during the life cycle (from design to operation) of a fusion component. This paper describes a first feedback of such use for fusion engineering purposes.

After a short overview of the CEA, IRFM VR platform capabilities, three main uses will be described: design review, simulation of remote handling and hands-on operations, with man in the loop.

The Design review mode was intensively used within the framework of a fruitful collaboration with ITER design Integration Team. This mode, fully compatible with CAD software, enables scale one data visualization with stereoscopic rendering. It improves the efficiency in detecting inconsistencies inside models and machine sub-system design optimization needs. Several accessibility cases of major Safety Important Components (SIC-1) were studied giving important requirements to the design at an early stage.

CEA, IRFM, in close collaboration with expertise of CEA, LIST for VR simulation software, applies VR technologies for designing RH maintenance scenario for ITER Test Blanket System (TBS) and Ion cyclotron Resonance Heating (ICRH)

Port Plugs. RH compatibility studies using VR pointed out major design drivers while helping to propose credible solution. VR platform is intensively used in the design of WEST (Tungsten (W) Environment Steady-state Tokamak) components and assembly studies, providing important information about the feasibility of assembly processes, optimization of physical mock-ups and ergonomic posture and gestures of operator.

Finally, new perspectives, as the integration of safety constraints (dose calculation) will be described, demonstrating the powerful of VR tools at different stages of the component lifecycle. (Keller, Doceul, Ferlay, Louison, et al. [2015](#))

A.4. The Contribution of a Virtual Self and Vibrotactile Feedback to Walking Through Virtual Apertures

Mestre, D. R., Louison, C., & Ferlay, F. (2016, July). The Contribution of a Virtual Self and Vibrotactile Feedback to Walking Through Virtual Apertures. *In International Conference on Human-Computer Interaction* (pp. 222-232). Springer International Publishing.

Abstract : We previously demonstrated that behavioral adjustments to environmental properties constituted an objective indicator of presence in Virtual Reality (VR). The subject's task was to walk through virtual apertures of variable width. Subjects exhibited a behavioral transition, from frontal walking to body rotation, while walking from broad to narrow apertures. Here, we tested the same basic protocol, using a Head-Mounted Display (HMD). Overall, results show the same basic behavior (shoulder rotation through a narrow door). However, optimal adaptive behavior (avoiding collision with the door's borders) required both the presence of a dynamic representation of the subject's body (in the visual display) and of a vibrotactile feedback, signaling approach of the subject's shoulder towards the doorpost. (Mestre, Louison, and Ferlay [2016](#))

A.5. Spatialized vibrotactile feedback contributes to goal-directed movements in cluttered virtual environments

Louison, C., Ferlay, F., & Mestre, D. R. (2017, March). Spatialized vibrotactile feedback contributes to goal-directed movements in cluttered virtual environments. *In 3D User Interfaces (3DUI), 2017 IEEE Symposium on* (pp. 99-102). IEEE.

Abstract : In virtual reality (VR), spatial awareness is a dominant research topic. It plays an essential role in the assessment of human operators' behavior within virtual environments (VE), notably for the evaluation of the feasibility

of manual maintenance tasks in cluttered industrial settings. In such contexts, it is decisive to evaluate the spatial and temporal correspondence between the operator's movement kinematics and that of his/her virtual avatar in the virtual environment. Often, in a cluttered VE, direct kinesthetic (force) feedback is limited or absent. We tested whether vibrotactile (cutaneous) feedback would increase visuo-proprioceptive consistency, spatial awareness, and thus the validity of VR studies, by augmenting the perception of the operator's contact(s) with virtual objects. We present preliminary experimental results, obtained using a head-mounted display (HMD) during a goal-directed task in a cluttered VE. Data suggest that spatialized vibrotactile feedback contributes to visuo-proprioceptive consistency. (Louison, Ferlay, and Mestre [2017](#))

A.6. Operators' accessibility studies for assembly and maintenance scenarios using virtual reality

Louison, C., Ferlay, F., Keller, D., & Mestre, D. R. (2017). Operators' accessibility studies for assembly and maintenance scenarios using virtual reality. *Fusion Engineering and Design*.

