

Université Victor Bordeaux Segalen

Année 2011

Thèse n°1886

THÈSE

Pour le

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ BORDEAUX 2

Mention : Sciences Cognitives

Présentée et soutenue publiquement

Le 12 décembre 2011

Par Florian LARRUE

Né(e) le 11 mars 1982 à Saint Michel d'Entraygues (16)

Influence des interfaces dans le transfert du virtuel au réel

Membres du Jury

M. Didier LE GALL	Professeur.....	Rapporteur
M. Rémy VERSACE	Professeur.....	Rapporteur
M. Bernard N'KAOUA	Professeur.....	Directeur de Thèse
M. Christian GROSS.....	Maître de Conférence.....	Co-Directeur de Thèse
Mme Hélène SAUZEON	Maître de Conférence	Membre du Jury
M. Martin HACHET.....	Chargé de Recherche INRIA .	Membre du Jury

Résumé

La thématique générale de notre thèse porte sur le transfert virtuel/réel de connaissances spatiales, et plus particulièrement sur l'identification de variables susceptibles d'optimiser ce transfert. Notamment, nous nous sommes intéressés à l'influence des interfaces de déplacement, de l'engagement physique et des informations sensorielles relatives au corps sur l'acquisition et le transfert de connaissances spatiales du virtuel vers le réel. L'engagement physique a été manipulé à l'aide de deux interacteurs (tapis roulant Vs joystick) proposant respectivement un fort et un faible engagement physique, ainsi que par une Interface Cerveau Ordinateur (ICO), permettant de commander un déplacement à l'aide de l'activité cérébrale du sujet, supprimant ainsi toute composante motrice effective. Enfin nous avons également manipulé l'expertise en jeu vidéo, variable susceptible de jouer un rôle important dans l'acquisition et l'utilisation des compétences spatiales au sens large, et plus spécifiquement dans le transfert virtuel-réel.

Nos expérimentations consistaient à apprendre un trajet à l'aide d'une des situations d'interaction définie ci-dessus. Le transfert virtuel/réel des connaissances spatiales a été ensuite évalué à l'aide de 6 tâches : une tâche de classification chronologique de photos, une tâche d'estimation de la distance parcourue et une tâche d'estimation de directions (tâches égocentriques) ; une tâche de croquis du trajet, une tâche d'estimation de la direction du point de départ du trajet (tâche allocentrique) ; et enfin une tâche globale de wayfinding consistant à reproduire en environnement réel le trajet préalablement appris en virtuel.

Nos résultats montrent que les effets de l'engagement physique (en particulier des informations proprioceptives et vestibulaires) et de l'expertise en jeu vidéo sont différents selon la nature de la compétence spatiale sollicitée (composante égocentrique, allocentrique ou reproduction du parcours). De plus, les résultats obtenus à l'aide de l'ICO permettent de préciser le rôle de la composante motrice dans l'acquisition et le transfert virtuel/réel de compétences spatiales.

L'ensemble de ces données sont discutées au regard des modèles d'acquisition et d'utilisation des connaissances spatiales, tels que le modèle Landmark-Route-Survey et la théorie des graphes. Les perspectives de notre travail concernent le développement d'interfaces adaptées aux utilisateurs ainsi que l'entraînement ou le réentraînement des

compétences spatiales de sujets âgés ou de patients présentant des pathologies lésionnelles et/ou dégénératives.

Mots Clés: Cognition Spatiale, Réalité Virtuelle, Interfaces, Engagement Physique, Information vestibulaire, Jeu Vidéo, Interface Cerveau Ordinateur.

Abstract

The general theme of our thesis focuses on the transfer of spatial learning from a virtual to a real environment, and more precisely on the identification of parameters that might optimize this transfer. Namely, we investigated the influence of displacement interfaces, of the physical involvement, and of the body-based information on the acquisition and the transfer of spatial learning from a virtual to a real world. The physical involvement was manipulated with the help of two interactors (Treadmill vs. Joystick) that respectively propose strong and mild physical involvements as well with the help of a Brain-Computer Interface (BCI). The BCI allows controlling displacements using subject's brain activity, thus nullifying all effective motor components. Finally, we also manipulated videogame experience, a parameter supposed to play an important role in the acquisition and the use of spatial skills in the widest sense and, more specifically in the virtual-to-real transfer.

Our experimentations first consisted in route learning within one of the above described interaction conditions. Then, the virtual-to-real transfer of spatial learning was evaluated with 6 tasks: the picture classification task, the distance estimation task, and the direction estimation task (egocentric task); the sketch-mapping task, the starting point estimation task (exocentric task); and finally the global wayfinding task, consisting in reproducing the previously learned virtual route in the real environment.

Our results reveal that the effects of the physical involvement (in particular, of the proprioceptive and vestibular information) and of the videogame experience are different, depending on the nature of the spatial ability needed (egocentric or exocentric component, route reproduction). Moreover, the results obtained with the BCI allow to precise the role of the motor component in the acquisition and the transfer of spatial skills from the virtual to the real environment.

These findings are discussed relative to the models of spatial knowledge acquisition and its utilization, such as the Landmark-Route-Survey model and the graph theory. Future trends of our work will concern the development of user-friendly interfaces as well as the training or the retraining of spatial abilities in older adults with or without degenerative disorders and patients with various brain lesions.

Key Words: Spatial Cognition, Virtual Reality, Interfaces, Physical Involvement, Vestibular Information, Videogames, Brain-Computer Interface

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Bernard N'Kaoua d'avoir dirigé ma thèse ; merci pour votre soutien, vos conseils, vos qualités pédagogiques et humaines, votre patience, votre faculté à toujours être proche et accessible durant ce long exercice qu'est la thèse.

Je remercie également Hélène Sauzéron pour son aide dans l'écriture, ses différentes relectures, ses conseils avisés, son aide pédagogique, le travail acharné qu'elle a mis en œuvre pour arriver au bout de ce travail.

Je souhaite remercier également Christian Gross pour ses encouragements et ses conseils, ainsi que Jean-René Cazalets, Etienne Guillaud pour m'avoir mis à disposition la Plateforme du Mouvement du CNRS (UMR 5227 – Mouvement Adaptation – Cognition) et son matériel de pointe pour effectuer mes différentes recherches.

Je remercie Fabien Lotte et Yann Irisard pour leurs aides et leurs conseils dans l'utilisation, le développement informatique, et la mise en place du protocole Cerveau Ordinateur, basé sur la plateforme Openvibe (INRIA).

Un grand merci à Déborah Foloppe et Luba Aguilova pour leurs aides dans la réalisation des différentes expérimentations. Ca n'a pas été facile tous les jours (notamment quand il pleuvait !) mais vous avez toujours su mener à bien le travail demandé. Cette thèse n'aurait jamais été ce qu'elle est sans vous. Merci encore !

Merci à Clémence Dana Gordon et Isabelle Tournemouly pour leur bonne humeur et leur réel soutien durant ce long parcours.

Un gros clin d'œil à Benoit Papaïx, Florent André et Sophie Lebellu !

Je tiens également à remercier mes différents collègues du laboratoire : Gregory Wallet (merci pour les articles, les corrections et ton soutien), Prashant Arvind Pala, Matthieu Taillade, Marie Dejos, David Iafrate, Catriona Raboutet ainsi que tous ceux que j'ai oubliés!

Enfin, je remercie mes amis et ma famille, notamment mes beaux-parents, mes parents et mon frère. Un sincère merci à ma femme Aude sans qui je ne serais jamais arrivé jusque là.

A ma fille Océane.

Tables des matières

Introduction.....	1
1^{ère} Partie : Partie Théorique	5
Chapitre I : La Cognition Spatiale.....	5
I. La cognition spatiale et ses représentations mentales	6
I.1 L'étude de la cognition spatiale : Concepts et définitions	6
I.2 Les représentations mentales	7
I.2.1 L'imagerie mentale	8
I.2.2 Les différents types de codage	8
I.2.2.1 La rotation mentale	9
I.2.2.2 Forme et taille des images mentales	9
I.2.2.3 Mesures des habiletés spatiales	10
I.2.2.3.1 Test de rotation mentale de Vandenberg et Kuse (1978).....	10
I.2.2.3.2 Les Cubes de Corsi (1972)	11
I.2.2.3.3 Le test GZ5 De Guilford et Zimmerman(1948).....	11
I.2.3 La carte cognitive.....	12
I.2.3.1 Les mesures des cartes cognitives	13
II. La navigation	13
II.1 Mécanismes cognitifs de la navigation : le wayfinding	14
II.1.1 Les représentations spatiales	15
II.1.1.1 Les référentiels spatiaux ou cadres de référence	15
II.1.1.2 Les modèles d'acquisition des connaissances spatiales	16
II.1.1.2.1 Le Modèle L-R-S de Siegel and White	16
II.1.1.2.2 La théorie des graphes	20
II.2 La composante motrice : l'action et la perception du mouvement	22
II.2.1 Les systèmes sensoriels nécessaires aux informations du corps dans l'espace	22
II.2.1.1 Le système visuel	22
II.2.1.2 Le système vestibulaire.....	22
II.2.1.3 La kinesthésie (ou proprioception)	23
II.2.2 La contribution des informations visuelles, vestibulaires et proprioceptives dans la navigation	24
II.3 Les facteurs influençant l'acquisition de connaissances spatiales	27
II.3.1 Le facteur âge	27
II.3.2 Le niveau d'études	27
II.3.3 Le sexe	28
II.3.4 Les jeux vidéo et cognition spatiale	29
II.3.4.1 Jeux vidéos, genres et évaluation des habiletés spatiales	29
II.3.4.2 Jeux vidéos et intégration multi sensorielle	30
II.3.5 Mesures de la navigation.....	31
Chapitre II : La Réalité Virtuelle.....	33
I. Définitions et concepts	35
II. Immersion	37
III. Présence.....	39
IV. Interaction.....	40
IV.1 Les niveaux d'Immersion et interaction (I ²).....	42
IV.1.1 Le niveau sensorimoteur	42
IV.1.2 Le niveau cognitif.....	42
IV.1.2.1 Les Schèmes.....	43
IV.1.2.2 La métaphore	43
IV.1.3 Le niveau fonctionnel	44

IV.2	Les interacteurs	45
IV.2.1	Les interacteurs sensoriels	45
IV.2.1.1	Les interacteurs visuels.....	45
IV.2.1.2	Les interacteurs sonores.....	47
IV.2.1.3	Les interacteurs haptiques	47
IV.2.1.4	Les interacteurs olfactifs.....	48
IV.2.2	Les interacteurs moteurs	48
IV.3	Interfaces et paradigmes d'interaction	48
IV.3.1	Les interfaces	49
IV.3.2	Les paradigmes d'interaction	50
IV.3.2.1	Le déplacement	50
IV.3.2.1.1	Quelques exemples d'interfaces de déplacement.....	51
IV.3.2.1.1.1	Interface basée sur le mouvement réel de la marche	51
IV.3.2.1.1.2	Basés sur des mouvements moteurs différents de la marche	54
IV.3.2.1.2	Les déplacements basés sur des métaphores.....	55
IV.3.2.2	La sélection et la manipulation d'objets.....	55
IV.3.2.2.1	Quelques exemples.....	56
IV.3.2.3	Le contrôle de l'application.	57
IV.3.2.3.1	Quelques exemples.....	57
Chapitre III : La Cognition Spatiale et les Interfaces.....		59
I.	Réalité virtuelle et neuropsychologie	60
I.1	Avantages de la réalité virtuelle pour la neuropsychologie	61
I.2	Quelques exemples	62
II.	Le transfert de connaissances du virtuel vers le réel	63
II.1	Facteurs influençant les acquisitions spatiales de connaissances en RV	64
II.1.1	Facteurs internes	64
II.1.1.1	Age	65
II.1.1.2	Sexe.....	66
II.1.1.3	Habilités spatiales	68
II.1.1.4	Jeux vidéos/ outil informatique	69
II.1.2	Facteurs externes	70
II.1.2.1	Type d'environnement	71
II.1.2.1.1	Fidélité visuelle	71
II.1.2.1.2	La taille et l'échelle de l'environnement.....	73
II.1.2.1.3	Les points de repères	74
II.1.2.2	Mode d'exploration	75
II.1.2.3	Les interfaces	77
II.1.2.3.1	Les interfaces visuelles.....	77
II.1.2.3.1.1	L'angle de vue.....	77
II.1.2.3.1.2	La taille de l'interacteur visuel	78
II.1.2.3.1.3	Le cas du HMD Vs Ecran de Bureau.....	79
II.1.2.3.2	Les interfaces de déplacement	80
II.1.2.3.2.1	La marche en EV.....	81
II.1.2.3.2.1.1	La recalibration sensorimotrice.....	82
II.1.2.3.2.1.2	Le flux visuel dans la marche en EV.....	83
II.1.2.3.2.1.3	Informations vestibulaires de rotation et de translation	83
III.	Se déplacer par la pensée (Les Interfaces Cerveau Ordinateur).....	87
III.1	Les différents types d'ICO.....	88
III.1.1	Invasive Vs Non Invasive.....	88
III.1.2	Synchrone Vs Asynchrone	90
III.2	Fonctionnement	92
III.3	Apprentissage d'un ICO	94
III.3.1	Du côté machine.....	94
III.3.2	Du côté de l'homme	96
III.4	Interfaces cerveaux ordinateurs : quelles utilisations ?	97

Chapitre IV : Modèle d'Analyse..... 99

- I. Objectifs..... 99
- II. Plan expérimental..... 103
 - II.1 Méthode..... 103
 - II.1.1 Participants..... 105
 - II.1.2 Matériels..... 105
 - II.1.2.1 L'environnement..... 105
 - II.1.2.2 Matériels..... 105
 - II.2 Procédure générale..... 106
 - II.2.1 Phase de tests neuropsychologiques..... 106
 - II.2.2 Apprentissage du trajet..... 106
 - II.2.2.1 Apprentissage en situation réelle..... 106
 - II.2.2.2 Apprentissage en situation virtuelle..... 107
 - II.2.3 Phase de restitutions (transfert)..... 108
 - II.2.3.1 Tâche égocentrique de classification chronologique de photos..... 108
 - II.2.3.2 Tâche égocentrique d'estimation des directions..... 108
 - II.2.3.3 Tâche égocentrique d'estimation des distances parcourues..... 108
 - II.2.3.4 Tâche allocentrique du dessin du parcours..... 108
 - II.2.3.5 Tâche allocentrique d'estimation du point de départ du trajet..... 109
 - II.2.3.6 Tâche globale du wayfinding..... 109

Chapitre V : Influence de l'Engagement Physique et de la Rotation sur le transfert Virtuel/Réel.....111

- I. Objectifs..... 111
- II. Méthode..... 115
 - II.1 Matériel..... 116
 - II.1.1 Interfaces..... 116
 - II.1.2 Interacteur Joystick..... 117
 - II.1.3 Interacteur Tapis Roulant..... 118
 - II.2 Procédure générale..... 120
- III. Résultats..... 121
- IV. Discussion..... 127
 - IV.1 La composante égocentrique..... 128
 - IV.2 La composante allocentrique..... 130
 - IV.3 La reproduction du parcours (wayfinding)..... 130

Chapitre VI : Influence de l'Engagement Physique et de l'Expérience en Jeux Vidéos sur le transfert Virtuel/Réel.....133

- I. Objectifs :..... 133
- I. Méthode..... 134
 - I.1 Matériels..... 135
 - I.2 Procédure Générale..... 135
- II. Résultats..... 136
- III. Discussion..... 142
 - III.1 La composante égocentrique..... 142
 - III.2 La composante allocentrique..... 144
 - III.3 Reproduction du parcours (Le wayfinding)..... 144

Chapitre VII : Les Interfaces Cerveau Ordinateur Implication de la composante motrice dans le transfert du virtuel au réel.....147

- I. Objectifs..... 147
- I. Méthode..... 148
 - I.1 Matériels..... 149
 - I.2 Interfaces..... 149
- II. Procédure générale..... 149
 - II.1 Apprentissage de l'utilisation du tapis roulant..... 149
 - II.2 Apprentissage du système ICO par l'utilisateur..... 150
- III. Résultats..... 152
 - III.1.1 Le protocole d'apprentissage ICO..... 153

III.1.2	Le transfert de connaissances du virtuel au réel	154
IV.	Discussion	159
IV.1	Protocole d'apprentissage du ICO	159
IV.2	Transfert d'apprentissage du virtuel au réel.	160
IV.2.1	La composante égocentrique	160
IV.2.2	La composante allocentrique	163
IV.2.3	La reproduction du parcours (Wayfinding).....	163
Chapitre VIII : Discussion et Perspectives		165
I.	La composante égocentrique.....	167
II.	La composante allocentrique.....	171
II.1	Le transfert virtuel/réel (wayfinding).....	173
III.	Perspectives	176
III.1	Traitement vestibulaire et apprentissage en EV de connaissances spatiales	176
III.2	Applications neuropsychologiques.....	179
Annexes.....		181
Annexe 1 : Ingénierie de Recherche : Le développement d'EV, d'Interfaces et de Logiciels d'Analyse de l'Activité pour la Cognition		183
I.	L'environnement virtuel du quartier de Bordeaux	184
I.1	La modélisation de l'environnement	184
I.1.1	La prise de mesures	184
I.1.2	L'infographie	185
I.1.3	La programmation 3D temps réel.....	186
I.1.4	Implémentations de fonctionnalités et publications.....	188
I.1.4.1	Impact du mode de navigation et du délai de rétention	188
I.1.4.2	La complexité de l'environnement	189
I.1.4.3	La fidélité visuelle	190
I.1.4.4	Le point de vue	192
I.1.5	La mise à jour de l'environnement virtuel.....	193
<i>Le joystick sans rotation</i>	195	
<i>Le joystick avec rotation</i>	196	
<i>Le tapis sans rotation</i>	196	
<i>Le tapis avec rotation</i>	197	
<i>L'Interface Cerveau-Ordinateur (ICO)</i>	198	
I.2	Logiciel d'analyse d'activité Virtuel/Réel	200
II.	L'appartement virtuel	206
II.1	Evaluation de la mémoire épisodique.....	206
Annexe 2 - Article 1: Differences in spatial learning transfer from virtual to real according to body-based manipulations.		209
Annexe 3 - Article 2: Interface and Gaming Experience Influence on Spatial Transfer: Egocentric vs. Allocentric Tasks		255
Table des illustrations		295
Liste des tableaux		299
Bibliographie		301

Introduction

Aujourd'hui, les tests psychométriques et les outils classiques utilisés dans l'évaluation, le diagnostic et la rééducation cognitive des patients sont généralement de type papiers/crayon, et donc très éloignés des situations de la vie quotidienne dans lesquelles les patients sont susceptibles de rencontrer des difficultés (et sur lesquelles portent d'ailleurs la plainte cognitive). La réalité virtuelle est considérée comme un substitut à ces problèmes dits « écologiques » (Rizzo, Schultheis, Kerns, Mateer, 2004 ; Bosco, Picucci, Caffò, Lancioni et Gyselinck, 2008) car elle permet de simuler en 3D des situations complexes qui ressemblent aux situations de la vie quotidienne tout en contrôlant les variables expérimentales, en respectant la sécurité des sujets, en s'adaptant à leurs besoins spécifiques, etc. Un des enjeux des technologies de la réalité virtuelle appliqués aux domaines de la santé, est de développer et de valider des outils de diagnostic et de rééducation adaptés au handicap du patient. La question préalable est alors de déterminer dans quelles mesures les apprentissages réalisés en virtuel sont transférables aux situations réelles.

La thématique générale de notre thèse porte sur le transfert virtuel/réel de connaissances spatiales, et plus particulièrement sur l'identification de variables susceptibles d'optimiser ce transfert. Parmi ces variables, nous nous centrerons plus particulièrement sur l'impact de l'activité du sujet lors de l'apprentissage de situations virtuelles (et leur transfert éventuel en réel). L'activité renvoie au mode d'interaction de sujet avec l'environnement 3D, et donc aux interfaces utilisées (joystick, souris, clavier, tapis roulant, etc) en comparaison à un mode passif dans lequel le sujet ne fait que visualiser les environnements. Les travaux portant sur l'impact de l'activité du sujet sur les performances réalisées en 3D ont montré des résultats contradictoires, certains montrant une supériorité du mode actif active (Wallet, Sauzeon, Rodrigues et N'Kaoua, 2008 ; Wallet, Sauzeon, Rodrigues et N'Kaoua, 2009 ; Wallet, Sauzéon, Rodrigues, Larrue et Kaoua, 2010 ; Wallet, Sauzéon, Pala, Larrue, Zheng et N'Kaoua, 2011 ; Peruch, Vercher et Gautier, 1995) et d'autres non (Wilson, Foreman, Gillett et Stanton, 1997; Wilson, 1999, Wilson et Péruch, 2002 ; Gaunet, Vidal, Kemeny et Berthoz, 2001). Notre thèse s'inscrit dans ce débat et a pour objectif de préciser :

- Le rôle du degré d'engagement physique (informations sensorielles relatives à la position du corps dans l'espace) et de la rotation dans l'apprentissage d'un parcours en 3D ;
- Leur implication différentielle dans l'optimisation du transfert virtuel/réel ;
- Le rôle de variables liées au sujet et susceptibles d'influencer les apprentissages, tels que la variable liée à l'expérience des jeux vidéo ;
- Enfin, nous nous interrogerons plus globalement sur le rôle de la composante motrice dans l'optimisation du transfert virtuel/réel en comparant les données obtenues à l'aide d'interfaces impliquant un fort engagement physique (tapis roulant avec rotation) à celles obtenues à l'aide d'une interface cerveau-ordinateur, sollicitant l'intention de se déplacer sans pour autant effectuer de déplacement physique lors de la navigation.

Notre thèse s'organise en deux parties distinctes. Nous proposons **dans une première partie théorique** de présenter les différents débats dans lesquels s'inscrit notre thèse.

Dans **le premier chapitre** sur la cognition spatiale, nous présentons les deux composantes nécessaires à la navigation dans un espace. Nous définissons la composante cognitive et les différents modèles d'acquisition des connaissances spatiales qu'elle sous tend. Nous introduisons ensuite la composante motrice du déplacement et les différents travaux portant sur le rôle des informations sensorielles du corps dans l'acquisition et la compréhension d'informations spatiales. Nous exposons enfin les facteurs liés aux caractéristiques individuelles et susceptibles de jouer un rôle majeur dans l'acquisition de connaissances spatiales.

Le second chapitre porte sur les concepts de base de la RV, et plus particulièrement sur les notions d'immersion, de présence, d'interactions sensorimotrices, cognitives et fonctionnelles. Nous présentons ensuite différentes modalités d'interaction avec les environnements 3D, ainsi que les interfaces permettant ces interactions.

Le troisième chapitre présente différents travaux portant sur l'influence de caractéristiques individuelles (âge, sexe, habiletés spatiales, expérience en jeu vidéo) et de facteurs externes (caractéristiques de l'EV et interfaces) dans l'acquisition de connaissances spatiales en EV. Nous présentons notamment des interfaces de restitution visuelles et des interfaces de déplacement basées sur la marche. Nous décrivons enfin le fonctionnement des

Interfaces Cerveau Ordinateur et les études montrant l'importance de ce type d'interfaces pour les personnes atteintes de graves troubles moteurs et/ou communicationnels.

Nous abordons la démarche expérimentale dans la **deuxième partie (partie empirique)** de notre thèse.

Le quatrième chapitre présente le modèle d'analyse, et la méthodologie commune à l'ensemble de nos expérimentations. Dans tous les cas, les sujets apprennent un parcours en virtuel (réplica d'un quartier réel de Bordeaux) et doivent le restituer en situation réelle. Les performances sont également évaluées à l'aide de différents tests permettant d'appréhender les composantes égocentriques ou allocentriques des compétences spatiales.

Le cinquième chapitre présente une étude portant sur l'impact de l'engagement physique (faible ou fort) et de la rotation de la tête (possibilité ou non d'effectuer une rotation de la tête lors des intersections) sur le transfert virtuel/réel des apprentissages spatiaux. L'engagement physique est manipulé en proposant soit un joystick (faible engagement) soit un tapis roulant (fort engagement) lors de l'apprentissage.

Le sixième chapitre porte sur l'impact de caractéristiques individuelles et notamment de l'expertise en jeu vidéo, sur les compétences spatiales au sens large (évaluées à l'aide de tests psychométriques classiques), mais également sur les compétences de navigation dans un EV, et enfin sur le transfert virtuel/réel des apprentissages spatiaux.

Le septième chapitre présente, dans un premier temps, un protocole d'apprentissage basé sur système Interface Cerveau Ordinateur. Dans un second temps, nous comparons l'acquisition de connaissances spatiales effectuée à l'aide de cette interface (dans un EV), à un apprentissage spatial réalisé à l'aide d'un tapis roulant, ou encore à un apprentissage réalisé en situation réelle. L'objectif est de discuter de l'impact de la composante motrice sur l'acquisition de compétences spatiales en comparant des situations impliquant (situations réelle et tapis roulant) ou n'impliquant pas (ICO) d'activité motrice effective lors de l'apprentissage.

Le huitième chapitre est consacré à la discussion générale de nos résultats en référence aux différents points abordés dans notre partie théorique. Nous concluons et présentons les différentes perspectives de recherche portant notamment sur le développement d'interfaces¹ et sur l'application de nos travaux de thèse à des personnes âgées ou à différentes populations de patients cérébraux lésés.

¹ Nous présentons en annexe 1 une partie plus technique qui aborde mon activité d'Ingénierie de Recherche, les techniques et les différents développements informatiques d'environnements 3D réalisés (environnement virtuel d'apprentissage, quartier virtuel de Bordeaux, appartement virtuel), l'intégration de nouvelles interfaces (clavier/souris, joystick, tapis roulant, motion capture, interface cerveau ordinateur), le développement de logiciels d'analyse d'activité que j'ai effectués au sein du laboratoire EA 4136. Les communications écrites, orales ou affichées qui découlent de ces différents développements sont également présentés.

1^{ère} Partie : Partie Théorique

Chapitre I : La Cognition Spatiale

Nos déplacements dans un environnement sont largement dépendants de nos capacités à s'orienter et à naviguer, et sont au cœur de l'étude de la cognition spatiale. La cognition spatiale est un domaine d'étude majeur des sciences de la cognition pour son caractère central dans le développement de l'individu mais aussi pour les incapacités fonctionnelles qu'elle suscite en cas d'altération.

Aller d'un point à un autre, réaliser des rotations mentales, trouver des raccourcis, etc. sont autant d'actions de la vie quotidienne qui nécessitent que l'environnement perçu soit compréhensible et stable ; que celui-ci soit familier ou non. L'activité de navigation spatiale est une des activités de vie quotidienne les plus sollicitées mais aussi l'une des activités les plus complexes mis en œuvre par un individu. En effet, une telle activité requière une orchestration entre des processus cognitifs mais aussi avec les processus sensori-moteurs nécessaires à l'acquisition des connaissances spatiales des environnements qui nous entourent pour assurer nos déplacements. Différents organes sensoriels et différentes formes de mémoire collaborent afin d'encoder, supprimer, traiter, stocker et récupérer les informations spatiales.

Si chez les personnes tout venantes, cette orchestration s'exécute assez efficacement pour un comportement adapté, elle est plus problématique pour les personnes atteintes de troubles de l'orientation spatiale, comme par exemple, les patients Alzheimer ou d'autres cas de neuropathologies (Traumatisme Crânien, Accident Vasculaire Cérébral, etc.).

I. La cognition spatiale et ses représentations mentales

Le déplacement confère une autonomie à la personne par son rôle crucial dans les activités de vie quotidienne; que l'on aille au supermarché, au travail, ou faire ses courses, etc. Quel que soit le moyen de locomotions (vélo, voiture, tram, bus, etc.), nos capacités à se localiser, s'orienter et à naviguer sont impliquées pour adapter nos comportements et atteindre nos buts navigationnels dans des environnements de plus en plus complexes car en perpétuel changement. Mais comment l'individu acquiert les informations spatiales? Comment ces informations sont mises à jour? Quels sont les processus cognitifs et sensori-moteurs impliqués dans la navigation de petits ou grands espaces?

Dans ce premier chapitre, nous présenterons une synthèse des théories et concepts relatifs à la cognition spatiale, et ce, à partir de l'abondante littérature qui a été publiée depuis plus d'un siècle. Précisément, nous clarifions cette littérature en présentant les multiples définitions de la cognition spatiale ou habilité spatiale, suivies, des travaux portant sur les notions de représentations spatiales. Enfin, nous présenterons les études s'adressant aux activités de navigation avec un focus particulier porté à l'articulation entre la composante cognitive et la composante sensori-motrice.

I.1 L'étude de la cognition spatiale : Concepts et définitions

La cognition spatiale se réfère à l'ensemble des processus permettant d'acquérir des connaissances spatiales de différentes sources, utilisés dans la vie quotidienne, et qui permettent, par exemple estimer les directions ou les distances. Elle est étudiée depuis de nombreuses années, mais la complexité des processus impliqués a donné lieu à de nombreuses définitions.

Sous le terme de cognition spatiale se cache différents concepts, tels que la mémoire spatiale, l'orientation spatiale, les capacités spatiales, etc. dont les définitions diffèrent selon les auteurs. Aujourd'hui encore, de part sa complexité, il est difficile de donner une définition claire de la mémoire spatiale et des capacités (ou habiletés) spatiales.

Peu d'auteurs définissent le concept d'habiletés spatiales car il renvoie à de nombreux processus cognitifs encore peu explorés. Pour Linn et Petersen (1985), la capacité spatiale se réfère généralement à des compétences dans la représentation, la transformation, la production, et le rappel de l'information symbolique non-linguistique. Pour Colom, Contreras, Shih et Santacreu (2003), les tests de capacités spatiales mesurent comment les individus apprennent le matériel spatial qui leur est présenté, dans une, deux ou trois dimensions, ou

comment les individus s'orientent eux même dans l'espace. Les capacités spatiales font donc référence à un ensemble de processus cognitifs très vastes, et certains auteurs se sont attelés à définir différentes catégories de la mémoire spatiale pour les évaluer. Par exemple, Linn et Petersen (1985) propose une distinction des capacités spatiales en 3 composantes (la plus communément utilisée dans la communauté scientifique) : *la perception spatiale* correspond à la capacité à déterminer des relations spatiales en respectant l'orientation de son propre corps quelles que soient les informations distractives ; *la visualisation spatiale* est la capacité à manipuler des informations complexes spatiales à différents niveaux, elle est associée à des manipulations spatiales complexes et requière une analyse de la tâche, une adaptation flexible afin d'arriver à la résolution du problème et enfin *la rotation mentale* est la capacité à faire tourner une figure en 2D ou 3D en l'imaginant. Certains auteurs placeraient la rotation mentale comme une sous-catégorie de la visualisation spatiale (Guilford et Zimmerman, 1948 ; McGee, 1979).

Dans les modèles précurseurs, Guilford et Zimmerman (1948) avaient présenté une classification comprenant 3 composantes : *Les capacités de relations spatiales* évaluent la capacité à transformer rapidement et mentalement des objets par rapport à son propre corps ; *la visualisation spatiale* représente la capacité à trouver des solutions à des problèmes visuels complexes, les transformations mentales effectuées sont donc dynamiques et adaptées à la tâche à effectuer ; *la vitesse de perception* concerne l'habileté à encoder rapidement des informations visuelles.

McGee (1979) distingue, quant à lui, deux facteurs : la visualisation spatiale incluant la capacité à imaginer les objets, à les manipuler en deux et trois dimensions et *l'orientation spatiale* qui permet de déterminer les relations entre différents stimuli et leurs patterns spatiaux, de les comprendre et de les analyser sous différentes perspectives.

Aux vues de ces différentes définitions, il est clair que le domaine de la cognition spatiale n'est pas encore figé. Pourtant, de nombreux tests neuropsychologiques ont été développés durant les dernières décennies pour mesurer les différents sous types de compétences spatiales.

I.2 Les représentations mentales

Dans cette partie, nous nous intéressons dans un premier temps à l'imagerie mentale et ses propriétés, étape nécessaire à l'élaboration de représentations spatiales. Puis, une seconde partie se concentra sur le développement de cartes cognitives, versions plus élaborées de l'imagerie mentale.

I.2.1 L'imagerie mentale

L'imagerie mentale est un concept qui pourrait se définir comme la construction de représentations mentales. Ce concept peut solliciter l'ensemble des sens humains mais se réfère le plus souvent au sens visuel et imagé. En 1990, Kosslyn demande à des étudiants d'évaluer les types de représentations mentales de leur vie quotidienne ; il en ressort que deux tiers des représentations sont imagés ou visuels, les autres sens étant beaucoup moins cités. Un des soucis majeurs des images mentales concerne leurs évaluations car elles sont évidemment non observables et peuvent être éphémères. Dans cette partie, nous présenterons quelques recherches concernant la nature et les propriétés des images mentales.

I.2.2 Les différents types de codage

Deux types de codage des images mentales sont proposés : *le codage analogique* (ou représentation imagée) concerne une représentation mentale très ressemblante à l'objet physique et ce codage serait lié à sa perception (Finks, 1989; Kosslyn, 1990) ; il y aurait donc une analogie entre l'objet physique perçu et son image mentale. *Le codage propositionnel* (appelé également représentation descriptive) propose une représentation abstraite de l'objet proche du langage et des mots; le stockage de la représentation n'est ni visuel, ni spatial et présente peu de similitudes avec la représentation initiale. Ce deuxième codage est donc lié au langage plutôt qu'à la perception visuelle et physique de l'objet (Pylyshyn, 1989). Le code propositionnel permettrait alors de générer des représentations mentales, qui ne seraient qu'un épi phénomène lié à la restitution d'informations verbales stockées en mémoire. La question actuelle concerne donc la manière dont les informations relatives à un objet sont enregistrées en mémoire. Est-ce que le contenu d'un objet physique est stocké dans des formats ressemblants au stimulus d'origine (codage analogique) ou alors la perception mentale de l'objet n'est qu'un phénomène du à l'encodage et la restitution d'informations de type verbal de l'objet (codage propositionnel) ? Actuellement la plupart des chercheurs optent pour un codage analogique ou un double codage analogique et propositionnel (Paivio, 1978). Le double codage consisterait à avoir en mémoire une représentation physique et une représentation basée sur un codage verbal; ainsi ces deux codages permettraient une meilleure qualité de stockage et de restitution de la représentation spatiale.

I.2.2.1 La rotation mentale

Shepard et Metzler (1971) sont les pionniers en matière d'imagerie mentale et notamment de rotation mentale, définie comme la capacité à faire tourner un objet sur lui-même mentalement. Ces auteurs ont évalué les propriétés des images mentales et les capacités de rotation mentale en demandant à des sujets d'effectuer mentalement des rotations planes et des rotations en trois dimensions. Ils ont ainsi montré que plus l'angle de rotation imposé est important et plus le temps pour effectuer cette rotation mentale est élevé, notamment pour des rotations en 3 dimensions. Par exemple il sera plus long d'effectuer mentalement une rotation de 200° plutôt qu'une rotation de 40°. Ainsi, ces résultats illustrent le codage analogique en montrant une similarité entre les opérations effectuées mentalement sur les objets et les opérations effectuées physiquement.

I.2.2.2 Forme et taille des images mentales

Une première expérimentation (Moyer, 1973) démontre qu'il est plus difficile d'évaluer mentalement deux objets de taille distincte plutôt que deux objets de taille différente. Moyer suppose alors qu'une psycho physique interne de la représentation mentale permettrait de respecter les lois physiques du monde réel. En 1978, Kosslyn étudie la relation entre le temps de balayage et la taille d'une représentation mentale. Pour cela, une carte représentant une île, composée de 7 lieux différents a été présentée au sujet. Celui-ci avait pour consigne d'apprendre mentalement la carte. L'expérimentateur indiquait ensuite au sujet un trajet composé d'un lieu de départ et d'arrivée. Le sujet devait alors imaginer mentalement le déplacement entre ces deux points et appuyer sur un bouton pour indiquer son arrivée à destination. Le temps de réponse mis pour effectuer le parcours mental était noté. Cet auteur montre alors que la durée d'un balayage visuel d'une carte mentale dépend de la longueur réelle entre deux points à parcourir ; c'est-à-dire que plus la distance à accomplir est courte et plus le parcours mental est rapide. Comme pour la rotation mentale, le codage de la représentation mentale semble prendre en compte les propriétés physiques du monde réel suggérant ainsi un codage analogique. Ces résultats concordent avec ceux de Thorndyke qui, en 1981, a demandé à des sujets d'estimer mentalement les distances entre des villes. Cet auteur observe que les distances entre deux points sont moins bien évaluées lorsque le nombre de villes intercalées entre ces deux points est important. Il semble également que l'estimation mentale des distances soit favorisée par la forme de la distance à évaluer. Par exemple, McNamara, Ratcliff et McKoon (1984) montre que l'on évalue mieux une distance entre deux villes si le trajet est rectiligne comparé à un trajet indirect. Dans le même ordre d'idée, Moar

et Bower (1983) montrent que les individus simplifient les formes de la configuration d'une représentation mentale. Les sujets avaient tendance à se représenter mentalement des angles droits plutôt que les angles réels. Ainsi, même si certains résultats décrivent une simplification de la représentation mentale, ces études affichent tout de même certaines similitudes entre le codage des images mentales et les propriétés physiques d'un environnement réel.

I.2.2.3 Mesures des habiletés spatiales

De nombreux tests psychotechniques, souvent de type papiers crayons mesurent les habiletés spatiales. Cependant, ces tests sont souvent très éloignés de la vie quotidienne et leur caractère « écologique » est souvent remis en question. Nous allons présenter ici quelques tests couramment utilisés dans les recherches sur la cognition spatiale.

I.2.2.3.1 Test de rotation mentale de Vandenberg et Kuse (1978)

Ce test est une mesure de la capacité à faire tourner une figure en 2D ou 3D en l'imaginant (cf. Figure 1.1). Il permet plus particulièrement d'évaluer les capacités mentales du sujet à se représenter un objet et à en modifier correctement son orientation. Il consiste à présenter au sujet une figure géométrique cible, et quatre figures pouvant correspondre ou non à la figure cible (lorsqu'une des figures correspond à la figure cible, l'angle de rotation peut être différent). Le sujet doit alors identifier la présence d'une figure cible parmi les 4 figures.

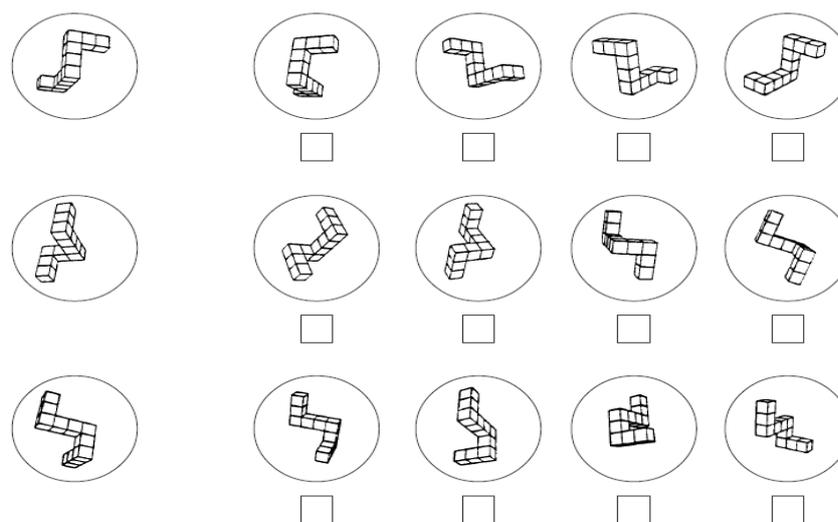


Figure 1.1: Test de rotation mentale de Vandenberg et Kuse(1978).

I.2.2.3.2 Les Cubes de Corsi (1972)

Le test des cubes de Corsi (1972) ou « Block Tapping test » (cf. Figure 1.2) permet de mesurer l'empan visuo-spatial et le registre visuo spatial du sujet. Dans une première partie, le sujet doit reproduire des séquences croissantes de position spatiale que l'examineur lui a préalablement montrées. Dans une deuxième partie, l'examineur montre toujours des séquences de position que le sujet doit reproduire en ordre inverse (empan visuo spatial indirect). Ce test mesure généralement l'empan de la mémoire visuo-spatiale à court terme (reproduction dans l'ordre) et de la mémoire de travail visuo-spatiale selon le modèle de Baddeley (1986 ; 1990) (reproduction dans l'ordre inverse).

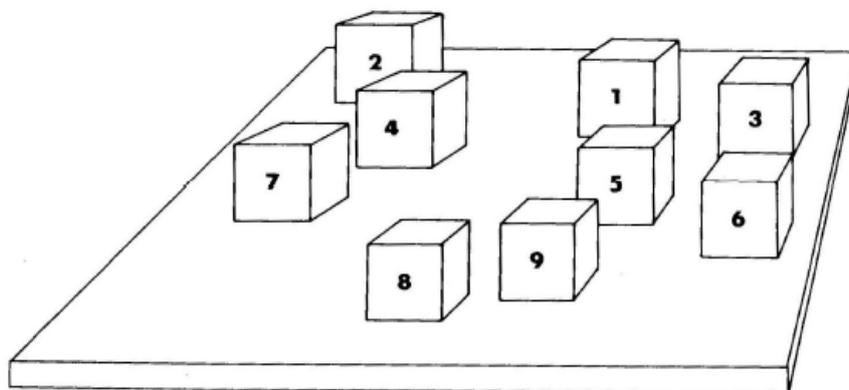


Figure 1.2: Test des cubes de Corsi(1972).

I.2.2.3.3 Le test GZ5 De Guilford et Zimmerman(1948)

Ce test mesure les compétences en orientation spatiale (cf. Figure 1.3). Il consiste à évaluer des situations de navigation liées aux mouvements d'un bateau. La première image indique la position de départ du bateau et la dernière celle de la position d'arrivée. Chaque image intermédiaire correspond à un déplacement entre la position de départ et la position d'arrivée. Le sujet doit alors évaluer le déplacement du bateau en indiquant s'il tourne à droite ou à gauche, s'il monte ou descend ou s'incline, etc. De plus, à l'exception du GZ5, la recherche actuelle en cognition spatiale montre très peu de corrélations entre les résultats à ces tests et les habiletés et compétences spatiales mises en jeu dans une activité d'acquisition de chemin et de navigation dans un environnement réel (Ashraf, 2005).

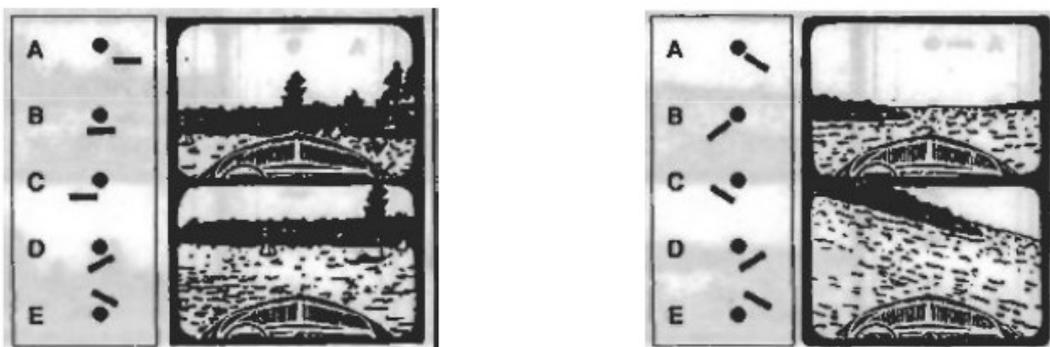


Figure 1.3: Test de Guilford et Zimmerman(1948).

Nous avons présenté ici quelques tests que nous utilisons plus particulièrement dans nos expériences. Ces tests sont, pour la plupart, très peu « écologiques » et relativement éloignés des activités de la vie quotidienne, notamment en termes de processus cognitifs et moteurs mis en jeu dans l'acquisition de connaissances spatiales.

I.2.3 La carte cognitive

Ce concept a été introduit par Tolman en 1948. Pour cet auteur, la carte cognitive (ou carte mentale) présente des similitudes avec les images mentales et serait, en fait, une version plus élaborée. La carte cognitive serait perçue comme un dispositif métaphorique et mnémonique, une forme du monde, simplifiée et encodée sous l'aspect d'attitudes et de perspectives locales (Kitchin, 1994). Les informations liées à la carte mentale peuvent être des points de repères ou des relations entre les points de repère, acquises par la visualisation d'une carte ou par l'exploration directe d'un environnement. La rotation mentale est une capacité importante dans l'élaboration de cartes cognitives ; elle permet d'extraire des propriétés spatiales mais surtout de faire pivoter la représentation mentale afin d'adopter des points de vue différents et manipuler ainsi les informations provenant de la carte cognitive. La plupart des auteurs ne font pas la différence entre le codage analogique ou codage propositionnel et proposent un double codage (McNamara, Hardy et Hirtle, 1989). Amorim (2004) propose que les aires visuelles traitent les images mentales visuelles alors que les aires associatives auraient un rôle sur les connaissances procédurales stockées en mémoire. Bien que les cartes cognitives soient considérées comme plus détaillées que les images mentales, celle-ci possèdent les mêmes distorsions, notamment concernant l'évaluation des tâches de jugement et de perception des distances, que nous avons présentées dans le paragraphe précédent.

Notons que, dans la suite de notre propos, notre travail se situant en aval des concepts de carte cognitive, de représentation mentale, de carte mentale, nous les utiliserons l'un

comme l'autre pour désigner le concept de carte cognitive dans le cadre de l'étude de l'activité de navigation.

I.2.3.1 Les mesures des cartes cognitives

Il existe différentes méthodes pour évaluer les représentations ou « cartes cognitives » que les sujets élaborent pour effectuer une tâche. En voici une liste non exhaustive (Ashraf, 2005) :

- Les descriptions verbales. Le sujet fournit des informations en temps réel au chercheur sur la description de l'environnement. Cependant, la présence du chercheur et les questions posées peuvent rapidement influencer les réponses du sujet. De plus, les sujets n'ont pas le même lexique pour définir un environnement donné ; la notation n'en est que plus difficile (Passini, 1984; Golledge, 1999).
- La reconstruction. Le sujet doit re-modéliser l'environnement à l'aide de blocs. Ce type de méthode est adapté pour des environnements simples, mais devient très délicate pour les environnements complexes (Johns, 2002).
- Les tâches de croquis. C'est la technique la plus utilisée, mais elle n'en demeure pas moins débattue. En effet, bien qu'elle mesure la capacité à se rappeler de points de repères, d'espaces, de configurations d'un environnement, elle pose le problème de l'influence des aptitudes au dessin sur la qualité de reproduction du parcours (Golledge, 1999 ; Thorndyke, 1980).

Quoi qu'il en soit, les distances, les esquisses de dessin, l'estimation de direction ou de points de départs sont les méthodes les plus généralement employées.

II. La navigation

La navigation correspond à toutes les activités motrices et cognitives dans un espace, qu'il soit borné ou non. D'après Montello (2005), 2 composantes inter-reliées interviennent dans une tâche de navigation : la composante cognitive et la composante sensori-motrice.

La composante cognitive correspond aux processus cognitifs qui permettent de planifier un itinéraire, prendre une direction, stocker et restituer des informations spatiales, et créer une représentation mentale de l'environnement.

La composante sensori-motrice, simplifiée par le terme composante motrice, concerne les déplacements et les informations kinesthésiques, vestibulaires, visuelles fournies par les entrées sensorielles de l'individu et qui informent de la position et la direction de son propre corps dans l'environnement.

Ces deux composantes (cognitive et motrice) seraient inter-reliées et travailleraient en parallèle. Nous allons présenter ces deux composantes plus en détails dans la partie suivante. Puis dans une dernière partie, nous nous intéresserons aux facteurs intrinsèques à l'individu qui sont susceptibles de générer des variations sur la capacité d'acquisition de connaissances spatiales.

II.1 Mécanismes cognitifs de la navigation : le wayfinding

Le wayfinding a été introduit par Lynch en 1960 et renvoie à la capacité à s'orienter et à naviguer dans un grand environnement, d'un point de départ à un point d'arrivée (Montello, 2005). Pour Lynch, le wayfinding repose sur l'utilisation cohérente d'informations sensorielles issues de l'environnement. Le wayfinding est donc guidé par un but et nécessite une planification et une prise de décision (Allen, 1999) des choix directionnels, et entraînent une réévaluation perpétuelle de la représentation mentale mémorisée (Conroy, 2001). Le wayfinding se caractérise donc par un ensemble de processus cognitifs qui permet l'encodage, l'analyse, l'extraction d'informations spatiales provenant de différentes sources. En règle générale, le wayfinding est évalué par une tâche qui consiste à reproduire un parcours préalablement appris. Cette tâche permet de mesurer globalement l'activité de navigation mais les processus cognitifs impliqués sont alors difficiles à différencier et à évaluer (Ashraf, 2005). En 1977, Downs et Stea distinguent 4 composantes dans le wayfinding: (i) l'orientation qui consiste mettre à jour en permanence la position et l'orientation de son corps dans un environnement par rapport à la destination à atteindre ; (ii) le choix initial de l'itinéraire : planifier les directions de l'itinéraire à prendre par rapport au point de départ et au point d'arrivée ; (iii) La surveillance constante de l'itinéraire : évaluer sa position, par rapport à l'itinéraire planifié et le point d'arrivée ; (iv) Et enfin, atteindre sa destination. Pour ces auteurs, les processus cognitifs impliqués dans la tâche de wayfinding sont continus et répétés et feraient intervenir nécessairement les fonctions exécutives².

² Elles sont définies comme les processus qui contrôlent et régulent les activités cognitives, et notamment l'exécution de comportements finalisés dans les situations complexes et nouvelles (Norman et Shallice, 1986). Les fonctions exécutives concernent par exemple, la planification des tâches, la flexibilité cognitive (capacité à changer de stratégie cognitive) et la résolution de problème (Lezak, Howieson, et Loring, 2004).

II.1.1 Les représentations spatiales

Le wayfinding implique inévitablement des mécanismes cognitifs basés sur l'imagerie mentale et le concept de carte cognitive précédemment définis. Dans ce paragraphe, nous allons aborder les différents types de référentiels spatiaux qui permettent de traiter et d'analyser les informations spatiales de différentes manières. Nous présenterons ensuite deux modèles de base de l'acquisition des connaissances spatiales, qui distinguent la façon dont l'information spatiale est acquise et traitée.

II.1.1.1 Les référentiels spatiaux ou cadres de référence

Les référentiels spatiaux, ou cadres de références définissent le point de vue de la représentation spatiale mémorisée. Deux cadres de référence se distinguent : le cadre égocentrique et le cadre allocentrique. Le cadre de référence égocentrique est centré sur le point de vue l'observateur et intègre les relations spatiales des objets ou points de repères toujours en référence au corps. Ce point de vue donne des informations spatiales compréhensibles et directement utilisables, et permet d'acquérir des informations sur la distance, les angles des rues mais toujours en relation avec son corps. Ce référentiel spatial est constamment mis à jour lors d'un déplacement ou d'une rotation du corps, et est étroitement lié aux actions effectuées à certains points de repère (exemple : Aller à droite après ce panneau). Le point de vue égocentrique est donc lié aux mouvements effectués dans l'environnement et ce type de représentation est dépendant des connaissances des actions associées aux points de repères du trajet. Le point de vue allocentrique correspond à une vue indépendante et externe du sujet, une vue de « survol » que l'on peut assimiler à une carte géographique. A partir d'informations spatiales reconstituées à l'aide de différents points de vue décentrés du corps, une représentation abstraite de l'environnement est créée et autorise la visualisation des relations spatiales des objets qui le compose. Il permet ainsi l'évaluation des distances entre deux objets distincts à partir d'objets externes servant de référence (Berthoz, 1999). Ce cadre de référence est donc lié à la représentation configurationnelle d'un environnement et permet la construction d'une carte cognitive.