Abstract : The development of fusion plants is more and more challenging. Compared to previous fusion experimental devices, integration constraints, maintenance and safety requirements are key parameters in the ITER project. Components are designed in parallel and we must consider integration, assembly and maintenance issues, which might have a huge impact on the overall design. That also implies to consider the operator's feedback to assess the feasibility of accessibility or maintenance processes.

Virtual reality (VR) provides tools to optimize such integration. In 2010, the CEA IRFM decided to upgrade its design tools, by using VR during the life cycle (from design to operations) of a fusion component. The VR platform is intensively used in the design and assembly studies of WEST components. In particular, feasibility of the assembly scenario is assessed by the operators involving in the real assembly work.

To study this aspect, the use of static manikins is quite frequent in the industry. However, more complex studies, like the feasibility of assembly and maintenance tasks in complex and very confined environments, require enhanced features such as dynamic and biomechanically realistic virtual humans. We also study the contribution of tactile feedback to improve physical presence and interaction in the virtual environment (VE), which is very important for the validation of a given task's feasibility and the ergonomic evaluation of the posture and gesture of the operator. In particular, we show that adapted behavior in respect to physical elements of the VE can be obtained using a dynamic co-localized representation of the subject's body and a pseudo-haptic tactile feedback.

In this paper, we present integration studies involving operators and recent advances in the assessment of maintenance feasibility. (Louison, Ferlay, Keller, et al. [2017](#))

A.7. Design and construction of the first ELM resilient long pulse ICRH antenna for WEST

Bernard, JM., Mollard, P., Bruno, V., Chen, Z., Delaplanche, JM., Delmas. E., ... & Louison C. (2017). Design and construction of the first ELM resilient long pulse ICRH antenna for WEST. *Fusion Engineering and Design*.

Abstract : One of the key missions of the Ion Cyclotron Resonant Heating (IRCH) system for WEST is to provide sufficient RF heating power in order to obtain a heat flux on the divertor target of 10 MW/m² during 1000 s and 20 MW/m² during a few tens of seconds. Based on the experience acquired in Tore Supra, the ICRH system has been upgraded for long pulse operation and Edge Localized Modes (ELM) resilience. To achieve this performance, three antennas have been designed through a European collaboration and are now under fabrication at CAS/ASIPP, at the Keye Company, Hefei, in China, within the framework of the Associated Laboratory IRFM-ASIPP. This paper describes the electrical and mechanical design of the antenna, together with the main manufacturing steps and leak test procedure used for validating the water-cooled components. Accessibility and maintenance studies on WEST have been performed with the help of virtual reality. The first ICRH antenna was delivered at Cadarache in July 2016, and is foreseen to be installed on WEST in 2017. (Bernard, Mollard, Bruno, et al. [2017](#))

A.8. Spatialized Vibrotactile Feedback Improves Goal-directed Movements in Cluttered Virtual Environments

Louison, C., Ferlay, F., & Mestre, D. R. (Under review, accepted for publication, pending major revisions (9 May, 2017)). Spatialized Vibrotactile Feedback Improves Goal-directed Movements in Cluttered Virtual Environments.

Abstract : Spatial awareness in virtual reality (VR) is a dominant research topic. It plays an essential role in the assessment of human operators' behavior in simulated tasks, notably for the evaluation of the feasibility of manual maintenance tasks in cluttered industrial settings. In such contexts, it is decisive to evaluate the spatial and temporal correspondence between the operator's movement kinematics and that of his/her virtual avatar in the virtual environment (VE). Often, in a cluttered VE, direct kinesthetic (force) feedback is limited

or absent. We tested whether vibrotactile (cutaneous) feedback would increase visuo-proprioceptive consistency, spatial awareness, and thus the validity of VR studies, by augmenting the perception of the operator's contact(s) with virtual objects. We present experimental results, obtained using a head-mounted display (HMD) during a goal-directed task in a cluttered VE. Results suggest the contribution of spatialized vibrotactile feedback to visuo-proprioceptive consistency.

B. Annexe : Interfaces de stimulation tactile mécanique

Le fonctionnement général des dispositifs basés sur une stimulation mécanique est la transformation d'une énergie électrique en un faible mouvement mécanique. Ce mouvement de l'ordre du micromètre au millimètre permet de créer une stimulation vibrotactile. Il existe plusieurs systèmes avec ces caractéristiques : hautparleur, piézoélectrique bimorphe, alliage à mémoire de forme, vibromoteur... En nous basant sur les travaux de REGENBRECHT, HAUBER, SCHOENFELDER et al. (2005) nous présenterons les systèmes de stimulation tactile utilisables pour le développement d'un dispositif de retour vibrant.

Actionneurs pneumatiques : ils utilisent un système de vannes et d'air sous pression pour déplacer une membrane mécaniquement en contact avec la peau. Ces dispositifs sont difficiles à embarquer en raison de leur nécessité d'air sous pression (Figure .2).



Figure .2. – Actionneur Pneumatique

Hautparleur miniature : il a été montré que l'amplitude et la force générées par un hautparleur pouvait clairement être perçues lorsque les enceintes étaient contrôlées à une fréquence entre 200-250 Hz. Néanmoins, la taille de l'enceinte requise pour générer une force de stimulation perceptive est relativement importante ce qui est peu adapté à des dispositifs embarqués. D'autre part, le bruit généré par le dispositif est un facteur gênant.

Buzzers électromagnétiques : ce dispositif est normalement utilisé comme un indicateur sonore. Le principe de fonctionnement de ces dispositifs est l'oscillation d'une membrane à partir du mouvement généré par le champ

d'une bobine alternative et d'un aimant lié à ressort plat. En retirant la membrane, le dispositif peut servir de stimulateur vibrant. L'inconvénient est la faible zone de contact par rapport à la taille du dispositif. En raison du champ magnétique, ils peuvent interférer avec des systèmes de tracking magnétique (Figure .3).

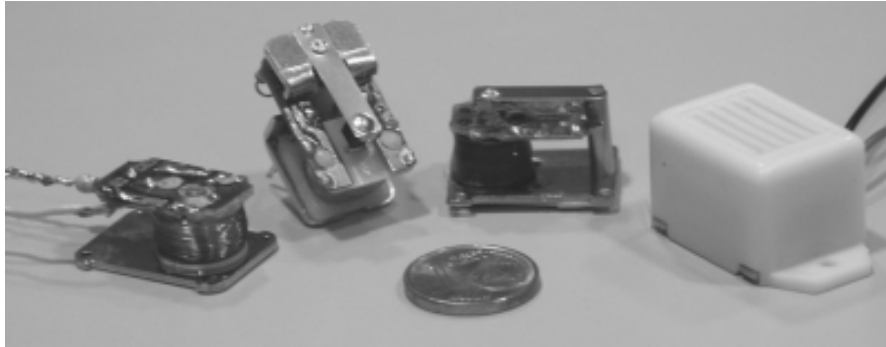


Figure .3. – Buzzers électromagnétiques

Actionneurs piézoélectriques : composés de deux couches matérielles (une couche céramique et une de métal), les éléments piézo vont diminuer de taille et se plier lorsqu'un courant est appliqué entre les couches. Cet effet peut être utilisé pour générer une vibration. Lors de l'application d'un courant alternatif (relativement important), ils peuvent générer une vibration perceptible. Ils ont l'avantage d'être plats et petits ce qui les rend facilement utilisables dans un dispositif vibrotactile. On trouve aussi des buzzers piézoélectriques (Figure .4).

Bimorph

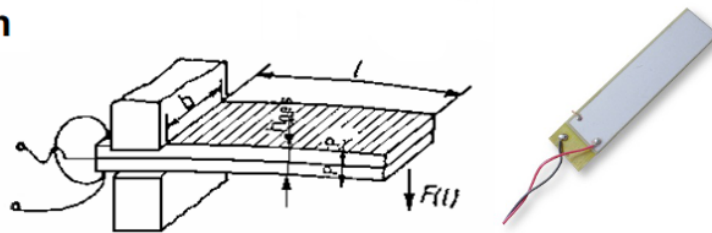


Figure .4. – Actionneurs piézoélectriques

Vibromoteur : un vibromoteur est généralement composé d'un moteur DC commun et d'un rotor avec une masse excentrée. La vibration est proportionnelle à la vitesse de vibration du rotor. En raison du déséquilibre de la masse sur le rotor, la rotation de celui-ci induit un mouvement de l'ensemble du moteur. En raison de la grande diversité en taille et en caractéristique des moteurs, on trouve facilement des dispositifs fonctionnant à faibles tensions (2-3 V). Plus la tension fournie est grande, plus la fré-