II.1.1.2 Les modèles d'acquisition des connaissances spatiales

Après avoir étudié les cadres de références qui basent l'organisation de l'information spatiale acquise selon des références propres ou externes au corps, nous allons présenter les modèles qui permettent de comprendre et d'expliquer la manière d'acquérir, d'organiser et de traiter les informations spatiales.

II.1.1.2.1 Le Modèle L-R-S de Siegel and White

Siegel et White (1975) propose le modèle L-R-S qui se compose de 3 niveaux sériels et hiérarchisés (cf. Figure 1.4). Le niveau *Landmarks* concerne l'acquisition des points de repères. Le deuxième niveau, le niveau *Route* concerne l'acquisition des relations spatiales et de la configuration de ces points de repères. Enfin, le niveau *Survey* concerne l'intégration des informations de type Landmark et Route dans une représentation plus globale, permettant grâce aux inférences et à la répétition des informations spatiales, de créer une carte cognitive de l'environnement. Ce dernier niveau serait impliqué dans la recherche de nouveaux chemins ou de raccourcis. Pour ces auteurs, le niveau Landmark et Route se réfèrent au point de vue égocentré alors que la stratégie de type Survey nécessiterait une compréhension globale de l'environnement et se référerait plus à une représentation de nature allocentrée. Ces niveaux de connaissances seraient sériels, chaque étape se succédant les unes après les autres. Ce modèle sera repris par Thorndyke et Hayes-Roth en 1982 et Wickens en 1992. Il fait encore aujourd'hui référence dans le domaine de la cognition spatiale.

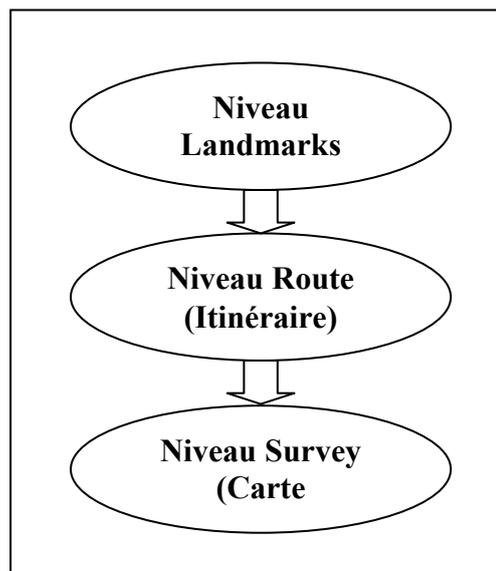


Figure 1.4: Modèle sériel d'acquisition des connaissances L-R-S de Siegel et White (1975).

Nous allons maintenant détailler ces 3 niveaux d'acquisition et de traitement des connaissances spatiales.

1. Niveau 1 : Connaissances des points de repères (*Landmarks Level*)

Ce premier niveau consiste à balayer la scène et à déterminer des éléments primaires qui serviront de points de repères. Ces points d'ancrage seront ensuite reconnus et utilisés dans la prise de décision spatiale mais peuvent être différents selon les individus. En 1960, Lynch précise que la particularité (*distinctiveness*) et la signification personnelle (*personal meaning*) de certains éléments caractérisant un environnement leur permettent de devenir des points de repères. Cet auteur a d'ailleurs subdivisé une ville en cinq éléments distincts (cf. Figure 1.5) :

- Les voies ou chemins : Ce sont des rues, des chemins de fers, etc. qui ont une clarté directionnelle. Ce sont des zones dans lesquelles le sujet peut se déplacer à pied, en voiture, à vélo, etc. Leurs propriétés physiques (taille, façades, etc.) sont des facteurs qui permettent une meilleure mémorisation.
- Les limites ou bords : Ce sont des éléments qui ne sont pas utilisés comme points de repères mais qui délimitent une zone. Les limites ont souvent une forme continue et visible.
- Les points de repères : ce sont des objets physiques fixes comme des immeubles, des panneaux de signalisation, des enseignes de magasins, etc. qui permettent généralement de s'orienter. Un point de repère est donc un objet qui se distingue des autres objets de l'environnement.
- Les nœuds : Ce sont des lieux stratégiques qui permettent la jonction entre différentes routes ; tels que, par exemple, des intersections. Les décisions de direction sont généralement prises au niveau des nœuds.
- Les quartiers : Ils sont constitués des éléments précédents et représentent une partie de la ville. Ils sont généralement de grande taille et sont reconnaissables par leur architecture, leur organisation, que l'on se situe à l'intérieur ou à l'extérieur.

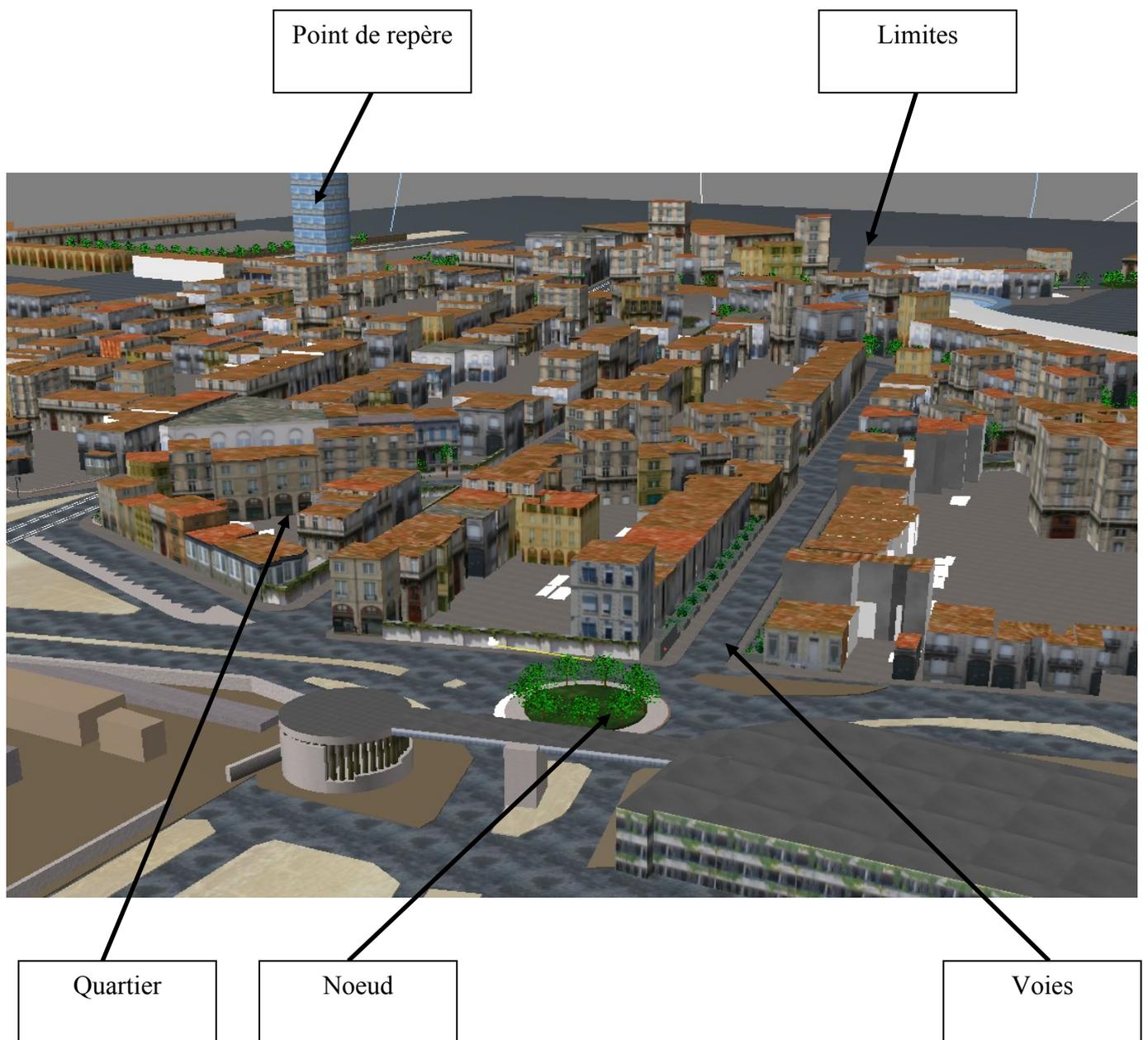


Figure 1.5: Modèle de Lynch (1960), illustré sur notre environnement virtuel.

D'après Stankiewicz et Kalia (2007) un point de repère doit être *persistant*, c'est-à-dire présent et toujours à la même place. Il doit ensuite être *saillant* pour être reconnu depuis n'importe quel point de vue. Il doit enfin être *informatif* puisqu'il doit indiquer la position de l'individu et les actions à réaliser par rapport à lui. Il existe différents types de points de repères : locaux (visibles uniquement depuis le point de vue donné) ou globaux (visibles de loin dans l'environnement). Ruddle et *al.* (2011) montrent que les repères locaux amélioreraient les performances dans une tâche de recherche de cibles comparés à des repères globaux. D'ailleurs, l'acquisition des points de repères peut s'effectuer par exploration de l'environnement, mais également par l'étude de vidéos, de photos, etc. (Golledge, 1999). Ce premier niveau permet donc d'identifier, de sélectionner et d'acquérir différents points de

repères mais ne donne pas d'informations sur la configuration du parcours ; la navigation n'est donc pas encore possible. Le point de repère est donc le constituant de base du modèle L-R-S pour obtenir une carte mentale.

2. Niveau 2 : Mesures de la connaissance du parcours (*Route Level*)

Le premier niveau permet d'acquérir les points de repère mais ne permet pas de naviguer entre eux. Le second niveau, quant à lui, permet de naviguer d'un point de départ à un point d'arrivée à l'aide de connaissances procédurales. Il permet effectivement d'associer des points de repères acquis au premier niveau (*Landmarks Level*) à des séquences d'action, et plus particulièrement, des directions. Il ferait intervenir des informations de type égocentrique (Satalich, 1995) et favoriseraient le développement de connaissances plus évoluées, notamment concernant les distances et relations spatiales entre les différents points de repères de l'environnement, le nombre et la direction des virages (Scribante, 2000). Par contre, ces connaissances métriques et angulaires sont approximatives (Allen, 1999). La vue du point de repère enclencherait l'action à effectuer ; si l'objet est perçu d'un point de vue différent, le sujet doit effectuer une rotation mentale (Mallot et Gillner, 2000) pour retrouver son point de vue initial et évaluer la direction à prendre. Ce niveau demande une acquisition optimale des points de repère (*Landmarks Level*) pour construire une représentation mentale de type Route. Les évaluations les plus connues du niveau Route sont l'estimation des distances ou des angles, le nombre de virages, la description verbale ou le dessin de l'itinéraire, etc. Cependant, certains auteurs précisent que les évaluations de type dessin ou description verbale sont étroitement liées aux capacités des sujets à dessiner ou à s'exprimer (Passini, 1984; Golledge, 1999).

3. Niveau 3 : La connaissance de la configuration (*Survey Level*)

Ce niveau permet de créer une représentation mentale de type allocentrée de l'environnement, et plus particulièrement une carte cognitive. Il se caractérise par une vue d'avion contenant les différentes informations spatiales et les informations configurationnelles de l'environnement (les points de repère du parcours, les relations entre ces points de repères, les distances, les angles, etc.). Satalich, en 1995, décompose les connaissances de type configuration en deux composantes: les connaissances primaires (égocentriques) acquises par une exploration directe de l'environnement, et les connaissances secondaires acquises par la consultation d'une carte, ou d'une représentation allocentrique. Les connaissances primaires permettent de construire une représentation égocentrique ou allocentrique de l'environnement, alors que les connaissances secondaires ne donnent accès qu'au niveau allocentrique.

Différents auteurs indiquent par contre que le point de vue égocentré du premier niveau n'est pas suffisant pour permettre l'élaboration d'une carte cognitive (O'Keefe et Nadel, 1978 ; Tolman, 1948 Voir Partie II.1.3 de ce chapitre), composante nécessaire pour retrouver un point de repère non visible. A ce niveau, le sujet dépasse son champ de vision et construit une représentation mentale (ou carte cognitive) de l'environnement quel que soit son point de vue. Ce niveau permet alors d'estimer une distance à vol d'oiseau ou de juger des positions relatives entre deux points de repères distincts.

D'après Pick et Lockman(1981), les niveaux 1 et 2 du modèles L-R-S feraient appel à des référentiels égocentriques alors que le dernier niveau (Survey) serait basé sur une représentation allocentrique. Ce modèle constitue une référence dans le domaine de la cognition spatiale et sous-entend que les informations spatiales sont encodées de façon sérielle.

Le modèle L-R-S a été confirmé par différentes études (e.g. Foley et Cohen, 1984) mais certains auteurs relativisent la notion d'un apprentissage sériel par niveau. Pour McNamara, Rump et Werner (2003), le second niveau (Route) serait suffisant pour réaliser un parcours appris auparavant et le niveau Survey ne serait utilisé que dans le cas de recherche de raccourcis ou de nouveaux chemins. De plus, ce dernier niveau pourrait être acquis sans pour autant passer par le niveau Route (comme l'a montré Satalich en 1995 à l'aide des informations secondaires) : le niveau optimal à atteindre serait fonction des tâches d'apprentissage et de rappel. Enfin, un individu pourrait faire appel à différents niveaux de connaissances pour réaliser une même tâche (Gillner et Mallot, 1998 ; Montello, 1998).

II.1.1.2.2 La théorie des graphes

Pour Gillner et Mallot (1998), la mémoire spatiale serait administrée par *un système cognitif* et *un système perception action* qui gèrerait des représentations spatiales enactées. Le système cognitif permettrait l'élaboration de représentations mentales (assimilable au modèle L-R-S) et le système perception action permettrait d'associer des vues ou des lieux à des réponses motrices. Une représentation basée sur les vues correspondrait au point de vue de l'observateur (égocentrique) alors que la représentation basée sur les lieux correspondrait à une représentation englobant une connaissance spatiale générale de l'espace visualisé (allocentrique), quelque soit la position et la direction du corps. Ce modèle permettrait d'encoder les points de repères selon deux manières différentes et donc deux cadres de référence différents. Par exemple, un point de repère encodé selon une représentation de type « lieu (allocentrique) » permet d'être reconnu quel que soit le point de vue de l'utilisateur (égocentrique) et permet d'avoir des informations sur les distances et les relations spatiales

entre chaque lieu, ce que ne contient pas une représentation de type vue (cf. Figure 1.6). Cette distinction va à l'encontre du modèle L-R-S qui prône pour une sérialité des informations spatiales, pour rappel d'abord encodées de manière égocentrique sur les deux premiers niveaux (Landmarks et Route) puis après répétition, encodées de manière allocentrique sur le dernier niveau (Survey). La théorie des graphes permettrait par exemple d'encoder des informations allocentriques sans passer par les 2 premières étapes (égocentriques) du modèle L-R-S. De plus, cette théorie permettrait de combiner la représentation d'un parcours (vue ou lieu, allocentrique ou égocentrique) à des réponses motrices associées à des objets précis de l'environnement, et permettrait de créer des graphes basés sur des vues et/ou des lieux (cf. Figure 1.6). Il serait ainsi facilement possible de passer d'une représentation de type vue ou lieu, de combiner les avantages des deux types de graphes.

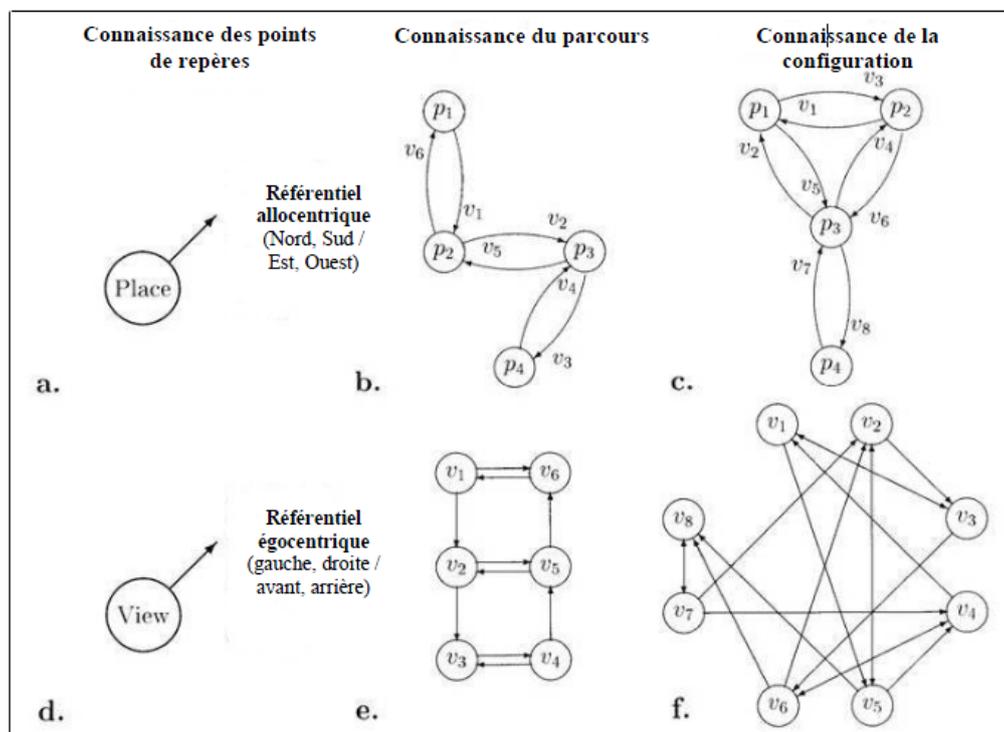


Figure 1.6 : Schéma de la théorie des graphes, selon Gillner et Mallot (1998).

Les points de repères peuvent être acquis à partir d'une vue basée sur les lieux (places) ou sur les vues (view). Chaque type de vue permet d'accéder à des connaissances de type points de repère, route et configuration.

II.2 La composante motrice : l'action et la perception du mouvement

La composante motrice de la cognition spatiale concerne l'ensemble des déplacements physiques d'un individu dans un environnement et les informations visuelles, vestibulaires et proprioceptives associées. Ces trois grands systèmes contribuent à la perception des mouvements de notre corps dans l'espace. Dans cette partie, nous distinguerons les informations données par ces 3 systèmes. Nous nous intéresserons ensuite à l'impact de ces informations sur l'acquisition et la restitution de connaissances spatiales.

II.2.1 Les systèmes sensoriels nécessaires aux informations du corps dans l'espace

II.2.1.1 Le système visuel

La vision est une aide dans les stratégies de navigation puisque qu'elle permet de coordonner des actions avec des repères visuels. Le système visuel permet un traitement rapide et efficace des informations relatives au mouvement. Le flux optique indique les déplacements d'une scène visuelle sur la rétine et peut être décomposé en deux parties : le flux optique dit de *translation* qui informe sur les mouvements/déplacements du corps en translation et le flux optique de *rotation* qui donnent des informations visuelles sur les rotations du corps. De plus, le système visuel joue un rôle dans la stabilisation du système postural, du maintien de l'équilibre mais aurait une influence plus contrastée concernant la navigation spatiale. En effet, des auteurs avancent que l'activité de navigation ne requière pas forcément les informations visuelles (Campos, Byrne et Sun, 2010 ; Chance, Gaunet, Beall et Loomis ; 1998; Klatzky, Loomis, Beall, Chance et Golledge ;1998).

II.2.1.2 Le système vestibulaire

Le système vestibulaire est situé dans l'oreille, plus précisément dans l'oreille interne. Il joue un rôle primordial dans l'équilibre du corps et informe de ses déplacements, et plus particulièrement les accélérations et rotations de la tête (Graf et Klam, 2006). Sa forme est assez complexe, d'où son surnom de *labyrinthe*. Comme pour de nombreuses espèces d'oiseau ou de mammifères, ce système permet de détecter les mouvements du corps dans les 3 dimensions de l'espace, et participe également à la stabilité du regard et de la posture. Il est donc complémentaire au système visuel. Anatomiquement, le système vestibulaire est composé de deux capteurs d'accélération des mouvements de tête : les *otolithes* et les *canaux*

semi-circulaires qui détectent respectivement les translations et les rotations de la tête et du corps. *Les otolithes* dépendent de la gravité terrestre et se distinguent en deux récepteurs : *l'utricule* et le *sacculle*. L'*utricule* se charge de capter les accélérations linéaires (par exemple un déplacement linéaire) et les accélérations verticales sont captées par le *sacculle* (par exemple, un saut). *Les canaux semi-circulaires* se chargent quant à eux de capter les accélérations angulaires. Les canaux semi-circulaires, contrairement aux otolithes, ne sont pas soumis à la gravité terrestre. Ils sont composés de trois canaux de chaque côté de la tête (un canal horizontal, un canal vertical antérieur et un canal postérieur) qui permettent de détecter l'ensemble des rotations angulaires dans l'espace tridimensionnel. En 2001, Mittelstaedt et Mittelstaedt montrent que les informations vestibulaires sont nécessaires à l'intégration d'un trajet, notamment en l'absence d'informations visuelles. Elles sont également nécessaires pour une meilleure perception des distances et des angles. Les informations vestibulaires seraient notamment impliquées dans la formation de connaissances de type configuration (route) (Day et Fitzpatrick, 2005 ; Lambrey, Samson, Dupont, Baulac et Berthoz, 2003).

II.2.1.3 La kinesthésie (ou proprioception).

Introduit par Bastian en 1880, la kinesthésie correspond à la perception du mouvement du corps et de ses membres, de leurs directions et de leurs orientations dans l'espace à l'aide des récepteurs situés dans les muscles, tendons, et les articulations. La kinesthésie informe de manière consciente ou inconsciente sur les copies internes des commandes motrices envoyées par le système nerveux aux muscles et au cerveau, et permet d'anticiper les conséquences d'un mouvement. Elle est souvent assimilée à la proprioception. Les récepteurs vestibulaires peuvent également contribuer à la perception des mouvements complexes (Bioulac, Burbaud, Cazalets et Gross, 2005) car ils donnent des informations inertielles sur les mouvements de la tête mais la plupart des auteurs préfèrent considérer la kinesthésie comme un système unique et différent. En 1975, Craske et Crawshaw montrent que des sujets estimaient mieux le déplacement de leur main dans l'obscurité lorsque le déplacement était effectué par eux même plutôt que par l'expérimentateur. Ces différences d'estimation de position de la main suggèrent que le signal moteur provoqué par le mouvement actif de la main et envoyé par le système nerveux aux muscles et au cerveau, serait propice à une meilleure évaluation des déplacements et positions des membres du corps dans l'espace. En 1997, Berthoz est le premier à parler de mémoire des kinesthèses, comme étant la mémoire du mouvement. Il insiste sur l'importance des informations sensorielles autres que celles basées sur la vision dans la mémoire spatiale et présente la kinesthésie comme le 6^{ème} sens humain.

Quand la vision est supprimée (yeux bandés par exemple), les humains sont tout de même capables de marcher d'un point de départ à un point d'arrivée (Mittelstaedt et Mittelstaedt, 2001). Une des explications est fournie par la théorie de la *path integration* (Mittelstaedt et Mittelstaedt, 1980) selon laquelle la navigation peut être réalisée sans vision uniquement à l'aide des informations kinesthésiques et vestibulaires générées par nos propres mouvements (Mahmood, Adamo, Briceno et Moffat, 2009 ; Loomis, Klatzky et Golledge, 2001), et donc sans connaissances visuelles des points de repères sur l'environnement. La *path integration* concerne donc l'intégration de trajet à l'aide d'informations des mouvements propres, qu'ils soient d'origine interne ou externe. Il s'agirait donc d'une reconstruction sensorielle de la trajectoire parcourue (Berthoz, Israel, Georges-Francois, Grasso et Tsuzuku, 1995). Les humains et les animaux peuvent donc naviguer dans un environnement en sollicitant continuellement les informations de position et de translation du corps (Mittelstaedt et Mittelstaedt, 2001).

II.2.2 La contribution des informations visuelles, vestibulaires et proprioceptives dans la navigation

Comme nous venons de le voir, trois sources sensorielles permettent d'évaluer la position et l'orientation du corps dans l'espace. Cette dernière théorie (*la path integration*) sous-entend que ces informations sont nécessaires à l'acquisition de connaissances spatiales sur un trajet. Dans cette section, nous proposons de détailler l'impact des informations visuelles, vestibulaires et kinesthésiques sur la navigation spatiale. La plupart des tâches permettant de mesurer cette théorie sont appelées « tâche de complétion de triangle ». Cette tâche consiste tout d'abord les yeux bandés (absence de vision) à marcher le long d'un premier segment, de changer de direction et de marcher le long d'un deuxième segment. Une fois arrivé à la fin du deuxième segment, le sujet doit alors s'orienter ou marcher vers le point de départ afin de reformer le parcours effectué ; la forme du parcours ressemble à une forme triangulaire, d'où son nom. Ces tâches montrent en règle générale que les informations visuelles sont moins importantes que les informations vestibulaires dans l'acquisition d'un trajet (Klatzky et al., 1998), elle correspond à une évaluation de la représentation spatiale interne de la position et de l'orientation du corps dans l'espace. D'autres façons de tester la *path integration* seront ici présentées mais la majorité des recherches s'effectue en l'absence de vision, permettant ainsi d'évaluer l'importance des informations vestibulaires et des informations kinesthésiques en bloquant soit le déplacement (et les informations vestibulaires de translation associées), soit la rotation de la tête (et les informations vestibulaires de rotation), soit en ne proposant qu'un déplacement passif (aucun mouvement physique du

corps et aucune accélération ou rotation perçue par le système vestibulaire) ou alors un déplacement complet permettant une translation et une rotation (système vestibulaire de rotation et de translation stimulé).

Nous allons préciser dans cette partie le rôle des informations vestibulaires et kinesthésiques et plus particulièrement la décomposition des informations vestibulaires liées à la translation du corps et de la rotation de la tête, sur l'acquisition de connaissances spatiales. Il est à noter que généralement, lorsque plusieurs façons de se déplacer sont proposées, l'activité motrice et les informations sensorielles sont distinguées ; notamment une modification des informations vestibulaires influencent généralement les informations proprioceptives (i.e. basées sur les récepteurs musculaires, les tendons, etc.). Par exemple, proposer un déplacement à l'aide d'un fauteuil roulant permet de stimuler entièrement le système vestibulaire (translation et rotation) mais donne des informations proprioceptives différentes comparées à une situation de marche normale (proposant également des informations vestibulaires de rotation et de translation dues à la captation des informations d'accélération et de rotation de la tête). La première façon de se déplacer se base généralement sur une activité motrice des mains où l'utilisateur doit pousser les roues (ou un joystick) pour avancer alors que l'activité motrice de la marche peut se baser par exemple sur l'activité motrice des jambes. Pour cette raison, lorsque nous parlerons d'une modification des informations vestibulaires, nous nous entendrons également que les informations proprioceptives sont modifiées.

Chance et *al.*, en 1998 étudient ces informations à l'aide de 3 modes de navigation distincts en EV : en marche active (informations vestibulaires présentes), en se déplaçant et en tournant à l'aide d'un joystick (informations vestibulaires absentes) et la dernière condition consistait en une translation automatique gérée par l'ordinateur (absence d'informations vestibulaires de translation) et une rotation contrôlée par les mouvements de la tête. Dans cette dernière condition, seules les informations vestibulaires de rotation étaient donc présentes. Le sujet naviguait à l'intérieur d'un labyrinthe et devait indiquer la position d'objets rencontrés le long de son parcours. Les résultats montrent des performances meilleures pour la marche comparée à l'utilisation du joystick, mais aucune différence entre les autres groupes. Ces premiers résultats soulignent l'importance des informations vestibulaires dans l'intégration d'un trajet et de ses caractéristiques. Ces auteurs remarquent d'ailleurs que les sujets ayant utilisés le mode de marche actif souffraient moins du mal des simulateurs, suggérant que la concordance entre les informations vestibulaires de rotation et le flux visuel auraient un rôle important dans ce type de trouble. Dans une autre expérience, Loomis et *al.* (2001), dans une tâche de complétion de triangle et une estimation des relations

spatiales de 6 objets, ne trouvent pas de différences majeures entre personnes aveugles, personnes mal voyantes et des sujets contrôle. Les résultats similaires de ces 3 groupes, avec ou sans vision, suggèrent que le flux optique est une entrée sensorielle pauvre dans l'intégration de chemin. Berthoz et *al.* (1995) ont utilisé un paradigme intéressant pour étudier les informations sensorielles relatives au corps. Les sujets étaient assis sur un robot mobile et étaient entraînés à contrôler sa vitesse. Puis un déplacement passif du robot (sur lequel le sujet était assis) était effectué (l'expérimentateur gérait le déplacement du robot) les yeux bandés selon différentes distances à parcourir. Une fois l'arrêt du robot, les sujets devaient estimer la distance parcourue en se déplaçant (toujours à l'aide du robot) jusqu'au point de départ. La plupart des sujets ont correctement évalué la distance parcourue passivement avec le robot, suggérant que la vision n'est pas primordiale pour l'intégration des distances mais que les informations vestibulaires sont primordiales. Dans le même ordre d'idée, Campos et *al.* (2010) montrent que la combinaison des informations visuelles et vestibulaires améliore l'estimation des distances. Par contre, dans ce type de tâche, les informations de type vestibulaire seraient deux fois plus importantes que les informations visuelles. Allen, Kirasic, Rashotte et Haun (2004) montrent que l'âge influence les performances d'une tâche de complétion de triangle. Une première expérience a montré que les sujets jeunes et âgés avaient les mêmes performances lorsque les informations vestibulaires étaient présentes. Par contre, lorsque les sujets âgés étaient poussés sur 2 segments, avec les yeux bandés et assis sur une chaise roulante (moins d'informations vestibulaires), les résultats étaient significativement moins bons que chez les sujets jeunes. Pour ces auteurs, lorsqu'une des 3 entrées sensorielles relatives aux informations du corps dans l'espace est supprimée, les personnes âgées ont des difficultés à se repérer.

L'ensemble de ces différentes expérimentations suggèrent l'importance des informations vestibulaires (et kinesthésiques) et leur complémentarité avec les informations visuelles, dans l'acquisition d'une représentation spatiale interne cohérente. Quelques auteurs se sont alors intéressés à évaluer quels types de représentations étaient impactés par les informations sensorielles relatives au corps. Pour de nombreux auteurs (Chance et *al.*, 1998 ; Klatzky et *al.*, 1998) le cadre de référence égocentrique se baserait sur les informations vestibulaires pour mettre à jour les positions et directions du corps dans un environnement. Le cadre exocentrique se baserait plus sur la position et l'orientation des indices visuels de l'environnement (Huteau, 1987). Les informations vestibulaires et kinesthésiques seraient également importantes pour le couplage entre la perception d'informations spatiales et l'action effectuée (Tversky, 2000).

II.3 Les facteurs influençant l'acquisition de connaissances spatiales

Deux types de facteurs peuvent interférer sur l'acquisition de connaissances spatiales : les facteurs internes (relatifs aux caractéristiques cognitives, psychologiques et physiologiques propres à l'individu) et les facteurs externes (relatifs aux caractéristiques de l'environnement et de la tâche d'apprentissage). Nous ne présenterons dans cette partie que les facteurs relatifs à l'individu, et plus particulièrement quelques études qui ont porté sur l'âge, le niveau d'étude, le sexe ainsi que l'expérience en jeu vidéo dans la cognition spatiale. Il est à noter que ces différents facteurs peuvent interagir entre eux.

II.3.1 Le facteur âge

Les habiletés spatiales s'améliorent au cours du développement. En effet, Thorndyke (1980) démontre que les habiletés visuo spatiales sont plus élevées à 20 ans qu'à 12 ans. Cependant, tout comme les fonctions exécutives, l'attention, la mémoire verbale, la mémoire visuelle, la mémoire de travail, la vitesse de traitement de l'information déclinent au cours du vieillissement (pour revue, Kalfat et Sauzéon, 2009), les capacités visuo-spatiales telles que l'orientation et l'apprentissage topographique sont également sensibles aux effet de l'âge (Dobson, Kirasic et Allen, 1995; Kirasic, 2000: pour une revue récente, voir, Moffat, 2009). Les apprentissages spatiaux seraient moins bien planifiés et ordonnés autant du point de vue spatial que temporel au cours du vieillissement, sûrement du fait du déclin exécutif. La composante allocentrique serait également plus altérée que la composante égocentrique (Moffat, Elkins et Resnick, 2006).

II.3.2 Le niveau d'études

Les personnes étudiant les sciences, et plus précisément les mathématiques semblent avoir de meilleurs résultats en termes de compétences spatiales (MacFarlane Smith, 1964). Alington, Leaf et Monaghan (1992) ont décrit une relation entre le niveau d'études et les habiletés spatiales et Blade et Watson (1955) montrent une évolution positive des habiletés spatiales après un an d'études en ingénierie, en accord avec les résultats de Seeber (1981), qui décrit de meilleures performances après des études de physique (quelque soit le sexe). Le contexte social, le niveau d'études en particulier dans les domaines scientifiques pourraient permettre de stimuler les processus cognitifs nécessaires aux habiletés spatiales (Alington et al.,1992).

II.3.3 Le sexe

Même si souvent les hommes sont meilleurs que les femmes dans les tâches visuo-spatiales, l'hétérogénéité des résultats ne permet pas aujourd'hui de conclure de façon claire sur les relations entre le genre et les habiletés spatiales. En effet, certains habilités manifestent des différences de genre et d'autres pas.

Ward, Newcombe et Overton (1986) démontrent que les hommes se repèrent mieux avec des points cardinaux alors que les femmes utiliseraient plutôt des points de repères. Chen, Chang et Chang (2009) dans une étude récente étudient l'effet du genre sur les performances dans une tâche de wayfinding (tâche de reproduction d'un trajet). Ils montrent que les hommes utilisent des stratégies de configuration (niveau Survey du modèle L-R-S) alors que les femmes se focalisent plus sur les points de repères et sur la représentation égocentrique (niveaux Landmarks et Route du modèle L-R-S). Ces résultats vont dans le sens de Sandstrom, Kaufman et Huettel (1998) qui montrent que les hommes utiliseraient plus les stratégies allocentriques, alors que les femmes utiliseraient plutôt les points de repères (ie. stratégies égocentriques) pour se repérer et naviguer ; les stratégies de navigation seraient donc différentes selon le sexe (Astur, Ortiz et Sutherland, 1998 ; Postma, Jager, Kessels, Koppeschaar et Van Honk, , 2004).

Sur le test psychométrique de Guilford et Zimmerman (1948) mesurant l'orientation spatiale, Satalich (1995), Scribante (2000), Johns (2002) montrent que les hommes sont plus performants que les femmes. Coluccia, Iosue et Antonellabrandimonte (2007), ou encore Bosco, Longoni et Vecchi (2004) montrent que les différences hommes-femmes s'accroissent lorsque la mémoire de travail visuo-spatiale intervient. Concernant les tests de rotation mentale, Linn et Petersen (1985) montrent également une supériorité chez les hommes. Par contre, les résultats concernant les tâches de mémoire visuelle sont en faveur des femmes (Stumpf et Eliot, 1995). Dans une autre étude, Weiss, Kemmler, Deisenhammer, Fleischhacker et Delazer, (2003) remarquent que les femmes ont de meilleures performances dans des tâches verbales alors que les hommes sont meilleurs dans des tâches visuo-spatiales. Par contre, l'auto-évaluation des capacités visuo-spatiales des participants montrent une meilleure assurance chez les hommes que chez les femmes, alors que l'auto-évaluation des capacités verbales ne montre pas de supériorité des femmes sur les hommes ; les auteurs expliquent ces résultats par le fait que les femmes auraient tendance à sous-estimer leurs compétences cognitives.

Par contre, peu de différences sont trouvées dans les tâches d'orientation (Bosco et *al.*, 2004), et lorsqu'elles le sont, elles sont expliquées par des différences de stratégies facilement remédiables par entraînement (Richardson, 1994).

II.3.4 Les jeux vidéo et cognition spatiale

Le jeu vidéo (JV), et les environnements 3D sont maintenant utilisés par de nombreuses personnes. Aujourd'hui, il existe des études qui évaluent l'impact de ce type d'expérience sur la cognition spatiale. Nous allons présentés les avantages de leur utilisation en termes d'habiletés spatiales mais également en termes d'intégration multi-sensorielle.

Il existe différentes classes de jeux vidéo : action, aventure, dance, conduite, jeux de combat, simulations, sports et stratégies (Spence et Feng, 2010). Ces types de jeux sollicitent des processus cognitifs différents selon la tâche. Par exemple, les simulateurs d'avions demanderont une analyse et une planification des actions à effectuer, alors qu'un jeu de type Tetris sollicitera plutôt les capacités de rotation mentale (pour une revue des types de jeux et des compétences cognitives impliquées, voir Spence et Feng, 2010).

II.3.4.1 Jeux vidéos, genres et évaluation des habiletés spatiales

Terlecki et Newcombe (2005) étudient les liens entre habitudes informatiques et compétences spatiales sur plus de 1300 étudiants et remarquent que les hommes utilisent en général plus les technologies informatiques que les femmes. Ces auteurs trouvent des différences significatives sur le test de Rotation Mentale de Vandenberg et Kuse (1978) et des performances plus élevées pour les joueurs. Plus encore, le fait de jouer aux jeux vidéo atténue les différences de genre dans les habiletés spatiales (les femmes qui jouent ayant des résultats proches des hommes en rotation mentale). Pépin et Dorval (1988) ont étudié l'exposition aux jeux vidéo de 70 sujets n'ayant jamais eu d'expérience en Jeux Vidéo. Un premier groupe a été exposé à 8 séances d'entraînement aux Jeux Vidéo alors que le deuxième groupe ne reçut aucun traitement. Les sujets étaient testés pré exposition et post exposition sur des tests papiers crayons mesurant la visualisation spatiale. Les sujets exposés aux Jeux Vidéo ont eu de meilleures performances en post test qu'en pré test, suggérant que le Jeu Vidéo a amélioré les fonctions cognitives impliquées dans la visualisation spatiale. De plus, aucun effet sexe n'a été retrouvé suggérant que l'effet du Jeu Vidéo soit bénéfique quelque soit le genre. Ces résultats s'accordent avec ceux de Feng, Spence et Pratt (2007) qui trouvent également que l'exposition aux jeux vidéos chez les non joueurs, et plus particulièrement à un jeu d'actions permet d'atténuer les différences de genre sur des tests d'attention spatiale et de

rotation Mentale. Dans cette étude, après 10 heures d'entraînement à un jeu d'action, les femmes améliorent leurs résultats sur ces deux composantes spatiales. Boot, Kramer, Simons, Fabiani et Gratton (2008) testent l'attention, la mémoire et le contrôle exécutif chez les joueurs et non joueurs. Ces auteurs montrent également une supériorité chez les joueurs en termes de suivi d'objets, de passage d'une tâche à une autre et de rotation mentale d'objets. L'entraînement de 20 heures subis par les non joueurs n'a cependant amélioré que la rotation mentale, du fait peut être d'un nombre d'heures d'entraînement peu élevé. A l'exception du jeu de puzzle (Tetris), les jeux d'actions et de stratégies n'ont par contre eu aucun effet sur les performances. Tetris semble être un jeu qui sollicite préférentiellement la rotation mentale (Sims, 2002) et les jeux d'action seraient bénéfiques selon la tâche à effectuer.

II.3.4.2 Jeux vidéos et intégration multi sensorielle

Green et Bavelier (2007) montrent que les joueurs auraient une résolution spatiale du traitement visuel et une acuité visuelle améliorée comparée aux non joueurs, que ce soit en vision périphérique ou en vision centrale. Ils constatent également une amélioration de la résolution spatiale du traitement visuel chez les non joueurs soumis à un entraînement de 30 heures aux jeux vidéo ; ils démontrent ainsi que les jeux vidéo modifient les propriétés basiques du système visuel. Ces résultats se retrouvent également chez Donohue, Woldorff et Mitroff (2010) qui trouvent une attention visuelle, une perception visuelle et une intégration multi sensorielle temporelle améliorée chez les joueurs. D'ailleurs, pour Richardson, Powers et Bousquet (2011), les jeux vidéo permettent également d'affiner la coordination visuomotrice de la main car certains jeux nécessitent une action motrice fine induite par le clavier/souris ou le joystick. Granek, Gorbet et Sergio (2009) montrent une réduction de l'activité du cortex préfrontal chez les joueurs lors de planification de mouvements dissociés de la vision. L'activité cérébrale des sujets était enregistrée pendant que ceux-ci effectuaient 4 tâches visuo-motrices très complexes impliquant un mouvement de main : 1) une rotation de la main, où l'œil regardait la cible à atteindre, et la main bougeait dans la direction opposée 2) un mouvement de joystick où l'œil regardait une cible et un joystick était utilisé pour déplacer un curseur sur la cible 3) un mouvement rotationnel du joystick, l'œil regardait une cible et un joystick était dirigé dans la direction opposée pour déplacer le curseur sur la cible. Les résultats montrent une activité neuronale sensorimotrice réduite chez les joueurs, du fait sûrement de leur plus grande expérience de « décoordination » entre l'œil et la main. D'autres auteurs s'intéressent aux processus cognitifs modifiés par l'utilisation des Jeux Vidéo. Green et Bavelier (2003) montrent par exemple des modifications positives des processus visuels et

attentionnels chez les joueurs. Spence et Feng (2010) proposent, dans leur état de l'art, d'utiliser les jeux vidéo pour étudier les processus cognitifs mis en jeu dans les habiletés spatiales, mais aussi de les utiliser pour améliorer les compétences spatiales.

De nombreuses études se sont focalisées sur les relations entre expériences en jeu vidéo et habiletés spatiales de type papier-crayon, mais peu d'études ont fait le lien entre navigation spatiale et jeux vidéos dans les apprentissages en environnement réel. Les tâches de navigation font appel à la mise à jour et l'intégration de la position spatiale des objets par rapport à soi au cours du temps (Richardson et *al.*, 2011), ce qui n'est pas le cas des tests papiers crayon. De plus, les évaluations se font souvent en environnement virtuel et non en réel. Les résultats des premières expériences de Richardson et *al.* (2011) montrent qu'une des tâches de pointage de cible en environnement virtuel serait corrélée à l'expérience en jeu vidéo, suggérant que les joueurs créent une meilleure représentation mentale d'un EV que les non joueurs lors d'un apprentissage en EV. Par contre, lors d'un apprentissage en réel et une restitution dans le même environnement, aucune corrélation n'a été trouvée sur les tâches de pointage (en fonction de l'expertise en jeu vidéo) suggérant une absence de relations entre expertise en jeu vidéo et performance en environnement réel. Pour expliquer ce résultat, les auteurs avancent que le jeu vidéo améliorerait plus particulièrement les mécanismes visuo-spatiaux (ie, supériorité des joueurs en EV) plutôt que l'acquisition des informations sensorielles relatives au corps (ie, perte de supériorité des joueurs en réel).

II.3.5 Mesures de la navigation

L'ensemble de ce chapitre a déjà présenté différentes manières d'évaluer la composante cognitive et/ou motrice de la navigation. Nous présentons ici un bref résumé. Différentes mesures peuvent être utilisées pour mesurer le wayfinding. Pour rappel, Lynch (1960) définit le wayfinding comme la capacité à s'orienter et à naviguer dans un grand environnement, d'un point de départ à un point d'arrivée. Ainsi l'évaluation des connaissances d'un trajet peut être évaluée par différents moyens tels que (Ashraf, 2005) :

- Des évaluations subjectives : des questionnaires d'auto évaluation sont proposés afin que les participants évaluent leurs propres performances (Passini, 1984). Par exemple, Weisman (1981) demandent à ses sujets le nombre de fois où ils se sont perdus et s'ils auraient été capables de guider des personnes étrangères.
- Des pointages des directions : Le sujet doit pointer des lieux ou objets (par exemple pointage d'un point de départ ou d'un objet non visible).

- Des estimations spatiales: les estimations de distances demandent aux participants d'évaluer verbalement ou en marchant différentes distances telles que des distances entre deux points, des distances générales, les estimations de directions (points de départ, objets non visibles), etc.
- D'autres mesures : temps mis pour terminer la tâche, nombre d'erreurs, pauses, etc.

Chapitre II : La Réalité Virtuelle

Le terme de Réalité Virtuelle a été introduit dans les années 80 par Jaron Lanier, chercheur en informatique spécialisé dans le domaine du jeu vidéo. La réalité virtuelle (RV³) est une technologie issue des progrès du monde informatique, de l'infographie et du calcul en temps réel. Cette technologie permet de reproduire informatiquement, et plus ou moins fidèlement, un monde réel ou imaginaire. Ainsi la RV autorise la construction de mondes artificiels dans lequel l'utilisateur interagit en effectuant des actions à l'aide d'interfaces, le plus souvent sensorimotrices, que l'application traduit alors en retours sensoriels et/ou moteurs. La RV constitue donc une expérience à la fois technologique et sensorielle.

La RV a longtemps été dévalorisée de par sa complexité technique à mettre en place, son coût, et l'ensemble des compétences nécessaires à la création d'une application. Aujourd'hui cette technologie est en plein essor car elle est devenue économiquement plus abordable et plus accessible notamment en termes de développements informatiques. Elle est utilisée dans de nombreux domaines; par exemple dans le design et la simulation de contraintes physiques pour l'industrie automobile ou avionique, pour la formation technique du personnel à l'aide de *serious games*, ou encore pour la chirurgie à distance, etc. De part son ouverture à de nombreux domaines technologiques et les processus cognitifs et moteurs qu'elle sous-tend, la RV constitue un axe de recherche très prisé qui offre encore de nombreux challenges scientifiques et technologiques. D'ailleurs, les recherches en neuropsychologie s'orientent vers l'utilisation de la RV pour l'évaluation et la remédiation car elle permet de simuler informatiquement des activités proches de la vie quotidienne, riches en informations cliniques, tout en maîtrisant, enregistrant des variables pertinentes et en respectant la sécurité des sujets.

Dans ce chapitre, nous allons nous intéresser plus en détails aux concepts fondamentaux de la RV. Nous aborderons dans un premier temps les concepts *d'immersion*,

³ Notre chapitre propose une vision assez globale de la RV et de ses concepts ; il se base notamment sur les deux premiers tomes « Le Traité de La Réalité Virtuelle » qui contiennent une revue extrêmement détaillée sur « Volume 1 : L'Homme et son Environnement » (Fuchs, Moreau, Berthoz et Vercher, 2006) et sur « Volume 2 : Interfaçage, Immersion et interaction en environnement virtuel » (Fuchs, Moreau, Burkhardt et Coquillart, 2006). Le lecteur pourra donc approfondir les notions que nous aborderons par la lecture de ces 2 références.

de *présence* et d'*interaction* qui placent l'être humain au centre de la RV. Dans un second temps, nous aborderons les notions d'*interacteur* et d'*interface*, c'est-à-dire les différentes technologies et moyens technologiques mis à disposition pour que l'utilisateur interagisse avec un EV, et nous en présenterons quelques exemples illustrés.

I. Définitions et concepts

De par sa multidisciplinarité et ses différents domaines d'études, la RV trouve de nombreuses définitions. Nous n'allons pas en établir un listing mais allons présenter les deux principales sur lesquelles s'appuie cette thèse: une définissant la finalité de la RV, et une autre plus axée sur la technologie et ses conséquences sur l'homme.

« *La finalité de la réalité virtuelle 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).

L'idée de cette définition repose sur un concept bien particulier : une personne peut agir physiquement et cognitivement dans un monde informatique virtuel qui peut être très ressemblant ou non au monde réel. La RV se focalise donc sur une approche *anthropocentrique*, c'est-à-dire les propriétés cognitives, sensorielles et motrices de l'homme sont de cœur au centre du système. Une activité cognitive dans un monde numérique 3D sans activité physique ne rentre donc pas dans le cadre de la RV. L'objectif de la RV n'est pas de créer une copie numérique conforme d'un environnement réel, mais bien de simuler un environnement informatique qui peut présenter des aspects du monde réel, autant sur le plan cognitif, sensoriel que moteur. Par exemple, pour une meilleure compréhension de l'environnement simulé, la RV peut fournir des informations non réalistes ou non naturelles, c'est-à-dire non présentes dans le monde réel. Ce monde peut se caractériser par des symboles et des objets qui peuvent être représentés par exemple sans texture, ou sous forme filaire, proposant différentes informations qui ne sont pas présentes en environnement réel (par exemple, la visualisation d'une voiture sous forme filaire). D'autres aspects du monde réel peuvent être schématisés, ou alors représentés de façon imagée et donnent du sens à des situations qui seraient difficiles à visualiser ou à interpréter dans le réel. Il est ainsi possible de superposer des informations d'un modèle virtuel à des informations de l'environnement réel (visualisation de la dissipation thermique par exemple) et de les synchroniser en temps réel; on parle alors de *Réalité Augmentée*.

Après avoir distingué la finalité de la RV centrée sur l'homme, il nous semble important d'étudier une définition plus « informatique » pour en comprendre ses rouages techniques et ses implications sur l'utilisateur. Arnaldi en 2003 propose une définition technologique de la RV :

« La réalité virtuelle est un domaine scientifique et technique exploitant l'informatique et des interfaces comportementales en vue de simuler dans un monde virtuel le comportement d'entités 3D, qui sont en interaction en temps réel entre elles et avec un ou des utilisateurs en immersion pseudo-naturelle par l'intermédiaire de canaux sensori-moteurs. »

Arnaldi (2003).

Reprenant cette définition, Fuchs et *al.* (2006) dans *Le Traité de la Réalité Virtuelle* proposent de souligner et de distinguer 5 concepts clés du domaine de la RV :

- 1- La RV est une extension des recherches du domaine *informatique*, tant sur le plan de la modélisation des environnements (infographie), de la gestion temps réel des EV que des matériels utilisés pour intégrer l'utilisateur, les actions qu'il pourra effectuer et leurs traductions en langage compréhensible pour la machine. L'informatique s'occupe alors de gérer la simulation des EV, des objets qui le composent, des actions effectuées par l'utilisateur sur les objets de l'EV et de leurs propriétés physiques et de leurs lois comportementales, de la gestion du son, etc.
- 2- Les *interfaces comportementales* désignent les outils qui permettent à l'utilisateur d'interagir avec l'EV. Elles sont composées d'interfaces sensorielles (qui informent l'évolution de l'EV par les sens de l'utilisateur), d'interfaces motrices (qui informent l'ordinateur des actions motrices de l'utilisateur) et d'interfaces sensori-motrices qui regroupent les deux fonctions (elles informent dans les deux sens).
- 3- Le *monde virtuel* doit permettre une interaction en temps réel d'un environnement tout en gérant des objets animés en 3D suivant des lois physiques et comportementales.
- 4- *L'interaction en temps réel* existe si l'utilisateur ne perçoit aucun décalage temporel (latence) entre son action effectuée dans l'EV et la réponse sensorielle de ce dernier. Le temps réel est une fausse idée car il existe toujours un temps de latence entre l'acquisition des données de l'interacteur, son transfert, son interprétation informatique et sa restitution sensorielle. L'objectif est donc de minimiser ce temps de latence, ou de le dissimuler pour éviter toute déstabilisation comportementale du sujet.
- 5- *L'immersion pseudo naturelle* concerne les différentes techniques, les différents dispositifs (interfaces, logiciels) mis en jeu dans l'application pour que l'utilisateur ne se perçoive plus dans l'environnement réel. Le terme pseudo renvoie à la volonté de se rapprocher de la réalité sans en faire partie (Wallet, 2009). L'immersion naturelle par définition est difficile à obtenir, car, on acquiert des comportements cognitifs et moteurs dans un environnement réel et non virtuel.