quence et l'amplitude seront importantes. Qui plus est, ils sont très abordables en raison de leur grande utilisation notamment dans les téléphones portables. Ils présentent l'inconvénient de ne pas permettre le contrôle séparé de l'amplitude et la fréquence (RYU, JUNG, S. KIM et al. 2007). On trouve deux formes de vibreurs : cylindrique et en forme de disque (Figure .5).

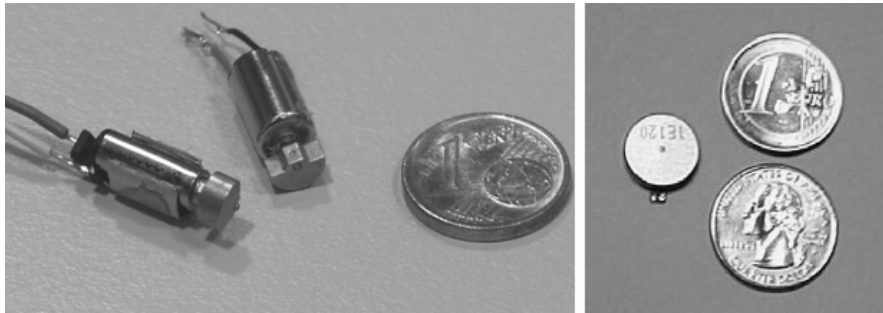


Figure .5. – Vibromoteurs cylindriques et en forme de disque.

C. Annexe : Carte fille de contrôle des vibreurs

La carte fille a été conçue pour permettre le contrôle de 20 vibreurs grâce aux entrées/sorties de la carte Chipkit Max32 avec la puissance délivrée par une batterie externe (Figure .6). Ce module vient se fixer sur le microcontrôleur. Il est composé de borniers permettant de connecter les vibreurs, de transistors et de diodes de roue libre et d'un connecteur permettant le raccordement avec l'alimentation des vibreurs (Figure .7).

Schéma d'implantation :

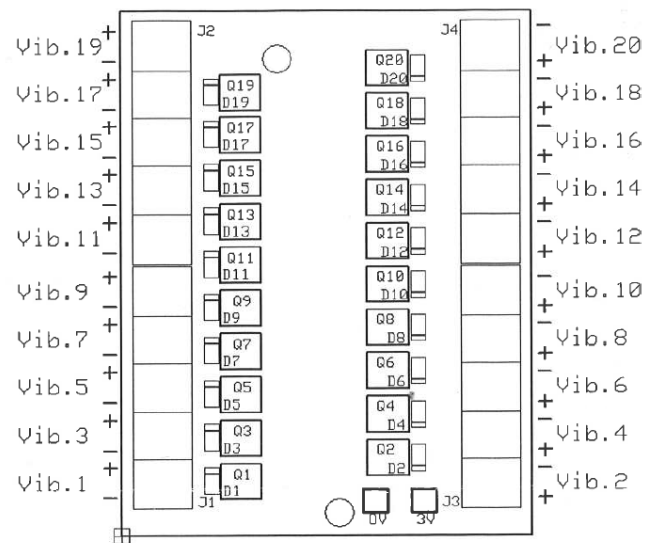


Figure .6. – Schéma de la carte fille pour chipkit Max32 pour la commande de 20 vibreurs.

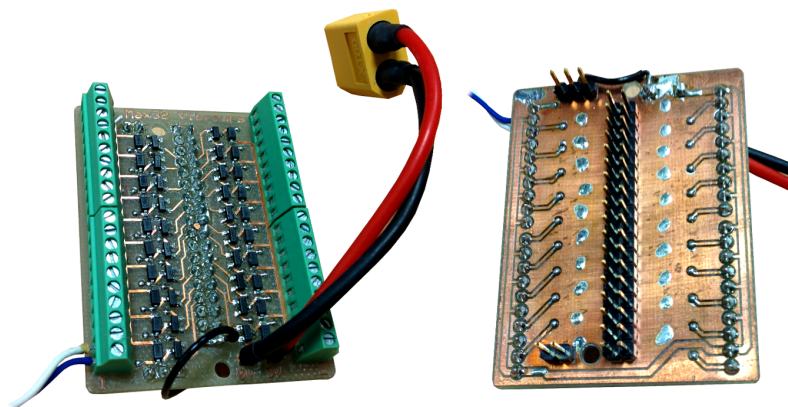
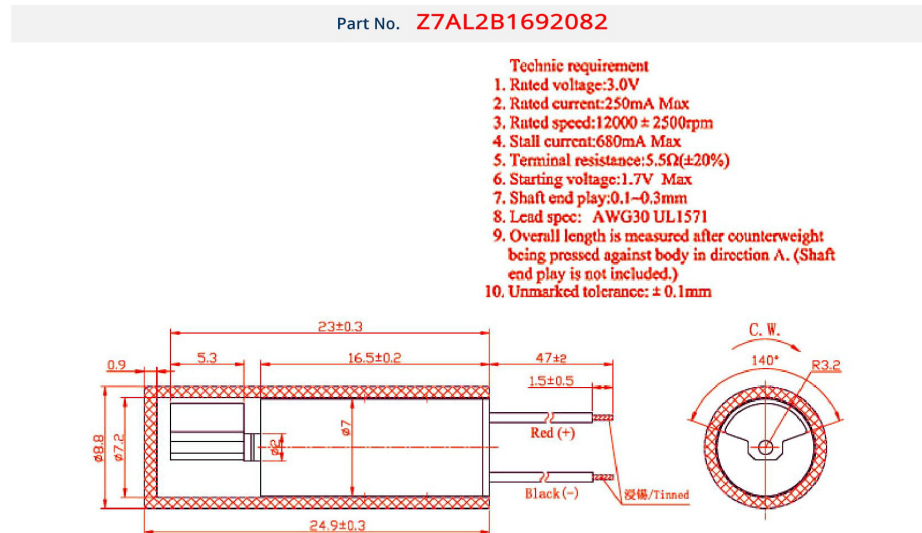


Figure .7. – Carte fille recto verso. Le connecteur permet de connecter la batterie.

D. Annexe : DataSheet Vibromoteur - Parallax Inc. ref. 28822

Datasheet vibromoteur cylindrique (Parallax Inc. ref. 28822), moteur à courant continu avec une masse excentrée, 12 000 tr/min à 3 V CC.



1. General scope

1-1 This specification applies to cylindrical permanent magnetic DC vibration motor model **Z7AL2B1692082**.

2. Operating conditions

Items	Specifications	Condition & Remarks
2-1 Rated voltage	3.0V DC	
2-2 Rated load	Counter weight	As specified in 10. Outline drawing.
2-3 Rotation	C.W/C.C.W (clockwise or counter clockwise)	
2-4 Motor position	All positions	
2-5 Operating voltage	2.2 ~ 3.6V DC	
2-6 Operating conditions	-30 ~ 70°C, ordinary humidity Humidity : 65 $\pm$ 20%RH	No condensation of moisture.
2-7 Storage conditions	-40 ~ 80°C, ordinary humidity Humidity : 65 $\pm$ 20%RH	No condensation of moisture.

Figure .8. – DataSheet Vibromoteur - Parallax Inc. ref. 28822.(p. 1)

3. Measuring conditions

Items		Specifications	Condition & Remarks
3-1	Temperature	20±2°C	
3-2	Humidity	(63 ~ 67%) RH	
3-3	Motor position	Motor Shaft horizontal	Lock the motor in a test fixture.

3-4 All data are based on the measurement under the temperature of 20 °C and humidity 65 %RH. However, the ranges of temperature 5~35 °C and humidity 45~85 %RH are to be applicable as long as no problems.