Cette définition repose donc sur l'utilisation d'outils informatiques pour simuler un EV, sur une communication (souvent différente de la réalité) entre l'homme et la machine permettant d'avoir une activité (cognitive et physique) dans l'EV par le biais d'interfaces sensorielles et/ou motrices, et des contraintes associées qui vont impacter la compréhension et le comportement de l'utilisateur.

II. Immersion

Comme nous venons de le voir, la dernière définition fait appel au concept d'*immersion*. Ce terme est souvent dérivé dans différents contextes et son sens en est finalement galvaudé. On parle « d'utilisateur immergé », « d'environnement immersif », « d'interaction immersive », etc. Il semble donc nécessaire d'en délimiter les frontières et donc d'en proposer une définition claire.

L'immersion concerne les moyens technologiques (logiciels et matériel) mis en place par l'ingénieur pour transférer l'attention de l'utilisateur vers l'environnement virtuel. Pour Slater (2003) plus le système délivre un rendu sensoriel fidèle et similaire à un environnement réel, et plus l'environnement est dit immersif. Slater la décrit également comme « *simplement ce que la technologie délivre d'un point de vue objectif* ». Cette définition de l'immersion confère une place majeure aux fonctionnalités ou stimulations sensorielles supportées par le dispositif technologique et minimise le rôle du vécu sensoriel et psychologique de l'utilisateur. En d'autres termes, cette définition inclut au maxima les prouesses technologiques et à minima l'être humain dans l'immersion. A titre d'illustration, nous pouvons évoquer l'étude de Hoffman, Patterson, Carrougner et Sharar (2001) rapportant une réduction de la douleur lors d'exposition de grands brûlés à un système de RV; les sujets étaient équipés d'un joystick, d'un casque posé sur la tête et évitant toute distraction périphérique, et reproduisant un son spatialisé. Il naviguait dans un EV simulant l'illusion de voler dans un monde glacé pendant que l'on soignait leurs brûlures. Ce couplage technologique a permis une rupture sensorielle de leur douleur au profit des stimulations sensorielles émanant de l'EV. L'immersion serait donc dépendante de la richesse sensorielle délivrée par l'EV et pourrait être particulièrement efficace dans la distraction de la douleur.

Ouramdane, Otmane et Mallem (2009) définit l'immersion par « *la perception de l'utilisateur de son monde virtuel* ». Plus les sensations de l'environnement réel sont masquées par les sensations en EV, et plus l'immersion est importante. Ce dernier concept rappelle la décomposition de l'immersion en deux facteurs bien distincts de Steuer (1992) : *la richesse sensorielle* et *l'interactivité* (cf. Figure 2.1). La richesse sensorielle réfère à la capacité d'un

EV à reproduire un EV sensoriellement riche, à l'aide de dispositifs et matériels utilisés pour remplacer les sens de l'être humain dans un EV. Elle se distingue en deux composantes : *l'étendue sensorielle*, c'est-à-dire l'ensemble des organes sensoriels qui sont stimulés simultanément pour arriver à percevoir l'environnement ; et *la qualité sensorielle* qui correspond au nombre et au type d'informations sensorielles disponibles pour un canal sensoriel. *L'interactivité* correspond aux capacités de l'EV pour modifier la forme ou le contenu d'un EV. Elle intègre plus précisément la stimulation cohérente et la correspondance des actions demandées par l'utilisateur sur l'EV. Elle permet donc à l'utilisateur d'agir sur l'EV. Ainsi un jeu vidéo (cf. Figure 2.1) propose une bonne interactivité mais peu de richesse sensorielle (généralement seule la vision et audition sont impliquées). Deux autres facteurs structuraux sont importants dans la prise en compte de l'immersion : la *cohérence* qui consiste à synchroniser et à assurer une cohérence spatiale et temporelle des différentes stimulations sensorielles et ; la *correspondance* qui consiste à définir une relation entre l'action réalisée par le sujet et son effet sur l'environnement virtuel. Comme le montre la Figure 2.1, la réalité virtuelle propose une richesse sensorielle et une interactivité inégalée comparée au téléphone ou l'interactivité est importante (il permet en temps réel la cohérence et la correspondance des informations auditives) mais où la richesse sensorielle est pauvre (seul le sens de l'audition est proposé).

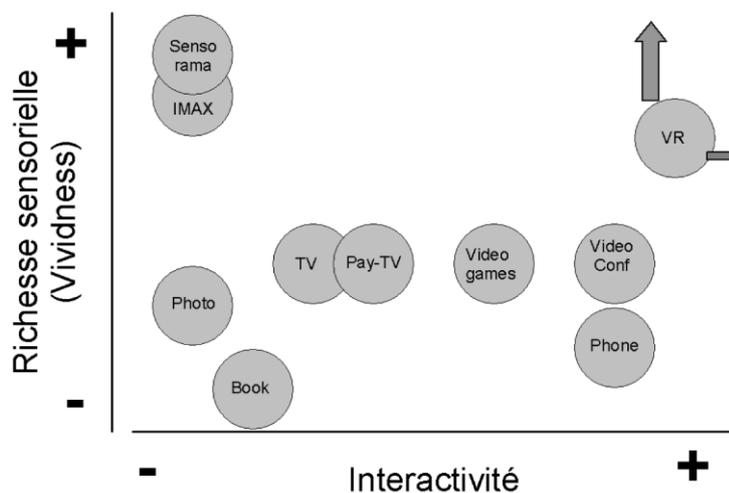


Figure 2.1 : Classification de différents dispositifs selon la distinction Richesse Sensorielle Vs Interactivité adapté de (Steuer,1992), repris du Traité de la Réalité Virtuelle, L'homme et son environnement (Fuchs et al., 2006).

III. Présence

Certains auteurs distinguent l'immersion plus « physique » de l'immersion mentale qui est également nommée présence. En 1995, Slater, Usoh et Steed définissent simplement la présence comme le sentiment d'être présent dans l'EV. La présence concerne le sentiment psychologique induit par l'ensemble des stimuli sensorimoteurs provoqués par les actions de l'utilisateur et les retours sensorimoteurs renvoyés par l'EV, c'est-à-dire à la réaction humaine à l'immersion et à l'ensemble des stimuli sensorimoteurs proposés par la RV (Slater, 2003). Elle correspond donc à la réponse psychologique et comportementale du sujet provoquée par l'immersion. Les mesures de la présence sont effectuées après exposition à un EV par des questionnaires (Slater et *al.*, 1995 ; Witmer et Singer, 1998, Fuchs et *al.*, 2006). Prothero et Hoffman (1995) ont montré que des utilisateurs exposés à des informations virtuelles non concordantes avec l'environnement réel étaient moins présents. La présence nécessite une similitude entre les informations sensorielles restituées par l'EV et la même activité effectuée en environnement réel; la présence découle donc d'une cohérence entre les informations sensorimotrices données par l'immersion (et la technologie) et la compréhension de ces informations par l'utilisateur. Le sujet utilise des processus cognitifs pour établir la relation entre les actions qu'il effectue dans l'EV et la traduction sensorielle et motrice de leurs impacts. Le sentiment d'être présent dans l'environnement dépendrait donc de la richesse sensorielle et la cohérence des actions proposés par l'EV (Witmer et Singer, 1998). Slater (2003) donne comme exemple le fait de fermer les yeux et d'écouter de la musique à l'aide d'un système de reproduction sonore spatialisé. Il se peut que l'on se dise « j'ai l'impression d'y être ». Pour cet auteur, cette réaction due à la technologie et à la qualité et la richesse sensorielle des informations sonores restituées a provoqué un sentiment de présence. Par contre le sentiment de présence ne dépend pas forcément du nombre d'interacteurs immersifs d'un EV. Par exemple, Baños, Botella, Rubió, Quero, García-Palacios et Alcañiz en 2008 montre que la stéréoscopie⁴ a peu d'influence sur le sentiment de présence. Ainsi la présence correspondrait aux réactions émotionnelles du sujet face à la cohérence des informations sensorielles restituées par l'EV. Différents auteurs confondent l'implication dans une tâche (*Involvement*) et la présence. En effet, il est possible d'être impliqué dans une tâche et d'être non présent (et inversement). Prenons l'exemple précédent de Slater concernant la musique. Je peux être présent mais la musique peut ne pas m'intéresser. Ainsi mon implication pour la

⁴ La stéréoscopie permet une perception en relief d'une scène ou d'un environnement à l'aide de deux images planes.

tâche à effectuer n'est pas reliée à mon sentiment de présence dans l'EV. D'après Witmer et Singer(1998), l'implication est un état psychologique qui a pour effet de focaliser son énergie et son attention sur différents stimuli, ou sur la signification des actions réalisées dans l'EV et de leurs conséquences directes observées. Deux explications « psychologiques » peuvent expliquer le sentiment de présence : des auteurs lient la présence aux capacités d'imagination des utilisateurs (Burdea et Coiffet, 1993 ; Sas et O'Hare, 2003) ; plus les utilisateurs ont de l'imagination et plus ils arriveraient à être présents dans un EV. La deuxième explication concerne les ressources attentionnelles des utilisateurs. Ainsi, certains pourraient focaliser leur attention jusqu'à en oublier l'environnement réel, alors que d'autres partageraient leurs ressources attentionnelles entre monde virtuel et monde réel (Witmer et Singer, 1998 ; Bystrom, Barfield et Hendrix, 1999). De manière générale, il ressort que plus l'utilisateur se sent immergé physiquement et sensoriellement dans l'environnement, plus le sentiment de présence est accru.

IV. Interaction

En EV, l'utilisateur agit sur l'environnement et doit percevoir en temps réel les actions effectuées et les répercussions aussi bien sur l'EV que sur ses organes sensoriels et moteurs. Pour Ouramdane et al. (2009), l'interaction « *correspond à l'ensemble des actions/réactions réciproques entre l'homme et l'ordinateur par l'intermédiaire d'interfaces sensorielles, d'interfaces motrices et de techniques d'interactions* ». L'interaction représente donc le mode de communication pour que l'homme et la machine reçoivent et/ou émettent de l'information. Cette communication s'établit par l'intermédiaire d'interfaces matérielles sensorielles et motrices. L'utilisateur agit sur l'environnement à l'aide d'interfaces motrices dont le rôle est de capter ses actions et de les transférer à l'application informatique. Celles-ci vont être transmises au calculateur qui va alors établir les transformations à appliquer à l'EV ainsi que les informations sensorielles (visuel, auditif, tactile, etc.) et/ou motrices qui devront être restituées à l'utilisateur par l'intermédiaire des interfaces sensorielles et/ou motrices. L'utilisateur a donc une activité cognitive de contrôle de l'interaction puisqu'il doit percevoir, évaluer et interpréter les répercussions de ses activités pour agir sur le monde virtuel. Cette boucle correspond à la boucle « perception, cognition, action » (Fuchs et al., 2006) de l'homme (cf. Figure 2. 2).

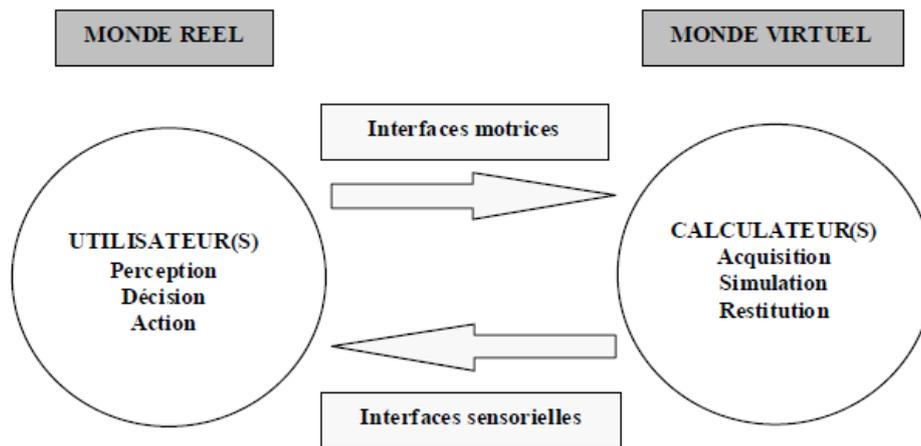


Figure 2. 2 : Boucle « perception, Cognition, Action » en RV, tiré du *Traité de la Réalité Virtuelle* (Fuchs et al.,2006).

Cette boucle peut être perturbée par la latence et les incohérences sensorimotrices qui peuvent impacter le comportement des utilisateurs dans l'EV.

La latence est également connue sous les termes de *retard*, *lag*, ou *délai*. Pour Vercher (2003), « *La vraie latence est celle qui recouvre l'ensemble de la boucle perceptivo-motrice. On définit donc bien la latence globale du système comme le temps s'écoulant entre l'action du sujet dans le monde réel, physique, et la réponse du système à cette entrée dans le monde virtuel. Ceci inclut tous les temps, de celui dû à la vitesse de transmission du signal au temps de réaction du sujet humain. Ce décalage temporel concerne bien entendu toutes les modalités motrices est sensorielles (visuelle, haptique, auditive...)* ».

La latence correspond donc au décalage temporel entre l'action effectuée par l'utilisateur et la réponse sensorimotrice donnée par le système. Un décalage temporel imperceptible entre l'entrée et la sortie est considéré comme du temps réel (même si cette notion, informatiquement n'existe pas). Pendant une interaction, la latence est donc due aux temps d'acquisition des différentes interfaces sensorimotrices, au temps de calcul et de transfert de ces informations au calculateur, et au temps de transfert de la réponse aux interfaces sensorimotrices. Plus ce temps est élevé et plus il affecte les canaux sensorimoteurs de l'utilisateur. La latence engendre donc des conséquences directes sur le comportement de l'utilisateur et sur son interaction avec l'environnement, notamment lorsqu'il n'arrive pas à la contrôler. En règle générale, un temps de latence supérieur à 300 ms est considéré comme incontrôlable et inutilisable. La latence engendre donc des incohérences sensorimotrices (même si ces dernières peuvent également avoir pour origine des différences perceptuelles de l'environnement virtuel comparé à un environnement réel d'après Fuchs, Burkhardt et Lourdeaux, 2006).

IV.1 Les niveaux d'Immersion et interaction (I²)

D'après la définition technologique de la RV d'Arnaldi (2003), la RV se base sur l'immersion et l'interaction en temps réel. Ces deux concepts sont étroitement reliés puisque l'interaction permet de communiquer avec la machine par l'intermédiaire de différents dispositifs matériels qui délivrent des informations sensorielles riches, cohérentes et concordantes aux actions effectuées (Immersion) par l'utilisateur dans l'EV. L'EV doit donc proposer à l'utilisateur des moyens d'effectuer une action, de la comprendre, et de pouvoir évaluer ses répercussions dans l'EV. Pour Fuchs, Nashashibi et Lourdeaux (1999), l'immersion et l'interaction (I²) reposent sur 3 niveaux d'activité de la tâche à réaliser : le niveau sensorimoteur, cognitif et fonctionnel (repris par Fuchs et *al.*, 2006 dans l'introduction du Traité de la Réalité Virtuelle).

IV.1.1 Le niveau sensorimoteur

Le corps de l'utilisateur est physiquement relié à l'ordinateur par le biais de dispositifs matériels permettant de communiquer par ses sens et de ses réponses sensorimotrices associées. *Le niveau sensorimoteur* correspond donc aux I² des entrées motrices de l'utilisateur que le système analyse, et qu'il restitue à l'aide d'interfaces sensorimotrices. Pour ce niveau, la richesse sensorielle et la cohérence des informations sensorielles proposées par les I² sont primordiales ; elles doivent être un minimum perturbées par le temps de latence et les incohérences sensorimotrices. On parle alors de *boucle sensorimotrice* entre l'utilisateur et l'ordinateur.

IV.1.2 Le niveau cognitif

Le niveau cognitif correspond aux processus cognitifs impliqués dans l'interaction et l'immersion ; il s'agit ici de comprendre quels processus vont permettre à l'utilisateur de communiquer, penser et agir avec l'EV. Ce niveau correspond à la notion de présence puisqu'il permet de coordonner les actions en fonction de la tâche et des intentions de l'utilisateur. L'ordinateur peut aider l'utilisateur à effectuer une action à l'aide d'interfaces logicielles comportementales, afin d'améliorer la façon d'effectuer son interaction et sa compréhension, car c'est cette compréhension qui va provoquer ou non l'activité de l'utilisateur. Pour que le niveau cognitif soit optimal, le niveau sensorimoteur doit être totalement « transparent ». Il existe deux catégories de processus cognitifs qui peuvent être

utilisés pour implémenter une immersion et une interaction proche du naturel : les Schèmes Comportementaux Importés (SCI) et les métaphores (avec ou sans substitution sensorimotrice).

IV.1.2.1 Les Schèmes

Lorsque l'utilisateur souhaite effectuer une action dans un environnement réel, il fait appel à des processus automatiques intégrés (cognitifs, sensorimoteurs) qui permettent sans effort mental particulier de résoudre l'action à effectuer : ce sont les schèmes de Piaget (1979) qui correspondent à une organisation mentale d'actions qui peuvent se généraliser à des situations analogues. Si des schèmes de l'environnement réel peuvent être intégrés à un EV, alors il est probable que l'immersion et l'interaction « cognitive » n'en seront que plus favorisées. Pour Piaget, le schème peut être reproduit à l'aide de conditions de reconnaissance ; il peut ainsi être assimilé et appliqué à de nouvelles situations ; il a une finalité, et il est exécuté inconsciemment. Les schèmes de comportements importés (SCI) en EV font appel à la notion d'immersion pseudo-naturelle, c'est-à-dire que l'on propose à l'utilisateur une immersion et une interaction qui se basent sur l'activité cognitive, sensorielle et motrice de l'utilisateur en environnement réel. Il est assez difficile de reproduire un SCI en EV de part la latence et les incohérences sensorimotrices engendrées. Il faut également constater qu'un SCI mal construit aura des répercussions néfastes sur le comportement de l'utilisateur en EV, même si l'action semble se rapprocher d'une action naturelle.

IV.1.2.2 La métaphore

Lorsqu'un SCI ne peut être utilisée, on peut faire appel à une *métaphore*. Au lieu d'utiliser des comportements sensorimoteurs acquis en environnement réel, on propose une image symbolique de l'action à effectuer. Par exemple, on peut proposer à une personne qui veut ouvrir une porte de cliquer sur son loquet. Ainsi l'action à effectuer n'est plus basée sur un schème sensorimoteur ni sur une interaction pseudo-naturelle. Il est également possible de déterminer une métaphore avec ou sans substitution sensori-motrice. Dans le cas d'une métaphore avec substitution sensori-motrice, un sens va être remplacé par un autre. Par contre, l'utilisation d'une métaphore peut être cognitivement coûteuse lorsque l'utilisateur ne la connaît pas ou ne la comprend pas ; un entraînement sera alors nécessaire pour transformer la métaphore en un schème d'usage.

IV.1.3 Le niveau fonctionnel

Le niveau fonctionnel correspond aux actions que l'on veut fournir à l'utilisateur pour qu'il agisse dans l'EV. Les actions de base que l'on peut effectuer dans un EV peuvent se distinguer selon 4 classes et sont appelées Primitives Comportementales Virtuelles (PCV) (Coquillard, Fuchs, Grosjean et Hachet, 2006). Ainsi un utilisateur peut :

- *Observer le monde virtuel*, l'utilisateur n'exploite pas d'interfaces matérielles et est souvent passif. Il peut observer visuellement, auditivement, tactilement l'EV ou par l'intégration parallèle de l'ensemble de ces stimulations sensorielles.
- *Se déplacer dans l'EV*, c'est-à-dire naviguer dans l'EV, soit sur une trajectoire à une dimension, sur une surface ou dans l'espace, avec ou sans changement d'orientation du sujet.
- *Agir sur l'EV*, c'est-à-dire manipuler un objet (translation et/ou rotation), déformer ou assembler un objet.
- *Communiquer avec une personne ou avec l'application*, c'est-à-dire communiquer avec un utilisateur, avec des personnages ou avec l'application.

La Figure 2.3 représente sous forme de schémas les 3 niveaux d'immersion et d'interaction présentés ci-avant.

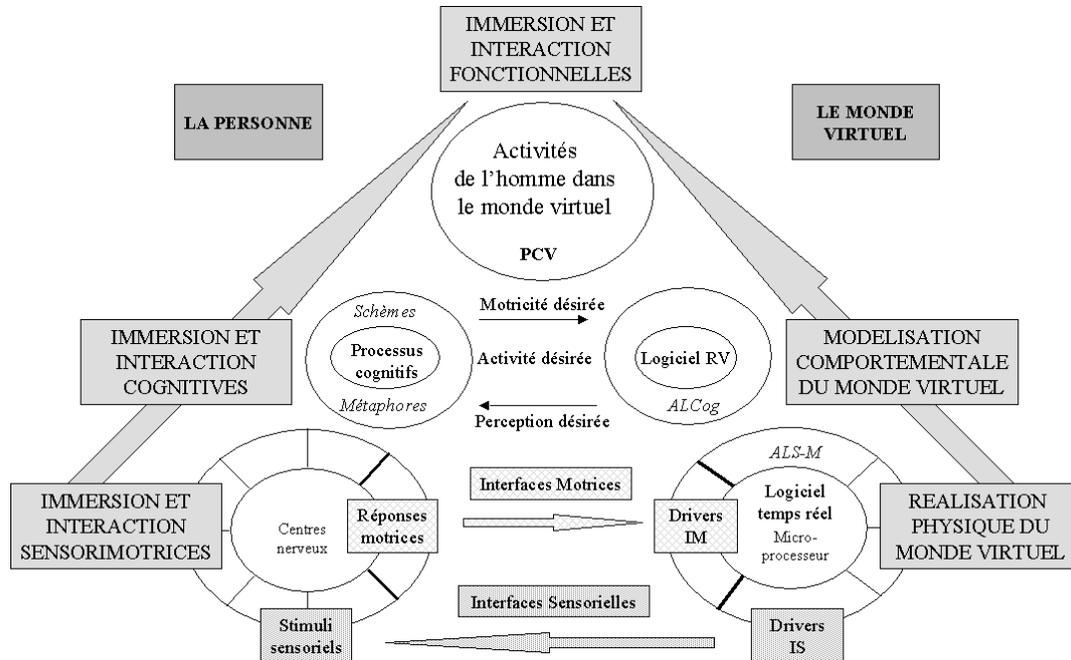


Figure 2.3: Schéma des 3 niveaux d'immersion et d'interaction en Réalité virtuelle, tiré du *Traité de la Réalité Virtuelle* (Fuchs et al., 2006).

IV.2 Les interacteurs

L'interacteur constitue le matériel utilisé pour réaliser une interaction. Par exemple, un gant est un interacteur qui pourra être utilisé pour sélectionner et manipuler des objets (et effectuer cette interaction avec l'EV). Les interacteurs peuvent être divisés en 2 catégories : selon les stimulations sensorielles et/ou motrices proposées ou alors selon la technologie qui les composent. Par exemple, pour Arnaldi (2003a), un interacteur pourra être préféré à un autre selon ses capacités technologiques (sa précision des mesures, sa fréquence d'échantillonnage, sa latence), ses propriétés physiques (son encombrement, son poids, son volume), sa fiabilité par rapport aux interférences (électromagnétiques par exemple) induites par les autres équipements, son utilisabilité (sa facilité d'apprentissage, sa facilité d'utilisation), selon son prix (d'acquisition et de fonctionnement), etc. Nous présentons ici des exemples interacteurs sensoriels et moteurs. Certains se rapprocheront quelques fois de la notion d'interfaces et des techniques d'interactions que nous présenterons plus tard dans ce chapitre.

IV.2.1 Les interacteurs sensoriels

Les interacteurs sensoriels concernent les matériels qui permettent d'agir et/ou de percevoir un EV en stimulant un ou plusieurs sens en temps réel, selon les actions effectuées. Les interacteurs sensoriels les plus communs concernent la restitution visuelle mais l'ouïe, l'odorat, le toucher peuvent également être stimulés. Nous proposons une classification non exhaustive d'interacteurs selon les sens que ces matériels stimulent.

IV.2.1.1 Les interacteurs visuels

Les interacteurs visuels permettent de restituer une scène visuelle d'un EV. Deux catégories d'interacteurs visuels peuvent être distinguées :

- les visiocasques (cf. Figure 2.4) contiennent deux écrans miniatures (un pour chaque œil). Ces systèmes sont généralement équipés d'une vision stéréoscopique⁵. Certains proposent également une restitution sonore. Cependant, le champ visuel de ce type d'interacteurs est souvent très réduit (de 40° à 100°) comparé à l'angle naturel de

⁵ La vision stéréoscopique permet d'avoir une impression de relief et de profondeur à partir de deux images planes

vision humaine. De plus, le poids ainsi que le coût financier représentent également des contraintes d'utilisation de ces systèmes.



Figure 2.4 : Exemple de visiocasque.

- Les écrans de projection. Ces écrans peuvent être de différentes tailles ou de différentes formes (écran de bureau, écran semi-cylindriques, etc.). Les systèmes les plus connus concernent les *CAVE* (Cave Automatic Virtual Environment), où l'utilisateur est immergé dans un cube composé de 5 ou 6 faces sur lesquelles l'environnement est projeté. (cf. Figure 2. 5).

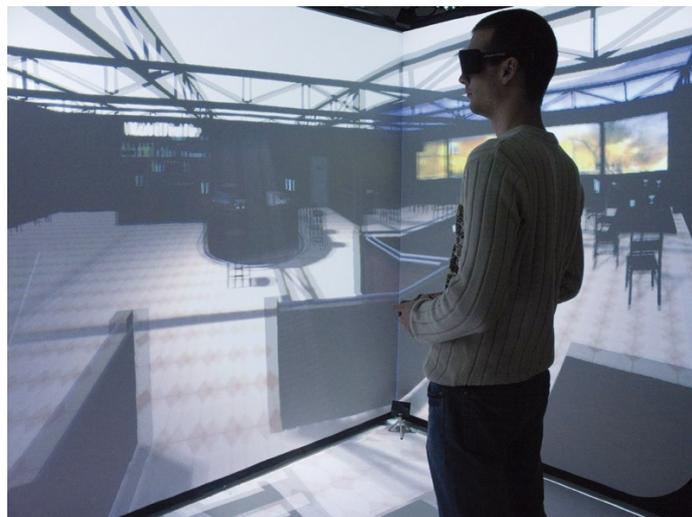


Figure 2. 5 : Exemple d'un système CAVE où l'utilisateur est plongé dans un cube sur lequel l'environnement est projeté. Le sujet est ici équipé de lunettes stéréoscopiques pour permettre une perception en relief de l'EV.

Il existe également des *dômes* qui permettent d'immerger l'utilisateur et d'augmenter l'angle du champ visuel de restitution. Ce type d'écran est souvent couplé à des lunettes stéréoscopiques qui permettent d'ajouter du relief à l'environnement. D'autres écrans de projection proposent des formes cylindriques pour couvrir l'ensemble du champ visuel humain (cf. Figure 2.6). Ce type de matériel est notamment utilisé pour le travail collaboratif. L'angle visuel proche de celui de

l'homme ainsi que la qualité d'affichage sont des avantages indéniables de ces interacteurs.



Figure 2.6: A gauche, un dôme ; à droite un écran semi cylindrique collaboratif.

IV.2.1.2 Les interacteurs sonores

Les interacteurs sonores concernent l'ensemble des matériels permettant de restituer fidèlement les sons d'un environnement virtuel. Généralement, ils se composent de plusieurs enceintes de haute qualité placées dans une pièce et permettent une immersion sonore du sujet. Il est aujourd'hui possible de spatialiser un son, c'est-à-dire de ressentir la direction et la distance à laquelle un son se situe par rapport à la position et la direction du sujet.

IV.2.1.3 Les interacteurs haptiques

Il existe deux types d'interacteurs haptiques : les interacteurs à retour d'effort et les interacteurs tactiles. Les interacteurs à retour d'effort permettent de ressentir la position et les mouvements du corps et les forces qui lui sont exercées. Les interacteurs tactiles permettent de ressentir la forme, le volume, la matière, la température d'un objet à l'aide des récepteurs cutanés de la peau. Les interacteurs à retour d'effort font nécessairement partie des interacteurs tactiles. Ce type d'interface est souvent onéreux et très intrusif. Ils sont composés de moteurs, souvent assez lourd et sont souvent dédiés à une activité particulière (cf. Figure 2.7). Il existe également des joysticks, des souris, des volants à retour d'effort, moins onéreux, mais également moins riche en termes de stimulations sensorielles, qui sont généralement très discrètes et pré-enregistrées.



Figure 2.7 : le système Haptic WorkStation®. Ce système est composé de nombreux moteurs.

IV.2.1.4 Les interacteurs olfactifs

Pour ce type d'interacteurs, les stimulations ne sont plus physiques mais chimiques. Les odeurs ne sont pas décomposables, ce qui signifie que ce type d'interacteur nécessite de posséder un type d'odeur particulier. Des diffuseurs d'odeurs permettent donc d'envoyer des odeurs en réponse à une situation précise, pendant un temps donné. Ces dispositifs peuvent être portatifs et situés près du nez, ou alors moins intrusifs mais limités.

IV.2.2 Les interacteurs moteurs

Ce sont les interacteurs qui permettent de manipuler, sélectionner et évoluer dans l'EV à l'aide d'actions motrices. Nous ne ferons pas un descriptif aussi exhaustif des interacteurs moteurs car certains ont déjà été décrits dans ce chapitre, sous une catégorisation différente. Les interacteurs moteurs peuvent être des tapis roulants pour simuler la locomotion, des joysticks, des gants, des souris et/ou clavier, etc., un volant et des pédales pour la simulation de conduite, des leviers de commande pour l'aviation, etc. Les systèmes de capture de mouvements (motion capture, head tracker, etc.) font également partis des interacteurs moteurs.

IV.3 Interfaces et paradigmes d'interaction

Dans cette partie, nous proposons de lever l'amalgame entre l'interacteur et l'interface bien que ces termes soient étroitement liés. Nous discuterons ensuite des paradigmes d'interaction et des différentes des techniques d'interactions qui en découlent.

IV.3.1 Les interfaces

En RV, on parle souvent d'interfaces comportementales. En effet, à la différence des autres systèmes d'Interfaces Homme Machine, la RV propose d'évoluer et d'agir sur l'EV par des actions et des comportements sensorimoteurs. Pour Bowman (1999), l'interface est considérée comme un ensemble de 3 entités distinctes (cf. Figure 2.8) :

- Un périphérique d'entrée, composé généralement d'un interacteur moteur, qui permet d'effectuer une action et de l'envoyer au périphérique de transfert.
- Un périphérique de transfert qui permet grâce aux changements moteurs effectués par le périphérique d'entrée de changer l'état de l'application et de fournir un stimulus sensoriel au périphérique de sortie.
- Un périphérique de sortie qui permet d'interpréter les comportements fournis par le périphérique d'entrée et de transfert et de les rendre perceptibles à l'utilisateur. Ils permettent de suivre en temps réel l'évolution de l'EV et peuvent être de type moteur, visuel, auditif, tactile, etc.

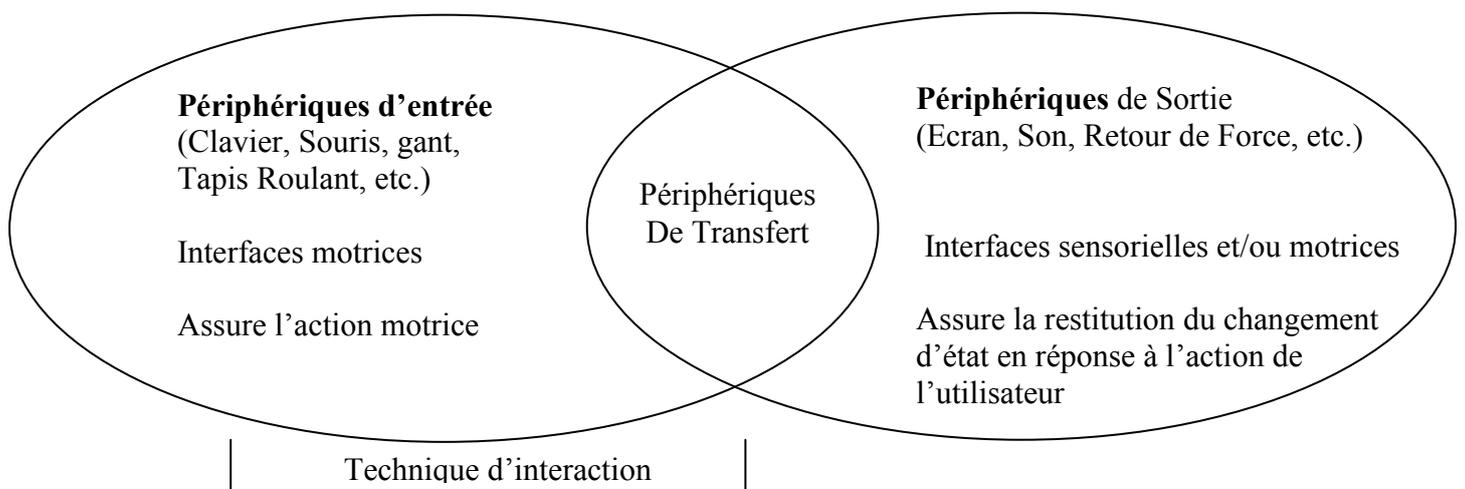


Figure 2.8 : Schéma représentant une interface dans son ensemble.

En règle générale, une interface sensorielle transmet des stimuli sensoriels de l'ordinateur vers l'homme, et une interface motrice transfère des réponses motrices de l'homme à l'ordinateur. Il existe également des interfaces sensorimotrices. Elles permettent donc des échanges bidirectionnels entre l'homme et la machine. Lorsque les interfaces sont correctement réalisées, les stimulations sensorielles cohérentes proposées par l'EV masquent l'environnement réel. Une interface se doit donc d'être *transparente*, c'est-à-dire non perçue par l'utilisateur pendant son utilisation. La transparence d'une interface peut être avec ou sans support matériel, ce dernier favorisant généralement les mouvements de l'utilisateur car

moins intrusif. Le choix de l'interface dans une application RV est donc primordial ; l'interacteur avec ou sans matériel, le type stimulus sensoriel restitué, les actions que l'utilisateur pourra effectuer, la manière dont est programmé le comportement suite à une action, influencent l'intention d'agir de l'utilisateur. Finalement, une interface regroupe l'ensemble des interacteurs et la technique utilisée pour effectuer l'interaction. Une *technique d'interaction* concerne le couplage périphérique d'entrée/périphérique de transfert, c'est-à-dire « *la méthode grâce à laquelle un utilisateur peut accomplir une action dans l'environnement 3D au travers de l'interface* » (Le Proux De la Rivière, 2005). Et, de manière plus simple, pour Foley, Van Dam, Feiner et Hugues (1996), cité par Ouramdane et al. (2009) « *la technique d'interaction consiste à établir la manière d'utiliser un périphérique pour effectuer une tâche sur un ordinateur* ».

Bowman (1999b) définit 4 paradigmes⁶ d'interactions qui définissent les tâches principales d'une interaction en EV : *la navigation, la sélection, la manipulation, le contrôle de l'application*. Ces tâches regroupent les techniques d'interactions associées à leur paradigme. Dans les paragraphes suivants, nous détaillons ces 4 paradigmes et nous proposons quelques illustrations concrètes.

IV.3.2 Les paradigmes d'interaction

Les paradigmes d'interactions sont étroitement reliés au niveau fonctionnel de l'immersion et de l'interaction et des Primitives Comportementales Virtuelles (cf. *infra* ; partie V.I.3 de ce chapitre). Ces tâches élémentaires (PCV) vont être réalisées par l'utilisateur à l'aide des paradigmes et techniques d'interaction associés. Bowman (1999) différencie 3 tâches dans un EV : le déplacement, la sélection-manipulation et le *contrôle* de l'application. Ces 3 paradigmes sont présentés ici. Par souci de simplicité et de lisibilité, nous ne présenterons pas en détail les interfaces logicielles cognitives et comportementales qui soutiennent l'utilisateur dans la compréhension et l'utilisation de ces différentes interfaces.

IV.3.2.1 Le déplacement

La navigation consiste à se déplacer dans l'EV en effectuant des actions par l'intermédiaire d'interfaces motrices et/ou sensorielles. La RV suppose un déplacement physique dans un environnement réel souvent de taille restreinte. Si l'application doit simuler

⁶ Klinger (2005), dans sa thèse, définit le paradigme comme une représentation du monde, une façon de voir les choses.

un déplacement par une marche physique, les interacteurs de navigation ont souvent une taille importante (exemple, un tapis roulant) et il faut souvent gérer une dimension alors que le déplacement physique en requiert au minimum deux. Ainsi, des métaphores de déplacement sont souvent utilisées plutôt qu'un SCI basé sur la marche.

Bowman (1999) propose 3 sous-tâches de base nécessaires au déplacement en EV :

- Le choix de la direction ou de la cible.
- Le choix de la vitesse/accélération du mouvement.
- Le choix des conditions d'entrée (c'est-à-dire le moyen par lequel l'utilisateur commence, continue et arrête le déplacement).

IV.3.2.1.1 Quelques exemples d'interfaces de déplacement

Outre les interacteurs de base tels que les joysticks, clavier ou souris, nous allons ici présenter quelques exemples d'interfaces moins courantes mais utilisées pour la locomotion en EV.

IV.3.2.1.1.1 Interface basée sur le mouvement réel de la marche

- La marche sur place

Du fait de la contrainte de la taille de certains EV, Usuh, Arthur, Whitton, Bastos, Steed, Slater et Brooks (1999) vont proposer un déplacement consistant à marcher sur place. Le GAITER est un système qui enregistre les mouvements des pieds et permet de détecter la direction et la vitesse du sujet.

Dans le même ordre d'idée, les Powered shoes (cf. Figure 2.9; Iwata, Hiroaki et Tomioka, 2006) développé par l'université de Tsukuba au Japon sont composées de chaussures, équipées d'un moteur électrique commandant de petites roulettes situées sous la semelle. Le principe de ce système repose sur l'annulation des pas de l'utilisateur en provoquant la force inverse du pas par l'intermédiaire du moteur et des roulettes. Ce système est limité par sa vitesse maximum (60 cm/secondes), et par l'amplitude peu naturelle des pas.



Figure 2.9 : Le système Powered Shoes, Iwata et al. (2006), Université de Tsukuba, Japon.

Une autre invention de cette même université concerne l'utilisation de dalles mobiles (CirculaFloor, cf. Figure 2.10 ; Iwata, Yano, Fukushima et Noma, 2005). Ces dalles, d'une taille de 70 cm se déplacent automatiquement lorsque l'utilisateur effectue un pas et limite le déplacement du sujet sans qu'il ne le perçoive. Des capteurs optiques permettent au système de déplacer les dalles sous ses pieds selon ses déplacements.



Figure 2.10 : le système CirculaFloor, , Iwata et al. (2005) , Université de Tsukuba, Japon.

Le système CyberSphere© (cf. Figure 2.11, Fernandes, Raja et Eyre, 2003) de l'université de Warwick permet d'immerger le patient dans une sphère qui se déplace selon les déplacements effectués par le sujet. Une sphère translucide de 3,5 mètres de diamètre est placée sur des coussins d'air lui permettant de tourner sur elle-même. Des vidéoprojecteurs affichent une image stéréoscopique sur l'ensemble de la surface de la sphère, le sujet ayant alors l'impression d'être immergé quel que soit son point de vue. Le sujet peut alors se déplacer et se diriger dans la sphère, en orientant ses pas et son corps. La sphère tournera et adaptera sa vitesse à la vitesse de marche ainsi que son flux visuel, selon le principe d'une « roue de hamster ». Le sujet aura alors l'impression de marcher physiquement alors que les déplacements automatisés de la sphère provoqués par les coussins d'air n'auront pas modifié sa position.



Figure 2.11 : LaCybersphere © de l'université de Warwick, Angleterre.

- **La marche dans de grands espaces**

La motion capture permet de capturer les mouvements de marche de l'utilisateur. Un système de Motion Capture est composé d'un ensemble de caméras émettant de la lumière infrarouge qui est réfléchi par des sphères placées sur le corps du sujet (cf. Figure 2.12). Cette technologie nécessite une pièce de grande taille ; le prix est également assez élevé et les EV limités à la taille de l'environnement réel. Par contre, cette technologie permet de combiner les informations kinesthésiques, visuelles et vestibulaires induites par le déplacement réel dans l'EV.

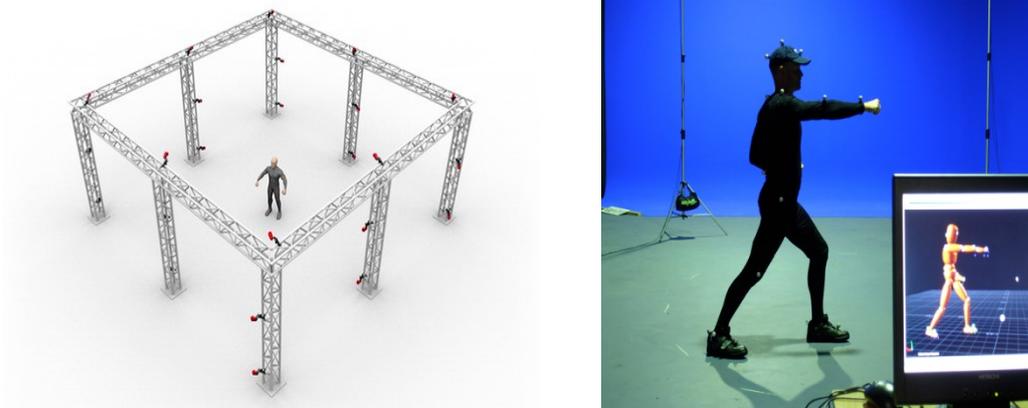


Figure 2.12 : Exemple d'un système de motion capture (Motion Point Optitrack©)

Les tapis roulants permettent une simulation de marche naturelle en environnement virtuel. Il existe deux types de tapis roulants : unidirectionnel, le sujet marche dans une direction et la rotation est gérée par l'ajout d'une technique d'interaction (motion capture, head tracker, joystick, etc.), ou omnidirectionnel, le sujet pouvant alors effectuer des translations et des rotations sur un tapis roulant gérant les deux dimensions.



Figure 2.13: Système Sarcos TreadPort ©.

Le système Sarcos TreadPort© (Hollerbach, Xu, Christensen, R. et Jacobsen, 2000) est basé sur une dimension (cf. Figure 2.13). Le sujet est attaché à une corde dont la longueur varie à chaque déplacement effectué. Plus la longueur de la corde augmente (ou diminue) et plus la vitesse du tapis augmente (ou diminue). Lorsque l'utilisateur se situe au centre du tapis, la vitesse du tapis reste constante.

Le système Cyberwalk développé (De Luca, Mattone, Robuffo Giordano et Bulthoff, 2009) est composé d'un ensemble de tapis motorisés composant la surface sur laquelle le sujet peut évoluer (cf. Figure 2.14). Ce tapis permet de se déplacer dans les deux dimensions et l'utilisateur peut contrôler sa direction et son accélération. Les informations sensorielles relatives au mouvement du corps sont présentes. Ce système est très coûteux et nécessite un grand espace.



Figure 2.14: le tapis omnidirectionnel CyberWalk©.

IV.3.2.1.1.2 Basés sur des mouvements moteurs différents de la marche

Ces systèmes se basent sur différentes habiletés motrices acquises par l'utilisateur.

- Les interfaces à base de pédales.

Le système Sarcos Uniport (Darken, Cockayne et Carnein, 1997) permet de se déplacer dans un EV à l'aide de pédales (cf. Figure 2.15). La direction est effectuée par les mouvements de tête permettant de diriger le point de vue.



Figure 2.15 : le système Sarcos Uniport©.

IV.3.2.1.2 Les déplacements basés sur des métaphores

Différentes métaphores du déplacement existent. Ainsi le joystick permet de gérer un déplacement en deux dimensions (tout comme le clavier souris). Le pointage du lieu où aller à l'aide d'un gant, etc., le déplacement par « grab the air », c'est-à-dire par la sélection d'un objet ou lieu et du déplacement automatique de l'EV, sont, par exemple, d'autres métaphores de navigation utilisées dans les EV.

IV.3.2.2 La sélection et la manipulation d'objets.

Nous avons regroupé les paradigmes d'interaction sélection et manipulation car ils sont rarement utilisés de manière autonome.

La sélection concerne la désignation d'un objet en vue d'être utilisé ultérieurement. La manipulation représente le fait de modifier les propriétés physiques de cet objet. Généralement, ces propriétés sont de type translationnel et rotationnel mais elles peuvent être également un changement de couleur, de transparence, de texture, etc. La sélection et la manipulation d'objets est une des actions de base qui permet à un utilisateur d'agir sur un EV. Cette activité motrice est particulièrement intégrée par le cerveau. Le toucher, l'ouïe, la vue sont des sens impliqués lors de la sélection et de la manipulation d'un objet en environnement réel. En EV, la présence de retours sonores, visuels ou haptiques en temps réel sont donc des stimulations sensorielles qui améliorent la manipulation et la sélection d'objets (Coquillard et *al.*, 2006). La manipulation, la sélection et le déplacement d'un objet dépendent donc de l'interface utilisée (la manière de sélectionner et de manipuler un objet à l'aide d'un joystick ou d'un gant est différente), du type de retour sensoriel (visuel, auditif, haptique, etc.) et des

conditions de la tâche à effectuer (la taille, et la distance des objets peuvent, par exemple, jouer un rôle important dans sa préhension et sa manipulation).

IV.3.2.2.1 Quelques exemples

- La main virtuelle

Une des métaphores la plus souvent utilisée concerne la main virtuelle (cf. Figure 2.16). Elle représente virtuellement un avatar de la main de l'utilisateur. Cette métaphore se base sur le comportement moteur et cognitif de l'utilisateur acquis en environnement réel et se comporte de la même manière que la main de l'utilisateur. Ce type d'interface fonctionne généralement de la manière suivante : un gant de données permet de détecter les mouvements physiques des doigts (ouverture et fermeture) qui sont alors associés au doigt de la main virtuelle. Lorsque le sujet souhaite sélectionner un objet, il ferme la main. Pour manipuler l'objet dans l'EV, un capteur de position et d'orientation permet de détecter les déplacements de la main physique dans l'environnement réel. Ce déplacement est alors couplé au déplacement virtuel de la main dans les 3 dimensions.



Figure 2.16 : Métaphore de la main virtuelle (Bolt,1980) (Image du Traité de la Réalité Virtuelle, Fuchs et *al.*, 2006)

- L'utilisation des « props »

Un props est un interacteur physique réel qui ressemble en tout point à un objet de l'environnement réel ; il est généralement utilisé pour un contexte donné. Ce type d'interface permet de bénéficier des avantages liés à l'habitude de son utilisation et de sa manipulation en environnement réel. Ces interfaces sont qualifiées d'haptiques passives car aucun retour sensoriel ou moteur n'est généralement proposé à l'utilisateur. Une des utilisations célèbres de ce type d'interface concerne l'application de neurologie de Hinckley, Pausch, Goble et Kassell (1994) qui consistait à manipuler l'IRM numérique d'un cerveau à l'aide d'une poupée. A l'aide d'une tablette, l'utilisateur pouvait également manipuler le plan de coupe.

- La technique du ray casting

Elle consiste à utiliser un laser virtuel pour pointer un objet. Il est ainsi possible d'attraper des objets à n'importe quelle distance. Le mouvement du rayon est asservi au mouvement de la main de l'utilisateur, rendant l'interaction assez naturelle (cf. Figure 2.17). Par contre, son utilisation devient difficile lorsque les objets sont de petite taille. Pour pallier à ce problème, Liang et Green (1994) propose d'utiliser un rayon en forme de cône, tout objet situé à l'intérieur du cône étant alors sélectionné.

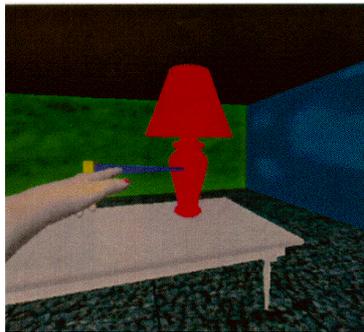


Figure 2.17 : la technique du ray casting, image tiré du Traité de la Réalité Virtuelle (Fuchs et al.,2006).

IV.3.2.3 Le contrôle de l'application.

Le contrôle de l'application concerne la possibilité de commander l'application afin d'en changer son état. En 2 dimensions, le contrôle de l'application est simple puisqu'il se fait par des menus déroulants et des messages explicites. En 3 dimensions, ces retours n'existent pas et il est assez compliqué de transposer un menu 2D en 3D du fait de la 3^{ème} dimension que l'être humain n'est pas habitué à gérer. Ruddle (2005) définit ce paradigme comme la tâche qui permet d'exécuter une application particulière du système, et de changer le mode d'interaction ou son état.

IV.3.2.3.1 Quelques exemples

Coquillard et *al.* (2006) dans le volume 2, chapitre 12 du traité de la réalité virtuelle proposent 5 distinctions des techniques d'interaction pour le contrôle de l'application : le mode verbal, le mode gestuel, la sélection graphique, la sélection d'outils physiques, et les interfaces matérielles dédiées au contrôle.

- *Le mode verbal*, naturel, ne nécessite pas l'affichage des menus déroulants. Il nécessite l'apprentissage d'un vocabulaire spécifique assez limité, ainsi que l'organisation hiérarchique des commandes vocales, ce qui est assez contraignant pour l'utilisateur non initié. De plus, ce type d'interface nécessite un apprentissage entre

l'homme et la machine assez long. Néanmoins, l'avantage réside dans la non utilisation d'interacteurs intrusifs et laisse libre les mains de l'utilisateur.

- *Le mode gestuel* permet de communiquer avec l'application par des gestes de la main ou du corps. Dans ce cas, un système capture et traduit les mouvements de l'utilisateur en commandes. L'affichage de menus n'est pas non plus exigé ; par contre l'utilisation n'est pas très naturelle et un trop grand nombre de gestes peut être difficile à mémoriser.
- *La sélection graphique* consiste pour l'utilisateur à choisir des paramètres à l'aide de menus qui peuvent être en deux dimensions ou en 3 dimensions. La plupart des menus graphiques dans les EV sont en 2D, car l'ajout d'une troisième dimension perturbe l'utilisateur, notamment par le fait qu'il n'est pas habitué à manipuler cette troisième dimension.
- *La sélection d'outils physiques* permet de résoudre les problèmes de positionnement des membres du corps dans l'espace en utilisant différentes interfaces. La notion d'outils consiste à aller sélectionner un objet dans l'EV (par exemple un clou, une scie, etc.) dont la fonction est spécifiquement définie pour une tâche donnée. On peut ainsi utiliser des props (voir *infra*, partie sur la sélection et la manipulation), c'est-à-dire un objet physique réel ayant la même fonctionnalité en virtuel. Ce type de système permet plus facilement de s'affranchir de l'apprentissage de l'interface.
- *Les interfaces dédiées au contrôle* constituent les interfaces matérielles telles que les claviers souris, qui permettent de communiquer avec l'application.

Ces différents concepts liés aux techniques et usages de la RV ont émergé des recherches portant sur l'interaction Homme-EV. Ce retour d'expérience scientifique permet aujourd'hui de faire de meilleurs choix de conception des dispositifs RV. Néanmoins, dans une perspective applicative, et notamment dans le domaine de la cognition spatiale, ces choix soulèvent de nombreuses questions : quel niveau de réalisme des EV était-il nécessaire pour permettre d'explorer les mécanismes cognitifs de la navigation spatiale ? Le mode d'interaction avec les EV modifie-t-il les mécanismes cognitifs et moteurs impliqués dans la navigation, et si oui comment ? Dans le chapitre suivant, nous adressons en détails ces questions qui sont au cœur des études que nous avons menées au cours de notre thèse.

Chapitre III : La Cognition Spatiale et les Interfaces

La RV permet de maîtriser de nombreux facteurs difficilement contrôlables dans la vie réelle. De nombreux auteurs (Rose, Brooks et Rizzo, 2005; Peruch et Wilson, 2004 ; Rizzo et al., 2004) ont démontré les avantages liés à cette technologie ; elle permet notamment de simuler des situations complexes proche de la vie quotidienne (environnement écologique), un meilleur contrôle des variables à maîtriser, une sécurité accrue des sujets, une adaptation des interactions à l'utilisateur, la multiplication des séances d'entraînements à moindre coût. Dans ce contexte, nous présenterons les travaux étayant l'intérêt applicatif de la RV pour la neuropsychologie. Puis, un focus sera porté aux applications pour l'étude de la cognition spatiale, et en particuliers le transfert de connaissances du virtuel au réel. Pour cela, seront détaillés les travaux sur les facteurs d'influence : les facteurs internes relatifs aux sujets et les facteurs externes relatifs au dispositif RV. Pour ces derniers, nous accorderons une attention spéciale aux recherches adressant le rôle de la composante motrice dans l'acquisition des connaissances spatiales en EV, et ce à travers la manipulation des interfaces de locomotion. Et, nous terminerons en présentant les nouvelles Interfaces Cerveau Ordinateur (ICO) basée sur l'imagerie motrice, comme méthodologie d'intérêt pour notre objet d'étude puisqu'elle permet de neutraliser l'activité motrice physique.

I. Réalité virtuelle et neuropsychologie

Les outils actuels de la neuropsychologie répondent déjà à des besoins de santé dans de nombreuses situations : le vieillissement normal et les problèmes liés à l'autonomie ; les patients traumatisés-crâniens (pouvant être dus à des lésions cérébrales, des accidents de la route, des chutes, des blessures par balle, des accidents sportifs, des actes chirurgicaux, etc.) ; les patients présentant des pathologies neurologiques (maladie d'Alzheimer, démences au sens large, maladie de Parkinson, etc.) ou vasculaires (AVC, démence vasculaire, etc.) ; les patients souffrant de troubles de l'apprentissage et du développement (déficit de l'attention, hyperactivité, retard mental), etc.

Les outils actuels permettent de poser des diagnostics, des pronostics ou encore de ré entraîner un (ou des) déficit(s) cognitif(s) mais ces outils sont le plus souvent basés sur un matériel dont le contenu et les tâches à réaliser sont très éloignées des activités naturelles de la vie quotidienne (ie., validité écologique limitée). Ainsi, le transfert thérapeutique est souvent limité et, donc réduit peu le handicap, c'est-à-dire les répercussions de ces déficits sur la vie familiale, sociale et professionnelle. Or, c'est sur ces répercussions, que porte le plus souvent la plainte des patients.

Malgré ces limites, de très nombreux outils d'évaluation ou de remédiation ont été élaborés, validés et étalonnés et sont utilisés dans un cadre aussi bien clinique, qu'expérimental. Il s'agit de tests de type « papier-crayon » tels que les épreuves de barrage de Zazzo (1972) pour l'attention (cf. Figure 3.1), ou la MEM-III (Wechsler, 2001) pour la mémoire, ou de tests informatisés tels que le TEA (Test Evaluation de l'Attention) de Zimmermann et Fimm (1994).

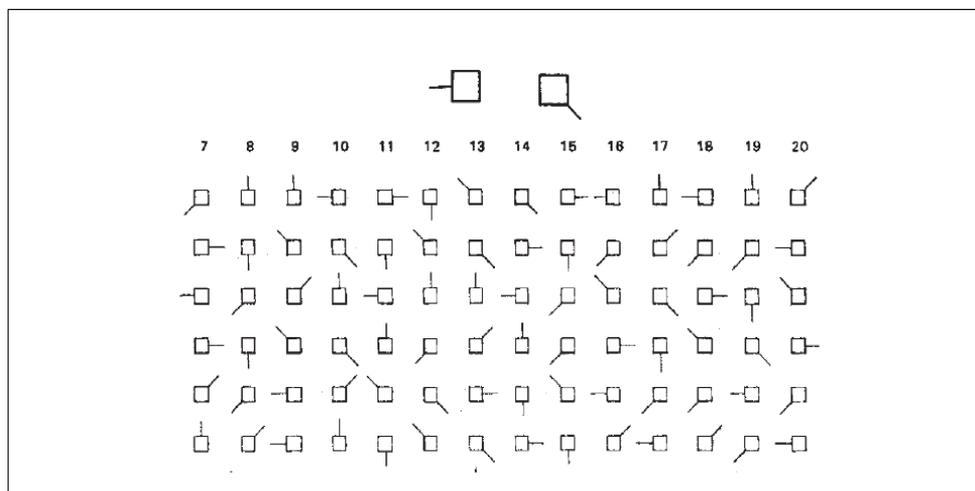


Figure 3.1 : Test des deux barrages de Zazzo (1972).

En fait, l'évolution des outils neuropsychologiques est étroitement liée aux avancées techniques et technologiques, en particulier dans les domaines de l'informatique et des interfaces avancées. Les premiers outils psychométriques ont été naturellement de type « papier-crayon » et ont dominé jusque dans les années 80. Par la suite sont apparus les outils informatisés qui n'ont cessé d'évoluer et de progresser en proposant des situations de tests et des scénarii plus riches et plus attractifs, des interfaces plus conviviales et plus adaptées aux utilisateurs. Dans cette perspective, les outils de demain utiliseront les évolutions techniques en termes d'environnements 3D et d'interfaces adaptées aux utilisateurs mais également au handicap, et contribueront ainsi à l'enrichissement des situations de tests en les rapprochant toujours plus des situations concrètes et complexes de la vie quotidienne (pour revue, N'Kaoua et Sauzéon, 2008).

I.1 Avantages de la réalité virtuelle pour la neuropsychologie

A la suite de lésions cérébrales acquises (traumatismes crâniens, accidents vasculaires cérébraux, tumeurs, etc.), les patients présentent fréquemment, en plus des troubles sensori-moteurs, des déficits des fonctions cognitives (attention, mémoire, fonctions exécutives, orientation topographique, etc.). Ces déficits sont parfois extrêmement invalidants et constituent un obstacle à la reprise d'une activité sociale ou professionnelle. De nombreux programmes de rééducation ont alors été développés notamment dans les domaines de l'attention, de la mémoire, des fonctions exécutives et de l'orientation topographique. D'une façon générale, les résultats de ces études peuvent être regroupés en 4 grands ensembles : absence de progrès constaté ; progrès limités à la fonction entraînée; progrès généralisés à d'autres fonctions ; progrès constatés avec répercussions sur la vie quotidienne. Mais le constat est que peu d'études observent une amélioration de la qualité de vie du patient après un réentraînement des fonctions cognitives déficitaires. L'un des éléments d'explication concerne la faible validité écologique des outils utilisés. En effet, les situations d'évaluation et de remédiation n'ont souvent pas de lien direct avec les situations auxquelles sont confrontés les patients dans la vie quotidienne et dans lesquelles ils éprouvent des difficultés (faire la cuisine, suivre une conversation, faire le marché, se souvenir de rendez-vous, etc.). De ce fait, les outils utilisés ont comme principale limite le caractère statique de la présentation du matériel, la faible interactivité (le sujet est le plus souvent passif et n'interagit pas avec la situation), l'absence de multi sensorialité (le matériel utilisé sollicite le plus souvent une seule modalité sensorielle), etc. La réalité virtuelle (RV) peut répondre à ces limites en proposant des mondes virtuels élaborés favorisant la multi sensorialité, l'interactivité, l'aspect

dynamique, l'immersion, etc. tout en permettant un contrôle expérimental rigoureux (temps de présentation, nombre d'objets, d'avatars, de présentations multimodales, etc.). Dans le champ de la neuropsychologie cognitive, il apparaît alors que l'un des enjeux majeurs des années à venir concerne l'application de ces techniques à l'évaluation et à la rééducation cognitive.

I.2 Quelques exemples

Cette partie présente quelques recherches effectuées dans le domaine de la neuropsychologie. Des recherches utilisant la RV donnent déjà des résultats prometteurs notamment dans les domaines de l'attention (Adams, Finn, Moes, Flannery et Rizzo, 2009), de la mémoire (Brooks, Rose, Potter, Jayawardena et Morling, 2004), des fonctions exécutives (Marié, Klinger, Chemin et Josset, 2003 ; Marié, Chemin, Lebreton et Klinger, 2005), ou de l'orientation topographique (Brooks, McNeil, Rose, Greenwood, Attree et Leadbetter, 1999).

Adams et *al.* (2009) ont étudié les processus attentionnels d'enfants souffrant de TDAH (trouble du déficit de l'attention avec hyperactivité) à l'aide d'une salle de classe virtuelle composée de bureaux, d'un tableau, d'une fenêtre, de portes, etc. et sur lesquels des éléments perturbateurs peuvent apparaître. Les enfants étaient plongés dans l'EV à l'aide d'un dôme et d'un casque HMD (cf. Figure 3.2) et devaient se concentrer sur une tâche continue de performance. Un système d'enregistrement a permis d'étudier et de préciser le comportement de ces enfants en les comparant à ceux d'enfants ne présentant pas de troubles attentionnels.



Figure 3.2 : À gauche la classe virtuelle, à droite les interacteurs permettant d'agir sur la classe virtuelle (Source Adams et *al.*, 2009).

Brooks et *al.* (2004) ont évalué la mémoire prospective de patients cérébro-lésés dans un EV composé d'un bungalow de 4 pièces, dans lequel les sujets se déplaçaient à l'aide d'un joystick et d'une souris. Différentes tâches sont réalisées telles que déménager des objets d'une pièce à une autre, étiqueter des cartons, appuyer sur un bouton toutes les cinq minutes pour ouvrir la porte aux déménageurs, etc. Les auteurs ont souligné l'intérêt de ce type d'environnement pour disposer d'une évaluation « écologique » de la mémoire.

Les capacités de planification ont été étudiées via la RV chez des patients parkinsoniens (Marié et *al.*, 2003 ; 2005). Les auteurs ont élaboré un environnement de type supermarché virtuel et une tâche basée sur le principe du test des commissions (Martin, 1972). Les variables telles que le temps, les trajectoires, les actions ont été enregistrées. Cet environnement a permis de préciser les difficultés de planification que rencontrent ces patients, une confrontation de ces difficultés par les patients et une plus grande motivation dans le déroulement de la tâche.

Enfin, Brooks et *al.* (1999) ont entraîné une patiente amnésique à trouver son chemin dans leur unité de rééducation au moyen d'un environnement 3D. Les auteurs montrent que l'apprentissage en situation virtuelle est plus efficace qu'en situation réelle, du fait certainement des possibilités de répétition du parcours, de l'absence d'informations distrayantes, etc. caractérisant l'environnement virtuel.

II. Le transfert de connaissances du virtuel vers le réel

La RV semble être une technologie adaptée à l'évaluation et la remédiation de troubles cognitifs et/ou moteurs mais une question essentielle à l'utilisation de la RV comme média d'apprentissage ou support rééducatif concerne le transfert virtuel-réel : finalement, les acquisitions faites en EV sont-elles transférées, utilisées dans le réel ? La question est importante car elle permettrait de proposer à terme, pour les patients, des entraînements répétés à domicile, et ce, de manière adaptable au fil des progrès de la personne grâce à la surveillance et le contrôle du thérapeute.

De manière générale, la méthodologie utilisée dans les études se déroulent en deux temps : les participants effectuent une tâche dans un EV et passent ensuite une batterie de tests afin d'évaluer ce qui a été appris dans le virtuel et transféré dans le réel. Dans le cadre de l'étude de la cognition spatiale, de nombreux auteurs se sont attelés à la question du transfert et montrent que les informations acquises en virtuel sont similaires à celles acquises en réel (Waller, Hunt et Knapp, 1998; Wallet et *al.*, 2008 ; 2009 ; 2010 ; 2011 ; Peruch et Wilson, 2004). Par contre, la plupart des auteurs s'accordent à dire que différents facteurs internes ou externes peuvent influencer ce transfert. Nous allons donc décrire dans cette partie les

différentes expérimentations qui ont permis de déterminer l'influence de ces facteurs sur le transfert de connaissances du virtuel au réel.

II.1 Facteurs influençant les acquisitions spatiales de connaissances en RV

Les facteurs internes concernent les variables psychologiques du sujet, alors que les facteurs externes concernent les variables relatives à l'application de réalité virtuelle. Nous allons nous intéresser d'abord à 4 facteurs internes reconnus comme susceptibles d'influencer le transfert de connaissances spatiales du virtuel au réel puis nous aborderons les facteurs externes (Darken, Allard et Achille, 1998).

II.1.1 Facteurs internes

Pour Cutmore, Hine, Maberly, Langford et Hawgood (2000), les différences individuelles représentent un facteur de nuisance dans l'élaboration d'un système de RV et affectent plus ou moins les résultats d'apprentissage de connaissances spatiales dans un EV (cf. Figure 3.3). Dans cette partie, nous allons nous intéresser à: l'âge, le sexe, les habiletés spatiales et l'expérience en jeu vidéo.

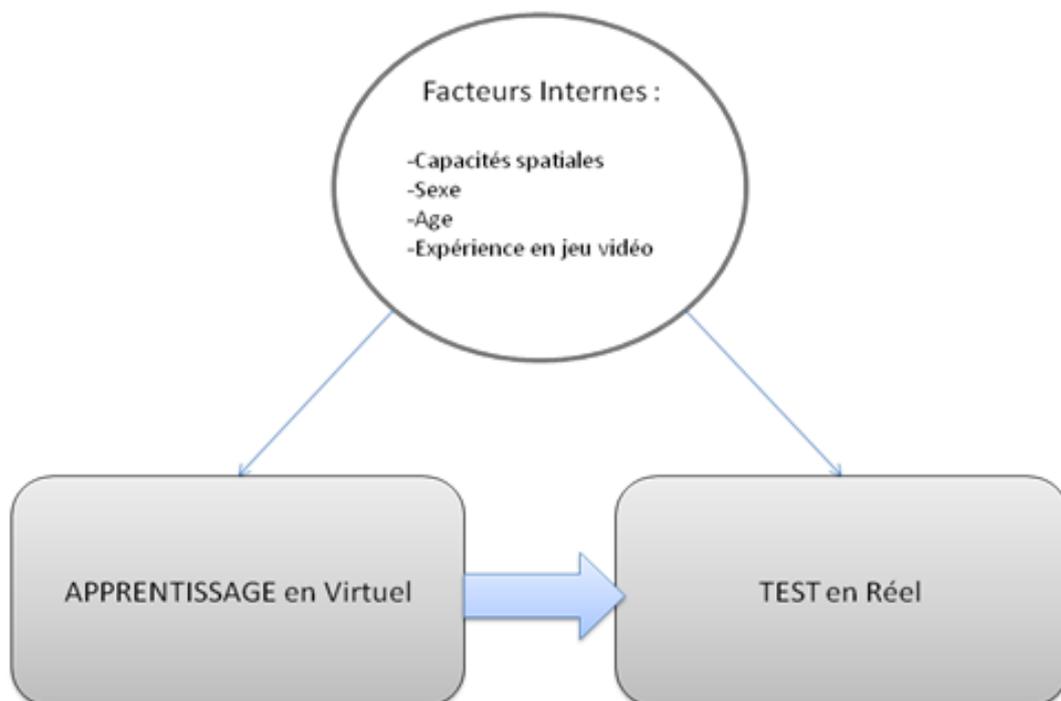


Figure 3.3 : Transfert virtuel/réel et facteurs internes influençant sa qualité.

II.1.1.1 Age

Dans sa récente revue de question, Moffat (2009) rapporte les études montrant que l'âge affecte d'une part, les capacités spatiales, tout comme les fonctions exécutives, l'attention, la mémoire verbale, visuelle, la mémoire de travail, la vitesse de traitement, etc., et d'autre part les performances spatiales dérivées des systèmes RV. Précisément, les personnes âgées mettent plus de temps à résoudre un problème spatial, traversent de plus longues distances, et font plus d'erreurs de mémoire spatiale comparées à une population plus jeune (eg., Moffat, Zonderman et Resnick, 2001). Et, dans cette même étude, il est montré que les performances spatiales étaient positivement corrélées aux tests de rotation mentale, ainsi qu'aux pré-tests de mémoire visuelle et verbale. Ces corrélations suggèrent que le déclin avec l'âge des performances en RV serait multi-déterminé, c'est-à-dire en lien avec certains processus cognitifs détériorés avec l'âge. Cushman, Stein et Duffy (2008) ont étudié 4 groupes de participants (population jeune, population âgée, les patients atteints de troubles cognitifs légers et des patients atteints de la maladie d'Alzheimer) sur une tâche de navigation réalisée en EV ou réel. Ils montrent que la stratégie consistant à apprendre des points de repères dans un environnement pour se repérer semblent équivalente que ce soit en environnement réel ou virtuel, suggérant que les mécanismes cognitifs impliqués dans les apprentissages spatiaux soient similaires. Par contre, les résultats montrent un déclin des performances spatiales concernant la population âgée, les âgés atteints de troubles cognitifs légers (i.e. Middle Cognitive Impairment) et les patients atteints de la maladie d'Alzheimer comparés au groupe jeune. Les personnes atteintes de troubles cognitifs légers ou de la maladie d'Alzheimer montrent des difficultés de rappel de même étendue, après un apprentissage en EV ou en réel, suggérant encore une similitude des processus impliqués dans les deux environnements. Les personnes âgées et les patients Alzheimer montraient également les mêmes difficultés dans l'association de scènes visuelles à un lieu. Ces similitudes virtuel-réel sont pour les auteurs le témoin d'une similitude des processus spatiaux impliqués obtenue grâce à la forte validité écologique des technologies VR pour la cognition spatiale. Dans une autre étude, Mahmood et al. (2009) ont étudié l'impact de la composante motrice sur les performances spatiales en EV en utilisant un joystick et 3 tâches distinctes: une tâche d'estimation de distances de reproduction de trajet impliquant des mouvements translationnels ; une tâche de rotation angulaire impliquant uniquement des mouvements rotationnels ; et enfin, une tâche de complétion de triangle impliquant des mouvements rotationnels et translationnels. Les différences concernant l'âge ne sont pas observées sur l'estimation de rotation ni sur l'estimation de courtes distances (elles s'accroissent tout de

même sur de longues distances). Par contre, des différences liées à l'âge sont observées sur la tâche de complétion de triangle, et ce, en faveur de la population jeune. Pour les auteurs, cela montre que les représentations mentales de nature multiple (mouvements translationnels et mouvements rotationnels) seraient dégradées avec l'âge alors que la même intégration basée sur un seul type de mouvement serait préservé. Notons que cette difficulté pourrait être en lien avec les troubles musculo-squelettiques des âgés (arthrite), sources de difficultés dans la préhension d'un objet et qui pourrait nuire à l'amplitude des mouvements dans la manipulation des interfaces des systèmes de RV (McGee, 2000).

Au total, les effets de l'âge rapportés sur les performances spatiales obtenues à partir d'un dispositif RV sont expliqués en termes de déclin lié à l'âge des mécanismes cognitifs sollicités dans la navigation (en particulier, planification, contrôle de l'exécution du trajet, et mémoire spatiale) mais aussi en termes de défaillances des processus sensori-moteurs en lien avec le mode d'interaction proposé dans le dispositif. Notons toutefois que ces hypothèses explicatives reposent aujourd'hui sur l'observation de liens corrélationnels et mériteraient d'être étayées par des plans expérimentaux réellement inférentiels (ie. testant réellement un lien de causalité).

II.1.1.2 Sexe

De manière générale, les hommes auraient de meilleures performances dans l'acquisition de connaissances spatiales en EV. Moffat, Hampson et Hatzipantelis (1998) ont montré que les hommes mettaient moins de temps à trouver la sortie d'un labyrinthe virtuel. De plus, le nombre d'erreurs de mémoire spatiale (nombre de fois où le sujet revenait sur ses pas) étaient inférieurs à ceux des femmes, suggérant un avantage des hommes pour la navigation en environnements virtuels⁷. Dans le cadre d'analyse des représentations spatiales offert par le modèle L-R-S, Castelli, Latinicorazzini et Geminiani (2008) montrent également des différences significatives concernant le genre sur des tâches allocentriques (niveau Survey) en faveur des hommes, mais pas de différences concernant les tâches impliquant le niveau Route. Néanmoins, Cutmore et *al.* (2000) avaient rapporté que même si les deux sexes utilisent des points de repères, les hommes les utilisent plus efficacement. A la lumière de ces premiers résultats, il apparait que les stratégies de navigation allocentriques utilisées en

⁷ Notons que Driscoll, Hamilton, Yeo, Brooks, et Sutherland (2005) ont étudié l'influence de l'âge et du genre à l'aide d'une modélisation virtuelle de la Water Morris Task et du test de rotation mentale de Venderberg, sur une population âgée de 20 à 90 ans. Les résultats montrent un déficit sur les deux tâches pour les âgés, et également de meilleurs résultats pour les hommes.

environnement réel par les hommes et le cadre égocentrique chez les femmes se retrouvent dans les EV, avec cependant des difficultés ajoutées en EV sur les stratégies egocentriques pour les femmes. Cette dernière conclusion est confortée par les études plus récentes. En 2005, Tlauka, Brolese, Pomeroy et Hobbs ont étudié l'influence du genre sur l'acquisition de connaissances spatiales dans un EV. Les utilisateurs étaient placés devant un écran de 19 pouces, et utilisaient le clavier pour naviguer dans deux centres commerciaux virtuels dont l'agencement spatial était différent. Ils évaluent alors le transfert à l'aide d'une tâche de wayfinding, d'estimation des directions et de distances, et une tâche de remplacement d'objets sur une carte. Les résultats montrent une supériorité en faveur des hommes sur la plupart des tâches d'évaluation du transfert, suggérant que comme dans les environnements réels, les hommes ont des capacités d'apprentissage spatiaux supérieurs aux femmes. Une autre expérience de Chen et *al.* en 2009 montre également des différences en faveur des hommes sur une tâche de wayfinding après apprentissage en EV. Pour Lawton (1994) et Waller et *al.* (1998), la compréhension des caractéristiques spatiales d'un EV serait plus difficile pour les femmes que pour les hommes. En effet, il est avancé que la moindre richesse visuelle des EV (comparé au réel) serait plus favorable aux stratégies allocentrées préférentiellement mises en œuvre par les hommes. A cela, l'expérience des ordinateurs (Waller et *al.*, 1998 ; Moffat et *al.*, 1998 ; Richardson et *al.*, 2011) et la fréquence d'utilisation des interfaces (Waller, 2000) sont mises en avant comme facteurs explicatifs. De manière très intéressante, Waller et *al.* (2001) montrent dans un labyrinthe virtuel que les femmes étaient significativement plus désorientées que les hommes avec en corolaire de grandes difficultés à utiliser la métaphore de déplacement du joystick. Pour ces auteurs, les différences homme-femme sur les performances spatiales mesurées à partir d'un EV seraient en partie dépendantes des différences de maîtrise du joystick.

Là encore, en conclusion, les effets de genre rapportés sur les performances de navigation obtenues à partir d'un dispositif RV sont expliqués, d'une part, en termes de processus cognitifs différemment mis en œuvre par les hommes et les femmes (ie., préférences allocentrées pour l'homme et préférences égocentrées pour la femme), et d'autre part, en termes de processus sensori-moteurs en lien avec le mode d'interaction proposé dans le dispositif.

II.1.1.3 Habilités spatiales

Moffat et *al.* (1998) ont été parmi les premiers à montrer les relations étroites entre performances de navigation en EV et habilités spatiales. En effet, ils rapportaient que les tests spatiaux de type papier crayon étaient corrélés au temps, au nombre d'erreurs dans une tâche de labyrinthe (corrélation non observée pour les tests papiers-crayons verbaux). Plus récemment, Castelli et *al.* (2008) ont montré que les sujets ayant une haute performance au test des Cubes de Corsi (mesurant l'empan visuo spatial droit et inverse) ont moins de difficulté à se remémorer un parcours et le rappellent plus rapidement. Ces mêmes auteurs observent également une corrélation entre le test de rotation mentale de Venderberg et Kuse (1978) et un test de rappel de position de point de repères. Pour ces auteurs, cette tâche fait appel à des processus de haut niveau qui nécessitent des rotations de l'environnement et des objets dans l'espace. Selon le modèle L-R-S, cette dernière observation suggère que les habilités visuo-spatiales sont étroitement liées à la qualité des représentations allocentrées et égocentrées construites à partir d'un EV. Ces résultats sont confortés par Cutmore et *al.* (2000) qui montrent également que les sujets ayant de hautes habiletés spatiales au test WAIS-R (Wechsler Adult Intelligence Scale- Revised ; cette échelle délivre une mesure du quotient intellectuel décomposable en deux sous scores : l'un verbal et l'autre visuo-spatial) de Wechsler (2001) ont de meilleures performances de navigation dans un environnement virtuel. Aussi, dans cette étude, il est rapporté que les tests papiers-crayons évaluant la visualisation spatiale et l'orientation spatiale sont corrélés avec l'acquisition de connaissances spatiales allocentrées et égocentrées en EV. En d'autres termes, de bonnes habiletés spatiales permettraient d'avoir une représentation allocentrique plus élaborée et des représentations égocentrées plus fines des EV. Ces résultats en EV concordent assez bien avec ceux obtenus en environnement réel. Par exemple, Lawton (1994) avait observé que la stratégie d'orientation est corrélée positivement aux habiletés spatiales et négativement corrélée à l'anxiété face à un environnement réel. Par contre, cet auteur ne trouvait pas de relation entre les habiletés de rotation mentale et les stratégies mises en place lors du wayfinding. A l'inverse, récemment, Nori, Grandicelli et Giusberti (2009) rapportent que les tests spatiaux de résolutions de problèmes, de rotation mentale ainsi que les Cubes de Corsi permettent d'évaluer les processus impliqués dans les tâches de wayfinding (les sujets après avoir effectué un parcours dans un environnement réel, devait le refaire du point d'arrivée vers le point de départ).

En résumé, les habilités spatiales jouent un rôle important dans l'acquisition de connaissances spatiales (allocentrées et égocentrées) dans un EV. Par contre, aucune des

études réalisées ne renseigne le rôle des liens entre habilités spatiales et processus sensori-moteurs en lien avec le mode d'interaction sur la performance de navigation ou encore sur la qualité des connaissances spatiales construites à partir d'un EV. Notons encore que ces relations entre habilités spatiales et navigation en EV sont encore pour l'essentiel basées sur de liens corrélacionnels et non inférentiels.

II.1.1.4 Jeux vidéos/ outil informatique

L'expérience en jeu vidéo et outil informatique ont souvent été étudiés en les reliant aux tests papiers crayons évaluant les habilités spatiales (Terlecki et *al.*, 2005 ; Feng et *al.*, 2007 ; Boot et *al.*, 2008 ; Pepin et Dorval, 1988). En règle générale, les auteurs rapportent que les habiletés spatiales sont meilleures chez les joueurs les plus expérimentés (*cf. infra*, chapitre I sur la cognition spatiale) et que l'exposition aux jeux vidéo peut améliorer les habiletés spatiales sur des tests de type « papier crayon ». Concernant les quelques études utilisant la RV, il est indiqué que les apprentissages visuo-spatiaux sont en partie médiés par l'expérience des jeux vidéos via l'étude des liens corrélacionnels entre performances RV et expérience en jeux vidéo, ou encore en introduisant comme co-variable le nombre d'année de pratique des jeux vidéo (Waller et *al.*, 2001; Moffat et *al.*, 1998; Richardson et *al.*, 2011; Castelli et *al.*, 2008). Cela révèle le caractère encore exploratoire de ce champ d'étude.

Une des études se rapprochant du transfert concerne celle de Richardson et *al.* (2011) qui révèlent que l'expérience en jeu vidéo permet de mieux apprendre des informations spatiales dans le virtuel, mais que ce facteur est peu relié aux performances d'apprentissage et de restitution en réel. En effet, l'expérience en jeu vidéo corrélait avec les erreurs de pointage et le temps de réponse lors d'un apprentissage et d'une restitution seulement en EV. Ainsi les jeux vidéo permettraient de développer une habileté à construire correctement une représentation spatiale durant la navigation en EV. L'avantage des joueurs uniquement en EV est expliqué par les auteurs par la plus grande automatisation de la coordination main-œil. Cette dernière améliorerait l'assimilation des informations visuelles sans interférer sur les processus cognitifs nécessaires à l'acquisition de connaissances spatiales en EV. Pour Richardson et *al.* (2011), le jeu vidéo influencerait les habiletés perceptuelles et cognitives dans le domaine de la vision. Pour Castelli et *al.* (2008), le temps d'apprentissage d'une interface doit être pris en compte car c'est un facteur qui influence les performances dans les recherches impliquant la cognition spatiale à l'aide des technologies de la RV.

Ainsi, quelques recherches étudient l'influence de l'utilisation des jeux vidéo ou des outils informatiques mais aucune hypothèse en termes de processus cognitifs (représentation

allo- et égocentrées) n'est actuellement disponible. A cela, l'hypothèse sensori-motrice de Richarson et *al.* (2011) sur le meilleur câblage main-œil reste à être démontrée.

Au final, il apparait que les facteurs internes contribuent à part entière à l'acquisition des connaissances spatiales à partir d'un EV. Et, qu'il s'agisse de l'âge, du genre, des habilités visuo-spatiales ou encore de la pratique des jeux vidéo, à chaque fois, les différences observées en termes de connaissances spatiales sont expliquées comme une meilleure efficacité de la composante cognitive et/ou de la composante motrice toutes deux impliquées dans l'interaction avec l'EV.

II.1.2 Facteurs externes

Les facteurs externes concernent l'ensemble des facteurs liés à la simulation virtuelle ; ils correspondent à ce que délivre la technologie à l'utilisateur. Il faut donc que l'utilisateur comprenne l'EV, sa composition, ses éléments, l'utilisation des interfaces et des interactions proposées. Ici, nous allons passer en revue différents facteurs externes tels que le type d'EV proposé et leurs caractéristiques, le mode d'exploration et l'importance des interfaces et des stimulations sensorielles associées (visuelles, vestibulaires et proprioceptives) sur l'apprentissage et la restitution d'informations spatiales acquises en EV (Figure 3.4).

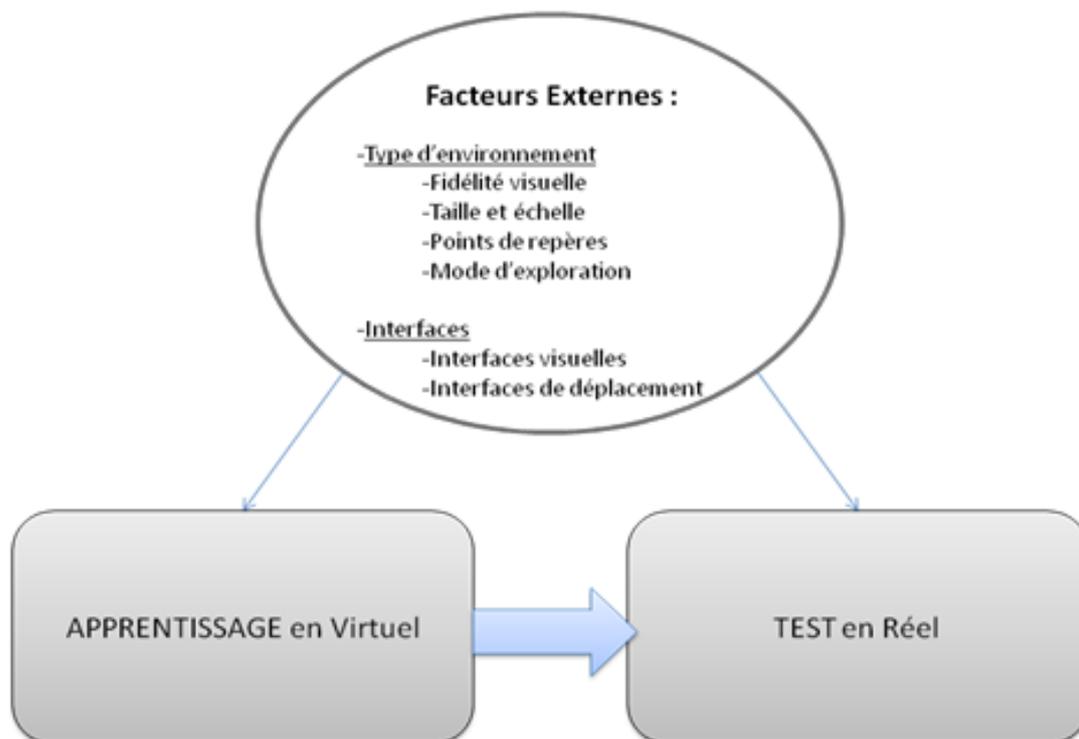


Figure 3.4 : Transfert virtuel/réel et facteurs externes influençant sa qualité.

II.1.2.1 Type d'environnement

Différents types d'EV sont utilisés pour évaluer la cognition spatiale : des labyrinthes (eg., Waller et *al.*, 2001) ; des environnements réalistes tels que des répliques virtuelles de supermarché (Ruddle et *al.*, 2011a, Meijer et *al.*, 2009), de buildings (Grant et Magee, 1998),de villes (Wallet et *al.*, 2008,2009,2010,2011), de campus (Peruch et Wilson , 2004), de forêts (Bakker, Werkhoven et Passenier, 1999) ou de restaurant (Sancaktar et Demirkan, 2008), etc. Ces environnements sont plus ou moins détaillés, ont des points de repères qui diffèrent d'un environnement à un autre, ont des tailles, des échelles, des champs de visions et une qualité visuelle variables.

II.1.2.1.1 Fidélité visuelle

La fidélité visuelle a été très étudiée, sauf dans le cadre de tâches de transfert virtuel/réel d'informations spatiales. De nombreuses définitions co-existent. Par exemple, Stankiewicz et Kalia (2007) détermine la fidélité visuelle comme le niveau de détails des points de repères : ils peuvent être structurels, c'est-à-dire des formes géométriques sans textures, ou alors pictural c'est-à-dire texturés à l'aide de photos. Ces auteurs montrent que les points de repères structurels sont mieux reconnus du fait du nombre d'informations moins important à retenir comparé à un environnement riche et détaillé. Dans une autre expérience, Waller et *al.* (2001) étudient la fidélité visuelle à l'aide de 3 labyrinthes bien distincts : un EV avec murs transparents, un EV avec murs texturés et le même labyrinthe en environnement réel. Les sujets naviguaient dans les environnements virtuels devant un écran d'ordinateur classique à l'aide d'un joystick. Ils devaient ensuite effectuer une tâche de transfert de pointage d'objets dans la version réel du labyrinthe. Les résultats montrent que les sujets ont de meilleures performances dans le labyrinthe avec murs transparents qu'avec les murs texturés. Pour les auteurs, voir à travers les murs permettrait de mieux élaborer la représentation configurationnelle de l'EV. En 2004, Lessels et Ruddle ont également montré de meilleures performances lorsque l'EV était texturé. Dans une recherche plus récente, Meijer et *al.* (2009) étudient la fidélité visuelle à l'aide de deux supermarchés virtuel : un présentant une qualité photoréaliste et un autre non photoréaliste. Le clavier et la souris étaient utilisés pour naviguer dans l'EV et un écran de 42 pouces permettait la restitution visuelle. Deux tests évaluant la composante Route (connaissance égocentrée) et deux autres la composante Survey (connaissance allocentrée) ont été utilisés. Les résultats montrent que la fidélité visuelle proposée dans l'EV photoréaliste permettait d'avoir de meilleurs résultats, mais seulement sur les tests égocentriques (de type Route). Enfin, Wallet et *al.* (2011) ont

étudié le mode d'exploration actif vs passif selon la fidélité visuelle sur le transfert de connaissances spatiales du virtuel au réel. Les sujets étaient assis à 2 mètres d'un grand écran (2x1,88 mètres). La tâche était simple : l'expérimentateur montrait un parcours virtuel d'un quartier de Bordeaux que le sujet devait apprendre soit en condition virtuelle active (à l'aide d'un joystick), soit en condition virtuelle passive. L'EV était soit texturé, soit non texturé. Ils devaient ensuite restituer le parcours selon 3 tâches : une tâche de wayfinding, une tâche de croquis du plan du parcours (connaissances allocentrées) et une tâche de classification de photos (connaissances égocentrées). Les résultats montrent que la fidélité visuelle améliore les performances pour la tâche de wayfinding et la tâche classification de photos (connaissances égocentrées) lorsque l'EV est détaillé, et quel que soit le mode de navigation utilisé. Par contre, un EV détaillé n'améliore pas le croquis du parcours (connaissances allocentrées) sauf si la navigation a été physiquement active. Ainsi, ces résultats indiquent que la fidélité visuelle améliore le transfert de connaissances spatiales du virtuel au réel pour le wayfinding, mais également les performances aux tâches faisant intervenir les connaissances spatiales égocentrées selon le modèle L-R-S.

Concernant l'influence des interfaces, Ruddle et Lessels (2006) se sont intéressés à une tâche de recherche d'objets dans un EV visuellement détaillé ou appauvri. Les interfaces étaient de 3 types : marche active à l'aide d'un HMD permettant d'orienter le point de vue à l'aide des mouvements de tête (condition avec informations vestibulaires de rotation et de translation), un HMD pour orienter le point de vue et un joystick pour les déplacements de translation (condition délivrant uniquement des informations vestibulaires de rotation), ou alors une souris et un clavier devant un ordinateur de bureau (condition sans information vestibulaire). Les résultats montrent de meilleures performances en condition de marche (informations vestibulaires de rotation et de translation présentes) suggérant que l'interface utilisée et notamment les informations vestibulaires sont plus importantes que la qualité visuelle de l'environnement.

En résumé, la fidélité visuelle jouerait un rôle important dans l'acquisition de connaissances spatiales (en particulier, de nature égocentrées) dans un EV. Aussi, l'importance des points de repères, leur qualité visuelle apparaissent primordiaux pour optimiser le transfert de connaissances du virtuel au réel pour les tâches de navigation de type wayfinding. Et, la dernière étude présentée signale une préséance de l'activité motrice sur la richesse/fidélité visuelle de l'interface en termes d'amélioration des performances spatiales (ie., localisations d'objets).

II.1.2.1.2 La taille et l'échelle de l'environnement

Ruddle et *al.* (2011a) définissent deux notions qui caractérisent un environnement : l'« *extent* » correspond à la taille de l'environnement et le « *scale* » à l'échelle. Le « *small extent* » correspondrait à un environnement de petite taille alors que le « *large extent* » à un environnement de grande taille. Siegel (1981) note d'ailleurs qu'il est plus facile d'apprendre des environnements de petite taille car ils ne nécessitent pas la construction de carte cognitive. Un « *small scale* » est un environnement qui n'a pas de barrière visuelle et qui permet de percevoir l'ensemble des détails visuels du même point de vue alors qu'un « *large scale* » ne permet pas de percevoir le détail des informations visuelles du même point de vue. Ainsi des EV peuvent être « *large extent* » et « *large scale* » comme une ville par exemple, mais certains environnements comme un parking ou un champ sont qualifiés de « *large extent* » et de « *small scale* » puisqu'ils correspondent à un grand espace où l'ensemble des informations spatiales sont perçues depuis le même point de vue. Par contre, un bureau de type « *open space* » serait qualifié de « *large scale* » et « *small extent* » puisque l'environnement ne permet pas de distinguer les détails visuels du même point de vue alors que la taille de l'environnement est petite. Ces définitions semblent importantes notamment pour l'étude des informations sensorimotrices nécessaires à l'intégration d'un chemin car plus la taille de l'environnement augmente et plus les erreurs d'intégration de chemin sont importantes (Loomis, Klatzky, Golledge et Philbeck, 1999). Dans leur expérience (que nous avons déjà abordée), Ruddle et *al.* (2011a) évaluent l'acquisition de connaissances spatiales à l'aide de deux supermarchés de taille différentes (un grand et un petit). Dans un premier temps, les sujets devaient rechercher des cibles dans n'importe quel ordre puis revenir à leur point de départ. Dans un second temps, les sujets devaient retrouver les cibles dans l'EV puis estimer la direction de chaque autre cible ainsi que le point de départ. Plus, l'environnement était de grande taille, plus les sujets avaient des difficultés à se repérer dans l'espace. Néanmoins, les informations vestibulaires, kinesthésiques et le flux visuel délivrés dans leur condition marche (comparé aux autres conditions moins fournies en information vestibulaire) ont permis d'optimiser les performances quelle que soit la taille de l'EV. Et, dans tous les cas, les meilleures performances spatiales étaient obtenues en situation de couplage « petite taille » de l'EV et informations sensorimotrices, comme précédemment montré par Ruddle et Lessels (2006).

Une fois de plus, ces quelques études sur le facteur « taille et échelle de l'EV » révèlent la double influence des processus cognitifs spatiaux et des processus sensori-moteur induits par le mode d'interaction offert par le dispositif

II.1.2.1.3 Les points de repères

Généralement, les points de repères en EV se réfèrent aux 5 distinctions (points de repères, nœuds, quartiers, chemins et bords) d'un environnement urbain comme défini par Lynch (1960). Les points de repères, leur qualité visuelle, leur signification semblent importantes pour l'acquisition de connaissances en EV. Pour Ruddle et *al.* (2011), deux types de points de repères en EV peuvent être définis :

- les points de repères locaux sont visibles seulement depuis le point de vue de l'utilisateur, permettent et optimisent la création de représentations spatiales de type égocentrique et facilitent l'apprentissage spécifique d'un chemin.
- les points de repères globaux sont visibles depuis n'importe quel point de vue et permettent de trouver des informations d'orientation de type cardinal (nord, sud, est, ouest). Ils permettent également d'optimiser la construction de représentations spatiales de type allocentriques en facilitant l'apprentissage des directions générales d'une route.

Ces auteurs ont étudié l'effet des points de repères et des informations vestibulaires et proprioceptives sur les connaissances de configuration d'un chemin. Dans la condition virtuelle, les sujets étaient installés devant un écran d'ordinateur, et 4 EV ont été développés : un contenant des points de repères locaux, un autre avec des points de repères globaux, un contenant les deux types de point de repères et un dernier ne contenant aucun point de repère supplémentaire (cf. Figure 3.5). La condition avec points de repères locaux a amélioré l'acquisition de connaissances spatiales contrairement à la condition avec points de repères globaux. De plus, il semble que les repères globaux soient moins utilisés que les repères locaux. Il est à noter cependant que l'alliance des repères locaux et globaux donne paradoxalement des résultats contradictoires.

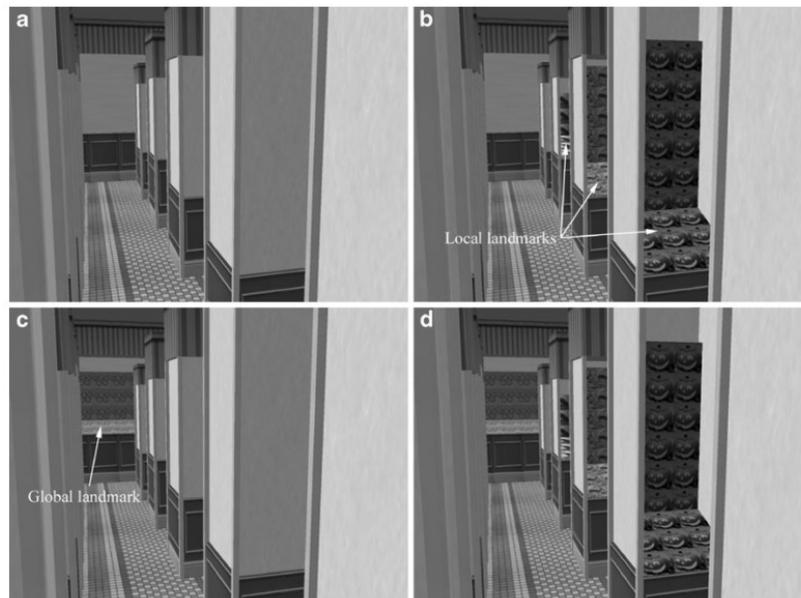


Figure 3.5: Ruddle et *al.* (2011). Impression écran des 4 EV : a) pas de points de repères supplémentaires b) points de repères locaux c) points de repères globaux d) points de repères locaux et globaux.

Dans une expérience à l'aide d'un EV plus simple, Riecke, Van Veen et Bühlhoff (2002) montrent que l'ajout de points de repères visuels temporairement disponibles dans une tâche de complétion de triangle (ie., connaissances égocentrées) n'améliorait pas les performances comparés à des points de repères fixes. Sinai, Krebs, Darken, Rowland et Mccarley (1999) rapportent également que certaines textures comme les briques permettent d'améliorer la perception des distances. Par contre, les textures d'herbes, tapis ou les textures abstraites ne favorisent pas cette perception.

Ainsi, les points de repères et leurs qualités visuelles semblent importants, notamment pour les EV de grandes tailles. Néanmoins, il reste à déterminer quels mécanismes ils favorisent (eg., construction des connaissances égocentrées ?) et quels liens ils entretiennent avec les processus sensori-moteurs.

II.1.2.2 Mode d'exploration

En 1997, Wilson et *al.* (1997) étudient le mode d'exploration selon 4 modalités : Physique, psychologique, passif, actif. Ainsi, un mode d'exploration physiquement actif permet au sujet d'agir avec l'environnement alors que le mode d'exploration physique passif consiste à visualiser un EV sans pouvoir agir dessus. Le mode d'exploration psychologiquement actif permet au sujet d'explorer lui-même l'environnement alors que le mode d'exploration psychologiquement passif consiste à suivre des directions indiquées par l'expérimentateur ou un ordinateur. Les auteurs proposent d'étudier des combinaisons de ces

4 modalités dans une tâche d'orientation spatiale à l'aide d'un clavier pour la condition physique active. Les sujets exploraient librement un environnement. Puis l'expérimentateur, dans un ordre aléatoire, déplaçait le point de vue du sujet vers 3 cibles différentes. Le sujet devait alors indiquer l'orientation des deux autres cibles. Ils devaient ensuite dessiner un plan de l'EV exploré. Les résultats de cette expérience montrent qu'aucune différence n'a été trouvée concernant le mode d'exploration physique (avec ou sans clavier) ni pour le mode d'exploration psychologique (possibilité de naviguer librement ou non). Dans une seconde expérience, Wilson et *al.* étudient la comparaison active passive dans un environnement plus simple, en utilisant une tâche où les sujets devaient retrouver des objets le plus rapidement possible en termes de temps. Encore une fois, aucune différence sur le mode de navigation ne fut trouvée. Ce débat passif/actif est étudié depuis de nombreuses années, certains suggérant de meilleurs résultats lorsque l'on interagit physiquement avec l'environnement (Wallet et *al.*, 2008; 2009;2010;2011; Peruch et *al.*, 1995) alors que d'autres montrent une supériorité de la condition passive, ou alors aucune différence (Wilson et *al.*, 1997; Wilson, 1999; Wilson et Peruch, 2002). Cependant, il est à noter que les différents auteurs utilisent des tâches de restitution et des interfaces qui peuvent être différentes ; il est alors difficile de conclure sur le mode de navigation vu que les facteurs internes et externes, les conditions d'apprentissage et d'interaction ne sont pas les mêmes. Par exemple, pour évaluer l'impact du mode d'exploration sur l'acquisition de connaissances spatiales, Wilson et *al.* (1997) utilisent un clavier pour se déplacer et évalue les capacités à l'aide d'une tâche d'orientation (mesures d'angle), de dessin et de recherche d'objets; ces auteurs ne montrent aucune différence entre passif/actif, alors que Peruch et *al.* (1995) utilisent des conditions de navigation passive, à l'aide de photos de l'environnement, ou active à l'aide d'un joystick et une tâche d'évaluation consistant à retrouver une cible par le chemin le plus court et montrent eux une supériorité de la condition active comparée aux conditions passives. Dans une autre expérience, Peruch et Wilson (2004) étudient la comparaison passive/active à l'aide d'un environnement virtuel du campus de Marseille. Les sujets devaient chercher 5 cibles et ensuite estimer les positions, orientations et distances de ces cibles. 2 groupes ont été constitués : un utilisant une souris 3D, et un en condition passive. Les résultats montrent que les informations spatiales transférées du virtuel au réel, notamment sur des tâches d'estimation de distances directes et relatives sont meilleures lorsque le sujet a navigué dans un environnement complexe à l'aide d'un mode d'exploration actif plutôt que passif. Par contre les tâches d'orientation sont plus précises en environnement réel que virtuel. Les auteurs donnent 3 explications à leurs résultats : 1) le campus réel est plus riche visuellement que sa modélisation virtuelle ; 2) les mouvements sont plus naturels dans l'environnement réel que dans l'environnement virtuel 3)

les informations vestibulaires et proprioceptives jouent sûrement un rôle dans l'apprentissage réel et ces informations ne sont pas présentes dans l'EV.

II.1.2.3 Les interfaces

Dans cette partie, nous allons nous intéresser aux recherches manipulant les interfaces visuelles, les interfaces sensorimotrices de déplacement relatives à l'apprentissage et à la restitution d'informations spatiales acquises à partir d'un EV.

Waller *et al.* (1998) définissent une interface fidèle comme le degré pour lequel les entrées et les sorties de l'interface sont similaires au monde réel. En fait, les interfaces proposent une simulation plus ou moins réaliste d'un déplacement qui est parfois similaire aux déplacements effectués en environnement réel (la marche par exemple) ou alors très éloignés comme le déplacement par le joystick ou le clavier/souris. Dans un premier temps, sont exposées les études relatives à l'impact des interfaces visuelles (même si il semble difficile de décomposer les interfaces visuelles et les interfaces motrices proposées dans chaque expérience du fait que certains interacteurs comme les casques immersifs (HMD) en plus de proposer une restitution visuelle, permettent également de tourner la tête dans l'environnement et proposent donc une interface motrice). Et, dans un second temps, notre intérêt sera porté aux études relatives à l'influence des interfaces de déplacement sur la cognition spatiale.

II.1.2.3.1 Les interfaces visuelles

II.1.2.3.1.1 L'angle de vue

Les interfaces visuelles peuvent se distinguer par leur résolution, leur taille d'écran, leurs angles de champ visuel, la présence ou non de stéréoscopie, etc. Par exemple, un point de vue de 180° permet de terminer une tâche de complétion de triangle avec plus de facilité (Riecke *et al.*, 2002) mais un angle de vue de 144° n'améliore que très peu les performances spatiales dans un environnement complexe comparé à un angle de vue de 48° (Lessels et Ruddle, 2004 ; Ruddle *et al.*, 2011a). Précisément, dans l'expérience de Riecke *et al.* (2002), les sujets étaient assis au centre d'une salle équipée d'un écran semi-cylindrique et contrôlaient leurs déplacements à l'aide d'une souris. Lessels et Ruddle (2004) ont eux étudié les différences de comportements entre l'utilisation d'une interface visuelle de grand champ (144°) (cf. Figure 3.6) à l'aide de 3 écrans d'ordinateur posés les uns à côté des autres et un petit champ visuel (48°) à l'aide d'un écran d'ordinateur simple. La tâche était assez simple : les sujets devaient retrouver des objets qu'ils avaient au préalable rencontrés. La navigation se faisait à l'aide du clavier et de la souris. Pour ces auteurs, si le comportement en RV se

rapproche d'un comportement réel, les résultats doivent être également similaires et ce comportement devrait être un prédicteur de performances. En condition « large point de vue », les sujets passaient leur temps à naviguer dans l'EV et assimilaient plus facilement la scène parce que l'EV était visible en une seule fois alors qu'en condition « petit point de vue », les sujets passaient plus de temps sur place pour planifier leurs recherches. Ainsi, le type d'affichage pourrait influencer sur le comportement navigationnel en EV.