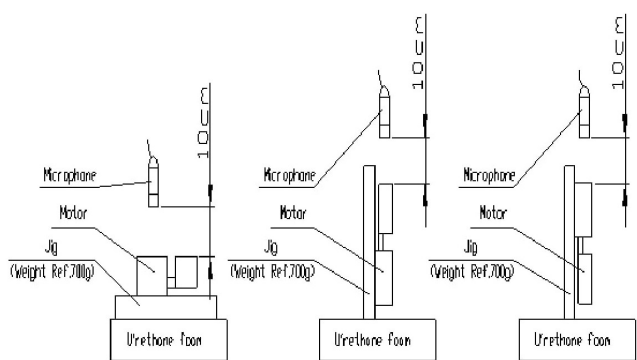
4. Mechanical specifications

Items		Specifications	Condition & Remarks
4-1	Configuration	As specified in 10. Outline drawing	Outline drawing No: Z7AL2B1692082.
4-2	Appearance	There shall be no evidence of mechanical damage and shall not have inadequate corrosion and so on	Visual examination (allowable extent is based on boundary sample)
4-3	Shaft end play	0.1 ~ 0.3mm	
4-4	Holding strength of vibration weight	49N (5kgf) min.	

5. Performance and characteristics

Items		Specifications	Condition & Remarks
5-1	Rated speed	12,000±2,500rpm	At rated voltage and rated load (Counterweight).
5-2	Rated current	250mA max	
5-3	Stall current	680mA max	At rated voltage.
5-4	Starting voltage	1.7V DC max	(Counterweight) any position of rotor.
5-5	Insulation resistance	1M• min	At DC 100V between terminal and case.

Figure .9. – DataSheet Vibromoteur - Parallax Inc. ref. 28822.(p. 2)

5-6	Terminal resistance	5.5• approx. (±20%)	At 20°C.
	Mechanical noise	50db (A) max	
Measured at rated voltage and rated load (counterweight). Background noise: 28db (A) max. @ 10cm. Measuring instruments: B & K. The weight of jig: 700g.			
5-7	 Fig. A Fig. B Fig. C		

6. Reliability Test

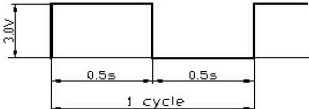
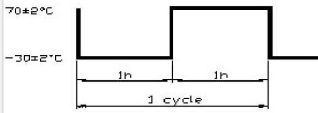
Items	Standard test conditions	Condition & Remarks																								
6-1	Life test	 <table><tr><th>Position</th><th>Voltage</th><th>Load</th><th>Temperature</th><th>Humidity</th><th>Life</th></tr><tr><td>Horizontal</td><td>Rated</td><td>weight</td><td>20 °C</td><td>65 %</td><td>200,000 cycles</td></tr></table> <table><tr><th>Position</th><th>Voltage</th><th>Load</th><th>Temperature</th><th>Humidity</th><th>Life</th></tr><tr><td>Horizontal</td><td>Rated</td><td>weight</td><td>20 °C</td><td>65 %</td><td>200,000 cycles</td></tr></table>	Position	Voltage	Load	Temperature	Humidity	Life	Horizontal	Rated	weight	20 °C	65 %	200,000 cycles	Position	Voltage	Load	Temperature	Humidity	Life	Horizontal	Rated	weight	20 °C	65 %	200,000 cycles
Position	Voltage	Load	Temperature	Humidity	Life																					
Horizontal	Rated	weight	20 °C	65 %	200,000 cycles																					
Position	Voltage	Load	Temperature	Humidity	Life																					
Horizontal	Rated	weight	20 °C	65 %	200,000 cycles																					

Figure .10. – DataSheet Vibromoteur - Parallax Inc. ref. 28822.(p. 3)

6-2	Low Temp exposure	Temperature: $-40\pm 2^{\circ}\text{C}$ Time: 96hrs	After 2 hours exposure in ordinary temperature and humidity, Motors shall be approved as specified in
6-3	High Temp exposure	Temperature: $60\pm 2^{\circ}\text{C}$ Time: 96hrs	
6-4	Humidity exposure	Temperature: $40\pm 2^{\circ}\text{C}$ Humidity: 90 ~ 95% RH Exposure time: 96hrs No condensation of moisture	
6-5	Vibration	Displacement: 1.5mm (p-p) Frequency: 10 ~ 55Hz Acceleration: 22m/s^2 Period: 20 Mins log sweep (10 ~ 55 ~ 10Hz) Direction: x, y, z Time: Every 2 hours	After the test motors shall be approved as specified in item 7-2.
6-6	Free fall	Test state: Set the motor to the approximately 75 g (include the motor) weight of block drop the motor on the concrete floor. Height: 1.5 m Direction: 6/6faces Number of times: Twice each	After the test motors shall be approved as specified in item 7-2.
6-7	Heat shock	Test cycle: 20 cycles 	After 2 hours exposure in ordinary temperature and humidity, Motors shall be approved as specified in item 7-2.

7. Requirements

Items		Requirements	
7-1	Table A	1) Rated speed: 2) Rated current: 3) Starting voltage:	Initial data -30% Min, Initial data +60% Max $\pm 30\%$ /Initial data $\pm 30\%$ max 2.0 V DC max
7-2	Table B	1) Rated speed: 2) Rated current: 3) Starting voltage:	$\pm 30\%$ /Initial data $\pm 30\%$ max $\pm 30\%$ /Initial data $\pm 30\%$ max 2.0V DC max

Figure .11. – DataSheet Vibromoteur - Parallax Inc. ref. 28822.(p. 4)

E. Annexe : Protocole de communication

E.1. Protocole de communication Version 1

Le protocole de communication entre l'application maître et le contrôleur vibrotactile a été établi pour définir les instructions envoyées par communication série Bluetooth pour la commande des vibreurs. Les commandes sont codées sur deux octets (un caractère ASCII) excepté quelques unes nécessitant deux caractères. Les commandes comprises entre 255 et 240 sont réservées aux commandes de configuration, tandis que les valeurs de 0 à 239 sont des instructions permettant le contrôle des vibreurs.

Commandes de configuration :

- **Start (255)** : passe le contrôleur en mode « Started », avant ça il est en mode « Standby ». Seules les commandes de contrôle des vibreurs et les commandes de configuration : Stop, Reset, JerkModeOn et JerkModeOff peuvent être utilisées dans ce mode.
- **Stop (254)** : instruction passant le contrôleur mode « Standby », c'est-à-dire qu'il réagit seulement aux commandes de configuration, mais pas aux instructions de contrôle de vibreur.
- **Reset (253)** : réinitialise le contrôleur et stoppe le fonctionnement de tous les vibreurs.
- **Identify (252) + ID [0-19]** : commande suivi d'une valeur ID correspondant à l'identifiant d'un vibreur. Permet d'identifier le vibreur ID en l'activant pendant une seconde.
- **Use (251) + ID [0-19]** : commande suivi d'une valeur ID correspondant à l'identifiant d'un vibreur. Définit le nombre de vibreurs qui peuvent être contrôlés. Les instructions touchant les autres vibreurs seront ignorées.
- **Limit (250) + ID [0-19]** : commande suivi d'une valeur ID correspondant à l'identifiant d'un vibreur. Limite le nombre de vibreurs simultanément activés afin de limiter la consommation.
- **PowerLimit (249) + MAX [0-100]** : commande suivi d'une valeur MAX correspondant à une valeur d'intensité maximale. Permet de limiter à un certain pourcentage la puissance maximale de l'intensité des vibreurs.
- **JerkModeOn (248)** : Passe le contrôleur en mode cadencé. Les vibrations feront des impulsions à une fréquence de 2 Hz.
- **JerkModeOff (247)** : Passe le contrôleur en mode continu. Les vibrations seront continues.