Figure 3.6 : Interfaces visuelles de 144° proposées par Lessels et Ruddle (2004).

II.1.2.3.1.2 La taille de l'interacteur visuel

Tan, Gergle, Scupelli et Pausch (2006) montrent que les sujets en EV se souviennent plus facilement de la position d'un objet lorsqu'ils ont eu une projection sur un grand écran comparé à un écran de petite taille, à angle de vue égale. Ainsi, plus la taille de l'écran est grande, et mieux serait perçue les informations spatiales. De plus, les écrans de petite taille favoriseraient l'utilisation de stratégies de type exocentrique alors que les écrans de grande taille favoriseraient les stratégies de type égocentrique. Il est donc pertinent de sélectionner le type d'écran et sa taille selon le type d'informations spatiales que l'on souhaite acquérir.

II.1.2.3.1.3 Le cas du HMD Vs Ecran de Bureau

Waller et *al.* (1998) montrent que dans une tâche de transfert, le HMD ne permet pas de créer des représentations de type allocentré. Selon l'auteur, la nouveauté de l'interaction par le HMD et la non expertise dans cette interface pourrait demander un effort cognitif plus important gênant le développement de représentation spatiale élaborée. Ruddle et Peruch (2004) ont étudié le rôle des informations vestibulaires en utilisant 2 types d'interfaces : un HMD qui permettait aux utilisateurs de tourner physiquement leur tête dans l'EV et donc de recevoir les informations proprioceptives et vestibulaires des mouvements rotationnels de tête vs. une interface de type clavier souris devant un écran de bureau simple. Les résultats ne montrent aucune différence du type d'interface concernant les tests de type route (représentation égocentrée). Par contre, les sujets ayant navigué à l'aide du HMD avaient de moins bons résultats sur les tests de type survey (représentation allocentrée) que les sujets ayant navigué avec l'interface de type bureau. Pour ces auteurs, plus l'EV devient complexe, et plus les caractéristiques environnementales prennent le dessus sur les informations vestibulaires et proprioceptives. Notamment, la profondeur du champ visuel serait importante dans les EV de grande taille (comme une ville par exemple). Dans le même ordre d'idée, Richardson et *al.* (2011) montrent que les sujets étaient meilleurs dans l'acquisition d'informations spatiales lorsque l'environnement avait été appris à l'aide d'un écran d'ordinateur de bureau plutôt qu'avec un HMD (qui permettait les mouvements rotationnels de la tête) couplé à un joystick (permettant les déplacements de translation). Cette interaction peu courante dans le jeu vidéo pourrait expliquer ces résultats. Les travaux de ces auteurs les amènent à préconiser une interface de marche plutôt qu'un couplage HMD/Joystick (Ruddle et Lessels, 2006 ; Chance et *al.*, 1998). Ruddle, Payne et Jones (1999) comparent également l'utilisation du HMD (translation à l'aide d'un bouton) sur un écran d'ordinateur simple à une interface de déplacement de type clavier/souris dans un environnement de grande taille. Les distances parcourues étaient équivalentes quel que soit le type d'interface visuelle utilisée mais le HMD était supérieure en termes de vitesse d'exécution de la tâche de navigation. Pour ces auteurs, le HMD permet de bouger la tête naturellement et requiert moins d'effort pour effectuer ces mouvements alors que les utilisateurs de l'écran de type « desktop » utiliseraient une stratégie de type « tunnel de vision », c'est-à-dire qu'ils ne modifieraient que très peu leurs changements de direction. A cela, cette étude rapporte que l'estimation relative des distances était meilleure avec le HMD mais aucune différence sur les tâches d'estimation des directions n'a été obtenue suggérant que les informations proprioceptives et vestibulaires

proposées par le HMD ne sont pas suffisantes pour améliorer l'acquisition de connaissances spatiales de type route (connaissance égocentrée).

Au total, le HMD, même s'il présente l'avantage de stimuler les informations vestibulaires de rotation, limite l'acquisition des connaissances spatiales. En effet, les études révèlent une absence d'acquisition des connaissances allocentrées et une acquisition partielle des connaissances égocentrées. Cela souligne que l'angle de vue et la taille de l'écran portés par cet interacteur, ainsi que sa nouveauté gênent le couplage perception-action qui devrait normalement s'opérer en présence d'informations vestibulaires et proprioceptives (*cf. infra*, chapitre cognition spatiale et le rôle de la composante motrice).

Nous allons maintenant nous intéresser aux interfaces de déplacement avec un intérêt particulier porté aux tâches de transfert de connaissances du virtuel au réel.

II.1.2.3.2 Les interfaces de déplacement

De nombreuses interfaces de déplacement sont proposées : joystick, clavier/souris, marche directe, marche sur tapis roulant, etc. Nous proposons ici une revue des interfaces de déplacement et leurs influences sur l'acquisition et le transfert de connaissances du virtuel au réel. Bowman en 1999 détermine 3 composantes basiques dans le déplacement en EV : le choix de la direction/sélection de la cible (le moyen par lequel l'utilisateur indique la direction du mouvement ou la fin du mouvement), sélection de la vitesse/accélération (moyen par lequel l'utilisateur indique la vitesse et l'accélération du mouvement) et enfin les conditions d'entrées, c'est-à-dire le moyen par lequel l'utilisateur commence, continue et arrête le mouvement.

Le joystick est un interacteur courant et des plus utilisés pour les études concernant le transfert en EV. Wallet (2009) dans sa thèse estime qu'environ 1/3 des expériences utilisent un joystick pour se déplacer en EV. Pourtant, cette interface semble promouvoir parfois le transfert (Wallet et *al.*, 2008, 2009, 2010, 2011 ; Peruch et *al.*, 1995) et parfois non (Gaunet et *al.*, 2001 ; Carassa, Geminiani, Morganti et Varotto, 2003). Waller (2000) montre que l'utilisation d'un joystick dans une tâche d'apprentissage en EV requière différents niveaux attentionnels selon la personne, et ces niveaux mis en place interféreraient sur la capacité à se représenter l'EV. Pour eux, il est crucial que les participants aient la même capacité d'utilisation de l'interface afin que son utilisation devienne transparente et automatique.

II.1.2.3.2.1 La marche en EV

Différents couplages d'interacteurs permettent de simuler la marche en EV. Pour rappel, l'intérêt de la marche en EV est d'acquérir les informations vestibulaires et proprioceptives nécessaires à l'acquisition de connaissances spatiales (*cf. infra*, Chapitre cognition spatiale et le rôle de la composante motrice). Par exemple, certains auteurs (Ruddle et *al.*, 2011a ; Chance et *al.*, 1998) utilisent les propriétés sensorimotrices du HMD pour tourner la tête (stimulation des informations vestibulaires de rotation) et les couplent à un tapis roulant (informations vestibulaires de translation), ou alors utilisent les propriétés sensorielles de la marche réelle dans une grande pièce ; ou encore couplent un HMD à un joystick (assurant le déplacement de translation) (Ruddle et Lessels, 2006).

Une des premières expériences concernant la marche en EV concerne Grant et Magee (1998) qui se sont attelés à la question du transfert de connaissances spatiales du virtuel au réel en comparant un apprentissage d'un environnement en réel, ou d'une réplique virtuelle à l'aide soit d'une interface de marche en RV, d'un joystick, d'une carte de l'environnement ou par la visualisation de photos. Ces auteurs ont montré que l'apprentissage par un EV peut être une alternative à un apprentissage réel. Notamment, l'interface de marche RV a montré de meilleures acquisitions spatiales transférées. Ils expliquent ces résultats par les informations vestibulaires et kinesthésiques portées par l'interface de marche en RV et absentes avec le joystick. Schellenbach, Lövdén, Verrel, Krüger et Lindenberger (2010) ont étudié le comportement de jeunes adultes et des sujets âgés sur l'utilisation et l'apprentissage d'un tapis roulant face à un EV (*cf.* Figure 3.7). Ils ont évalué les paramètres de marche, la posture, la longueur des pas, la cadence des pas, la distance parcourue, le temps de parcours en environnement réel et virtuel à l'aide d'un système de capture de mouvement. Ils montrent alors que le comportement de marche sur le tapis roulant est différent d'une marche en environnement réel, quel que soit l'âge. Cependant, après 20 minutes de marche, les sujets étaient capables d'utiliser l'interface à tel point que les différences de marche entre virtuel et réel sont devenues quasi inexistantes, plus précisément chez les jeunes adultes. Ceci témoigne qu'une interface de marche basée sur un tapis roulant en EV s'approche des conditions naturelles de marche, quel que soit l'âge (même si le groupe âgé a mis plus de temps à adapter sa marche au tapis roulant).



Figure 3.7: Etude des propriétés de la marche à l'aide de la motion capture (Schellenback et al.,2010).

II.1.2.3.2.1.1 La recalibration sensorimotrice

Waller et Richardson (2008) montrent que le système de perception des distances est altéré après exposition à un environnement virtuel et que les sujets en EV ont généralement tendance à sous estimer les distances égocentriques. Dans une première expérience, les sujets, les yeux bandés, estimaient plusieurs distances dans l'environnement réel. Puis, ils étaient soumis à un EV dans lequel ils devaient marcher. Ils devaient ensuite ré estimer des distances dans l'environnement réel. Les sujets ont eu tendance à surestimer les distances après interaction avec l'EV, suggérant qu'il y a un « recalibrage » du système perceptivo-visuel. Dans une deuxième expérience, ces mêmes auteurs se sont demandés si le flux optique et/ou les informations vestibulaires sont nécessaires dans l'estimation des distances en EV. Pour cela 4 groupes ont été déterminés : un groupe où le flux optique était généré automatiquement, un autre où la vitesse de déplacement du flux était adaptée à la vitesse de l'utilisateur (pas d'informations vestibulaires dans ces deux premières conditions), un groupe où les sujets avaient à disposition le flux optique et les informations vestibulaires, et enfin une dernière condition où la vision était supprimée avec néanmoins présence des informations vestibulaires. Les groupes avec uniquement les informations visuelles ont eu de moins bons résultats que les groupes avec informations vestibulaires (avec ou sans vision) témoignant de la présence des informations vestibulaires sur les informations pour l'intégration des distances. Aussi, les auteurs proposent que les informations visuelles présentées seules dans l'EV détériorent la perception égocentrique des distances et un tapis roulant permet alors de mieux percevoir les distances que l'utilisation d'un joystick ou d'une souris, du fait du manque d'informations vestibulaires et kinesthésiques proposés par ces types d'interface. Pour ces auteurs, les sujets seraient plus conscients de leurs mouvements et de leurs positions

grâce des interfaces engageant plus largement le corps et donc plus riches en stimulations vestibulaires et proprioceptives. Mohler, Thompson, Creem-Regehr, Willemsen, Pick. et Rieser (2007) montrent que la recalibration sensorimotrice effectuée avec un tapis roulant en EV se compose des indices visuels de la vitesse, et des mécanismes de la marche. Lorsque la vitesse du mouvement visuel diffère de la vitesse de marche biomécanique, la locomotion est recalibrée dans le monde réel ; quand le flux visuel est moins rapide que la vitesse de marche, les sujets ont tendance à surestimer les distances (et, inversement lorsque la vitesse du flux visuel était rapide). Par contre, lorsque la vitesse du tapis était identique à la vitesse de marche sur le tapis roulant, la perception des distances était plus précise. Plus globalement, la calibration du système perception-action en EV serait affectée par la perception visuelle de la vitesse de nos propres mouvements.

II.1.2.3.2.1.2 Le flux visuel dans la marche en EV

Pour Bakker et *al.* (1999), l'ensemble des métaphores de déplacement proposé en EV manque de feedback vestibulaire et proprioceptif. Dans leur expérimentation, les sujets naviguaient dans une forêt virtuelle à l'aide d'interfaces proposant différentes combinaisons d'informations vestibulaires, kinesthésiques et visuelles. Pour ces auteurs, le flux visuel seul ne permet pas de s'orienter correctement et la combinaison des informations visuelles, vestibulaires et kinesthésiques permet une meilleure mise à jour des représentations égocentriques telle que révélée par une meilleure estimation des angles. Par contre, Riecke et *al.* en 2002 montrent que le flux optique peut être suffisant pour effectuer une tâche de complétion de triangle si l'angle de vue de l'écran est suffisamment large pour couvrir le champ visuel humain. Pour Ruddle et *al.* (2011), lorsque le flux visuel est seulement proposé dans l'interaction, les repères locaux semblent importants pour la création de représentations spatiales de type route (connaissances égocentrées), contrairement aux repères globaux. Ces études suggèrent donc que le flux optique participe à la construction des connaissances égocentrées sur l'EV.

II.1.2.3.2.1.3 Informations vestibulaires de rotation et de translation

Klatzky et *al.* (1998) ont montré qu'une rotation physique est plus importante que le flux visuel pour induire un sentiment de déplacement de la tête dans l'espace. Et, les études reposant sur des tâches de complétion de triangle montrent que les informations vestibulaires de rotation et de translation sont essentielles pour la réussite à ce type de tâches. Ruddle et Lessels (2006) utilisent 3 interfaces de locomotion différentes : une marche active avec HMD délivrant des informations vestibulaires, proprioceptives et visuelles, une interface basée sur

un HMD et un joystick, ne délivrant alors que des informations vestibulaires de rotation et un flux visuel, ou alors seulement un flux visuel à l'aide d'une interface clavier/souris devant un ordinateur de bureau. Les auteurs font également varier la qualité visuelle de l'EV (détaillé vs non détaillé). Les résultats sont meilleurs pour l'interface délivrant simultanément des informations vestibulaires, proprioceptives et visuelles, quelle que soit la qualité d'affichage, les deux autres conditions amenant à de très mauvais résultats. Ces résultats sont interprétés par les auteurs comme la supériorité des informations vestibulaires, proprioceptives dans l'acquisition de connaissances spatiales, comparées aux informations visuelles. La théorie de la *path integration* est donc pérenne même dans un environnement virtuel.

Cette conclusion serait valide même pour les environnements de grande taille. Par exemple, Grant et Magee (1998) montrent dans une tâche de transfert que le fait de marcher réellement dans un EV améliore l'estimation des directions. Dans une autre expérience, Chance et *al.* (1998) utilisent un labyrinthe virtuel pour évaluer l'influence des informations vestibulaires sur l'intégration de chemin. Trois groupes ont été définis : un groupe où le sujet marchait (toutes les informations vestibulaires sont présentes), un groupe où le sujet se déplaçait à l'aide d'un joystick (aucune information vestibulaire) et un groupe où les sujets s'orientaient à l'aide de leurs mouvements de tête et se déplaçaient à l'aide d'un joystick (seules les informations vestibulaires de rotation sont actives). Les performances étaient meilleures pour le mode de marche comparées au mode joystick, suggérant que les informations vestibulaires de translations et de rotation sont importantes dans l'acquisition de connaissances spatiales en EV. Ainsi, quel que soit le type d'EV (reproduction 3D d'un environnement réel ou labyrinthe), et quelle que soit la tâche (transfert ou estimation dans l'EV), les informations vestibulaires sont importantes pour acquérir de façon plus précise des informations spatiales. Dans le même ordre d'idée, Ruddle et Lessels (2009) testent l'influence des informations vestibulaires de translation et de rotation dans une tâche de recherche de cibles en EV. Trois groupes étaient composés : un groupe où les sujets marchaient dans l'EV à l'aide d'un HMD (informations vestibulaires de translation et rotation), un groupe se déplaçant à l'aide d'un bouton d'activation et d'un HMD pour tourner la tête (seulement les informations vestibulaire de rotation étaient présentes), un groupe installé devant un ordinateur et naviguant à l'aide d'un clavier et d'une souris (aucune information vestibulaire). Les résultats montrent encore une fois de meilleures performances pour la condition où les sujets marchaient réellement dans l'EV, suggérant l'importance des informations vestibulaires de translation et de rotation, et notamment dans la mise à jour de sa propre position dans l'EV. Sancaktar et *al.* (2008) utilisent un restaurant virtuel pour évaluer l'acquisition de connaissances spatiales égocentriques et plus particulièrement l'influence des

mouvements de rotation et de translation du corps dans les environnements virtuels. Les sujets étaient installés devant un écran d'ordinateur et visualisaient dans un cadre de référence égocentrique un restaurant virtuel dans lequel ils n'avaient aucun contrôle de leur mouvement. Deux types de déplacement étaient proposés : la visualisation de l'EV avec rotation qui consistait à placer le sujet au centre du restaurant et à déplacer le point de vue dans le sens contraire des aiguilles d'une montre. A la différence, la condition de visualisation de l'EV avec translation consistait à visualiser le restaurant en entrant et sortant par la même porte. L'évaluation des directions relatives entre différents objets était meilleure lorsque des mouvements de translation étaient proposés plutôt que des mouvements de rotation, suggérant l'importance des déplacements de translation pour optimiser la formation d'une carte cognitive (connaissances allocentrées) de l'EV. Ruddle et *al.* (2011) ont utilisé un déplacement de marche virtuelle procurant l'ensemble des informations vestibulaires et le comparent à une interface HMD/Joystick sur une tâche où les sujets devaient estimer des directions en EV. Les sujets étaient guidés virtuellement le long d'une route une première fois et devaient ensuite retrouver leur chemin. Les résultats montrent que la marche virtuelle et les informations vestibulaires améliorent l'acquisition de connaissances spatiales. Les informations vestibulaires des mouvements de translation permettraient de mettre à jour constamment la position du corps par rapport aux points de repères et d'établir ainsi une connaissance métrique. Enfin, Ruddle et *al.* (2011a) étudient l'effet des informations vestibulaires dans un environnement de petite et grande échelle de type supermarché. Pour cela, plusieurs interfaces sont développées. Le groupe « TransRot » était composé de deux interfaces : une marche physique réelle traquée par des capteurs de position et un retour visuel par HMD permettait d'utiliser l'ensemble des informations vestibulaires de rotation et de translation propres à la marche en environnement réelle, une marche sur tapis roulant omnidirectionnel permettant également d'acquérir les mêmes informations sensorielles que la marche virtuelle. Le groupe « Translate » était constitué d'un tapis roulant unidirectionnel et rotation avec un joystick ne permettant qu'une stimulation vestibulaire de translation, le groupe « Rotate » était composé d'une interface permettant de tourner physiquement et de stimuler seulement le système vestibulaire de rotation (rotation de la tête traquée par un HMD et déplacement de translation avec le joystick) et enfin le groupe « Visual Only » était composé d'une interface joystick permettant un déplacement et une rotation mais ne donnant aucune information vestibulaire. Dans une première expérience sur un EV de grande échelle et petite taille, les sujets naviguaient dans un supermarché. Dans un premier temps, les sujets devaient trouver des cibles dans un ordre aléatoire, retourner au point de départ et indiquer la direction de la cible trouvée. Dans un deuxième temps, les sujets devaient retrouver les cibles

mais devaient également indiquer les directions des autres cibles et du point de départ, ainsi que les distances les séparant. Les variables relevées étaient la distance parcourue, l'estimation des directions et des distances (mesurant les aptitudes à créer une carte cognitive), et la vitesse moyenne de parcours. Concernant l'estimation des directions, le groupe « TransRot » avait de meilleurs résultats comparés au groupe « Visual Only » (ne proposant pas d'informations vestibulaires). Le groupe « TransRot » évaluait également mieux les distances, mais les différences n'apparaissaient que concernant le groupe « Rotate ». Finalement, les auteurs en concluent que le fait de marcher en EV (sur tapis roulant omnidirectionnelle ou marche réelle) et les indices propres aux mouvements du corps dans l'espace (visuels, vestibulaires et kinesthésiques) proposés par ce type d'interfaces ont amélioré favorablement l'exploration de l'EV mais ont également permis de favoriser la création de carte cognitive. Les groupes ayant utilisé le joystick et le HMD pour orienter le point de vue (informations vestibulaires de rotation) ou le joystick pour se déplacer (aucune information vestibulaire) montrent des performances en termes de temps d'exploration supérieures à 25 % comparés aux groupes de marche virtuelle. Dans une seconde expérience, ces auteurs essaient de distinguer l'importance des informations vestibulaires de rotation et de translation dans un environnement de grande taille et de grande échelle. Les interfaces utilisées étaient les mêmes que celles citées précédemment et l'EV était un supermarché de taille plus importante. (cf. Figure 3.8). Les tests d'évaluation étaient également les mêmes que la précédente expérience. Pour l'estimation des directions et des distances, les groupes « Translate » et « TransRot » ont de meilleures performances, mais aucune différence concernant les informations vestibulaires de rotation n'a été trouvée sur ces 2 tâches. Finalement cette expérience montre que les informations sensorielles relatives au corps, notamment de translation seraient les seules nécessaires pour acquérir des informations spatiales dans un grand environnement et amélioreraient la formation de carte cognitive (connaissances allocentrées). Et l'ajout d'informations vestibulaires de rotation n'optimise que très peu l'apprentissage de connaissances spatiales. Ainsi, le fait de marcher dans un EV améliore la représentation allocentrique et un tapis roulant unidirectionnel semble suffisant pour y parvenir un EV.



Figure 3.8 : (Ruddle et al.,2011). A gauche, marche physique sur un tapis roulant unidirectionnel et visualisation de l'EV avec HMD. A droite marche physique sur un tapis omnidirectionnel. Les boules blanches sur les deux images correspondent au tracking de position et de tête à l'aide la motion capture.

En conclusion, l'acquisition et le transfert de connaissances spatiales à partir d'un EV sont influencés par les différents types de variables externes. Les systèmes visuels de restitution, la qualité informationnelle des EV et les interfaces de déplacements utilisés sont essentielles à l'optimisation des composantes cognitives et motrices impliquées dans l'acquisition de connaissances spatiales à partir d'un EV.

III. Se déplacer par la pensée (Les Interfaces Cerveau Ordinateur)

Depuis quelques années, un type d'interface basé sur l'activité cérébrale de l'utilisateur s'est développé : il s'agit des interfaces cerveau-ordinateur (ICO). Très novateur, ces interfaces permettent d'envoyer des commandes à un ordinateur à l'aide de l'activité cérébrale et sans intervention de la composante motrice. Selon Cabestaing et Rakotomamonjy (2007), les ICO sont « des systèmes de communication *directe entre un individu et une machine (ordinateur) ne reposant pas sur des canaux de communication standard que sont nos nerfs périphériques et nos muscles* »; la communication entre l'homme et la machine ne s'effectuerait plus à travers une interface motrice mais par les états mentaux. Cette technologie est une avancée en termes de communication et d'interactions pour les personnes atteintes de troubles moteurs importants (Lotte, 2008) ayant encore toute leurs facultés mentales mais n'arrivant plus à communiquer, comme par exemple les personnes atteintes de sclérose latérale amyotrophique (SLA ou maladie de Lou Gehrig) (Cabestaing et Rakotomamonjy, 2007). Les ICO sont de réelles alternatives de communication dans des

contextes aussi variés que l'utilisation du traitement de texte ou le contrôle de neuroprothèses (Lee, Ryu, Jolesz, Cho et Yoo, 2009).

III.1 Les différents types d'ICO

Les ICO sont le plus souvent décrites à l'aide de deux classifications. La première (invasive vs. non invasive) consiste à distinguer comment et où l'activité cérébrale est mesurée (Lotte, 2008). La deuxième classification (synchrone vs asynchrone) consiste à définir si le sujet interagira avec l'EV à tout moment ou alors à des moments précis. Chaque ICO utilise donc une technique d'acquisition cérébrale invasive ou non invasive ainsi qu'un mode d'interaction synchrone ou asynchrone.

III.1.1 Invasive Vs Non Invasive

Deux types d'ICO peuvent être définis (Lebedev et Nicolelis, 2006) : les ICO non invasives et les ICO invasives. L'ICO non invasive repose sur la mesure des signaux à la surface du crâne, et sont composés de l'activité électrique de millions de neurones, l'analyse étant alors très complexe. Il n'y aucune opération chirurgicale, et cette technique est totalement indolore. Par contre, ce type d'ICO est sensible aux artéfacts issus des neurones voisins et qui ne sont pas associés à la tâche mentale de l'individu. Les ICO non invasives reposent sur les techniques d'acquisition de l'imagerie cérébrale, telle que l'Imagerie par Résonance Magnétique fonctionnelle (IRMf), ou sur l'électrophysiologie, à savoir la magnétoencéphalographie (MEG) (Wolpaw, Birbaumer, McFarland, Pfurtscheller et Vaughan, 2002) et l'Électroencéphalographie (EEG). La MEG et l'Irmf sont des techniques qui permettent d'obtenir des signaux d'une meilleure qualité, mais possèdent les inconvénients principaux de ne pas être mobiles et accessibles au plus grand nombre, les techniques d'acquisition par EEG étant souvent préférées à ces 2 techniques. En effet, l'EEG mesure en temps réel l'évolution d'un faible courant électrique (de l'ordre du microvolt) produit par la différence de potentiel entre 2 électrodes. La mesure des signaux EEG est donc acquise par contact entre les électrodes (allant de 2 à 256 pour certains systèmes) d'un casque EEG (cf. Figure 3.9) et le scalp.

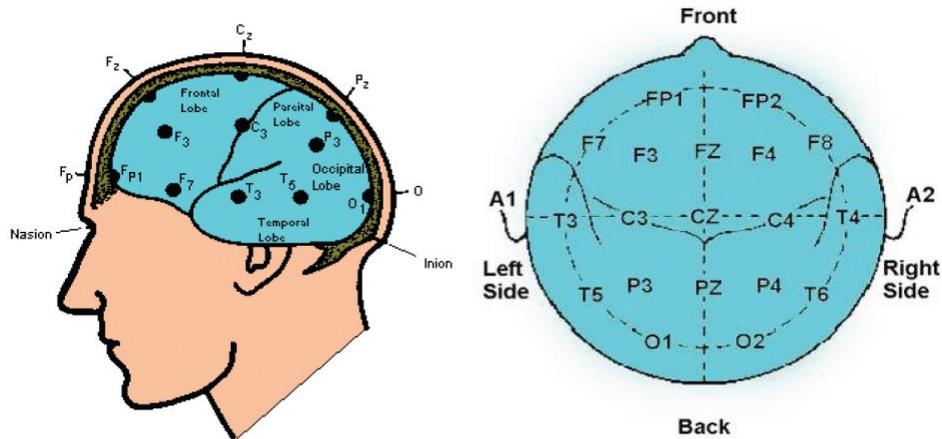


Figure 3.9: Position et noms de la classification internationale des électrodes (image provenant de la thèse de Fabien Lotte, 2008 – tiré de <http://www.wikipedia.org>).

Les ICO invasives cf. Figure 3.10) consistent à introduire des électrodes à l'intérieur du cortex cérébral (Local Potential Field : LFP) ou bien à les disposer à la surface du cerveau (ECoG : Électrocorticogramme) (cf. Figure 3.11). Cette technique permet de mesurer plus finement la source de l'activité neuronale. Elle permet aussi une meilleure résolution et une meilleure stabilité du signal enregistré. Par contre, elle nécessite une intervention chirurgicale et la durée des électrodes dans le cortex est limitée. De plus, l'implant d'un corps étranger dans le cerveau peut être dangereux pour la santé du sujet.

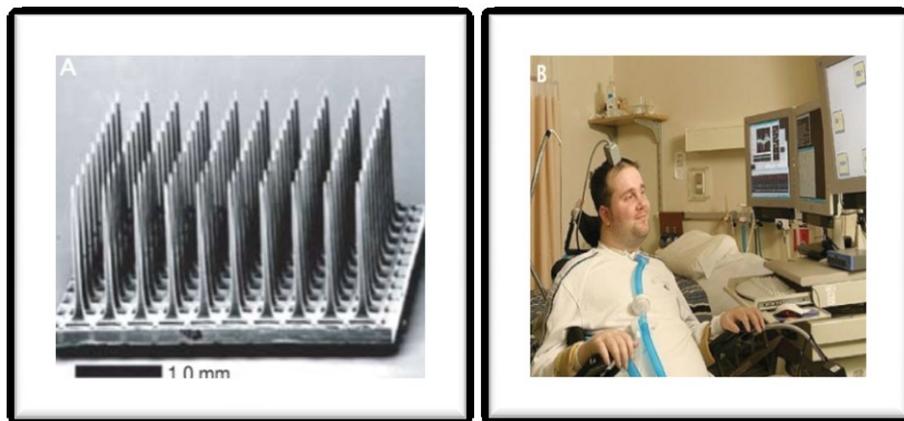


Figure 3.10: Electrode invasive placée dans le cerveau d'un individu.

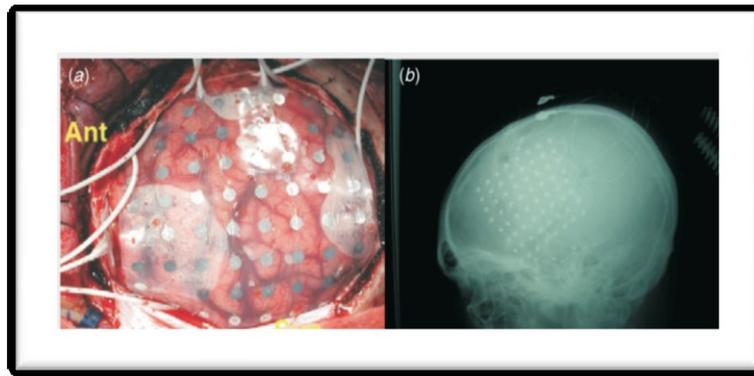


Figure 3.11 : Exemple d'implantation d'électrodes pour des signaux Ecog : a) Photo lors de l'implantation d'une grille de 64 électrodes sur le cortex cérébral. B) Radiographie du crâne d'un individu implanté de 64 électrodes sur le cortex cérébral.

III.1.2 Synchrone Vs Asynchrone

En mode synchrone, l'analyse des données EEG s'effectue à un moment précis et non en continu. Le sujet ne peut donc interagir qu'à un moment précis. Cabestaing et Rakotomamonjy (2007), l'ICO synchrone est basée sur l'enregistrement de potentiels évoqués de l'individu. Les potentiels évoqués se définissent comme étant des signaux électro physiologiques transitoires, en réponse à des stimulations sensorielles extérieures. L'interface génère des stimuli pour lesquels des potentiels évoqués sont caractérisés. C'est l'activité du cerveau qui est enregistrée en réponse à un stimulus. L'apprentissage de ce type de système est souvent rapide, par contre il nécessite un stimulus externe pour que l'interface prenne une décision. Deux types de réponses sont généralement utilisés :

- Les *Potentiels Evoqués Visuels de bas niveau* (appelés également Steady State Visual Evoked Responses ; SSVERs), apparaissent dans le cortex visuel primaire après stimulus visuel. Des formes noires et blanches, carrées entraînent une activation importante des SSVERs.
- Les *Potentiels Evoqués par Evènement* (ERPs pour Event Related Potential). Ce sont des signaux électriques post-stimulation qui sont définis en composantes selon deux paramètres : la positivité ou négativité de l'onde (noté P pour les ondes positives et N pour les ondes négatives) et la latence d'apparition en millisecondes. Par exemple, la P300 est une composante positive apparaissant après 300 ms et elle est fortement corrélée à des tâches cognitives.

L'ICO asynchrone est basée sur l'enregistrement continu de signaux cérébraux modifiés volontairement lorsque l'individu interagit avec le système. La modification de l'activité cérébrale est détectée par l'ICO puis traduite en commandes. La difficulté de ce type de système réside dans l'analyse en continu des signaux EEG, même lorsque que l'utilisateur

ne commande pas l'ICO. Plusieurs types de signaux peuvent être utilisés pour le mode asynchrone :

Les potentiels corticaux lents (SCPS : Slow Cortical Potential Shifts) sont des variations de l'activité cérébrale très progressives allant de quelques millisecondes à plusieurs secondes, et sont facilement contrôlables par la majorité des individus.

L'activité oscillatoire sensorimotrice : cette activité est générée lorsque l'individu planifie ou imagine un mouvement. Six classes d'oscillations (ou rythmes) sont principalement enregistrées dans ces ICO (Lotte, 2008 ; cf. Figure 3.12):

- Le rythme delta (1-4hz) est un rythme lent observé dans le sommeil profond chez les adultes.
- Le rythme teta (4-7 hz) est un rythme légèrement plus rapide et s'observe au cours de la somnolence chez les jeunes enfants.
- Le rythme alpha (8-12 hz) apparaît dans le lobe occipital quand le sujet ferme les yeux et se relaxe.
- Le rythme mu (8-13hz) est situé au niveau du cortex moteur et sensorimoteur. L'amplitude de ce rythme varie selon les mouvements du sujet ; on l'appelle également « rythme sensorimoteur ».
- Le rythme beta (13-30 hz) est observé quand le sujet est éveillé et conscient ; ce rythme est affecté par les mouvements dans les zones motrices.
- Le rythme gamma concerne les rythmes supérieurs à 30 hz et sont attribués à diverses fonctions cognitives et motrices.

Les rythmes Mu et Beta semblent des signaux propices à la communication avec une interface ICO car ils sont associés aux aires motrices du cerveau. Le mouvement ou la préparation d'un mouvement est accompagné d'une baisse des rythmes Mu et Beta, que l'on appelle plus communément la *désynchronisation*. Elle est opposée à la *synchronisation* qui est détectée après un mouvement ou lorsque le sujet se relaxe. Les changements de rythme de mu et beta sont de l'ordre de 0,5 secondes et sont en accord avec leur utilisation dans les ICO.

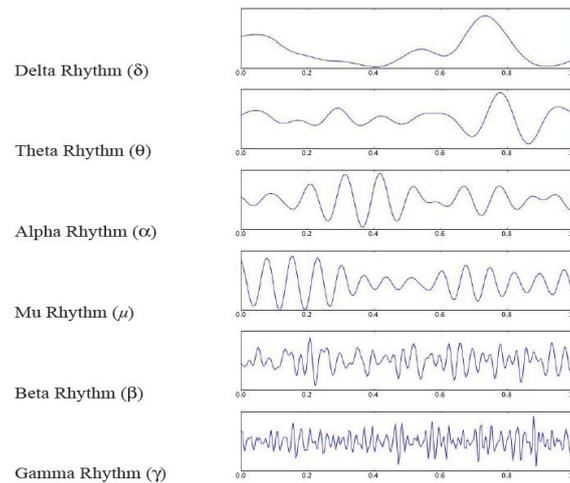


Figure 3.12: rythmes du cerveau mesurés par EEG image tirée de la thèse de Lotte(2008).

- Les signaux EEG spontanés correspondent aux signaux qui sont obtenus dans une tâche mentale spécifique autre que le mouvement réel ou imaginé. Ce type d'activité (calcul mentale par exemple, ou l'imagination de déplacements d'objets) entraîne une variation des activités cérébrales des zones spécifiques du cerveau.

De part cette description fonctionnelle des signaux EEG, on comprend pourquoi ce sont le plus souvent les activités oscillatoires sensorimotrices (qui sont modifiées lors d'une activité volontaire de l'individu) qui sont utilisées dans les ICO asynchrones.

III.2 Fonctionnement

Nous allons maintenant décrire les principales étapes du fonctionnement d'une ICO puis nous ferons une brève revue de l'utilisation des ICO dans le domaine de la RV. Ce fonctionnement est basé sur le logiciel OpenVibe (Renard, Lotte, Gibert, Congedo, Maby, Delannoy, Bertrand et *al.*, 2010; Lotte et Renard, 2008 ; Lecuyer, Lotte, Reilly, Leeb, Hirosevv et Slater, 2008), projet financé par l'Agence Nationale de Recherche (ANR) en partenariat avec l'INRIA de Rennes, l'INSERM Unité R&D Grenoble, le département DETECS du CEA-List, le Gipsa-Lab de l'INPG et le service des aides techniques de l'AFM. Cette plateforme OpenSource permet de proposer des techniques simples et efficaces pour la création et le design d'ICO.

Une ICO se décompose en 6 étapes (cf. Figure 3.13) (Lotte, Lécuyer et Arnaldi, 2007).

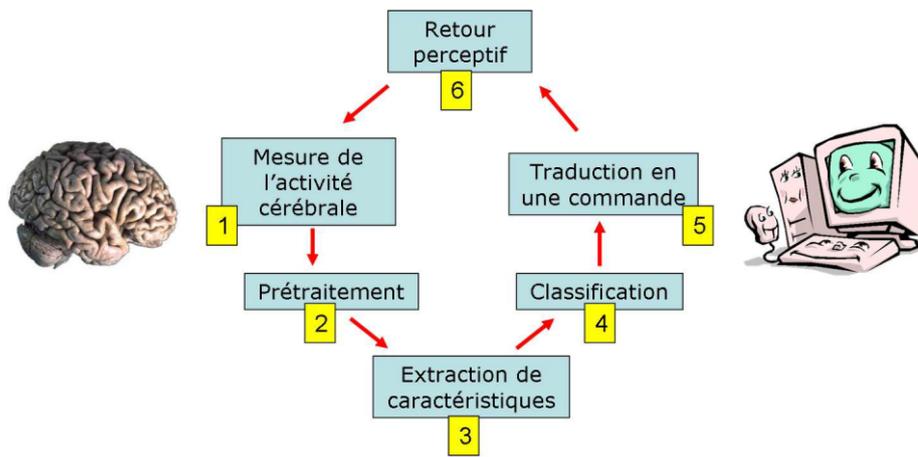


Figure 3.13 : Schéma de fonctionnement d'une ICO (Lotte et al., 2007)

- **La mesure de l'activité cérébrale** : cette étape mesure l'activité cérébrale du sujet pendant une activité mentale à l'aide de différentes méthodes encéphalographiques, dont la plus utilisée concerne l'ElectroEncéphalographie (EEG).
- **Le pré-traitement** : les signaux EEG étant généralement très bruités, ils sont « nettoyés » par filtres spatio-temporels ou un filtre de Laplace pour supprimer les signaux parasites.
- **L'extraction des caractéristiques** : les signaux sont décomposés en dimensions ou « caractéristiques » et réunis dans un « vecteur de caractéristiques ». Ces caractéristiques peuvent être par exemple la puissance des fréquences d'un signal cérébral et leur extraction participe à l'interprétation des signaux.
- **La classification** : L'objectif de cette étape est d'attribuer une classe au vecteur de caractéristiques défini précédemment. Une classe est une tâche mentale effectuée par l'utilisateur que l'ICO aura réussi à détecter à l'aide d'algorithmes appelés *classifieur*. Il existe différents algorithmes de classification, plus ou moins robustes (Support Vector Machine, Linear Discriminant Analysis, etc. ; Krusienski, Sellers, Cabestaing, Bayouhd, McFarland, Vaughan et Wolpaw, 2006) et capables d'apprendre et de caractériser les correspondances entre les différentes tâches mentales effectuées. La plupart des ICO se basent sur deux classes (par exemple, imagerie motrice gauche ou droite détectée) mais malgré le nombre de classes peu élevé, il est très rare d'atteindre un niveau de classification égale à 100% car de nombreux paramètres viennent perturber les signaux électriques (concentration, bruit électrique, etc.).

- **La traduction de la commande** : Une fois le signal classifié, il faut le traduire en commande compréhensible pour l'ordinateur. Par exemple, un déplacement vers la gauche ou la droite.

-**Le retour perceptif** : Enfin, il faut renvoyer un signal sensoriel à l'utilisateur (feedback) afin que l'utilisateur vérifie la cohérence de son imagerie motrice et la décision de classification de la machine. Ce feedback permet à l'utilisateur de savoir si le système a correctement détecté son intention et si il arrive à bien maîtriser son activité cérébrale.

III.3 Apprentissage d'un ICO

Passons maintenant à l'apprentissage d'un ICO. Cet apprentissage s'effectue du côté de la machine qui doit analyser et détecter les activités cérébrales de l'utilisateur et les traduire en commande, mais également du côté de l'être humain car celui-ci doit adapter et maîtriser son activité cérébrale dans des tâches d'imagerie mentale. L'utilisation d'un ICO nécessite donc un apprentissage non trivial entre l'Homme et la Machine.

III.3.1 Du côté machine

Lors d'une tâche d'imagerie motrice, l'apprentissage consiste en la présentation de stimuli (par exemple une flèche apparaît à gauche), et le sujet doit alors imaginer le mouvement de sa main gauche (et inversement, flèche droite/main droite). Le système détecte les caractéristiques du signal pour le classifier correctement. Le taux de classification est le pourcentage de distinctions correctes entre le signal utilisateur et les patterns détectés par l'ICO. Dans l'étude de Guger, Edlinger, Harkam., Niedermayer et Pfurtscheller (2003), 93% des sujets testés ont maîtrisé le système avec un taux de classification de 60%. Leeb, Scherer, Keinrath, Guger et Pfurtscheller (2005) montrent qu'un entraînement de 45 minutes permet une classification de l'ordre de 80% à 100%. Des études ont été faites chez des sujets atteints de trouble moteurs et ont également montré une bonne maîtrise de l'ICO (Sellers, Krusienski, McFarland et Wolpaw, 2007) Généralement, le nombre d'essais et de sessions sont assez élevés pour arriver à une classification correcte. D'ailleurs, Kübler, Mattia, George, Doron et Neuper (2010) montrent qu'un entraînement de 1 à 4 sessions n'améliore pas le taux de classification d'un ICO. Différents facteurs semblent poser problèmes. En effet le phénomène « *BCI-illiteracy* », traduit par *analphabétisme de l'ICO*, c'est-à-dire l'impossibilité de maîtriser son activité cérébrale, toucherait environ une personne sur 6 (Sanelli, Braun, Tangermann et Mller, 2008). Nijboer, Furdea, Gunst, Mellinger, McFarland, Birbaumer et Kübler (2008) montrent que 20% des sujets ne provoquent pas assez de synchronisation

motrice pour utiliser l'ICO. Ces résultats seraient un obstacle pour de nombreux patients à utiliser ce type d'interface. Certains auteurs trouvent une corrélation entre la puissance des rythmes sensorimoteurs et les performances des ICO (Blankertz, Sannelli, Halder, Hammer, Kübler, Müller, Curio et Dickhaus, 2010). Halder, Agorastos, Veit, Hammer, Lee, Varkuti, Bogdan et al. (2011) révèlent une différence neurale entre les utilisateurs ayant de bonnes performances à l'utilisation des ICO et les moins bons. Les utilisateurs performants ont des activations plus importantes dans les zones motrices lors des tâches d'imageries mentales alors que les moins performants activent des zones corticales n'ayant peu ou pas de lien direct avec l'imagination ou l'exécution d'un mouvement.

Certains auteurs se sont attelés à l'amélioration de l'apprentissage de l'ICO, en explorant la piste du feedback sensoriel, et en particulier de nature visuelle (Wolpaw et al., 2002). Les types de feedback visuel peuvent être de simples barres de progression ou l'affichage d'objets qui se déplacent, selon la classification effectuée par l'ordinateur (comme le système de handball proposé par le logiciel OpenSource OpenVibe, Figure 3.14). Les travaux de Ron-Angevin et Díaz-Estrella (2009) et de Leeb et al. (2005) montrent que la RV améliore le contrôle de l'ICO comparé à un simple feedback visuel. Une autre piste explorée est l'imagerie motrice. La classification EEG s'effectue souvent à l'aide de l'imagerie motrice des mains ou des jambes (Pfurtscheller, Leeb, Keinrath, Friedman, Neuper, Guger et Slater, 2006; Ron-Angevin et al., 2009; Leeb et al., 2005). Le protocole le plus commun concerne l'imagerie motrice de la main gauche et de la main droite. Mais des protocoles plus récents permettent maintenant d'avoir 3 classes d'imagerie motrice (Scherer, Lee, Schlögl., Leeb, Bischof et Pfurtscheller, 2007). Dans cette dernière expérience, deux sujets sur trois arrivaient à maîtriser correctement l'ICO.

Aujourd'hui, il n'existe toujours pas de méthodes d'apprentissage ICO standardisées. L'ensemble des recherches est donc très hétérogène quant aux matériels, protocoles d'apprentissage, ICO avec ou sans feedback, rendant la comparaison qualitative et quantitative de ces recherches, difficile.

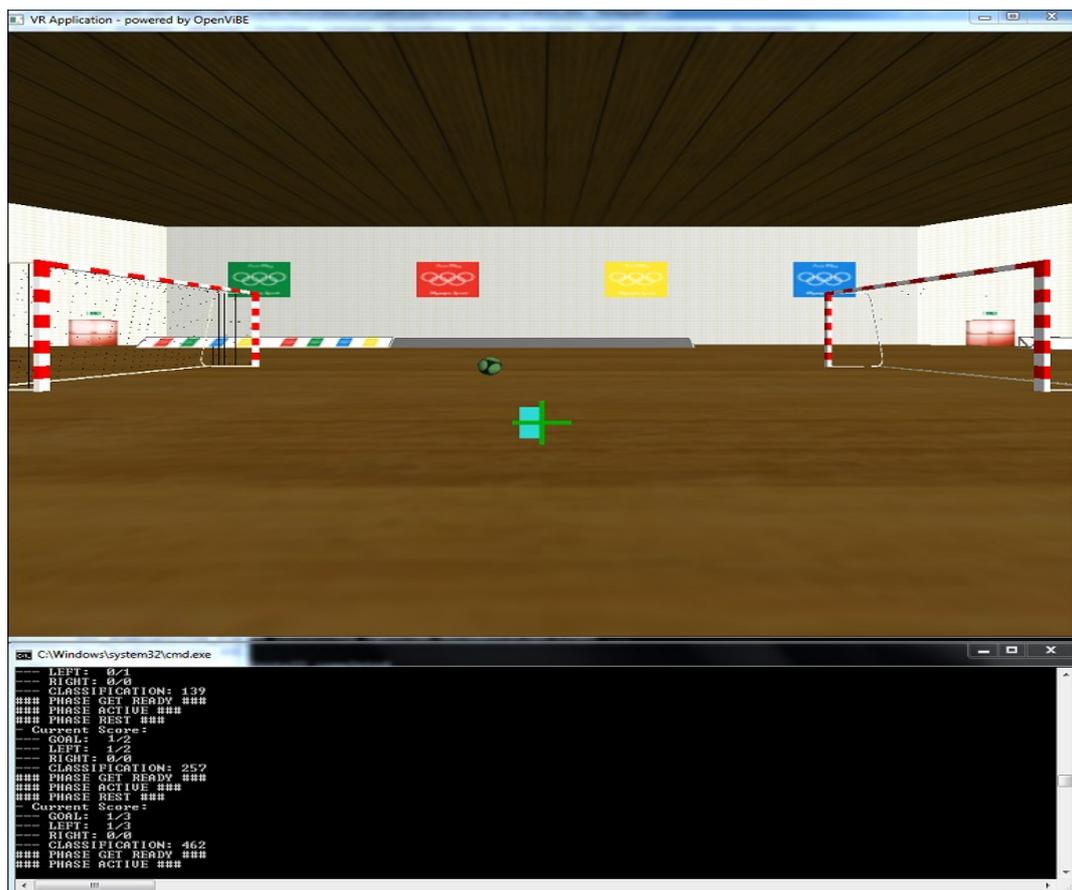


Figure 3.14: logiciel Openvibe et feedback visuel par le handball.

III.3.2 Du coté de l'homme

Comme nous venons de le voir, le principe de fonctionnement de l'ICO est basé sur l'imagerie mentale d'un mouvement imaginé. Celle-ci a été définie par Driskell, Copper et Moran en 1994 comme « une répétition cognitive d'une tâche en l'absence *de mouvement* ». L'ICO est une interface de contrôle par l'activité cérébrale du sujet engendrée par une imagerie motrice. La composante motrice de la navigation, telle que Montello (2005) la définit par un déplacement physique, est supprimée. Pour Neuper et Pfurtscheller (2001), il y a une forte relation entre les réseaux neuronaux activés par l'imagerie motrice et l'exécution motrice. Abernethy, Hanrahan, Kippers, Mackinnon et Pandy (2005) définissent 3 théories concernant l'imagerie motrice : *la théorie psychoneuromusculaire* met en avant une similitude de substrat neural entre un mouvement réalisé et un mouvement imaginé. Le cerveau envoie des signaux électriques à nos muscles dans le même ordre que lorsque nous voulons effectuer le mouvement physiquement ; *la théorie d'apprentissage symbolique*, variante de la théorie psychoneuromusculaire, va plus loin en postulant que le cerveau est apte de manière symbolique à planifier une séquence de mouvements sans envoyer d'activité électrique aux muscles ; enfin, pour la *théorie des ensembles attention-excitation (attention-*

arousal set theory), l'imagerie fonctionne car elle aide le sujet à atteindre un niveau d'éveil et d'attention optimal sur ce qui est pertinent. Aucun message électrique ne serait envoyé aux muscles pour créer une planification de mouvements. Finalement ces trois théories sont en faveur de l'ICO comme interface permettant d'évaluer les habiletés spatiales, en permettant de focaliser son attention et de mémoriser des séquences d'actions et de directions d'un itinéraire.

III.4 Interfaces cerveaux ordinateurs : quelles utilisations ?

Dans cette partie, sont présentées brièvement les recherches portant sur l'ICO dans différents domaines.

Certaines ICO sont utilisées pour le jeu vidéo, afin de renseigner le système des différents états mentaux (stress, ennui, etc.) que le sujet a pendant l'interaction (Nijholt et Tan, 2007), l'ICO permet alors de fournir un retour perceptif approprié. Dans le même ordre d'idée, Lalor, Kelly, Finucane, BurkeSmith, Reilly et McDarby (2005) utilisent l'ICO pour maîtriser les mouvements d'un avatar dans un EV. Lotte, van Langenhove, Lamarche, Ernest, Renard, Arnaldi et Lécuyer (2010) proposent également un déplacement dans un musée à l'aide du même type d'interface. Gentiletti, Gebhart, Acevedo, Yáñez-Suárez et Medina-Bañuelos (2009) rapportent aussi une bonne maîtrise de l'interface dans une tâche consistant à déplacer un fauteuil roulant dans un EV.

D'autres études portent sur l'utilisation de l'ICO pour le handicap moteur. Par exemple, Galán, Nuttin et Lew (2008) ont montré que le contrôle d'une chaise roulante pouvait être effectué à l'aide d'une ICO asynchrone. Dans une autre étude avec des patients atteints d'accidents vasculo cérébraux et une hémiparésie des mains, Buch, Weber, Cohen, Braun, Dimyan, Ard, Mellinger et *al.* (2008) utilisent avec succès cette interface pour apprendre aux sujets à se servir d'une orthèse. Le système permettait d'ouvrir ou de fermer l'orthèse de la main lorsque le sujet réussissait à suivre une cible à l'aide de l'imagerie motrice et de l'ICO. Lebedev et Nicolelis (2006) montrent également des résultats encourageants dans l'application de cette technologie à la maîtrise d'un fauteuil roulant et ou de neuroprothèse. L'étude de Ramos Murguialday, Hill, Bensch, Martens, Halder, Nijboer, Schoelkopf, Birbaumer et *al.* (2011) montrent que les ICO basées sur l'audition et les informations proprioceptives pourraient être utilisées chez des patients atteints de locked-in syndrome (syndrome d'enfermement avec perte quasi complète de mobilité).

D'autres études ont été menées concernant l'utilisation de cette technologie appliquée à des troubles cognitifs. Par exemple, Strehl, Leins, Goth, Klinger, Hinterberger et Birbaumer

(2006) se sont intéressés aux patients atteints de troubles de l'attention et d'hyperactivité. Les résultats ont montré que ces patients pouvaient contrôler certains rythmes cérébraux impliqués dans leur pathologie. Klobassa, Vaughan, Brunner, Schwartz, Wolpaw, Neuper et Sellers, (2009) proposent un ICO auditif pour les personnes limitées en matière de mobilité oculaire ou d'acuité visuelle. Plus récemment, Zhu, Sun, Zeng et Sun (2011) proposent qu'une ICO couplée à un environnement 3D pourrait constituer un outil pertinent pour l'amélioration des difficultés sociales et de communication chez des enfants autistes.

La RV couplée au système ICO offre des possibilités pour les patients atteints de troubles moteurs graves, et dont l'autonomie est altérée, voire inexistante. Les ICO ayant les mêmes fonctionnalités qu'une interface classique (Lecuyer et *al.*, 2008), elles pourraient également être utilisées pour la compréhension et l'étude différenciée de la composante cognitive et de la composante motrice toutes deux impliquées dans les tâches de la vie quotidienne, et notamment les tâches d'orientation et de navigation spatiale. En effet, les ICO permettent de s'affranchir de la composante motrice du mouvement nécessaire à l'exécution des tâches de vie quotidienne. Néanmoins, à ce jour, aucune étude ne s'est intéressée à son impact sur l'acquisition et le transfert de connaissances spatiales du virtuel au réel.

2^{ème} Partie : Partie Empirique

Chapitre IV : Modèle d'Analyse

I. Objectifs

Aujourd'hui, les tests psychométriques et outils classiques utilisés dans l'évaluation, le diagnostic et la rééducation cognitive des patients sont généralement de type papiers/crayon, et donc très éloignés des situations de la vie quotidienne dans lesquelles les patients sont susceptibles de rencontrer des difficultés (et sur lesquelles portent d'ailleurs la plainte cognitive). La réalité virtuelle est considérée comme un substitut à ces problèmes dits « écologiques » (Rizzo et *al.*, 2004 ; Bosco et *al.*, 2008) car elle permet de simuler en 3D des situations complexes qui ressemblent aux situations de la vie quotidienne tout en contrôlant les variables expérimentales, en respectant la sécurité des sujets, en s'adaptant à leurs besoins spécifiques, etc. Un des enjeux des technologies de la réalité virtuelle appliqués aux domaines de la santé, est de développer et de valider des outils de diagnostic et de rééducation adaptés au handicap du patient. La question préalable est alors de déterminer dans quelles mesures les apprentissages réalisés en virtuel sont transférables aux situations réelles. La thématique générale de notre thèse porte sur le transfert virtuel/réel de connaissances spatiales, et plus particulièrement sur l'identification de variables susceptibles d'optimiser ce transfert. Un des débats majeurs dans l'utilisation de la Réalité Virtuelle appliquée à la santé concerne l'impact de l'activité du sujet dans l'apprentissage des situations virtuelles (et leur transfert éventuel en réel). L'activité peut se définir comme un mode de navigation dans lequel le sujet interagit avec l'environnement à l'aide d'interfaces telles que le joystick, la souris, le clavier, etc. Ces situations sont généralement comparées à un mode passif dans lequel le sujet ne fait que visualiser les environnements 3D. Or, les travaux ayant évalués l'impact du caractère actif vs. passif du sujet sur les performances réalisées en 3D ont montré des résultats contradictoires, certains montrant une supériorité de la navigation active (Wallet et *al.*, 2008 ; 2009 ; 2010 ; W 2011 ; Peruch et *al.*, 1995) et d'autres non (Wilson et *al.*, 1997 ; Wilson, 1999, Wilson et Péruch, 2002 ; Gaunet et *al.*, 2001).

Dans ce contexte, notre thèse s'inscrit dans ce débat et a pour objectif de préciser :

- Le rôle du degré d'engagement physique (informations sensorielles relatives à la position du corps dans l'espace) et de la rotation dans l'apprentissage d'un parcours en 3D ;
- Leur implication différentielle dans l'optimisation du transfert virtuel/réel ;
- Le rôle de variables liées au sujet et susceptibles d'influencer les apprentissages, tels que la variable liée à l'expérience des jeux vidéo ;
- Enfin, nous nous interrogerons plus globalement sur le rôle de la composante motrice dans l'optimisation du transfert virtuel/réel en comparant les données obtenues à l'aide d'interfaces impliquant un fort engagement physique (tapis roulant avec rotation) à celles obtenues à l'aide d'une interface cerveau-ordinateur, sollicitant l'intention de se déplacer sans pour autant effectuer de déplacement physique lors de la navigation.

L'ensemble de ces données seront discutées au regard des modèles d'acquisition et d'utilisation des connaissances spatiales, tels que le modèle Landmark-Route-Survey de Siegel et White (1975) et la théorie des graphes proposée par Gillner et Mallot (1998).

En vue d'étudier les variables qui influencent le transfert virtuel/réel des apprentissages spatiaux, nous avons développé un répliquât 3D d'un quartier réel de la ville de Bordeaux (cf. partie II.1 – ci-dessous). D'une façon générale, les sujets apprenaient un parcours en situation virtuelle et devait le reproduire en réel. De plus, différents types d'évaluations des apprentissages spatiaux nous permettaient de préciser la nature des représentations spatiales acquises dans l'environnement 3D notamment en termes de composante égocentrique (centrée sur le sujet) ou allocentrique (de type plan ou carte cognitive). L'étude du degré d'engagement physique a été réalisée en comparant l'apprentissage d'un trajet 3D à l'aide d'un tapis roulant (présence d'informations vestibulaires et proprioceptives) à un apprentissage à l'aide d'un joystick (très peu d'informations proprioceptives et vestibulaires). Le rôle de la rotation (changement de direction active) a été évalué en comparant une situation où le sujet se dirige par lui-même à chaque intersection à une situation où les changements de directions sont entièrement préprogrammés. La condition de changement de direction actif correspondait sur le tapis roulant à une rotation de la tête (présence d'informations vestibulaires) et à une rotation manuelle avec un joystick (mouvement du poignet n'entraînant pas d'activation vestibulaire).

Afin d'étudier le rôle respectif de ces informations dans le transfert virtuel/réel de compétences spatiales, nous avons développé et comparé les apprentissages réalisés à l'aide de 4 types d'interfaces (Voir Figure 4.1) :

- Un tapis roulant unidirectionnel (permettant au sujet de se déplacer) couplé à un système de capture des mouvements de la tête pour ajuster son point de vue à l'orientation de sa tête ;
- Un tapis roulant unidirectionnel (permettant au sujet de se déplacer), sans orientation du point de vue (le déplacement et les changements de direction étaient préprogrammés) ;
- Un joystick (pour se déplacer) couplé à l'orientation du point de vue (dans cas l'orientation se fait à l'aide du joystick et non à l'aide du mouvement de la tête) ;
- Un joystick sans orientation du point de vue (qui permettait de se déplacer, mais comme pour la deuxième interface présentée, les changements de points de vue étaient pré programmés).

Ainsi, l'influence respective de l'engagement physique et de la rotation ont été évalués dans notre première expérimentation.

Interacteurs Possibilité d'orienter le point de vue	Tapis Roulant	Joystick
Avec orientation active	 <p data-bbox="539 1406 959 1458">Le sujet se déplace dans l'EV à l'aide du tapis roulant et s'oriente en tournant la tête pour changer de directions.</p>	 <p data-bbox="994 1406 1414 1458">Le sujet se déplace dans l'EV à l'aide de l'axe vertical du joystick et incline horizontalement le joystick pour s'orienter.</p>
Sans orientation active	 <p data-bbox="539 1841 959 1892">Le sujet se déplace dans l'EV à l'aide du tapis roulant, les changements de directions sont préprogrammés</p>	 <p data-bbox="994 1841 1414 1892">Le sujet se déplace dans l'EV à l'aide de l'axe vertical du joystick, les changements de directions sont préprogrammés</p>

Figure 4.1 : Tableau récapitulatif des différentes interfaces proposées, avec la possibilité ou non d'effectuer activement des rotations dans l'EV.

Dans une seconde expérimentation, nous nous sommes centrés sur l'effet d'une variable susceptible de jouer un rôle majeur dans les apprentissages spatiaux en 3D : la variable expertise en jeu vidéo. Des études ont montré que les joueurs présentaient des performances plus élevées dans certaines tâches classiques d'évaluation des compétences spatiales telles que le test de rotation mentale (Terlecki et *al.*, 2005 ; Boot et *al.*, 2008). L'étude de Richardson et *al.* (2011) a montré une corrélation entre l'expérience en jeu vidéo et une tâche de pointage de cible lors d'un apprentissage en utilisant un joystick et un écran de type bureau comme interacteur. Par contre, ces auteurs n'observent pas de corrélations entre jeux vidéo et performances spatiales lorsque ces mêmes tâches sont réalisées dans un environnement réel. En revanche, à notre connaissance, aucune étude n'a porté sur le transfert virtuel/réel ni sur l'influence de l'expertise en jeu vidéo, sur la navigation spatiale. C'est donc dans cet objectif que s'inscrit notre seconde expérimentation, en utilisant à la fois le joystick et le tapis, et en évaluant également le niveau ou les niveaux de représentation spatiale concernés par cette variable, toujours à l'aide du modèle L-R-S et de la théorie des graphes.

Enfin, dans une troisième expérimentation, nous avons développé une Interface Cerveau Ordinateur (ICO) qui permet de traduire en commandes motrices l'activité électrique du cerveau recueillie à l'aide d'un système EEG. Cette technologie permet d'effectuer des déplacements en imaginant le mouvement d'un membre (par exemple bouger la main droite et main gauche), mais sans effectuer physiquement l'action (imagerie motrice). Le sujet peut alors naviguer dans un environnement 3D en imaginant un mouvement de la main droite (pour se déplacer à droite) ou un mouvement de la main gauche (pour se déplacer à gauche). Cette modalité d'interaction avec un environnement virtuel est extrêmement prometteuse en termes d'applications et notamment en ce qui concerne les personnes atteintes de handicap cognitif et/ou psycho-moteur (Cabestaing et Rakotomamonjy, 2007 ; Lotte, 2008). Cependant, les applications dans le domaine de la cognition spatiale sont quasi inexistantes à l'heure actuelle. Enfin sur le plan théorique, cette interface permet d'évaluer l'importance de la composante motrice (en termes de déplacement physique) dans l'acquisition et la restitution d'informations spatiales. Dans cette troisième expérimentation, nous avons donc comparé le transfert virtuel/réel suite à un apprentissage 3D réalisé soit à l'aide de l'ICO, soit à l'aide d'un tapis roulant. Ces conditions ont été comparées à une situation dans laquelle l'apprentissage a été réalisé directement en situation réelle.

II. Plan expérimental

Comme indiqué précédemment, 3 expérimentations ont été conduites :

Expérimentation 1 : 2 Interacteurs (Tapis Roulant Vs Joystick) x 2 Mouvement de Rotation (Avec Vs Sans) en mesures indépendantes.

Expérimentation 2 : 3 modes d'apprentissage (Tapis Roulant Vs Joystick Vs Réel) x 2 Niveaux d'expertise en jeu vidéo (Joueurs Vs Non Joueurs) en mesures indépendantes.

Expérimentation 3 : 3 modes d'apprentissage (ICO Vs Tapis Roulant Vs Réel) en mesures indépendantes.

Pour chaque expérience, 6 tâches (contrebalancées dans un ordre aléatoire) permettent d'évaluer le transfert de connaissances spatiales du virtuel au réel :

- 3 tests « égocentriques » : classification chronologique de photos, estimation de la distance parcourue et estimation des directions prises ;
- 2 tests allocentriques : dessin du plan du parcours et estimation de la position du point de départ du trajet par rapport à une position donnée ;
- Une tâche de wayfinding où le sujet doit reproduire en réel le parcours appris en virtuel.

Les facteurs liés au sujet (sexe, âge et habiletés spatiales) ont été contrôlés afin d'homogénéiser les différents groupes comparés.

II.1 Méthode

La méthode générale de l'ensemble des expériences est sensiblement la même. Lorsque des spécificités apparaîtront nous les indiquerons dans la partie méthode spécifique à chaque expérimentation. Pour étudier le transfert des connaissances spatiales nous avons développé une modélisation informatique 3D d'un quartier réel de la ville de Bordeaux. L'objectif de la tâche était donc d'apprendre le parcours (cf. Figure 4.2) à l'aide d'une des interfaces en EV (cf. Figure 4.1) et de le restituer selon différentes modalités d'évaluation.

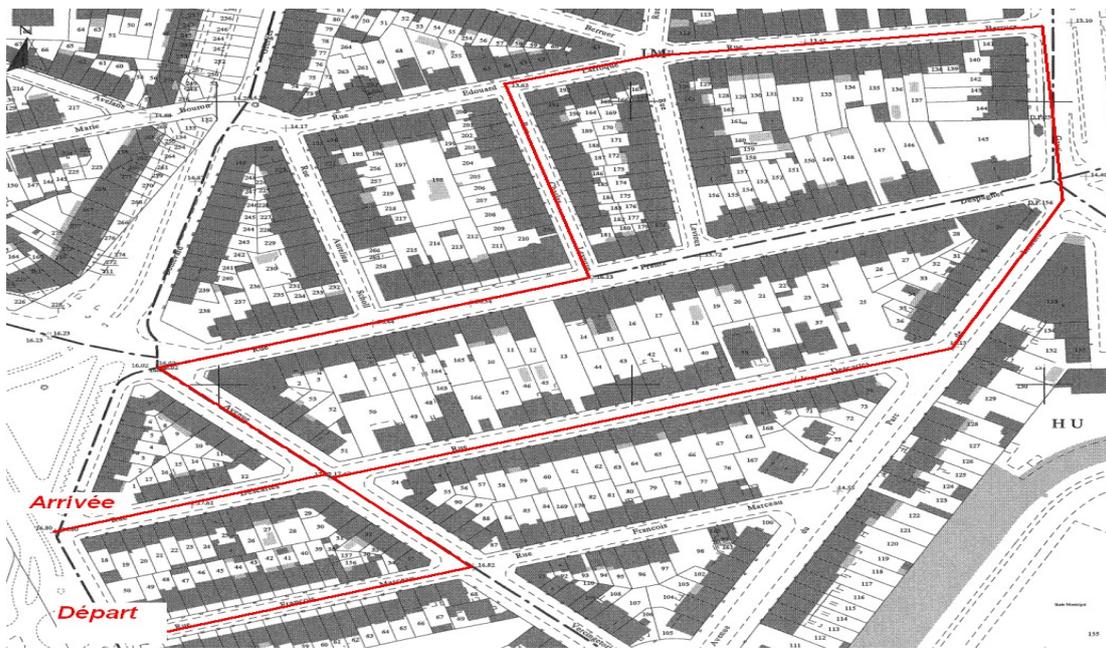


Figure 4.2 : Plan cadastral du parcours, ayant permis sa modélisation.

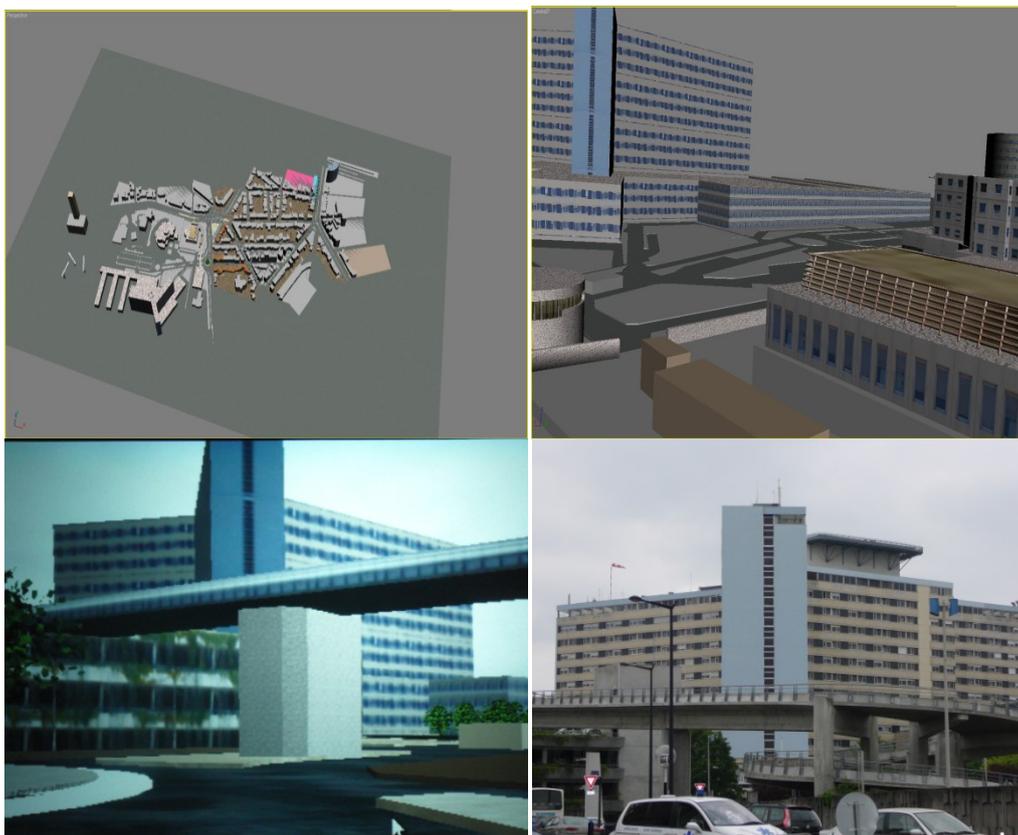


Figure 4.3: Vue de l'environnement virtuel

Vue de l'environnement réel

II.1.1 Participants

Les participants étaient des étudiants de l'Université Bordeaux Segalen, âgés de 18 à 30 ans, droitier. Ils étaient tous de langue maternelle française, avec une vue correcte normale ou corrigée, et ayant un bac ou l'équivalent du bac au minimum. Dans nos expérimentations, une personne jouant aux jeux vidéo est considérée comme une personne qui joue hebdomadairement au minimum 2 heures depuis plus d'un an. Un sujet non joueur est considéré comme une personne n'ayant pratiquement jamais jouée aux jeux vidéos et qui n'est pas un ancien joueur.

II.1.2 Matériels

II.1.2.1 L'environnement

L'environnement réel était un quartier proche de l'Hôpital Pellegrin de Bordeaux. L'environnement 3D (cf. Figure 4.3) était une réplique fidèle de l'environnement réel, composé de stimuli visuels réalistes. L'échelle de l'environnement réel a été reproduite (mesures des maisons, distances des rues, etc.) à l'aide d'un plan cadastral et des photos de certaines maisons ont été appliquées sur les surfaces géométriques de l'environnement virtuel pour en améliorer sa fidélité visuelle (cf. Figure 4.3). Des points de repères locaux et globaux (poste, pharmacies, stade, cheminées, etc.) et des sons urbains ont été reproduits également pour améliorer l'immersion et le réalisme de la simulation. Nous avons modélisé cet environnement virtuel à l'aide du logiciel Virtools 3.5® (Voir partie Ingénierie de Recherche, annexe 1). Quel que soit le groupe d'apprentissage (virtuel ou réel), l'itinéraire à apprendre était présenté en vue égocentrique, à hauteur de tête. L'environnement était caractérisé par une boucle fermée de 780 mètres, 13 intersections, et 11 changements de directions (cf. Figure 4.2).

II.1.2.2 Matériels

L'ordinateur utilisé était un ordinateur portable DELL Precision M6300 (RAM : 3GHz; processeur : Intel Core 2 Duo T9500 2,60 Ghz), composé d'une carte graphique Nvidia Quadro FX 1600M dotée de 256Mo de RAM. Les expérimentations ont été effectuées à la Plateforme du Mouvement du Laboratoire Mouvement Adaptation et Cognition de Bordeaux (CNRS UMR 5227). Les sujets étaient placés dans le noir, à 2 mètres d'un écran de projection mesurant 2mx1.88m. Les environnements 3D étaient projetés à l'aide d'un vidéo

projecteur Optoma/ThemeScene - Texas Instrument en vidéoprojection arrière évitant ainsi tout risque d'ombre.

II.2 Procédure générale

Chaque expérimentation s'est déroulée de la manière suivante :

II.2.1 Phase de tests neuropsychologiques

Cette phase permet d'évaluer les capacités spatiales du participant. Trois tests ont été utilisés dans un ordre contrebalancé :

- Le test des cubes de Corsi (Corsi, 1972) mesure l'empan visuo spatial direct et indirect du participant. Le sujet doit reproduire des séquences croissantes de positions spatiales que l'examineur lui a préalablement montrées. Dans une deuxième partie, l'examineur montre toujours des séquences de positions que le sujet doit reproduire en ordre inverse.
- Le test de rotation mentale de Vandenberg et Kuse (1978) mesure la capacité à faire tourner une figure en 2D ou 3D en l'imaginant. Il permet plus particulièrement d'évaluer les capacités mentales du sujet à se représenter un objet et à en modifier correctement son orientation.
- Le GZ-5 (Guilford et Zimmerman, 1948) est une évaluation des capacités du sujet à percevoir des changements de direction et de position. Il consiste plus particulièrement à évaluer des situations de navigation liées aux mouvements d'un bateau.

II.2.2 Apprentissage du trajet

II.2.2.1 Apprentissage en situation réelle

Le participant a pour consigne de mémoriser un trajet en situation réelle (le trajet lui est montré une seule fois). Le sujet était accompagné par l'expérimentateur placé derrière lui, qui lui indiquait les directions à prendre à chaque intersection par une consigne verbale (« par là ») ainsi qu'un geste de la main indiquant la direction. Le sujet était équipé d'une caméra AIPTEK mini Pocket DV8900 posée sur un casque de vélo, et d'un GPS Magellan CrossOver afin d'enregistrer sa position et les informations visuelles perçues tout au long du trajet.

II.2.2.2 Apprentissage en situation virtuelle

Pour la condition virtuelle, le sujet visualisait la reproduction 3D du trajet réel. Comme pour la situation réelle, l'expérimentateur était placé derrière lui, et lui indiquait les directions à prendre à chaque intersection par une consigne verbale (« par là ») ainsi qu'un geste de la main indiquant la direction. Là encore, la position et le trajet réalisé par le sujet dans l'environnement 3D étaient enregistrés toutes les 20ms.

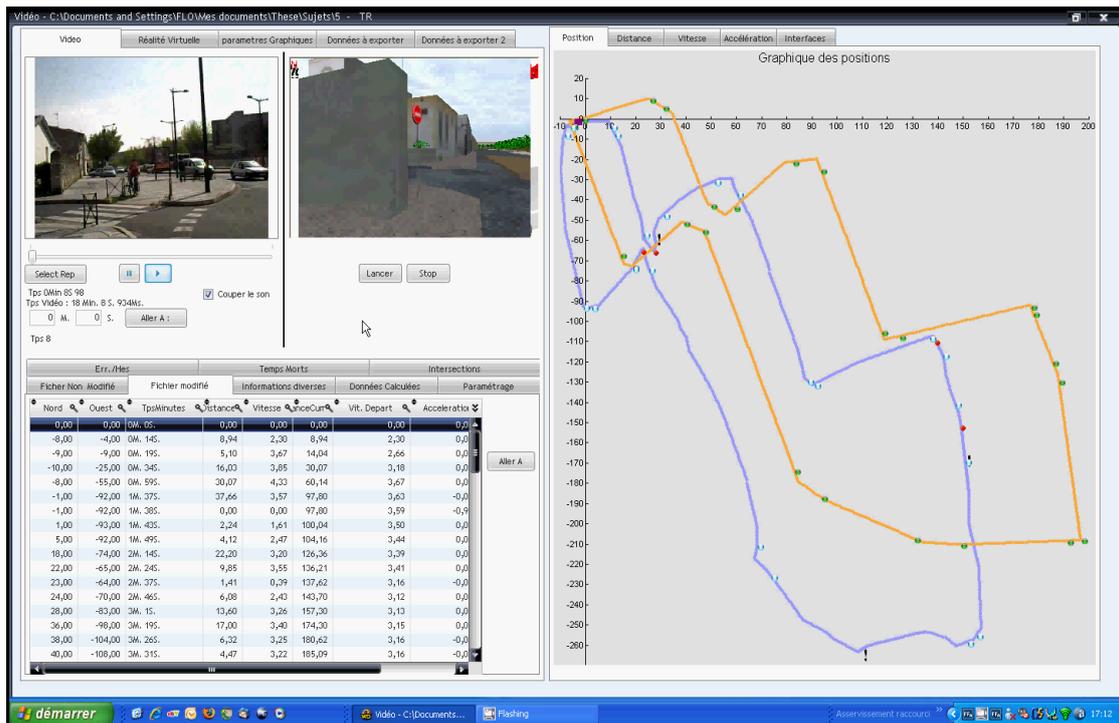


Figure 4.4 : Capture d'écran du logiciel d'analyse d'activité cognitive et motrice : à gauche, l'environnement réel et l'EV, à droite les différents graphiques des positions, vitesses, accélérations et manipulations des interfaces (en bleu le réel, en orange le virtuel).

Un logiciel créé à l'aide de du langage de programmation Windev (PCSOFT®) a été développé afin de comparer les trajets (données GPS/vidéo) réalisés en environnement réel et virtuel, aussi bien lors de l'apprentissage que lors de la restitution du parcours (cf. Figure 4.4). Ce logiciel donne les informations relatives aux accélérations, décélérations, nombre de rotations, à la vitesse moyenne, le temps resté dans les intersections, le nombre d'accélérations/ décélérations/rotations dans les intersections, la distance parcourue, etc. (pour un descriptif plus détaillé, voir la partie Ingénierie de Recherche en annexe 1).

II.2.3 Phase de restitutions (transfert)

Les sujets, après apprentissage ont été évalués à l'aide de 6 épreuves de restitutions, décrites ci-dessous, et destinées à évaluer plus spécifiquement les connaissances égocentriques ou allocentriques :

II.2.3.1 Tâche égocentrique de classification chronologique de photos

Dans ce test, 12 photos de l'environnement réel sont présentées dans un ordre aléatoire au participant. Celui-ci a pour consigne de classer les photos dans l'ordre chronologique (durant 10 minutes). Le score se calcule de la façon suivante : 1 point par photo correctement placée, 0.5 point lorsque plusieurs photos se suivent mais ne sont pas à la bonne place (par exemple lorsque les photos 4-5-6 sont placées à l'emplacement 8-9-10, 1,5 points sont attribués au lieu de 3).

II.2.3.2 Tâche égocentrique d'estimation des directions

Ce test consiste à présenter les photos des intersections de l'environnement réel dans un ordre aléatoire. Le sujet doit indiquer la direction qu'il a prise à l'aide de 8 flèches situées en dessous de l'image présentée. Deux scores sont notés : le pourcentage d'erreurs et l'erreur angulaire moyenne. L'erreur correspond à la sélection d'un mauvais choix de direction. L'erreur angulaire correspond à la différence angulaire entre la flèche correcte et la flèche indiquée par le sujet.

II.2.3.3 Tâche égocentrique d'estimation des distances parcourues

Le sujet a pour consigne d'indiquer verbalement (en mètres) la distance totale qu'il estime avoir parcourue durant l'apprentissage en EV.

II.2.3.4 Tâche allocentrique du dessin du parcours

La tâche de dessin consiste, pour le sujet à esquisser un plan du parcours. Le plan demandé est un simple schéma (i.e. des segments connectés) indiquant les changements de directions pour effectuer le parcours. Le participant a 10 minutes pour effectuer le test. Le sujet comptabilise un point pour chaque dessin de segment de direction correct.

II.2.3.5 Tâche allocentrique d'estimation du point de départ du trajet

Des photos des intersections sont présentées aléatoirement et le sujet doit indiquer le point de départ par rapport à la photo présentée. Nous mesurons également le nombre d'erreurs et l'erreur angulaire moyenne du participant. Ce test nécessite l'élaboration d'une carte mentale et mesure donc plus particulièrement les connaissances de type allocentrées (cf. Figure 4.5).

II.2.3.6 Tâche globale du wayfinding

La tâche de wayfinding consiste, pour le sujet, à reproduire en situation réelle le parcours appris en virtuel (Chen et Stanney, 1999). Le sujet est équipé de la même caméra et du même GPS afin d'enregistrer sa position et les informations visuelles qu'il perçoit tout au long du trajet. L'expérimentateur comptabilise les erreurs de directions et les hésitations (i.e. quand le sujet marque un arrêt de plus de 2 secondes). En cas d'erreur, le sujet est stoppé et l'expérimentateur le replace dans la bonne direction. Ces deux scores sont alors divisés par le nombre de choix de directions afin d'obtenir un score en pourcentage. Cette tâche est la plus proche des activités spatiales quotidiennes et permet d'étudier le transfert de connaissances spatiales d'un EV vers un environnement identique dans le réel.

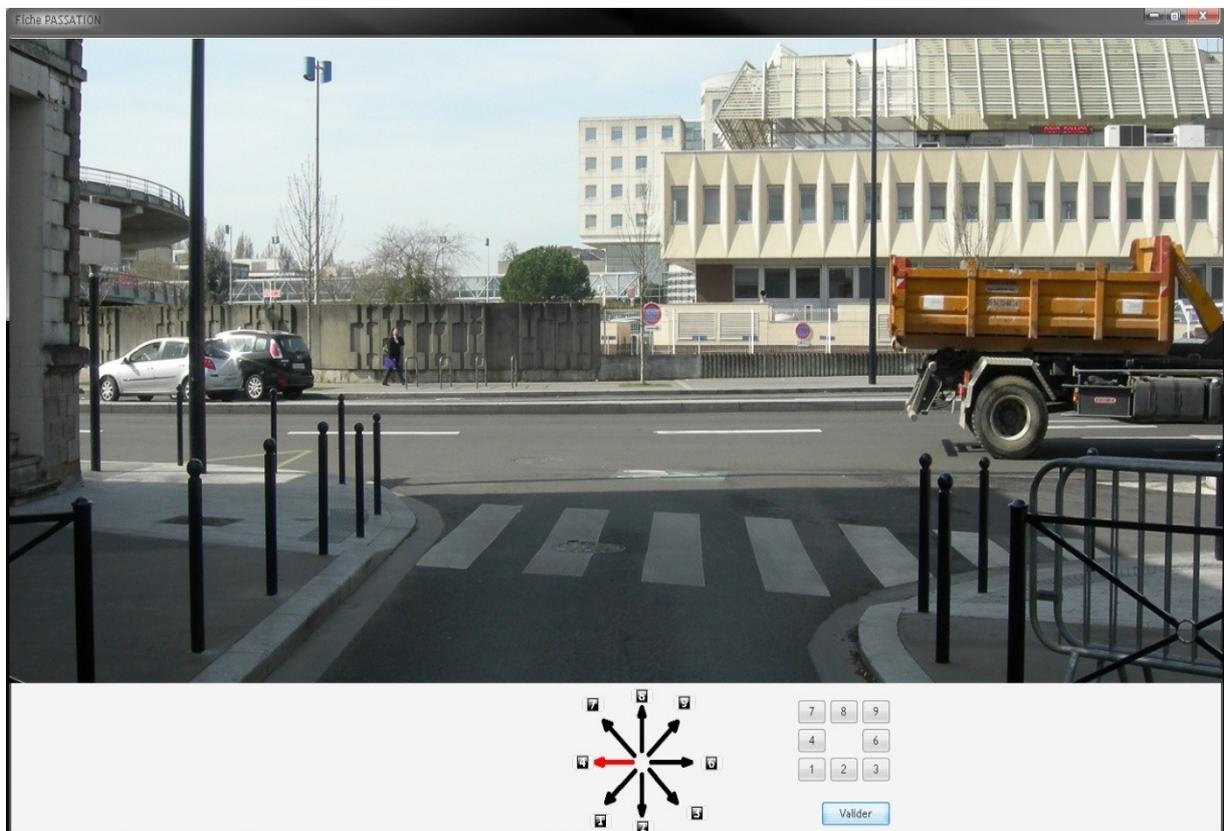


Figure 4.5: Test d'estimation de direction et du point de départ du trajet.

En complément de ces tests de restitution, nous avons également utilisé des tests papiers crayons afin de mesurer les aptitudes du sujet à l'outil informatique, ses connaissances et sa fréquence d'utilisation des jeux vidéos, le type de jeux vidéo, et enfin son ressenti à l'égard de l'interface utilisée.

Deux autres tests ont été proposés :

- Le Questionnaire sur la Propension à l'Immersion (Immersive Tendencies Questionnaire) de Witmer et Singer (1998) révisé et traduit en français par le Laboratoire de Cyberpsychologie de l'UQO (2002), qui mesure la capacité du sujet à s'immerger dans n'importe quel type de média à l'aide de 4 échelles (Focus, Implication, Emotion et Jeu).
- Le Questionnaire sur l'Etat de Présence (Presence Questionnaire) également créé par Witmer et Singer (1998) adapté en français par le Laboratoire de Cyberpsychologie de l'UQO (2002), mesure le sentiment de présence du sujet durant la période d'apprentissage dans l'EV. Ce questionnaire permet donc d'évaluer la réaction humaine à l'immersion et à l'ensemble des stimuli sensorimoteurs proposés par le système RV, selon 7 échelles de mesures différentes (Réalisme, Possibilité d'agir, Qualité de l'interface, Possibilité d'Examiner, Auto-évaluation de la performance, Auditif, Haptique).

Chapitre V : Influence de l'Engagement Physique et de la Rotation sur le transfert Virtuel/Réel

Les résultats de ce chapitre ont été soumis dans la revue « Journal Experimental Of Psychology : Applied » sous le titre suivant :

LARRUE, F., Sauzéon, H., Foloppe, D., Wallet, G., Gross, C. & N'Kaoua, B. (submitted). Differences in spatial learning transfer from virtual to real according to body-based manipulations.

I. Objectifs

Cette première expérimentation porte sur le rôle du degré d'engagement physique (informations proprioceptives et vestibulaires relatives à la position du corps dans l'espace) et de la rotation dans l'apprentissage d'un parcours en 3D. Dans ce contexte, 2 interacteurs sont manipulés : un joystick (faible engagement physique mettant en jeu peu d'informations proprioceptives et aucune information vestibulaire) ; et un tapis roulant unidirectionnel (fort engagement physique mettant en jeu des informations proprioceptives dues à l'activité motrice de la marche et des informations vestibulaires de translation dues aux accélérations/décélérations linéaires du tapis). Nous avons également évalué l'implication de la rotation (changement de direction active) pour ces deux types d'interacteurs en comparant une situation où le sujet se dirige à chaque intersection, à une condition où les changements de direction étaient préprogrammés. Dans la condition de rotation active, le sujet effectuait soit une rotation de la tête (présence d'informations vestibulaires de rotation) en condition de déplacement avec le tapis roulant, soit une inclinaison du joystick (aucune information vestibulaire) pour la condition de déplacement avec le joystick. Nos différents tests d'évaluation des apprentissages spatiaux permettent de préciser l'impact de l'engagement physique (et donc des informations vestibulaires et proprioceptives associées) sur les compétences spatiales de type égocentrique et allocentrique. Nous discuterons ces données au

regard des théories relatives à l'acquisition de connaissances spatiales, et plus particulièrement au modèle L-R-S de Siegel et White(1975) et la théorie des graphes de Gillner et Mallot (1998).

Aujourd'hui encore, le débat concernant l'importance du mode actif (comparé au mode passif) dans l'acquisition des connaissances spatiales est toujours d'actualité. Pour rappel, Wilson et *al.* (1997) ont défini deux modes d'exploration : passif, où le sujet n'interagit pas avec l'environnement, et actif, où le sujet interagit à l'aide d'une interface. Les auteurs trouvent des résultats différents selon le mode d'exploration utilisé. Par exemple, dans une tâche de wayfinding où les sujets devaient retrouver des cibles à l'aide d'un joystick, Peruch et *al.* (1995) montrent une supériorité pour le mode d'interaction actif comparé au mode passif. Des résultats similaires ont été obtenus par Wallet et *al.* (2008,2009,2010,2011) qui comparaient également un déplacement avec ou sans joystick. Par contre, Wilson et *al.* (1997) ne trouvent aucune différence significative entre les modes passif et actif en utilisant une interaction à l'aide d'un clavier ou d'une souris. Ruddle et *al.* (2009) se sont intéressés à la marche. Ces auteurs ont étudié différentes interfaces de locomotion telles que la marche dans un environnement virtuel couplé à un casque HMD (Head Mounted display : dispositif permettant d'orienter le point de vue en fonction du mouvement de la tête), le déplacement à l'aide d'un clavier couplé à un HMD, ou le déplacement à l'aide d'un clavier et d'une souris couplé à un écran de bureau. Ils rapportent que la marche en réalité virtuelle permet de meilleures performances comparées aux autres interfaces dans une tâche de recherche de cibles. Dans une autre étude, plus ancienne, Grant et Magee (1998) ont comparé une interface de marche et une interface joystick dans une tâche de wayfinding, et ont également observé de meilleures performances dans la condition où le sujet se déplaçait en marchant.

Mieux comprendre les caractéristiques de l'activité sensori-motrice susceptible d'optimiser le transfert des apprentissages spatiaux constitue aujourd'hui un enjeu important. Cela permettrait i) de proposer des interfaces pertinentes au regard des objectifs de la tâche à réaliser ; ii) de préciser le rôle du couplage perception-action et en particulier des informations vestibulaires et proprioceptives dans la navigation spatiale, et iii) d'apporter un éclairage nouveau sur le débat concernant l'influence du mode d'interaction (actif vs. passif) sur les apprentissages spatiaux dont nous avons vu qu'il donne lieu à des positions contradictoires. Dans cette étude, nous nous sommes intéressés au rôle du degré d'engagement physique (faible ou fort) et de la rotation (changement de direction active lors des intersections) dans l'acquisition et l'utilisation des connaissances spatiales. Manipuler ces

variables revient également à s'interroger sur le rôle des informations sensorielles relatives à la position du corps, et en particulier les informations vestibulaires et proprioceptives dans les apprentissages spatiaux (cf. Chapitre 1 et note de bas de page⁸). Différentes recherches montrent que ces 2 systèmes (vestibulaires et proprioceptifs) sont importants dans l'acquisition des connaissances spatiales en environnement réel. Par exemple, Campos et *al.* (2010) démontrent que les informations vestibulaires et proprioceptives seraient deux fois plus importantes que le flux optique dans l'estimation de direction ou de distance ; par contre, le couplage de l'ensemble des informations visuelles, vestibulaires et proprioceptives serait additif en termes de bénéfices sur la cognition spatiale. Dans un autre travail, Klatzky et *al.* (1998) étudient la capacité à se situer dans un environnement en utilisant une tâche de complétion de triangle (cf. chapitre 1 et note de bas de page⁹) imaginée, simulée ou réelle. Ils montrent que le fait de tourner réellement la tête (mouvement de rotation physique en situation réelle) permet d'améliorer l'évaluation de sa propre position dans l'espace, ce qui souligne l'importance des informations vestibulaires dans ce type de tâche. D'autres études ont évalué l'importance des informations proprioceptives dans des situations virtuelles. Waller et Richardson (2008), par exemple, montrent que les informations vestibulaires et proprioceptives sont plus importantes que le flux optique dans un déplacement en virtuel, ce qui rejoint les résultats obtenus par Campos et *al.* (2010) en situation réelle. Plus récemment, Ruddle et *al.* (2011a) ont comparé différentes interfaces stimulant ou non les informations vestibulaires (pour rappel les informations vestibulaires sont composées des informations

⁸ Les informations sensorielles relatives au corps comprennent :

- Les informations concernant le flux optique, c'est-à-dire l'ensemble des informations visuelles permettant de détecter des formes, des textures, des mouvements d'objets, etc. Le flux optique est composé du flux optique translationnel (relatif à l'ensemble des mouvements d'une position à une autre sans orientation) et du flux optique rotationnel (relatif au mouvement de rotation).
- Les informations liées au système vestibulaire. Le système vestibulaire se situe dans l'oreille interne et informe sur les accélérations/décélérations de la tête, ainsi que sur les rotations. Comme le flux optique, le système vestibulaire se compose de deux parties : le système vestibulaire rotationnel et le système vestibulaire translationnel.
- Les informations proprioceptives. Elles informent sur les commandes motrices envoyées par le système nerveux aux muscles et au cerveau, et permettent d'anticiper les conséquences d'un mouvement.

⁹ Cette tâche consiste à marcher le long d'un premier segment, à changer de direction et marcher le long d'un deuxième segment. Une fois arrivé à la fin du deuxième segment, le sujet retrouver le point de départ; la forme du parcours ressemble à une forme triangulaire, d'où son nom.

vestibulaires de translation en rapport avec les accélérations linéaires de la tête, et des informations vestibulaires de rotation en rapport avec les mouvements de rotation de la tête).

Les conditions étaient les suivantes :

- Joystick avec écran d'affichage normal : dans ce cas, le sujet se déplace à l'aide d'un joystick pour avancer et pour tourner. Il n'effectue donc pas de mouvement de la tête et ne reçoit pas d'informations vestibulaires ;
- Joystick avec HMD : le sujet se déplace avec le joystick et oriente son point de vue par des mouvements de tête (notamment pour tourner). Il reçoit donc des informations vestibulaires de rotation (mouvements de la tête), mais pas d'informations vestibulaires de translation (les mouvements de tête concernent les rotations mais pas les accélérations linéaires qui sont effectuées seulement à l'aide du joystick) ;
- Tapis roulant avec joystick : le tapis roulant permet d'accélérer et de décélérer alors que le joystick permet de tourner. Dans ce cas, le tapis fournit des informations vestibulaires de translation, mais le sujet ne bénéficie pas d'informations vestibulaires de rotation puisqu'il ne tourne pas la tête lors des rotations ;
- Tapis roulant avec HMD : le tapis permet d'accélérer et de décélérer, et le HMD permet d'orienter le point de vue à l'aide des mouvements de tête. Le sujet bénéficie donc d'informations vestibulaires de translation et de rotation.

Les auteurs ont ainsi pu démontrer que la stimulation vestibulaire de rotation avait peu d'influence sur la perception des distances dans un EV et que l'activité motrice liée à la marche favorisait l'élaboration et la mise à jour de représentations allocentrées. Ces résultats vont dans le sens de Ruddle et Péruch (2004) qui montrent que l'effet de rotation est négligeable lorsque la tâche est de type allocentrique. L'ensemble de ces recherches se centre sur l'effet du déplacement en situation réelle ou virtuelle, mais peu ou pas d'études se sont intéressées au transfert virtuel/réel des informations spatiales. Dans ce contexte, cette première expérimentation a pour objectif d'évaluer l'impact de différents interacteurs sur le transfert d'informations spatiales en se centrant plus spécifiquement sur le rôle des informations vestibulaires et proprioceptives. Le sujet devra apprendre un trajet dans un environnement virtuel et les interacteurs utilisés sont le tapis roulant unidirectionnel et le joystick, qui permettent de définir 4 situations d'interactions :

- Déplacement à l'aide d'un tapis roulant avec possibilité d'orienter le point de vue par une rotation de la tête ;

- Déplacement à l'aide du tapis roulant sans possibilité d'orienter son point de vue. Dans ce cas, le parcours est prédéfini et le trajet défile sur l'écran (y compris les changements de direction). Le sujet ne fait que marcher sur le tapis roulant (unidirectionnel) en gérant uniquement les accélérations et les décélérations. La vitesse de déplacement du trajet virtuel est asservie à la vitesse du tapis ;
- Joystick pour se déplacer avec possibilité d'orienter le point de vue également à l'aide du joystick (et non pas avec les mouvements de la tête) ;
- Joystick pour se déplacer sans possibilité d'orienter le point de vue. Cette dernière condition est équivalente à la seconde condition dans laquelle le tapis roulant est remplacé par le joystick.

Ces 4 conditions d'interactions sont comparées à une condition contrôle dans laquelle le sujet apprend le parcours en environnement réel et le restitue également en environnement réel.

Le tableau ci-dessous présente les informations proprioceptives supposées stimulées selon le type d'interface utilisé et la possibilité (ou non) d'orienter le point de vue.

Interacteurs		Tapis Roulant		Joystick	
		Avec Rotation	Sans Rotation	Avec Rotation	Sans Rotation
Flux Optique	Flux optique translationnel	✓	✓	✓	✓
	Flux optique rotationnel	✓	✓	✓	✓
Informations proprioceptives	Informations Proprioceptives	✓	✓	✓	✓
Informations vestibulaires	Informations vestibulaires de translations	✓	✓		
	Informations vestibulaires de rotation	✓			

Tableau 5.1: Informations vestibulaires et proprioceptives selon l'interacteur et le type de Rotation.

II. Méthode

Quatre vingt douze étudiants de l'Université Victor Segalen (46 hommes et 46 femmes) ont participé à cette étude. Vingt étudiants ont été assignés à la condition d'apprentissage réel (groupe contrôle, 10 hommes et 10 femmes) et 72 participants ont appris le trajet à l'aide de la RV. Quatre groupes de 18 participants ont été constitués selon l'interface utilisée : (1) Tapis avec rotation, (2) Tapis sans rotation, (3) Joystick avec rotation et (4) Joystick sans rotation. Les 5 groupes étaient appariés pour le sexe et l'expertise en jeu

vidéo ($\chi^2 p > 0,05$). Ils étaient également équivalents en termes de compétences spatiales mesurées à l'aide du GZ-5 (Guilford et Zimmerman, 1948), du test de rotation mentale (Vandenberg et Kuse, 1978) et du test des Cube de Corsi (Corsi, 1972) (respectivement, $p > 0,300$ $p > 0,800$; $p > 0,600$).

Interacteurs	Acquisition en réel				Acquisition RV						
	Rotation	Tapis Roulant				Joystick					
		Avec		Sans		Avec			Sans		
Genre	10 Hommes/10 Femmes		9 Hommes/9 Femmes		9 Hommes/9 Femmes			9 Hommes/9 Femmes			
jeux Vidéos	10 Joueurs/10 non Joueurs		9 Joueurs/9 non Joueurs		10 Joueurs/8 non Joueurs			9 Joueurs/9 non Joueurs			
	Moyenne	Ecart Type	Moyenne	Ecart Type	Moyenne	Ecart Type	Moyenne	Ecart Type	Moyenne	Ecart Type	
Age	22,3	2,812	22,611	3,238	23,833	3,312	21,889	2,193	23	3,694	
Habiletés spatiales											
GZ-5	22,238	10,477	18,681	9,746	23,514	9,01	25,847	12,921	22,819	9,268	
Test Rotation Mentale	20,6	9,681	22,278	6,918	19,389	8,932	21,833	5,924	21,5	8,396	
Cubes de Corsi (Empan total)	18,45	2,892	18,556	2,202	18,389	2,893	18,111	1,605	17,444	2,455	
Cubes de Corsi (Empan Direct)	9,25	1,803	9,556	1,542	9,333	1,749	9,222	1,06	8,722	1,904	
Cubes de Corsi (Empan Indirect)	9,2	1,704	9	1,188	9,056	1,514	8,889	1,53	8,722	1,179	

Tableau 5.2: Moyenne et écart type des facteurs internes et des habiletés aux tests spatiaux.

II.1 Matériel

II.1.1 Interfaces

Cette partie décrit brièvement l'ensemble des interfaces développées et le matériel utilisé. Quel que soit l'interacteur utilisé, la vitesse de déplacement était bloquée à 6 km/h. L'ensemble des apprentissages en réalité virtuelle a été effectué au sein de la Plateforme d'Analyse du Mouvement du laboratoire Mouvement Adaptation Cognition (UMR 5227) de l'Université Bordeaux Segalen (cf. Figure 5.1). Cette salle mesure environ 12 mètres sur 10 mètres.



Figure 5.1: Plateforme d'Analyse du Mouvement de l'UMR 5227, CNRS, Université Bordeaux Victor Segalen.

II.1.2 Interacteur Joystick

Condition Générale

Le joystick était de marque Saitek® X52 Flight System. L'axe vertical était bloqué pour éviter le retour en arrière, seul l'accélération était permise. Plus le joystick était incliné et plus le sujet accélérail ; l'inclinaison du joystick était donc proportionnelle à la vitesse de déplacement.

Condition sans Rotation

Le sujet ne pouvait pas effectuer de rotation. Il suivait un trajet prédéfini et les rotations étaient automatiques ; le sujet ne maîtrisait donc que sa vitesse de déplacement linéaire sur le trajet en inclinant le joystick à sa convenance.

Condition avec Rotation

Le sujet a la possibilité de réaliser des rotations actives à l'aide du joystick. Il maîtrisait sa vitesse de déplacement, mais également sa vitesse de rotation. Plus il inclinait le joystick vers la gauche (ou vers la droite), plus la caméra tournait rapidement vers la gauche (ou la droite). Ainsi le sujet maîtrisait sa vitesse de déplacement, sa rotation, et ne suivait plus un trajet prédéfini (cf. Figure 5.2).

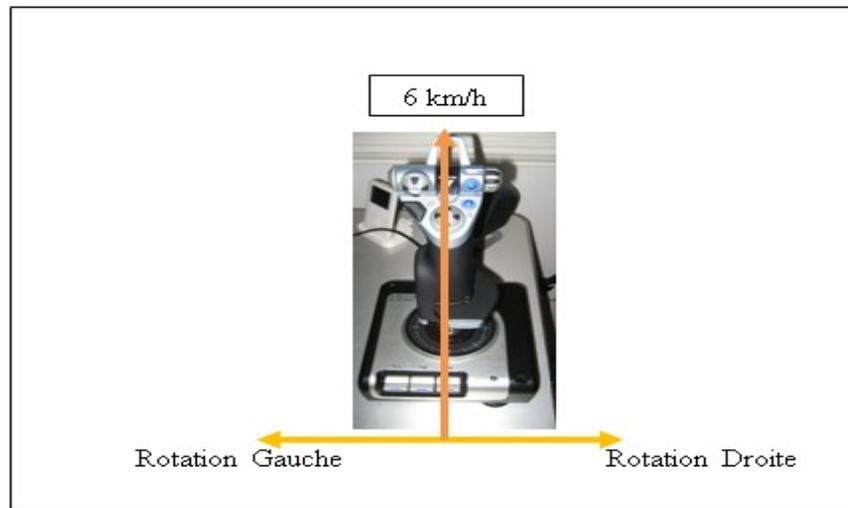


Figure 5.2: Fonctionnalités de déplacement avec le joystick (l'axe vertical permet d'avancer, l'axe horizontal permet d'orienter son point de vue à gauche ou à droite).

II.1.3 Interacteur Tapis Roulant

Interacteur Tapis

Un tapis COSCOM programmable équipé d'un port série RS-232, un Software Development Kit (SDK), ainsi qu'un télémètre SONAR MS-EZ1 ont été utilisés pour simuler l'activité de marche. L'objectif de cette interface était de pouvoir accélérer, décélérer, s'arrêter à l'aide d'interacteurs non intrusifs. Comme pour la condition joystick, la vitesse de déplacement était limitée à 6 km/h. Le tapis roulant était divisé en 3 parties : une zone d'accélération qui se situait à l'avant du tapis, une zone de marche normale (au milieu du tapis) et une zone de décélération à l'arrière du tapis. Lorsque le sujet souhaitait accélérer, il se déplaçait vers l'avant du tapis. Le télémètre (situé à l'arrière du tapis) détectait une augmentation de distance, ce qui déclenchait une accélération du tapis jusqu'à ce que le participant revienne dans la zone de marche normale. De la même manière, lorsque le sujet souhaitait décélérer, il se déplaçait à l'arrière du tapis, dans la zone de décélération, le télémètre détectait une diminution de la distance et le tapis décélérait tant que le sujet n'était pas revenu dans la zone de marche (cf. Figure 5.3). Ainsi, cette métaphore du mouvement basée sur un schème comportemental importé de la marche permettait de stimuler le système vestibulaire de translation puisque le sujet devait se déplacer sur le tapis roulant et ressentait les accélérations/décélérations qu'il demandait au tapis. Le temps de réponse global du couplage tapis roulant/télémètre était inférieur à 70 ms assurant un contrôle « presque temps réel » de l'interface proposée.