Les commandes de contrôle des vibreurs « commande » sont comprises entre 0 et 239. La commande contient à la fois l'information sur l'identifiant du vibreur à contrôler *IdVibreur* (compris entre 0 et 19) et l'intensité du vibreur *Power* (comprise entre 0 et 11). Pour récupérer les informations depuis la commande :

$$Power = commande \% 12 \quad (.1)$$

$$IdVibreur = (commande - power)/20 \quad (.2)$$

Avec pour l'intensité « 0 » vibration éteinte, « 10 » correspondant à une vibration continue à pleine puissance, « 11 » vibration cadencée à pleine puissance. Et de « 1 » à « 9 » correspondant à un pourcentage de l'intensité de vibration, par exemple 5 revient à demander au contrôleur de faire fonctionner le vibreur à 50 % de sa puissance maximale en utilisant une modulation de largeur d'impulsion.

E.2. Protocole de communication Version 2

Le protocole de communication entre l'application maître et le contrôleur vibrotactile a été établi pour définir les instructions envoyées par la communication série Bluetooth pour la commande des vibreurs. Celui-ci a évolué pendant toute la durée de la thèse pour répondre aux besoins particuliers de chaque expérimentation. Cette nouvelle version permet un plus grand contrôle de l'intensité, avec cent niveaux de modulation possibles. Il est également possible d'activer le mode de vibration cadencé de manière individuelle. Les commandes sont codées sur deux ou quatre octets (un ou deux caractères ASCII). Le premier caractère est utilisé pour identifier le type de commande, le second caractère sert à transmettre des paramètres à la commande. Les commandes sont de deux types : les commandes de configuration et les commandes d'activation des vibreurs.

Commandes de configuration :

- **Start (255)** : passe le contrôleur en mode « Started », avant ça il est en mode « Standby ». Seules les commandes de contrôle des vibreurs et les commandes de configuration : Stop, Reset, JerkModeOn et JerkModeOff peuvent être utilisées dans ce mode.
- **Stop (254)** : instruction passant le contrôleur mode « Standby », c'est-à-dire qu'il réagit seulement aux commandes de configuration, mais pas aux instructions de contrôle de vibreur.
- **Reset (253)** : réinitialise le contrôleur et stoppe le fonctionnement de tous les vibreurs.
- **Identify (252) + ID [0-19]** : commande suivi d'une valeur ID correspondant à l'identifiant d'un vibreur. Permet d'identifier le vibreur ID en l'activant pendant une seconde.
- **Use (251) + ID [0-19]** : commande suivi d'une valeur ID correspondant à l'identifiant d'un vibreur. Définit le nombre de vibreurs qui peuvent être contrôlés. Les instructions touchant les autres vibreurs seront ignorées.
- **Limit (250) + ID [0-19]** : commande suivi d'une valeur ID correspondant à l'identifiant d'un vibreur. Limite le nombre de vibreurs simultanément activés afin de limiter la consommation.

- **PowerLimit (249) + MAX [0-100]** : commande suivi d'une valeur MAX correspondant à une valeur d'intensité maximale. Permet de limiter à un certain pourcentage la puissance maximale de l'intensité des vibreurs.
- **JerkModeOn (248)** : Passe le contrôleur en mode cadencé. Les vibrations feront des impulsions à une fréquence de 2 Hz.
- **JerkModeOff (247)** : Passe le contrôleur en mode continu. La vibration des vibreurs sera continue.

Les commandes de contrôle des vibreurs sont composées de deux caractères. Le premier permet d'identifier le type d'action et le vibreur concerné, la valeur est comprise entre 101 et 161. Le second caractère, si nécessaire, sert à définir l'intensité et est compris entre 0 et 100. Cette valeur correspond au pourcentage de la puissance maximale en utilisant une modulation de largeur d'impulsions.

- Activation du vibreur en mode continu (101 à 120) + Intensité [0-100] : activation du vibreur *IdVibreur* en fonctionnement normal (vibration continue), l'intensité de vibration est transmise par le second caractère de la commande, avec $IdVibreur = commande - 101$.
- Activation du vibreur en mode cadencé (121 à 140) + Intensité [0-100] : activation du vibreur *IdVibreur* en fonctionnement cadencé, l'intensité de vibration est transmise par le second caractère de la commande, avec $IdVibreur = commande - 121$.
- Arrêt du vibreur (141 à 160) : Arrêt du vibreur *IdVibreur*, avec $IdVibreur = commande - 141$.