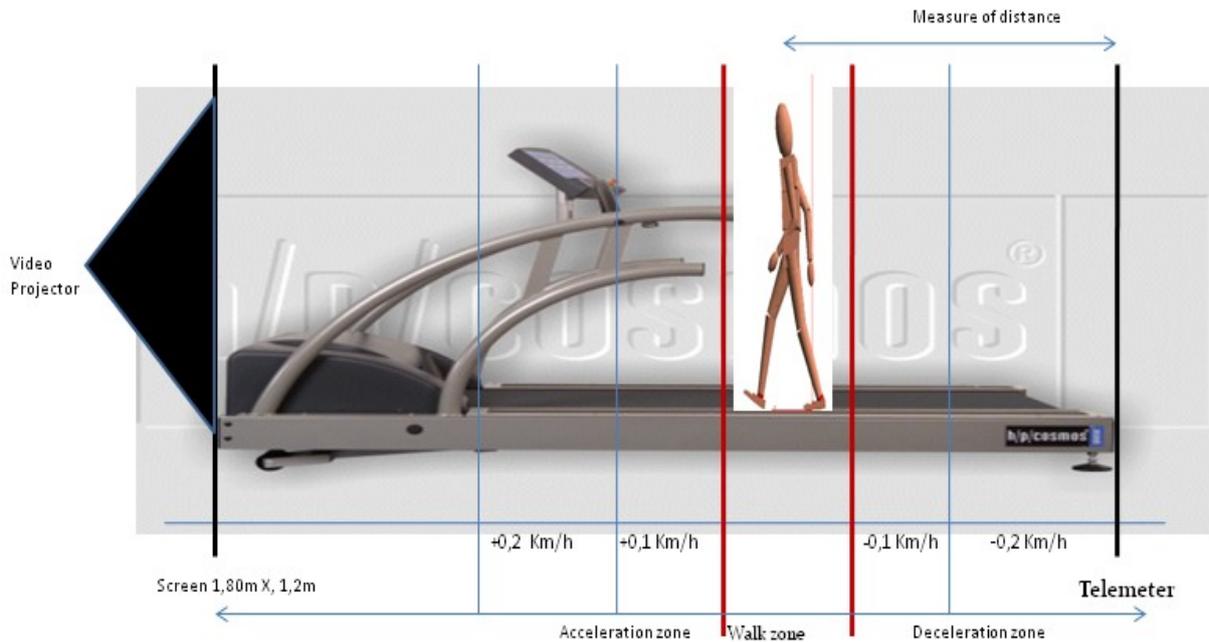


Figure 5.3: Schéma du mode de fonctionnement du tapis roulant COSCOM©.

Condition sans Rotation

Le sujet ne pouvait pas contrôler ses rotations et suivait un trajet prédéfini (les rotations étaient automatiques) ; à l'aide du tapis roulant et de la métaphore de translation associée, le sujet ne maîtrisait donc que sa vitesse de déplacement en se déplaçant dans les zones d'accélération, de décélération et de marche normale.

Condition avec Rotation

Pour la maîtrise du mouvement de rotation, le système de motion capture OPTITRACK© (Natural Point) a été utilisé. Le sujet était équipé d'un bandeau comportant 3 sphères, permettant un tracking en temps réel des mouvements de tête à l'aide de 12 caméras murales OPTITRACK. Ce système permettait au sujet d'orienter son point de vue à l'aide des mouvements de sa tête. Plus le sujet tournait la tête rapidement, plus la rotation de l'environnement était rapide. (cf. Figure 5.4).

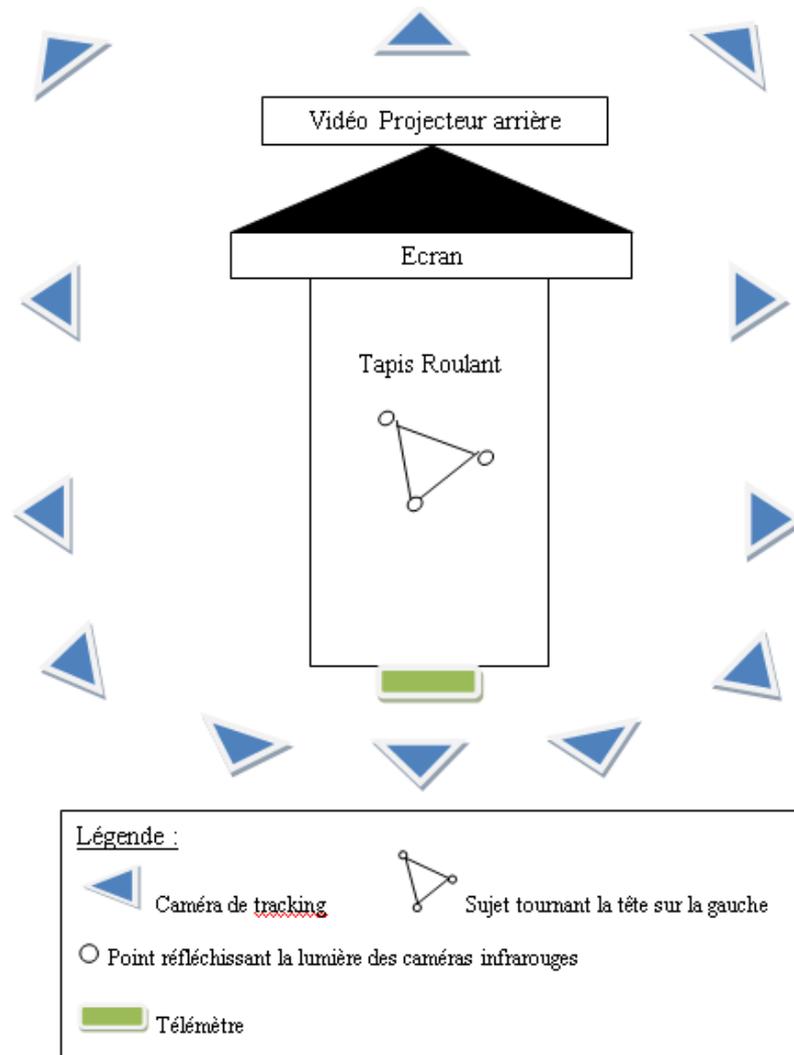


Figure 5.4: Schéma de fonctionnement de la rotation au tapis roulant (vue de haut).

II.2 Procédure générale

La procédure générale a été décrite dans la partie Modèle d'Analyse (Chapitre 4). Elle se compose de : (i) des tests papiers crayons évaluant les habiletés spatiales du sujet, (ii) l'apprentissage du trajet et (iii) la restitution du trajet à l'aide de 6 tests de restitution. Dans cette expérimentation, les sujets ont été au préalable soumis à l'apprentissage de l'interface qu'ils devaient utiliser. Cet apprentissage a été réalisé en utilisant un environnement virtuel différent du quartier de Bordeaux (pour détails, cf. Ingénierie de recherche en annexe 1).

III. Résultats

L'objectif de cette expérimentation est de comparer les performances dues à un apprentissage en RV aux performances après un apprentissage en réel ; pour chaque condition expérimentale, nous avons normalisé chaque mesure dépendante à l'aide d'un Z-Score :

$$Z = \frac{(X - M_{\text{réel}})}{\sigma_{\text{réel}}}$$

où X est la variable dépendante, M est la moyenne, σ est l'écart type de la variable dépendante. Dans tous les cas, la moyenne utilisée pour centrer les variables est la moyenne obtenue en condition réelle. Cette technique utilisée par Skelton, Bukach, Laurance, Thomas et Jacobs (2000) ou Arthur, Hancock et Chrysler(1997) permet de rapporter les scores obtenus en RV aux scores réalisés en réel, ces derniers étant utilisés comme référence. De plus, cette méthode permet d'ajuster le plan expérimental dans la mesure où la condition réelle ne permet pas de manipuler la variable rotation (contrairement aux conditions joystick et tapis roulant). De ce fait, une valeur positive obtenue en RV, signifie qu'elle est supérieure à la condition réelle (et inversement lorsque le score est négatif). Chaque mesure dépendante a été ensuite soumise à une ANOVA en mesure indépendante à deux facteurs : 2 [Interacteurs : Tapis Roulant Vs Joystick] x 2 [Mouvement de Rotation (Avec Vs Sans)]. Nous avons également effectué des corrélations entre la vitesse d'apprentissage et chaque mesure de restitution à l'aide du test de corrélation de Bravais Pearson. Aucune corrélation entre la vitesse d'apprentissage et les résultats n'a été obtenue ; ces résultats ne peuvent donc pas être expliqués par le temps passé dans l'environnement. L'ensemble des résultats obtenus est présenté dans le tableau ci-dessous (cf. Tableau 5.3).

Interfaces		Tapis Roulant				Joystick			
		Avec Rotation		Sans Rotation		Avec Rotation		Sans Rotation	
Taches de restitution	Score	Moyenne	Ecart Type						
Phase d'apprentissage	Z Score Vitesse Moyenne	4,512	1,773	2,793	2,801	7,894	2,032	9,682	1,211
Tache égocentrique Classification de photos	Z Score	-0,718	0,807	-0,942	0,773	-0,782	0,822	-0,679	0,966
Tache égocentrique d'estimation des distances	Z Score Distance	0,077	0,794	-0,196	0,657	0,919	0,864	-0,18	0,977
Tache égocentrique d'estimation des directions	Z Score Erreur angulaire Moyenne	-0,363	0,781	-0,066	0,555	-0,092	0,601	-0,381	0,504
Tache allocentrique du dessin du plan du parcours	Z Score	-0,177	0,875	-0,315	1,095	-0,615	1,344	0,031	0,971
tache exocentrique d'estimation du point de départ	Z Score Erreur angulaire Moyenne	-0,099	0,518	0,135	0,84	0,28	0,707	0,443	0,689
Tache de wayfinding	Z Score Vitesse Moyenne de restitution	-0,621	1,292	-1,15	0,932	-0,568	1,45	-1,132	0,686
	Z Score pourcentage d'erreurs	0,408	0,863	1,227	1,607	1,035	1,253	0,717	0,942

Tableau 5.3 : Moyennes et écart-types obtenus à l'ensemble des tests de restitution Selon l'interacteur (Tapis Roulant Vs Joystick) et le mode de rotation (Avec Vs Sans).

Phase d'apprentissage :

Les scores sont positifs et montrent en général que l'apprentissage en Réalité Virtuelle est plus rapide qu'en environnement réel. Les résultats en RV sont d'ailleurs bien supérieurs aux résultats obtenus après apprentissage en réel ($|Z| > 2$). L'ANOVA montre (cf. Figure 5.5) :

- Un effet significatif du facteur interacteur [$F(1,68)=114,488$; $p < 0,0001$] ; la vitesse d'apprentissage du parcours est plus rapide avec le joystick qu'avec le tapis roulant ;
- Pas d'effet significatif du facteur rotation ($p > 0,900$) ;
- Une interaction « Interfaces Vs Rotation », [$F(1,68)=13,342$; $p < 0,001$] : pour le joystick, la vitesse d'apprentissage est supérieure en condition sans rotation alors que pour le tapis roulant la vitesse d'apprentissage est supérieure en condition avec rotation.

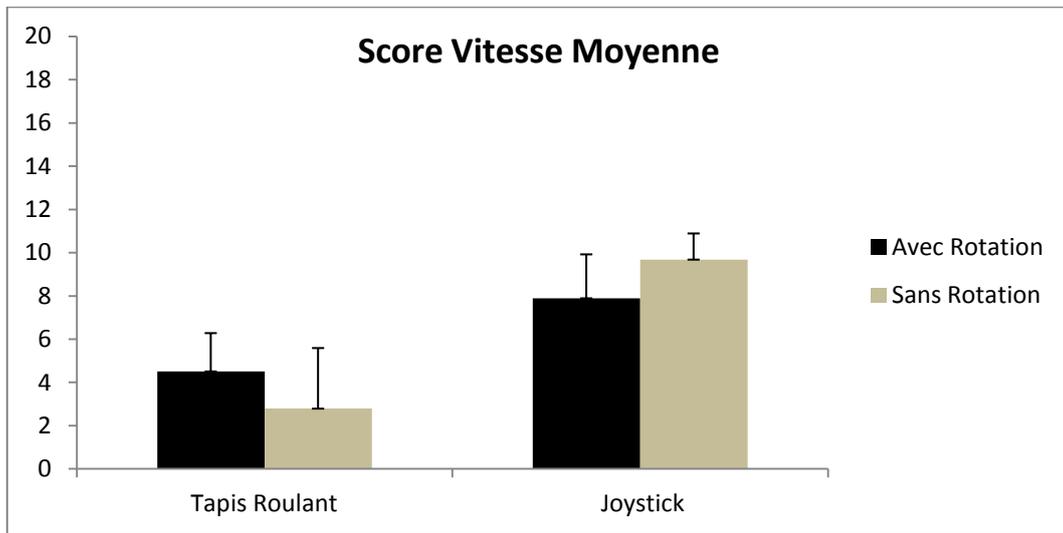


Figure 5.5: Z scores moyens pour la vitesse d'apprentissage Selon les facteurs « interacteurs » et « rotation ».

Tâche égocentrique de classification de photos (cf. Figure 5.6) :

Les valeurs de l'ensemble des résultats sont très proches de la condition apprentissage en réel ($|z| < 1$). L'ANOVA ne montre aucun effet significatif (Interacteurs, $p > 0.600$, Rotation, $p > 0.700$, « Interacteurs x Rotation », $p > 0.400$).

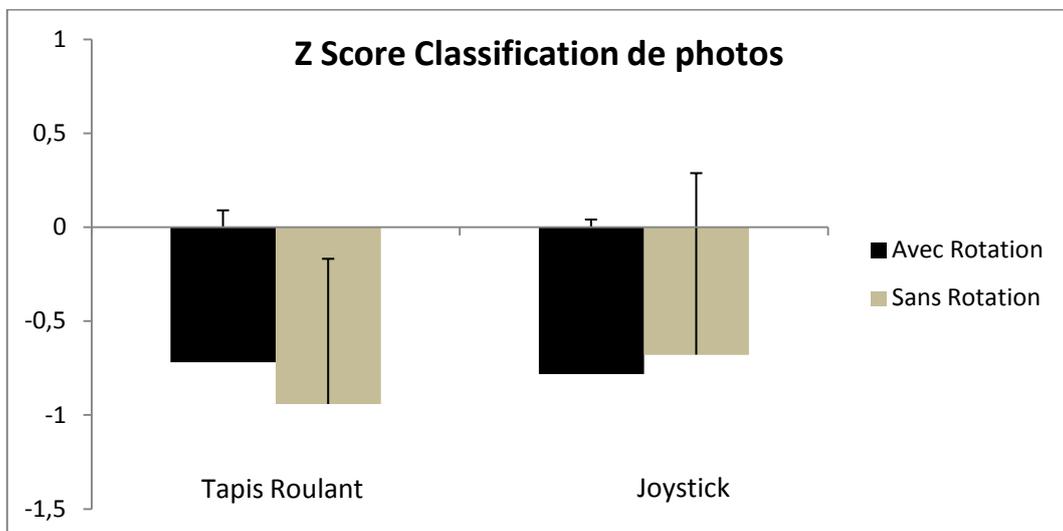


Figure 5.6: Z scores moyens à la tâche de classification de photos Selon les facteurs « interacteurs » et « rotation ».

Tâche égocentrique d'estimation de la distance parcourue (Cf. Figure 5.7) :

Les valeurs de l'ensemble des résultats sont très proches de la condition réelle ($|z| < 1$). L'ANOVA a montré :

- Un effet interacteur [$F(1,68)=4,801$; $p < 0.05$] ; les distances sont surestimées avec le joystick comparé au tapis roulant ;
- Un effet Rotation [$F(1,68)=12,28$; $p < 0.001$] ; les distances sont surestimées dans la condition avec rotation comparée à la condition réelle ;
- Une interaction "Interacteurs x Rotation" également significative [$F(1,68)=4,44$; $p < 0.05$].

En tapis roulant, les résultats sont quasi identiques avec ou sans rotation (et proche de la condition apprentissage en réelle), alors qu'avec le joystick, la distance est surestimée en condition avec rotation comparée à la condition sans rotation (cf. Figure 5.7).

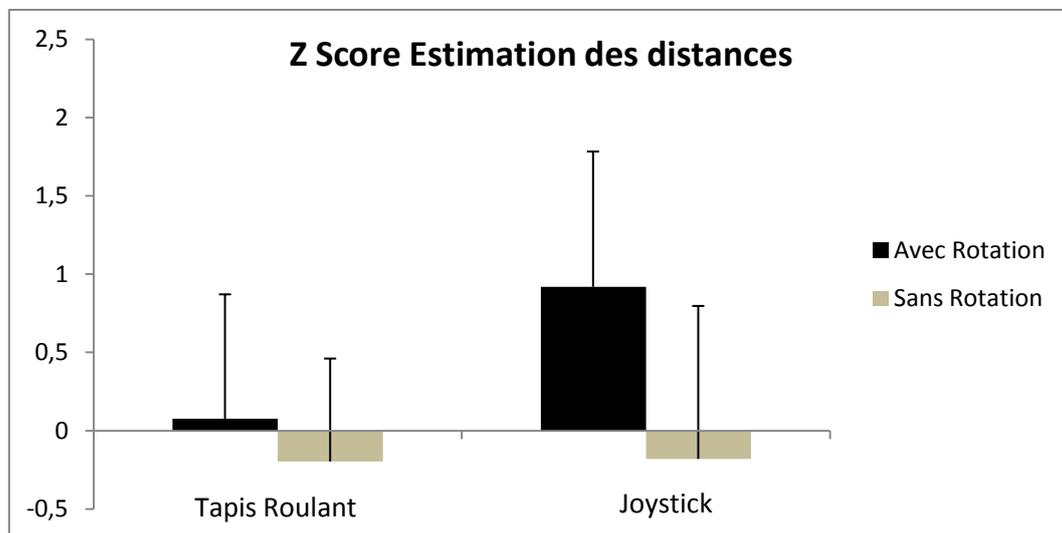


Figure 5.7: Z scores moyens pour l'estimation de distance parcourue Selon les facteurs « interacteurs » et « rotation ».

Tâche égocentrique d'estimation des directions (cf. Figure 5.8) :

Les résultats de ce test sont très proches des scores obtenus après apprentissage en réel ($|z| < 1$). Les effets concernant les interacteurs et la rotation ne sont pas significatifs (respectivement $p > 0.800$, $p > 0.900$) ; cependant l'interaction « Interacteurs x Rotation » est significative [$F(1,68)= 4,026$; $p < 0.05$]. Pour le tapis roulant, l'estimation des directions est meilleure en condition rotation alors que pour le joystick, l'estimation est meilleure en condition sans rotation (cf. Figure 5.8).

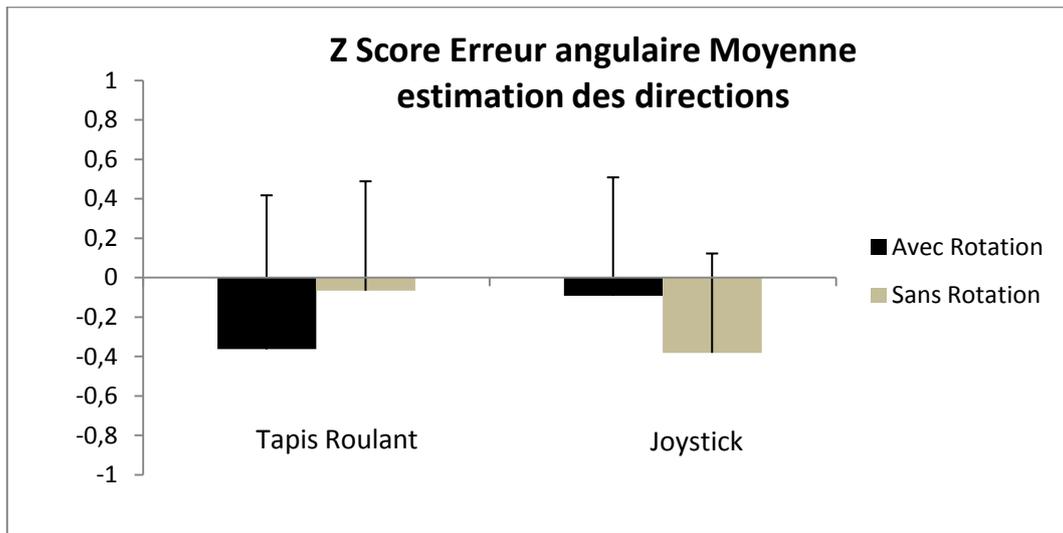


Figure 5.8: Z scores moyens aux estimations de directions Selon les facteurs « interacteurs » et « rotation ».

Tâche allocentrique de dessin du plan du parcours:

Les scores obtenus sont très proches des scores après apprentissage en réel ($|z| < 1$) et l'ANOVA ne révèle aucune différence significative pour tous les effets (effet interacteur, $p > 0.800$; effet Rotation, $p > 0.300$; effet d'interaction entre les deux facteurs, $p > 0.100$) (cf. Figure 5.9).

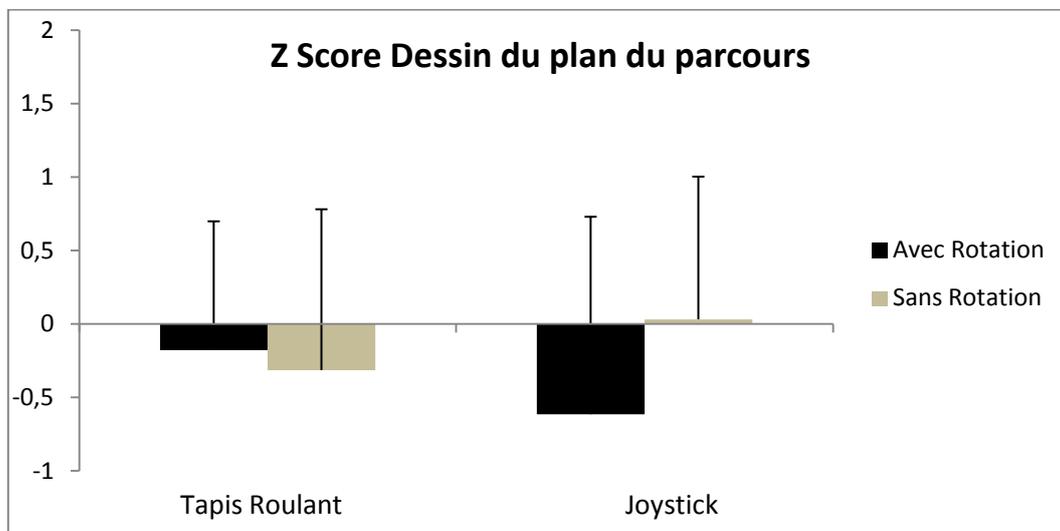


Figure 5.9: Z scores moyens à la Tâche allocentrique du plan du parcours Selon les facteurs « interacteurs » et « rotation ».

Tâche allocentrique d'estimation du point de départ du trajet :

Les scores sont également très proches des résultats obtenus après apprentissage en réel ($|z| < 1$). L'ANOVA montre uniquement un effet interacteur ($[F(1,68)=4,356; p < 0.05]$) ; l'estimation du point de départ est moins bonne dans la condition joystick comparée au tapis roulant. L'effet rotation ainsi que l'interaction « Interacteurs x Rotation » ne sont pas significatifs (respectivement, $p > 0.200$ et $p > 0.800$). (cf. Figure 5.10).

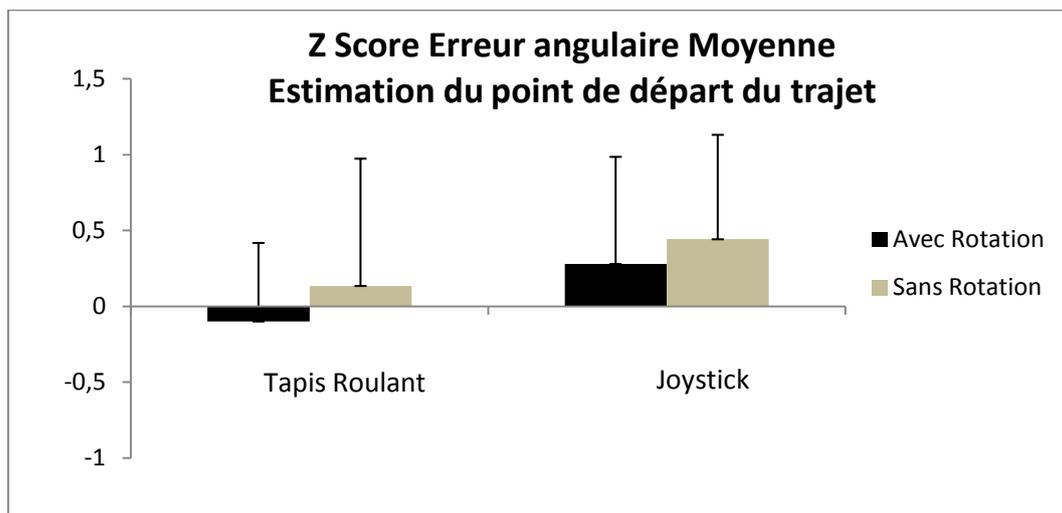


Figure 5.10: Z scores moyens d'erreurs angulaires pour la tâche d'estimation du point de départ Selon les facteurs « interacteurs » et « rotation ».

Tâche globale du wayfinding :

Concernant la vitesse de restitution, les Z scores montrent que les deux conditions Rotation (tapis et joystick) sont très proches des scores obtenus après apprentissage en réel alors que les deux conditions sans Rotation sont plus éloignées ($|z| > 1$). L'ANOVA montre un effet de rotation significatif ($[F(1,68)=4,206; p < 0.05]$) : les participants avec rotation ont une vitesse de restitution plus rapide comparée aux participants sans Rotation (cf. Figure 5.11). Aucune autre différence significative n'est observée (effet interacteur $p > 0.800$, interaction entre les deux facteurs, $p > 0.900$).

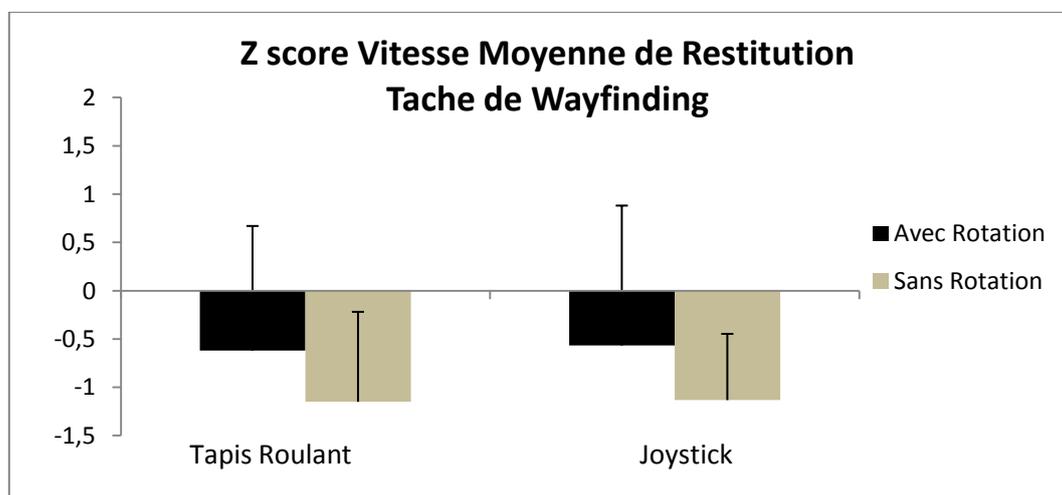


Figure 5.11: Z scores moyens pour la vitesse de restitution en Wayfinding Selon les facteurs « interacteurs » et « rotation ».

Pour la mesure des erreurs de directions, les Z Scores montrent que certaines valeurs sont proches du réel ($|z| < 1$), alors que d'autres sont éloignées ($|z| > 1$). L'ANOVA ne montre pas d'effet significatif pour les interacteurs ($p > 0.800$) ni pour la Rotation ($p > 0.300$). Cependant,

l'interaction « Interacteurs Vs Rotation » se révèle significative ($[F(1,68)=4.019; p<0.05]$). Au tapis roulant, les résultats sont meilleurs en condition rotation (comparée à la condition sans rotation) alors qu'au joystick, les résultats sont meilleurs en conditions sans rotation (cf. Figure 5.12).

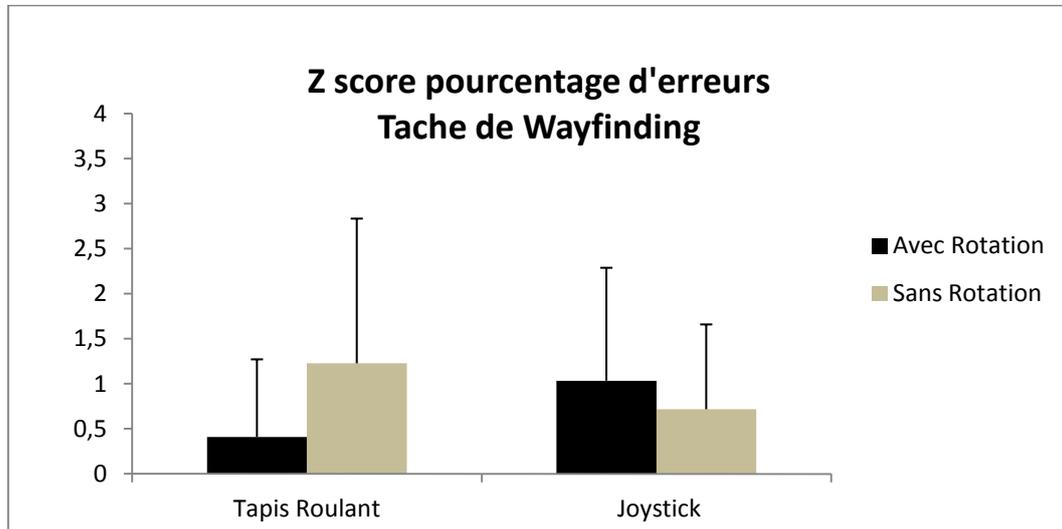


Figure 5.12: Z scores moyens du pourcentage d'erreurs au wayfinding Selon les facteurs « interacteurs » et « rotation ».

IV. Discussion

L'objectif de ce travail était d'étudier l'influence de l'engagement physique et de la rotation sur le transfert de connaissances du virtuel au réel. L'apprentissage d'un trajet était réalisé dans 4 situations d'interaction virtuelle : joystick (avec ou sans rotation) ou tapis roulant (avec ou sans rotation). Ces conditions étaient comparées à une condition d'apprentissage en réel. Les performances étaient évaluées à l'aide d'une tâche de reproduction du parcours en réel (wayfinding) et de différentes tâches de nature égocentrique ou allocentriques. Les résultats sont discutés en termes d'influence des informations proprioceptives et vestibulaires sur le transfert de compétences spatiales et sont mis en relation avec les modèles théoriques de la cognition spatiale, en particulier le modèle L-R-S de Siegel et White (1975) et la théorie des graphes (Gillner et Mallot, 1998).

Pour rappel,

- La condition tapis roulant sans rotation, met en jeu les informations vestibulaires de translation (lorsque la rotation n'est pas présente) mais également les informations proprioceptives (liées à la marche) ;

- La condition tapis roulant avec rotation met en jeu les informations vestibulaires de translation et de rotation, ainsi que les informations proprioceptives ;
- La condition joystick sans rotation met en jeu très peu d'informations proprioceptives (juste les mouvements du poignet) et pas d'information vestibulaire ;
- La condition joystick avec rotation permet une rotation, mais celle-ci est effectuée à l'aide du joystick, et non par un mouvement de tête ; dans ce cas, la rotation est présente, mais comme pour la condition précédente, peu d'informations proprioceptives (mouvement du poignet) et aucune information vestibulaire ne sont mises en jeu.

Nos résultats seront donc discutés en termes d'effet d'engagement du corps et d'effet de la rotation sur les représentations égocentriques, allocentriques, ainsi que sur la reproduction du parcours.

IV.1 La composante égocentrique

Nos résultats montrent une supériorité du tapis roulant concernant l'estimation égocentrique des distances. Cette tâche qui consiste à demander au sujet d'estimer la distance totale parcourue, est considérée par les auteurs (Waller et Richardson, 2008) comme étant de nature égocentrique, car elle repose sur une mise à jour « en temps réel » de la position du sujet par rapport au point de départ en prenant en compte les différents points de repères de l'environnement. Elle solliciterait donc les niveaux Landmark et Route du modèle de Siegel et White (1975). Nos résultats à cette tâche sont en accord avec les recherches de Waller et Richardson (2008) qui montrent que les informations sensorielles relatives à la position du corps jouent un rôle important dans l'estimation des distances et dans l'élaboration de représentations égocentriques (Klatzky et *al.*, 1998 ; Lambrey et *al.*, 2003). Ces résultats sont également en accord avec ceux de Chance et *al.* (1998) qui avaient montré que les informations sensorielles concernées par les représentations égocentriques sont plus spécifiquement les informations vestibulaires. Enfin Ruddle et *al.* (2011a) confirment l'importance des informations vestibulaires de translation dans l'estimation des distances en EV, mais, en revanche, ne trouvent pas d'effet des informations vestibulaires de rotation. Cette dernière observation est également cohérente avec nos résultats dans la mesure où nous observons :

- Une amélioration de la composante égocentrique après apprentissage à l'aide du tapis roulant (sollicitant les informations vestibulaires de translation) comparée au joystick (ne sollicitant pas les informations vestibulaires de translation) ;

- Une absence d'amélioration de la composante égocentrique en condition de rotation de la tête avec tapis roulant, confirmant que les informations vestibulaires de rotation ne potentialisent pas l'effet des informations vestibulaires de translation dans l'estimation égocentrique des distances.

Dans notre étude, les informations vestibulaires de translation semblent donc jouer un rôle prépondérant dans l'estimation des distances.

Toujours pour la composante égocentrique, nos résultats montrent une interaction entre les interacteurs (joystick vs. tapis roulant) et la rotation (avec vs. sans) dans la tâche égocentrique d'estimation des directions. Dans cette tâche, le sujet a pour consigne d'indiquer, pour chaque photo représentant une intersection du trajet réel, la direction qu'il devait prendre (droite, gauche ou tout droit). Pour le tapis roulant, les performances à cette tâche sont meilleures en condition avec rotation alors que pour le joystick, elles sont meilleures sans rotation. Pour le tapis roulant, la rotation améliore les performances contrairement à la tâche précédente. Il est à noter que cette tâche nécessite, à chaque intersection, l'association d'un point de vue à une direction (couplage perception action de la théorie des graphes de Gillner et Mallot, 1998). On peut donc supposer, que lorsque l'on utilise le tapis roulant, la rotation active favorise le couplage perception action (couplage d'un point de vue avec une action à réaliser telle que tourner à droite ou à gauche). Dans les différentes conditions que nous avons manipulées, la condition tapis roulant avec rotation est la seule à solliciter les informations vestibulaires de rotation (en plus des informations proprioceptives et vestibulaires de translation). Ces informations vestibulaires de rotation pourraient donc favoriser les performances de tâches nécessitant un couplage perception action, telle que la tâche que nous avons utilisée. Cependant, comme pour la tâche précédente, la rotation n'améliore pas les performances dès lors que le joystick est utilisé comme interacteur. Il est à noter, pour rappel, que le joystick avec rotation ne sollicite pas les informations vestibulaires de rotation (en effet, dans cette condition, le sujet ne tourne pas la tête lors des changements de direction). Une hypothèse est donc que l'effet de la rotation active de la tête dépend du degré d'engagement physique : il serait maximum pour un fort engagement physique (marche au tapis roulant) et minimum pour un faible engagement physique (joystick).

En conclusion de cette partie concernant la composante égocentrique, nous pouvons donc proposer : 1) que l'engagement physique améliore l'estimation des distances ; 2) cette amélioration (en situation de fort engagement physique) serait liée aux informations vestibulaires de translation ; 3) Toujours en situation de fort engagement physique, les

informations vestibulaires de rotation seraient nécessaires dans des tâches égocentriques qui nécessitent une association d'un point de vue à une action (couplage perception action de la théorie des graphes) ; 4) En situation de faible engagement (joystick), dans tous les cas, la rotation active de la tête n'améliore pas les performances dans les tâches égocentriques que nous avons utilisées.

IV.2 La composante allocentrique

La tâche concernant l'estimation allocentrique du point de départ du trajet montre également de meilleures performances en condition tapis roulant. La encore, la rotation de la tête (informations vestibulaires de rotation) n'améliore pas les résultats dans cette condition de fort engagement physique. Lorsque le joystick est utilisé comme interacteur, les performances sont moins bonnes, et ce, avec ou sans rotation active. On peut donc supposer que l'engagement du corps et plus particulièrement les informations vestibulaires de translation, sont importantes pour l'élaboration des représentations allocentriques. Ces résultats vont dans le sens et précisent les conclusions de Ruddle et *al.* (2009; 2011a) concernant l'importance de l'engagement physique et de la marche dans l'élaboration de cartes cognitives.

IV.3 La reproduction du parcours (wayfinding)

Pour rappel, nous avons recueilli la vitesse de reproduction du trajet (à l'aide d'un GPS) en fonction de la condition manipulée lors de l'apprentissage. L'analyse de variance montre un effet simple du facteur rotation (avec vs. sans) qui s'explique par le fait que l'apprentissage incluant la rotation permet de meilleures performances (en terme de vitesse de restitution) quel que soit l'interacteur utilisé. Cet indicateur (vitesse de restitution en réel) est le seul qui soit favorisé par la rotation active, quelle soit liée à des mouvements de tête (tapis roulant avec rotation) ou à des mouvements du poignet (joystick avec rotation). On peut supposer que le fait de pouvoir explorer l'environnement de façon active à chaque intersection (mais également tout au long du trajet) durant l'apprentissage (quel que soit l'interacteur) se rapproche des conditions « réelles » d'apprentissage d'un trajet favorisant ainsi la restitution en réelle notamment pour la rapidité (voir par exemple la notion de transfert approprié de Morris, Bransford et Franks, 1977).

Toujours pour la tâche de wayfinding, nous observons également une interaction entre l'interacteur et la rotation pour ce qui concerne le pourcentage d'erreurs. Pour le tapis roulant,

les performances sont meilleures après apprentissage avec rotation, alors que pour le joystick les performances sont meilleures sans rotation. Si l'on compare aux résultats précédents concernant la vitesse de restitution, il en ressort que seule la situation tapis roulant avec rotation permet à la fois une restitution plus rapide et plus efficace (en termes de taux d'erreurs). En revanche, la situation joystick sans rotation permet une restitution efficace mais moins rapide. Quoiqu'il en soit, le profil de performance en termes de pourcentage d'erreurs est strictement identique à celui observé dans la tâche égocentrique d'estimation des directions. De ce fait, plusieurs conclusions peuvent être proposées :

1) La tâche de wayfinding pourrait être proche de la tâche d'estimation égocentrique des directions, en termes de processus cognitifs et cognitivo-moteurs impliqués ; cela suggère une prépondérance de la composante égocentrique dans la tâche de reproduction en réel du parcours (notamment dans les conditions d'apprentissage unique et pour le type de trajet – longueur, complexité, etc.- que nous avons utilisées) ;

2) Lorsque l'interacteur est proche des conditions naturelles (tapis roulant), la rotation de la tête lors de l'apprentissage favorise le transfert virtuel/réel. Nous pourrions là encore, évoquer la notion de transfert approprié (Morris et *al.*, 1977) mais également la notion de couplage perception action (couplage d'un point de vue à une rotation de la tête). Néanmoins, comme pour la tâche égocentrique d'estimation des directions, l'effet de rotation dépend du degré d'engagement physique. En effet, en situation de marche, les informations vestibulaires de rotation potentialisent l'apprentissage et le transfert virtuel/réel du trajet, ce qui n'est pas le cas lors d'un faible engagement (joystick) ; 3) Enfin, un fort engagement physique (marche) couplé à la rotation de la tête est la seule condition qui permet, en situation de reproduction réelle du parcours (transfert virtuel/réel) d'obtenir les meilleures performances à la fois en termes de pourcentage de réponses correctes et de rapidité d'exécution du parcours.

Chapitre VI : Influence de l'Engagement Physique et de l'Expérience en Jeux Vidéos sur le transfert Virtuel/Réel

Les résultats de ce chapitre ont été soumis dans la revue «Journal Experimental Of Psychology : Applied » sous le titre suivant :

LARRUE, F., Sauzéron, H., Foloppe, D., Wallet, G., Gross, C. et N'Kaoua (submitted). Interface and Gaming Experience Influence on Spatial Transfer: Egocentric vs. Allocentric Tasks.

I. Objectifs :

Dans cette expérimentation, nous nous sommes centrés sur l'effet d'une variable susceptible de jouer un rôle majeur dans les apprentissages spatiaux en 3D : l'expertise en jeu vidéo. Des études ont montré que les joueurs présentaient des performances plus élevées dans certaines tâches classiques d'évaluation des compétences spatiales telles que le test de rotation mentale (Terlecki et *al.*, 2005 ; Boot et *al.*, 2008). L'étude de Richardson et *al.* (2011) a montré une corrélation entre l'expérience en jeu vidéo et une tâche de pointage de cible lors d'un apprentissage en utilisant un joystick et un écran de type bureau comme interface. Par contre, ces auteurs n'observent pas de corrélations entre jeux vidéo et performances spatiales lorsque ces mêmes tâches sont réalisées dans un environnement réel. Pour Castelli et *al.* (2008), l'expérience avec une interface doit être prise en compte car ce facteur influence les performances spatiales notamment lorsqu'elles sont appréhendées à l'aide des technologies de la RV. En revanche, aucune étude n'a porté sur le transfert virtuel/réel.

Dans ce contexte, notre seconde expérimentation a pour objectifs : 1) d'évaluer l'impact de l'expertise en jeu vidéo sur les compétences spatiales en général (c'est-à-dire évaluées soient à l'aide de tests papier-crayons soit à l'aide d'une tâche d'orientation en environnement réel). Cet impact sera discuté à l'aide du modèle théorique Landmark-Route-Survey (Siegel et White, 1975) et de la théorie des graphes (Gillner et Mallot, 1998) ; 2)

d'évaluer plus spécifiquement l'impact de l'expertise en jeu vidéo sur les performances spatiales selon les situations d'interactions avec un environnement 3D.

Les études manipulant l'expertise en jeu vidéo montrent des avantages en faveur des joueurs dans des tests papiers crayons évaluant les habiletés spatiales notamment la rotation mentale (Terlecki et *al.*, 2005 ; Boot et *al.*, 2008) et pour certaines compétences cognitives telles que l'attention, la mémoire ou le contrôle exécutif (Boot et *al.*, 2008). Certains auteurs ont montré que l'exposition répétée à des jeux vidéos améliore également les habiletés spatiales chez des sujets non joueurs (Pépin et Dorval, 1988 ; Feng et *al.*; 2007). D'autres ont montré que des habiletés spatiales élevées favorisent l'acquisition de connaissances spatiales en EV (Castelli et *al.*, 2008 ; Cutmore et *al.*, 2000 ; Moffat et *al.*, 1998). Enfin, la coordination visuomotrice serait améliorée chez les joueurs (Richardson et *al.*, 2011; Granek et *al.*, 2009) ainsi que certaines propriétés élémentaires de la vision (Green et Bavelier, 2003 ; 2007 ; Donohue et *al.*, 2010). D'autres études ont comparé l'impact de l'expertise en jeu vidéo sur des situations virtuelle ou réelle. Richardson et *al.* (2011) ont observé une corrélation positive entre l'expérience en jeu vidéo et les compétences spatiales en environnement virtuel (dans une tâche de pointage). Par contre ces corrélations n'étaient pas retrouvées lors d'un apprentissage et d'une restitution en environnement réel suggérant que les jeux vidéo n'auraient que peu d'impact sur les activités de vie quotidienne.

Dans cette expérimentation nous nous proposons d'évaluer l'impact du jeu vidéo sur les compétences spatiales et plus spécifiquement sur l'interaction avec un environnement 3D. Deux interfaces sollicitant un engagement physique faible ou élevé (cf. chapitre V de la partie empirique) on été utilisées : le tapis roulant avec rotation (stimulations vestibulaires et proprioceptives) qui correspond à une interaction nouvelle pour tous les sujets, et un joystick avec rotation (aucune information vestibulaire et peu d'informations proprioceptives), interface assez commune, notamment pour les joueurs. Les sujets apprennent un trajet en EV à l'aide d'une des deux interfaces et doivent le restituer selon les 6 tâches décrites dans le modèle d'analyse. Les performances sont comparées à une condition d'apprentissage en environnement réel (condition contrôle).

I. Méthode

Cinquante-six étudiants (28 hommes, 28 femmes) de l'Université de Bordeaux ont participé à cette expérimentation. Ils étaient tous droitiers, répartis dans un des 3 modes d'apprentissage suivants : en condition virtuelle à l'aide d'un tapis roulant avec orientation, en condition virtuelle avec un joystick avec orientation ou en condition d'apprentissage en

environnement réel. Les 3 groupes étaient homogènes concernant le sexe et les compétences spatiales mesurées à l'aide du GZ-5 ($p>0.100$), du test de Rotation Mentale ($p>0.700$) et des Cubes de Corsi ($p>0.900$, voir Tableau 6.1). Chaque groupe d'apprentissage en virtuel était composé de 9 sujets considérés comme joueurs (plus de deux heures par semaine aux jeux vidéo depuis plus d'un an) et 9 sujets ne jouant jamais aux jeux vidéos et n'ayant jamais été ancien joueur. Le groupe réel était composé de 10 joueurs, 10 non joueurs.

Mode de Locomotions	Condition Réelle				Conditions Virtuelles							
	Apprentissage Réel		Apprentissage tapis roulant		Apprentissage Joystick							
Expérience en Jeux Vidéos	Joueurs		Non Joueurs		Joueurs		Non Joueurs		Joueurs		Non Joueurs	
Genre (Hommes/Femmes)	5/5		5/5		5/4		4/5		4/5		5/4	
	Moyenne	Ecart Type	Moyenne	Ecart Type	Moyenne	Ecart Type	Moyenne	Ecart Type	Moyenne	Ecart Type	Moyenne	Ecart Type
Age	21,11	1,36	23,22	2,99	21,67	2,96	23,67	3,43	22,11	2,57	21,56	1,88
Habilités Spatiales												
GZ-5	22,78	9,89	21,70	11,54	18,19	9,62	16,58	9,98	23,75	10,10	26,44	13,58
Test de Rotation Mentale	18,70	7,68	22,50	11,44	21,78	8,20	19,00	6,54	24,00	5,32	20,56	6,89
Cube de Corsi(Total)	18,70	2,26	18,20	3,52	18,78	2,17	18,22	2,28	19,00	2,00	17,56	1,13
Cube de Corsi(Direct)	9,50	1,58	9,00	2,06	9,67	1,87	9,33	1,32	9,67	1,41	9,22	0,97
Cube de Corsi(Indirect)	9,20	1,14	9,20	2,20	9,11	0,78	8,89	1,27	9,33	1,58	8,33	1,32

Tableau 6.1 : Tableau des répartitions, âge, sexe et résultats aux différents tests papiers crayons.

I.1 Matériels

Le matériel utilisé pour la restitution est décrit dans la partie Méthode commune à chaque expérimentation. Le parcours était le même que dans le chapitre V, c'est-à-dire de 780 mètres avec 13 choix de directions. Les interfaces utilisées sont similaires au groupe Tapis avec Rotation et Joystick avec Rotation de l'expérimentation décrite au chapitre V.

I.2 Procédure Générale

La procédure générale se compose de (i) des tests papiers crayons évaluant les habiletés spatiales du sujet, (ii) l'apprentissage du trajet et (iii) la restitution du trajet. Les

phases d'apprentissage virtuel ou réel sont exactement les mêmes que celles présentées en chapitre V de cette thèse.

II. Résultats

Chaque variable dépendante a été soumise à une ANOVA à deux facteurs en mesures indépendantes [3 (Mode d'apprentissage : Tapis Roulant Vs Joystick Vs Réel) x 2 (Expérience en Jeux Vidéo : Joueurs Vs Non Joueurs)]. Les résultats pour chaque groupe sont présentés en Tableau 6.2. Les tests post Hoc ont été effectués à l'aide de la procédure de Fisher ($p < 0.05$).

modes de Locomotion		Réel				Tapis Roulant				Joystick			
		Joueurs		Non Joueurs		Joueurs		Non Joueurs		Joueurs		Non Joueurs	
Expérience en jeu vidéo		Moyenne	Ecart Type	Moyenne	Ecart Type	Moyenne	Ecart Type	Moyenne	Ecart Type	Moyenne	Ecart Type	Moyenne	Ecart Type
Taches de restitution	Score												
	Vitesse												
Phase d'apprentissage	Moyenne (km/h)	3,23	0,29	3,22	0,22	4,42	0,46	4,19	0,39	5,32	0,35	5,08	0,62
	% bonnes réponses	64,58	26,44	78,75	30,83	45,83	17,05	46,30	29,86	68,98	21,66	34,73	13,01
Tache égocentrique Classification de photos	Distance (en mètres)	706,00	603,42	1024,20	659,03	934,44	705,30	1250,00	491,17	1511,11	445,66	1464,44	620,39
Tache égocentrique d'estimation des directions	% d'erreurs	16,15	15,58	22,30	12,80	38,46	20,35	23,08	14,39	22,22	15,60	35,04	22,13
Tache allocentrique du dessin du plan du parcours	Score (% erreurs)	81,54	22,42	90,00	13,59	80,34	12,82	76,07	20,87	70,94	23,64	77,78	27,05
tache exocentrique d'estimation du point de départ	% d'erreurs	52,50	21,17	39,17	10,43	46,30	16,20	57,41	15,84	52,78	19,10	49,07	20,60
Tache de wayfinding	Vitesse Moyenne de restitution	3,28	0,31	3,25	0,21	3,16	0,24	2,98	0,39	3,11	0,40	3,15	0,36
	% d'erreurs	6,15	7,07	3,85	6,54	8,66	5,84	9,40	6,41	11,11	7,80	12,82	9,42

Tableau 6.2 : Moyenne et écart type des différentes variables mesurées lors de la restitution selon le mode d'apprentissage et l'expertise en Jeux Vidéo.

Vitesse d'apprentissage (Figure 6.1) :

L'ANOVA révèle un effet significatif du mode d'apprentissage [$F(2,50)=113,517$; $p<0,0001$]; la vitesse d'apprentissage était plus élevée pour la condition joystick, suivie de la condition tapis roulant, puis de la condition réelle. Les tests post hoc montrent des différences significatives entre les 3 groupes. L'effet « expérience en jeu vidéo » et l'interaction « Mode d'apprentissage x Expérience Jeux Vidéo » n'étaient pas significatives (respectivement, $p>0.100$, $p>0.600$).

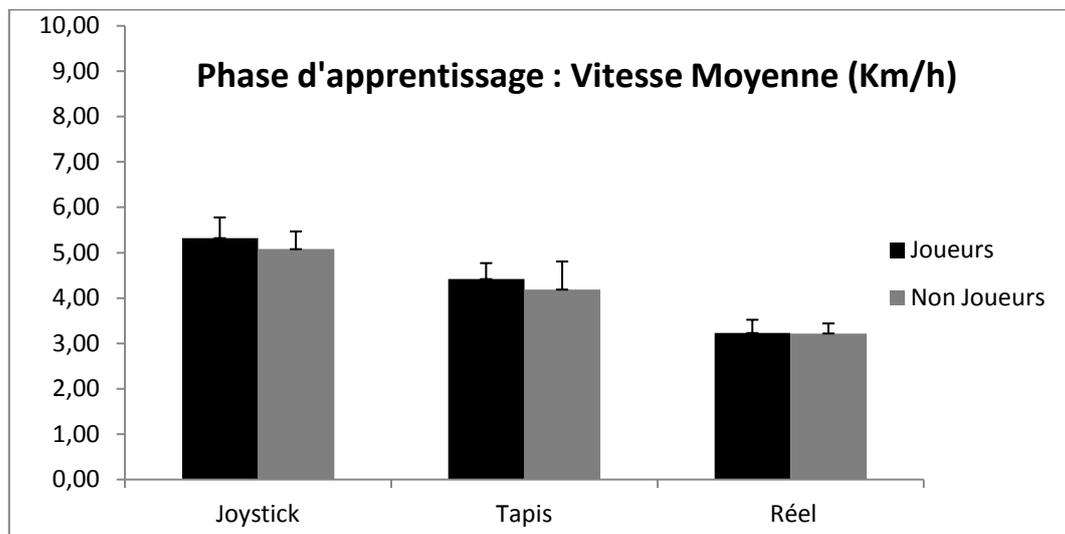


Figure 6.1 : Vitesse moyenne d'apprentissage Selon le mode d'apprentissage et l'expérience en jeux vidéo.

Tâche égocentrique de classification de photos (Figure 6.2) :

L'analyse statistique montre une différence significative concernant le mode d'apprentissage [$F(2,50)=5,890$; $p<0.01$]. La condition réelle induit de meilleures performances comparées aux deux conditions virtuelles (tapis roulant et joystick). Les tests post hoc montrent une différence significative entre la condition réelle et les deux conditions d'apprentissage virtuel mais pas de différence entre le tapis et le joystick. Aucune différence n'a été obtenue concernant l'expérience en jeu vidéo ($p>0.300$) mais l'interaction « Mode d'apprentissage x Expérience en jeux vidéo » est significative [$F(2,50)=4,941$; $p<0.02$]. Pour la condition joystick les joueurs sont meilleurs que les non joueurs, alors que pour la condition réelle, les non joueurs sont meilleurs que les joueurs. En revanche, pour le tapis roulant, les performances sont identiques quel que soit l'expérience en jeu vidéo.

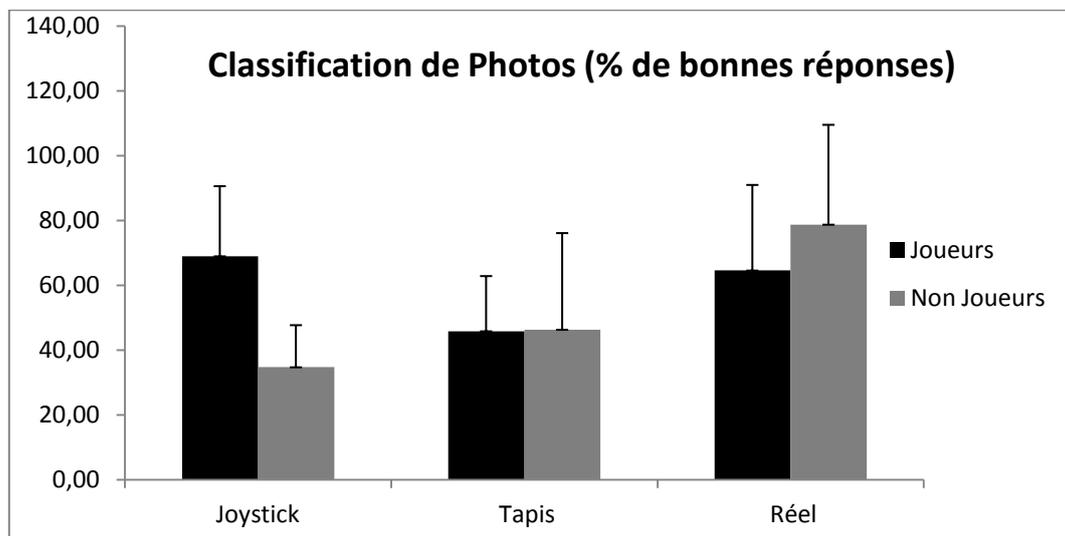


Figure 6.2 : Performances au classement de photos Selon le mode d'apprentissage et l'expérience en jeu vidéo.

Tâche égocentrique d'estimation de la distance parcourue (Figure 6.3) :

L'ANOVA montre uniquement un effet significatif du mode d'apprentissage [$F(2,50)=5,249$; $p<0.01$]. La condition réelle et la condition tapis roulant présentent des performances relativement proches, alors que la condition joystick s'associe à une surestimation des distances chez les sujets. Les tests post hoc montrent une différence significative entre les conditions réelle et joystick, et joystick et tapis roulant. Aucun effet n'a été observé concernant l'expérience en jeux vidéo ($p>0.200$) et l'interaction « Mode d'apprentissage x Expérience en Jeux Vidéo » ($p>0.500$).

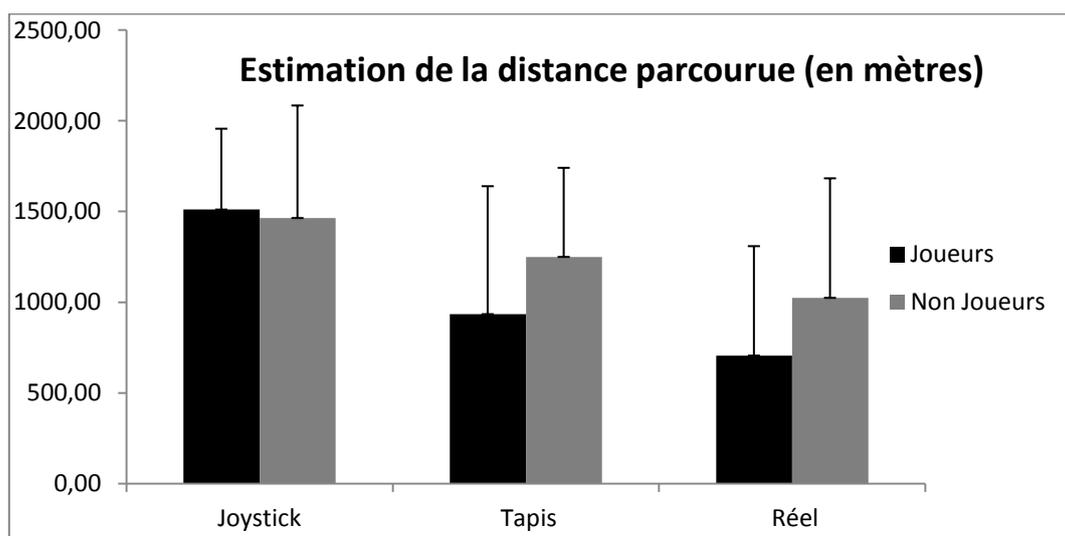


Figure 6.3 : Estimation de la distance selon le mode d'apprentissage et l'expérience en jeu vidéo.

Tâche égocentrique d'estimation des directions (Figure 6.4) :

L'ANOVA montre uniquement une interaction « Mode d'apprentissage x Expérience Jeux Vidéo » [$F(2,50)=3,395$; $p<0.05$]. Pour la condition joystick, les joueurs sont meilleurs que les non joueurs, alors que pour la condition tapis roulant, les non joueurs sont meilleurs que les joueurs. Pour la condition réelle, les performances des joueurs et des non joueurs sont quasi identiques. La condition réelle montre les meilleurs résultats, et ce quelle que soit l'expérience en Jeux Vidéo. Aucune autre différence (Mode d'apprentissage, Expérience en jeu vidéo) n'a été trouvée ($p>0.100$, $p>0.700$).

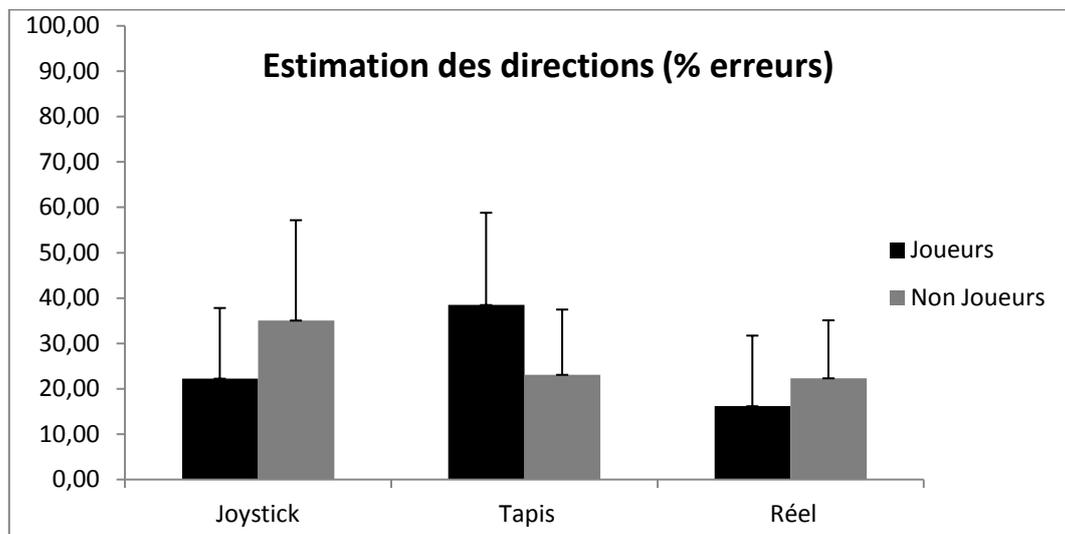


Figure 6.4 : Pourcentages d'erreurs à la tâche d'estimation des directions selon le mode d'apprentissage et l'expérience en jeu vidéo.

Tâche allocentrique du dessin du parcours (Figure 6.5) :

L'ANOVA ne montre aucune différence significative pour le mode d'apprentissage, l'expérience en jeux vidéo ou l'interaction « Mode d'apprentissage x Expérience en Jeux Vidéo » (respectivement, $p>0.200$, $p>0.500$, $p>0.500$).

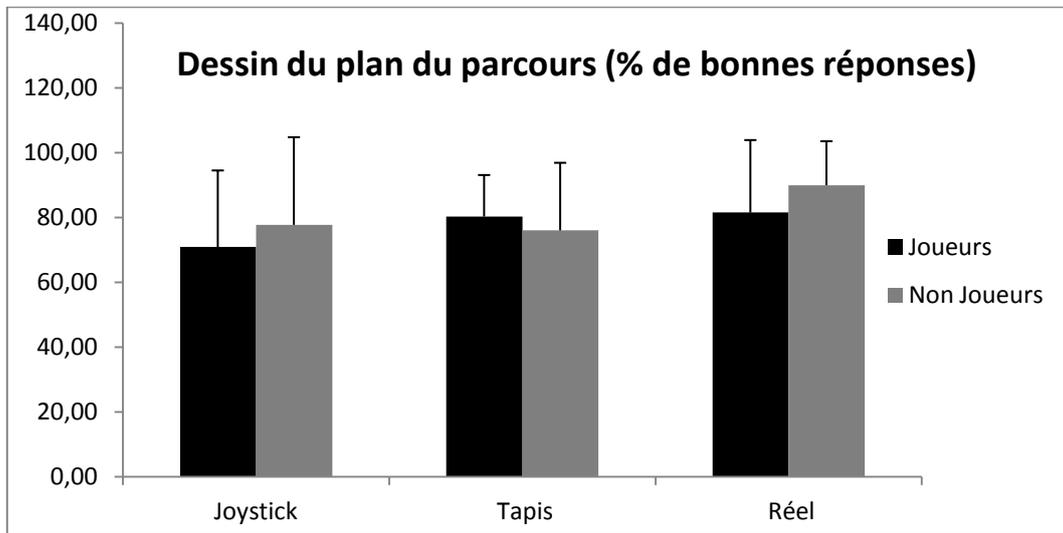


Figure 6.5 : Pourcentages de bonnes réponses à la tâche de croquis Selon le mode d'apprentissage et l'expérience en jeu vidéo.

Tâche allocentrique d'estimation du point de départ du trajet (Figure 6.6):

L'ANOVA ne montre aucune différence significative pour le mode de locomotion, l'expérience en jeux vidéo ou l'interaction « Mode d'apprentissage x Expérience en Jeux Vidéo » (respectivement, $p > 0.500$, $p > 0.600$, $p > 0.100$).

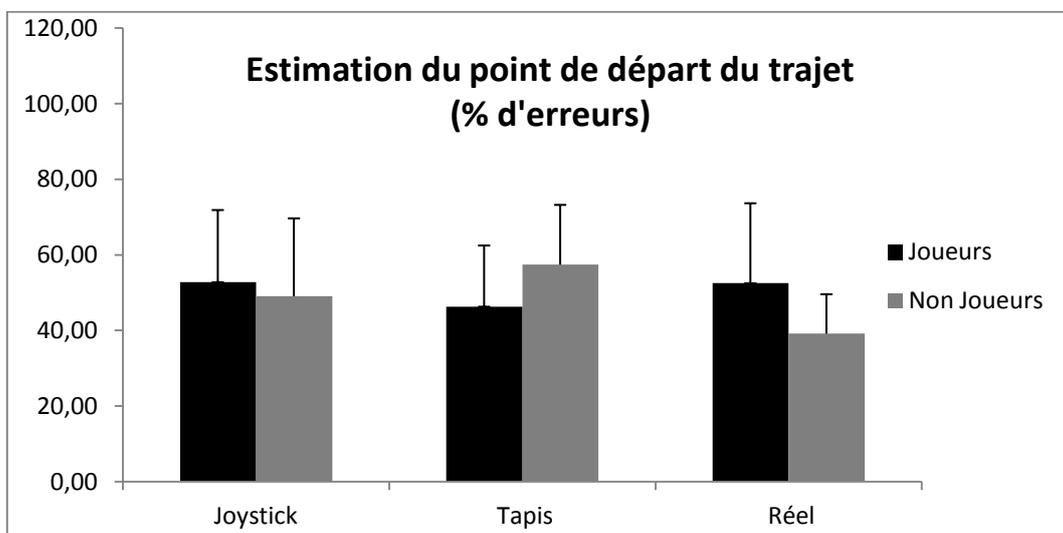


Figure 6.6: Pourcentage d'erreurs pour la tâche d'estimation du point de départ du trajet Selon le mode d'apprentissage et l'expérience en jeu vidéo.

Tâche de wayfinding :

- Vitesse moyenne (cf. Figure 6.7):

Aucune différence n'a été observée pour le mode d'apprentissage ($p > 0.100$), l'expérience en jeu vidéo ($p > 0.500$) et pour l'interaction « Mode d'apprentissage x Expérience en Jeux Vidéo » ($p > 0.500$).

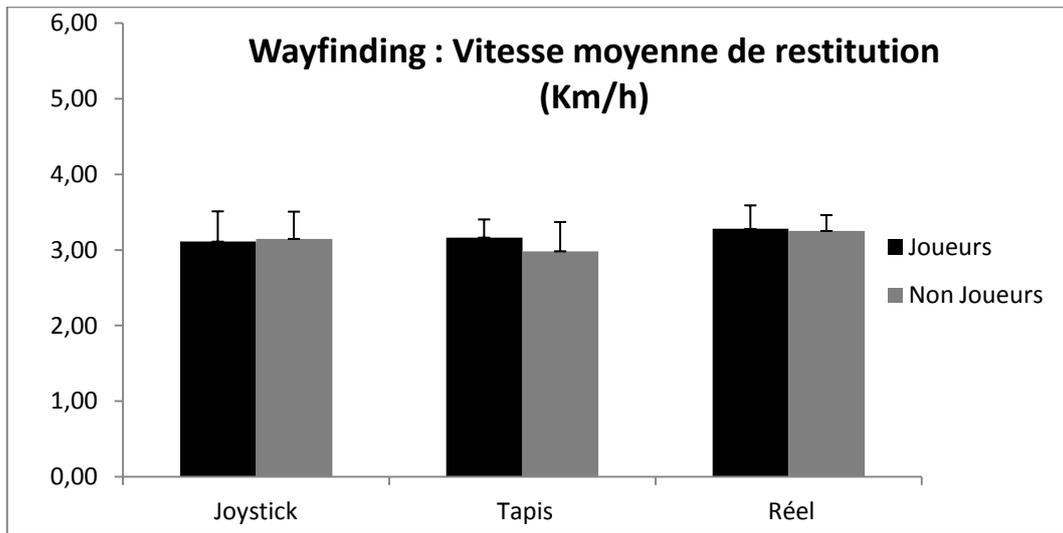


Figure 6.7: Vitesse moyenne en phase de restitution Selon le mode d'apprentissage et l'expérience en jeux vidéo.

- Pourcentage d'erreurs de direction (cf. Figure 6.8) :

L'analyse statistique montre une différence significative pour le mode d'apprentissage [$F(2,50)=4,428$; $p<0.02$]. Les performances en condition réelle sont meilleures qu'en conditions tapis roulant, suivie de la condition joystick. Les tests post hoc montrent une différence significative entre la condition joystick et la condition réelle. Aucune autre différence n'a été obtenue concernant l'expérience en jeux vidéo ($p>0.900$), et l'interaction « Mode d'apprentissage x Expérience en Jeux Vidéo » ($p>0.600$).

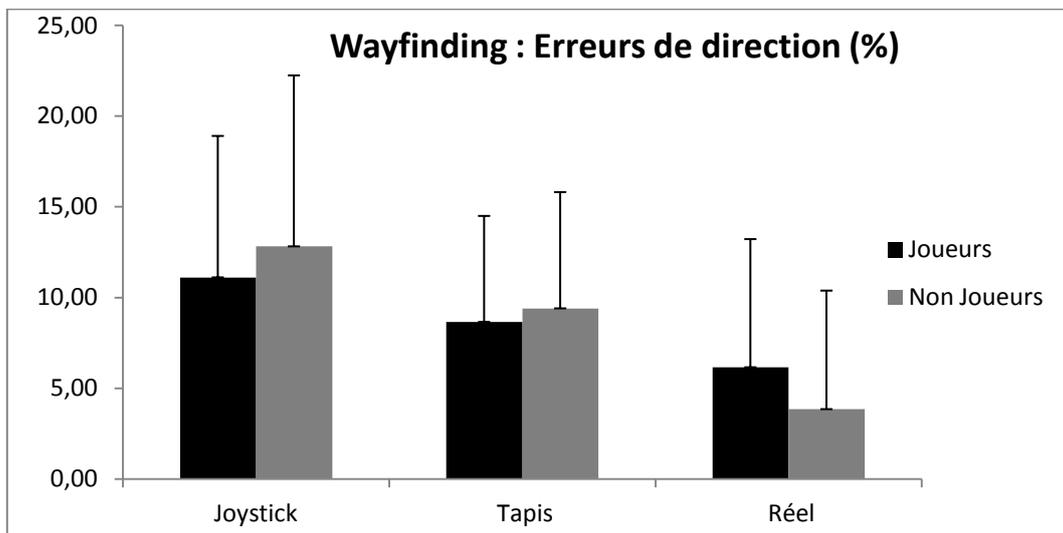


Figure 6.8 : Pourcentage d'erreurs de direction pour la tâche de wayfinding Selon le mode d'apprentissage et l'expérience en Jeux Vidéo.

III. Discussion

L'objectif de ce travail était d'étudier l'influence de l'engagement physique¹⁰ et de l'expertise en jeu vidéo sur le transfert de connaissances du virtuel au réel. L'apprentissage d'un trajet était réalisé selon 3 conditions : en EV avec apprentissage à l'aide d'un joystick, en EV avec apprentissage à l'aide d'un tapis roulant, et enfin en situation réelle. Les performances étaient évaluées à l'aide d'une tâche de reproduction du parcours en réel (wayfinding) et de différentes tâches de nature égocentrique ou allocentrique.

III.1 La composante égocentrique

Un effet groupe d'apprentissage en faveur de la condition réelle a été observé dans la tâche égocentrique de classification de photos. Les tests post hoc indiquent que les différences se situent entre la condition réelle et les deux conditions virtuelles, mais pas entre les 2 conditions virtuelles. Dans cette tâche égocentrique de classification, une interaction « Mode d'apprentissage x Expérience Jeux Vidéo » a également été observée. Les joueurs sont meilleurs après avoir appris à l'aide d'un joystick comparé à l'apprentissage en situation réelle, alors que les non joueurs sont meilleurs après apprentissage réel comparé à un apprentissage joystick. Les performances des joueurs et non joueurs sont identiques après apprentissage à l'aide du tapis roulant. En fait, pour les non joueurs, les performances sont maximales après apprentissage en réel, et sont moins bonnes mais à peu près équivalentes après apprentissage joystick ou tapis roulant. L'absence de différence entre ces 2 dernières conditions permet de conclure que l'engagement physique (faible pour joystick vs. élevé pour tapis roulant) n'améliore pas les performances dans ce type de tâche (chez les non joueurs). Cette conclusion est en accord avec Wallet et *al.* (2009) qui montrent, dans une tâche de transfert équivalente à la notre, que la condition active (interaction avec un joystick) n'a pas d'influence sur cette tâche comparée à une condition passive, et cela quelle que soit la complexité d'un parcours proposé. Pour cet auteur, ce type de tâche repose principalement sur la mémoire visuelle et sur la mémorisation du contexte temporel (ordre chronologique des intersections). De ce fait, le couplage perception action (association d'un point de vue – ie. une intersection – avec une action à effectuer – aller à droite ou à gauche) favorisé par une

¹⁰ Pour rappel, la condition joystick ne propose aucune information vestibulaire et peu d'informations proprioceptives alors que la condition tapis roulant propose une stimulation vestibulaire de rotation et de translation, ainsi que des informations proprioceptives liées à l'activité de la marche.

activité motrice lors de l'apprentissage, n'aurait pas d'effet sur la performance à ce type de tâche. En revanche, la plus grande richesse informationnelle caractérisant la situation réelle améliorerait les performances dans cette condition (réelle) comparée aux deux conditions virtuelles. Cette hypothèse semble confirmée par les résultats de Wallet et *al.* (2011) montrant que la fidélité visuelle de l'EV (ie. degré de réalisme c'est à dire niveau de ressemblance avec l'environnement réel) permet d'améliorer les performances dans ce type de tâche de classification. Mais dans cette étude, Wallet et *al.* (2011) n'avaient pas manipulé le niveau d'expertise en jeu vidéo (l'absence d'expertise en jeu vidéo constituait un critère d'inclusion). Notre étude précise donc que ce pattern de résultat n'apparaît que pour les non experts en jeu vidéo. Pour les joueurs, les performances après apprentissage en joystick sont identiques à l'apprentissage en réel et ces 2 conditions sont supérieures aux performances après tapis roulant. L'expertise en jeu vidéo permet donc aux joueurs d'améliorer largement leurs performances après apprentissage au joystick. Ces résultats obtenus sur une tâche de classification, rejoignent ceux de Donohue et *al.* (2010). Ces auteurs ont comparé des joueurs et des non joueurs dans une épreuve consistant à détecter une séquence chronologique de stimuli visuels et auditifs. Ils montrent que les joueurs sont meilleurs que les non joueurs dans ce type de tâche impliquant un jugement d'ordre temporel.

Dans la tâche égocentrique d'estimation des distances, la condition réelle et la condition tapis roulant montrent de meilleures performances que la condition joystick (quel que soit le niveau d'expertise en jeu vidéo). En d'autres termes, l'engagement physique et les informations vestibulaires stimulées par le tapis roulant permettraient de mieux évaluer la distance parcourue, comparée à une condition d'apprentissage au joystick. Ces résultats sont en accord avec Waller et Richardson (2008) qui montrent l'importance des informations vestibulaires et proprioceptives dans l'évaluation des distances. Chance et *al.* (1998) montrent également que l'engagement physique de la marche en environnement virtuel est important dans l'élaboration de représentations de type égocentrique.

Enfin, la tâche égocentrique d'estimation des directions révèle une interaction entre le mode d'apprentissage et l'expérience en Jeux Vidéo. Rappelons que cette tâche consiste à indiquer la direction du trajet (droite, gauche ou tout droit) pour chaque photo de point de vue (intersection) présentée au sujet. Les résultats montrent des performances équivalentes en condition d'apprentissage réel, quelle que soit l'expérience en Jeux Vidéo. Par contre les joueurs obtiennent de meilleures performances après un apprentissage joystick (comparé au tapis roulant) alors que les non joueurs obtiennent de meilleures performances après apprentissage au tapis roulant. Les performances à cette tâche, qui consiste à associer un point

de vue à une action à effectuer (couplage perception action), semblent donc favorisées par la mise en jeu d'une composante motrice lors de l'apprentissage, mais l'efficacité de cette composante dépendrait de l'expertise en jeu vidéo. Pour les experts, le joystick permettrait d'obtenir des performances quasiment identiques à l'apprentissage en réel alors que pour les non experts, c'est le tapis roulant qui serait plus efficace et qui permettrait de se rapprocher de la condition réelle.

En conclusion de cette partie, nous pouvons proposer que : 1) Dans une tâche d'estimation des distances, l'engagement physique (condition tapis roulant supérieure à condition joystick) est important quelle que soit l'expertise en jeux vidéo (ce qui rejoint les résultats de notre première expérimentation) ; 2) pour une tâche égocentrique de classification (ne sollicitant pas de couplage perception action, c'est-à-dire que la tâche ne consiste pas à associer un point de vue à une action mais à classer chronologiquement des points de vue) l'engagement physique n'améliore pas les performances chez les non joueurs (condition joystick identique à condition tapis roulant). En revanche, le joystick améliore les performances chez les joueurs ; 3) Enfin, pour une tâche sollicitant un couplage perception action (tâche d'estimation des directions, c'est-à-dire association d'un point de vue à une à une direction), le joystick est aussi efficace que le réel pour les joueurs mais pour les non joueurs, le tapis roulant permet d'obtenir des performances proches du réel.

III.2 La composante allocentrique

Les tâches allocentriques de dessin du trajet et d'estimation du point de départ ne montrent pas d'effet du mode d'apprentissage (réel, joystick ou tapis roulant), ni d'effet de l'expertise en jeu vidéo, ni d'interaction entre le mode d'apprentissage et l'expertise. La conclusion de ces résultats est que ni l'engagement physique, ni l'expertise en jeu vidéo n'affectent l'élaboration et/ou l'utilisation de l'étape « carte cognitive », étape qui renvoie au niveau « Survey » du modèle L-R-S de Siegel et White (1975).

III.3 Reproduction du parcours (Le wayfinding)

Nos résultats au wayfinding sur les erreurs de direction montrent un effet du mode d'apprentissage : les performances sont meilleures en condition réelle, puis en condition tapis roulant, puis en condition joystick quelque soit l'expertise en jeu vidéo. Les tests post hoc montrent une différence significative entre la condition réelle et la condition joystick. Ruddle et al.(2011a) ont comparé un joystick et un tapis roulant et ont montré l'importance d'un haut

niveau d'engagement physique pour la navigation dans des environnements de grande taille, d'autres auteurs soulignent l'importance des informations sensorielles relatives au corps dans l'acquisition de connaissances spatiales, notamment en situation de marche réelle dans un EV (Chance et *al.*, 1998 ; Ruddle et Lessels, 2009 ; Ruddle et *al.*, 2011a). Dans notre étude, la condition d'apprentissage en réelle est celle qui est la plus efficace lorsque la reproduction se fait en réelle. En revanche, la condition d'apprentissage avec joystick est celle qui donne des résultats de reproduction (en réel) significativement inférieurs à l'apprentissage en réel, et ce quel que soit l'expertise en jeu vidéo. Enfin la condition d'apprentissage en tapis roulant est associée à des performances intermédiaires (entre l'apprentissage en réel et l'apprentissage avec joystick), là encore quelle que soit l'expertise en jeu vidéo (il faut tout de même noter que les performances en joystick et en tapis roulant ne sont pas significativement différentes).

Finalemment, nos résultats permettent de conclure :

- 1) que dans les tâches égocentriques de classification et d'estimation des directions, les joueurs bénéficient du joystick pour améliorer leurs performances (comparés aux non joueurs). Dans le chapitre 1, nous avons indiqué que certains auteurs (Feng et *al.*, 2007 ; Boot et *al.*, 2008) montraient des différences de compétences spatiales entre joueurs et non joueurs mais dans tous les cas, ces effets étaient évalués à l'aide de tests psychométriques classiques (rotation mentale, GZ5, etc). Nos résultats indiquent que, lorsqu'il s'agit de tâches 3D de navigation (se rapprochant des environnements réels) l'effet de l'expertise (meilleures performances pour les joueurs avec le joystick) s'exerce principalement sur des tâches nécessitant une estimation de l'ordre temporel et/ou des directions associées à un point de vue ;
- 2) Dans la tâche d'estimation des directions, comme nous l'avons vu dans le point ci-dessus, les joueurs bénéficient du joystick pour améliorer leurs performances mais en revanche les non joueurs bénéficient du tapis roulant. Comme nous l'avons déjà indiqué, cette tâche sollicite un couplage perception action (c'est-à-dire couplage d'un point de vue à une action à effectuer). Dans ce cadre, une composante motrice à l'apprentissage doit améliorer la performance. Mais nos résultats précisent que le joystick n'est favorable qu'aux joueurs, alors que les non joueurs doivent mettre en jeu un engagement physique plus important pour améliorer leurs performances (résultats meilleurs après apprentissage au tapis roulant comparé au joystick pour les non joueurs) ;
- 3) Dans la tâche égocentrique d'estimation des distances joueurs et non joueurs bénéficient du tapis roulant quelque soit l'expertise en jeu vidéo ; dans ce cas l'engagement physique

améliore les performances dans ce type de tâche, ce qui rejoint les résultats de Ruddle et *al.* (2011a) et Waller et Richardson (2008) ;

4) Pour ce qui concerne la composante allocentrique, nous avons indiqué que l'engagement physique et l'expertise en jeux vidéo n'amélioreraient pas l'élaboration et/ou l'utilisation du niveau « carte cognitive » (niveau « Survey » du modèle L-R-S) ;

5) Dans la tâche de wayfinding, l'apprentissage en réel permet d'obtenir les meilleures performances ; les moins bonnes performances sont obtenues après apprentissage joystick (quelque soit l'expertise en jeu vidéo). Le tapis roulant permet d'obtenir des performances intermédiaires. Si l'efficacité du tapis roulant n'est pas clairement démontrée, ces résultats montrent néanmoins que le joystick n'est pas l'interacteur optimal pour permettre un transfert virtuel/réel des compétences spatiales.

Chapitre VII : Les Interfaces Cerveau Ordinateur Implication de la composante motrice dans le transfert du virtuel au réel

I. Objectifs

Dans ce chapitre, l'objectif est d'évaluer la pertinence d'une interface cerveau ordinateur (ICO) dans l'apprentissage d'un trajet virtuel et sa reproduction en réel (transfert virtuel/réel). Les interfaces cerveau ordinateur permettent de traduire en commandes motrices l'activité électrique du cerveau recueillie à l'aide d'un système EEG. Cette technologie a pour but de naviguer dans des environnements virtuels sans effectuer d'action motrice et, simplement, en imaginant le mouvement d'un membre (imagerie motrice, ie. imaginer un mouvement de la main droite pour tourner à droite et de la main gauche pour tourner à gauche). Cette modalité d'interaction avec un environnement virtuel est extrêmement prometteuse en termes d'applications et notamment en ce qui concerne les personnes atteintes de handicap cognitifs et/ou psycho-moteurs (Cabestaing et Rakotomamonjy, 2007 ; Lotte, 2008). Cependant, à l'heure actuelle, les applications dans le domaine de la cognition spatiale sont quasiment inexistantes. Sur le plan théorique, cette interface permet d'évaluer l'importance de la composante motrice (en termes de déplacement physique) dans l'acquisition et la restitution d'informations spatiales. Dans cette expérience, nous avons donc comparé le transfert virtuel/réel après apprentissage d'un trajet 3D réalisé soit l'aide de l'ICO, soit à l'aide d'un tapis roulant. Ces conditions ont été comparées à une situation dans laquelle l'apprentissage a été réalisé directement en situation réelle.

Pour rappel, la navigation sollicite deux composantes : la composante cognitive et la composante motrice (Montello, 2005). La composante motrice concerne le déplacement physique du corps dans l'espace ainsi que les informations sensorielles associées (visuelles, vestibulaires et proprioceptives). Les ICO (ou BCI pour *Brain Computer Interface*) permettent de s'affranchir de cette composante puisqu'elles n'impliquent aucune activité motrice du corps. De ce fait, différents auteurs ont étudié l'utilisation de l'ICO dans les domaines du handicap cognitif/et ou moteur. Zhu et *al.* (2011), par exemple, proposent qu'une ICO

couplée à un environnement 3D pourrait constituer un outil pertinent pour l'amélioration des troubles sociaux et de communication chez des enfants autistes. Dans le cadre de la motricité, Galàn et *al.* (2008) se sont intéressés à la maîtrise d'une chaise roulante, à l'aide d'une interface de type ICO et montrent également des résultats prometteurs pour les patients tétraplégiques. L'étude de Ramos Murguialday et *al.* (2011) montrent que les ICO basées sur l'audition et les informations proprioceptives pourraient être utilisées chez des patients atteints de locked-in syndrome. D'autres études (Pfurtscheller et *al.*, 2006 ; Lalor et *al.*, 2005 ; Lotte et *al.*, 2010) ont utilisé le couplage ICO/RV pour se déplacer ou maîtriser les déplacements d'un avatar (personnage) dans un EV, en vue d'applications soit à la santé soit aux domaines du jeu vidéo. Cependant, ces recherches sont plus axées sur la technologie, l'utilisation de l'ICO et les algorithmes permettant le traitement des signaux EEG, que sur les aspects utilisateur. Or, la première étape dans l'utilisation d'une ICO, réside dans la capacité du sujet à maîtriser ces activités EEG, et plus particulièrement à stabiliser des patterns d'activités liés à une activité d'imagerie (imaginer un mouvement du bras droit), afin de les transformer en commande machine (tourner à droite). Les protocoles d'apprentissage ICO de la littérature ne sont pas standardisés et les progrès réalisés dans l'apprentissage (correspondant à la maîtrise des signaux cérébraux par le sujet) sont difficiles à évaluer. Enfin, l'ICO n'a jamais été utilisé dans le cadre de l'étude de la cognition spatiale et plus spécifiquement du transfert virtuel/réel. Outre les applications thérapeutiques, son utilisation dans ce domaine est pertinente dans la mesure où cette modalité d'interaction ne sollicite aucunement les informations vestibulaires dont nous avons vu qu'elles étaient considérées comme nécessaire à l'intégration d'un chemin (Mittelstaedt et Mittelstaedt, 2001) et plus particulièrement en EV (Ruddle et *al.*, 2011, 2011a).

L'objectif de ce travail est donc double : 1) Etablir et valider un protocole d'apprentissage de l'ICO et 2) Etudier l'impact de cette modalité d'interaction (sans composante motrice effective) sur l'apprentissage d'un parcours en virtuel et son transfert en réel.

I. Méthode

46 étudiants de l'Université Bordeaux Segalen ont participé à cette expérience. Ils étaient tous droitiers, âgés de 18 à 30 ans avec un bac ou équivalent minimum. Ils ont été répartis en 3 groupes d'apprentissage : 18 (9 hommes/ 9 femmes) en condition tapis roulant, 8 (4 hommes/4 femmes) en condition ICO et 20 (10 hommes/10 femmes) en condition réelle (groupe contrôle).

I.1 Matériels

L'environnement virtuel utilisé est celui présenté dans le chapitre Modèle d'analyse. L'ordinateur était un PC HP Elite Book Intel Core I5 CPU M520 2.4 GHZ, 1.92 Go RAM, équipé d'une carte graphique NVIDIA NVS 5100M 512 Mo RAM relié à un vidéo projecteur Optoma/ThemeScene (TexasInstrument) projetant une image de 2x1,88m. La traduction des signaux cérébraux en commandes était gérée par le logiciel Openvibe (Renard et *al.*,2010 ; Lotte et Renard, 2008 ; Lecuyer et *al.*, 2008) développé par l'INRIA et les signaux EEG étaient acquis à l'aide d'un ordinateur de type PC X86 Family 6 (système d'acquisition EEG Deltamed ®).

Le casque EEG comportait 23 électrodes.

I.2 Interfaces

L'interface tapis roulant avec rotation utilisée est celle décrite dans le chapitre 5 de notre partie empirique. Le sujet peut donc maîtriser sa vitesse de déplacement ainsi que la rotation de son point de vue dans l'EV.

L'apprentissage réel correspond également à la même procédure que l'expérimentation présentée en chapitre 5.

Dans l'interface ICO, la vitesse était bloquée à 4 km/h. Le sujet ne pouvait intervenir que dans les intersections, lorsque des flèches apparaissaient et l'informaient de la direction à prendre (ICO synchrone). Ainsi si une flèche gauche (ou droite) s'affichait, le sujet devait penser au mouvement de sa main gauche (ou droite). L'ICO analysait alors les signaux cérébraux et attribuait une commande (gauche ou droite). Cette commande était traduite dans l'EV par un feedback visuel correspondant à un changement de direction à gauche ou à droite (pour plus de détails, voir nos travaux d'Ingénierie de Recherche en annexe 1).

II. Procédure générale

La procédure générale correspond à la procédure commune décrite dans la partie Modèle d'Analyse. Elle se compose de (i) des tests papiers crayons évaluant les habiletés spatiales du sujet, (ii) l'apprentissage du trajet et (iii) la restitution du trajet.

II.1 Apprentissage de l'utilisation du tapis roulant

Les phases d'apprentissage tapis roulant et réel sont exactement les mêmes que celles présentées en expérience 5 et 6.

II.2 Apprentissage du système ICO par l'utilisateur

Les sujets étaient installés à 2 mètres de l'écran et portait un casque EEG connecté au matériel présenté en partie I.1. (cf. Figure 7.1).



Figure 7.1 : Photo d'un sujet utilisant l'interface ICO dans notre quartier virtuel de Bordeaux.

La première étape de cette expérience a consisté à élaborer et évaluer un protocole d'apprentissage, car il n'existe pas de protocole standard. L'apprentissage consiste, pour l'utilisateur, à apprendre à contrôler ses signaux cérébraux et ceci de façon relativement stable dans le temps. Le sujet avait pour consigne d'imaginer des mouvements de sa main gauche (ou droite) lorsqu'une flèche gauche (ou droite) était présentée à l'écran. Deux types d'apprentissage ont été effectués : sans feedback et avec feedback (cf. Figure 7.2).

La session sans feedback était composée de 20 flèches indiquant la direction gauche, 20 flèches indiquant la direction droite, présentées dans un ordre aléatoire. La session se passait de la façon suivante : pendant 2 secondes, un écran noir était présenté, puis une croix verte apparaissait durant 2 secondes, le sujet devait alors focaliser son attention sur cette croix. Puis une flèche rouge apparaissait, indiquant une direction qui correspondait à l'imagerie motrice à effectuer (main gauche ou main droite). Le sujet devait alors maintenir cette image mentale durant 5s, avant de passer à l'essai suivant. Le sujet avait pour consigne de ne pas effectuer de mouvement ni cligner les yeux durant la présentation des informations.

Après cette première étape, l'étape suivante (avec feedback) permettait au sujet d'avoir un retour sur la pertinence de l'activité EEG qu'il produisait (en fonction de la consigne). En effet, l'objectif de l'apprentissage est de faire en sorte que le sujet puisse « produire », pour une consigne donnée, le même type de pattern EEG. Dans ce cadre, le feedback lui indiquait si l'activité EEG produite correspondait bien à la consigne. Dans la session feedback, des flèches apparaissaient et indiquaient au sujet le côté du mouvement à imaginer (droit ou gauche). Le pattern EEG correspondant au mouvement imaginé était identifié par l'ordinateur (lorsque le pattern était suffisamment discriminable) et transformé en commande. Cette commande permettait de déplacer un ballon de handball à droite ou à gauche (selon le mouvement imaginé) afin de marquer un but. De ce fait, le sujet pouvait mesurer, et le cas échéant, rectifier l'écart entre le mouvement imaginé et la direction que prenait le ballon. Cette session feedback a été élaborée d'après les travaux de Ron-Angevin et Diaz-Estrella (2009) et Leeb et *al.* (2005). Dans notre expérience, la durée d'une session d'apprentissage (avec ou sans feedback) était d'environ 15 minutes.

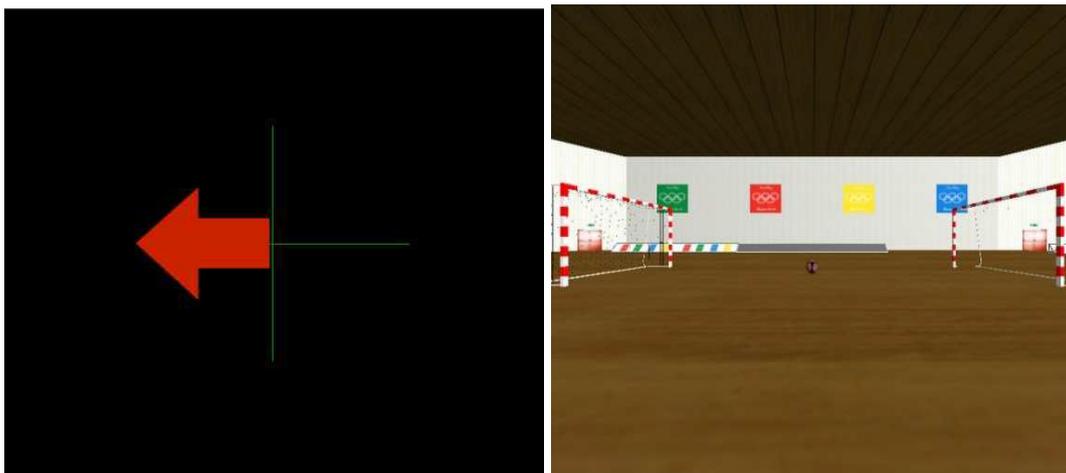


Figure 7.2 : A gauche, session sans feedback ; à droite session d'entraînement avec feedback (OpenVibe, INRIA).

Pour déterminer le nombre de sessions, nous nous sommes inspirés de 2 articles de références. Le premier (Pfurtscheller et Neuper, 2001) mentionnait 6 sessions, la 1^{ère} et la 3^{ème} session effectuées sans feedback. Le second (Guger et *al.*, 2001), comprenait également 6 sessions ou 7 sessions, la 1^{ère}, la 4^{ème} et la 6^{ème} sans feedback. Nous avons, pour notre part, opté pour 6 sessions, avec une seule session sans feedback pour optimiser l'apprentissage. Ces sessions ont été effectuées durant 3 jours : 3 sessions le premier jour, 2 sessions le second et une seule session le dernier jour. Le temps d'apprentissage de l'ICO était estimé à environ 10 heures.

Les performances d'apprentissage étaient évaluées à l'aide de deux indicateurs : le taux de classification correcte, et le taux de feedback correct. Le taux de classification est une mesure qui permet d'évaluer la capacité de l'ICO à identifier un pattern EEG correspondant à une image motrice donnée : lors des premiers essais, l'ordinateur identifie un pattern type d'activité EEG correspondant à une image motrice (mouvement de la main droite ou gauche). Ce pattern, réactualisé à chaque essai, servira de base à l'identification et à la classification des patterns EEG ultérieurs. Mais rien n'indique au sujet que l'activité qu'il produit à chaque essai est associée à la bonne commande. Le taux de feedback correct est alors calculé uniquement dans les sessions avec feedback. Dans ce cas, le sujet imagine un mouvement et voit le ballon de handball se déplacer dans le sens du mouvement imaginé. Il a donc un feedback sur ses capacités à contrôler ses signaux EEG. Ce taux permet de connaître le pourcentage de bonnes réponses à la consigne donnée (pourcentage de déplacement à gauche lorsque le sujet imagine un mouvement de la main gauche et de déplacement à droite lorsque le sujet imagine un mouvement de la main droite).

Une fois l'apprentissage de l'interface effectué, le sujet est soumis au protocole RV tel qu'il a été présenté dans le chapitre intitulé Modèle d'Analyse. Le sujet apprend un trajet en se déplaçant dans l'environnement 3D à l'aide de l'imagerie mentale, en suivant des flèches apparaissant dans l'environnement virtuel à chaque intersection. Comme pour l'apprentissage en ICO, une flèche à droite indiquait que le sujet devait imaginer un mouvement de la main droite (et vice versa pour la flèche gauche). Il s'agit donc d'un ICO synchrone (cf. Chapitre 3 de notre partie théorique), dans la mesure où le sujet n'interagit que quand le système le lui propose (ici à chaque intersection). Le trajet est réalisé une fois durant l'apprentissage, et devra être reproduit en situation réelle (environ 30 minutes après).

Cette condition était comparée à deux autres issues de nos expérimentations précédentes : 1) la condition réelle dans laquelle le sujet apprend le même trajet en réel (que dans la condition ICO) et le restitue également en réel et ; 2) la condition tapis roulant avec rotation dans laquelle le sujet apprend en virtuel et restitue en réel.

III. Résultats

Dans un premier temps, nous présenterons les résultats concernant la phase d'apprentissage ; dans un second temps, nous présenterons les données concernant le transfert virtuel/réel des compétences spatiales acquises à l'aide de l'ICO (comparées aux conditions apprentissage en situation réelle ou apprentissage à l'aide du tapis roulant).

III.1.1 Le protocole d'apprentissage ICO

Le tableau ci-dessous présente le taux de classification ainsi que le taux de feedback correcte (droite ou gauche) pour les 6 sessions d'apprentissage (cf. Tableau 7.1).

sujet	sexe	PREMIER JOUR						DEUXIEME JOUR						3EME JOUR			Moyenne des sessions				
		Session 1 (sans Feedback)		Session 2 (avec feedback)		Session 3 (avec feedback)		Session 4 (avec feedback)		Session 5 (avec feedback)		Session 6 (avec feedback)									
		Classif	Classif	gauche	droite	Classif	gauche	droite	Classif	gauche	droite	Classif	gauche	droite	Classif	gauche	droite	Classif	gauche	droite	Gen.
1	M	63,00	53,00	44,00	45,00	52,00	33,00	75,00	50,00	0,00	10,00	52,00	65,00	68,00	52,00	44,00	44,00	53,67	37,20	48,40	42,80
3	F	65,00	54,00	70,00	85,00	56,00	73,00	60,00	63,00	95,00	53,00	56,00	90,00	68,00	65,00	88,00	78,00	59,83	83,20	68,80	76,00
4	M	55,00	72,00	88,00	78,00	67,00	78,00	83,00	63,00	80,00	58,00	54,00	85,00	65,00	60,00	76,00	70,00	61,83	81,40	70,80	76,10
5	M	53,00	40,00	18,00	65,00	40,00	22,00	46,00	52,00	40,00	65,00	58,00	63,00	20,00	44,00	23,00	65,00	47,83	33,20	52,20	42,70
7	F	53,00	53,00	80,00	35,00	58,00	93,00	30,00	48,00	76,00	66,00	38,00	55,00	48,00	48,00	63,00	58,00	49,67	73,40	47,40	60,40
8	F	72,00	61,00	93,00	40,00	69,00	100,00	3,00	54,00	93,00	13,00	51,00	83,00	38,00	66,00	85,00	63,00	62,17	90,80	31,40	61,10
9	M	52,00	44,00	23,00	90,00	53,00	28,00	93,00	37,00	23,00	73,00	35,00	28,00	70,00	40,00	40,00	70,00	43,50	28,40	79,20	53,80
11	F	57,00	33,00	95,00	3,00	39,00	95,00	0,00	38,00	38,00	78,00	49,00	43,00	65,00	37,00	65,00	50,00	42,17	67,20	39,20	53,20
moienne		58,75	51,25	63,88	55,13	54,25	65,25	48,75	50,63	55,63	52,00	49,13	64,00	55,25	51,50	60,50	62,25	52,58	61,85	54,68	58,26
Ecart Type		7,19	12,26	31,32	29,72	10,95	32,48	35,41	9,80	35,19	26,20	8,32	21,71	18,23	11,19	23,06	11,20	8,05	25,03	16,65	12,94

Tableau 7.1 : Taux (en pourcentages) de Classifications correctes lors des sessions d'apprentissage ICO Sans et avec feedback.

La Figure 7.3 présente l'ensemble des courbes d'apprentissage au cours des 6 sessions. Le taux de classification (quelle que soit la session) s'étend de 33 à 72%, le taux de feedback correct pour un mouvement imaginé à gauche varie de 0 à 100%, le taux de feedback correct pour un mouvement imaginé à droite varie de 0% à 93%. Ces données ont été soumises à une ANOVA en mesures répétées. Les tests Post Hoc ont été effectués à l'aide du test non paramétrique Student-Newmans-Keuls.

Concernant le taux de classification¹¹, l'ANOVA ne montre pas de différence significative entre les 6 sessions ($p > 0.08$).

Concernant le taux de feedback¹², là encore, l'ANOVA ne montre aucune différence entre les 6 sessions, ni pour le feedback à droite, ni pour le feedback à gauche ($p > 0.700$; $p > 0.700$).

¹¹ Rappelons que ce taux indique le nombre de fois que l'ordinateur « reconnaît » un pattern d'activité, c'est-à-dire le nombre de fois que l'ordinateur établit une correspondance entre un pattern produit et un pattern de référence ; ce pattern de référence, réactualisé à chaque essai, correspond à ce que l'ordinateur a identifié comme étant associé à un mouvement imaginé à droite (pattern 1) ou à gauche (pattern2).

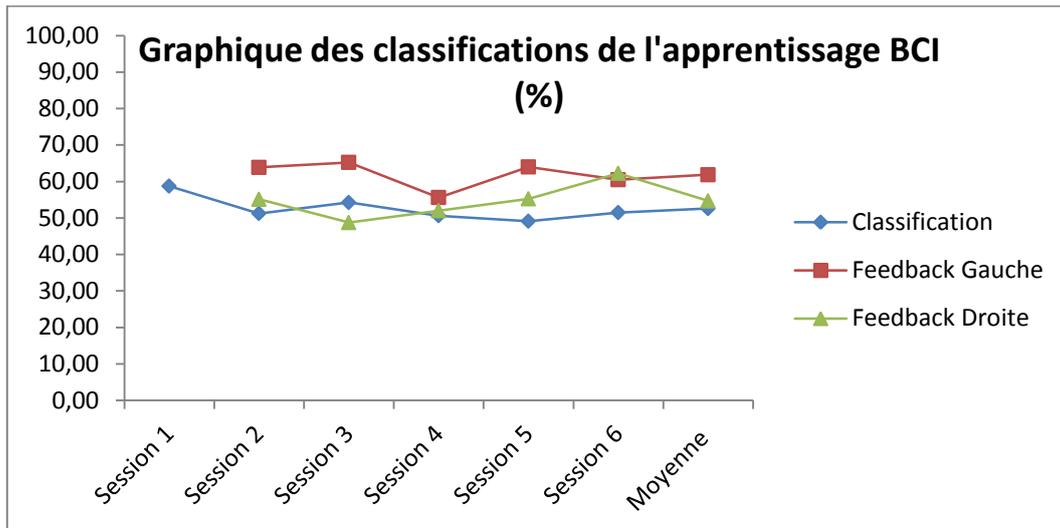


Figure 7.3 : Taux en pourcentage de classification et de feedback durant l'apprentissage pour les 8 sujets. La courbe bleue correspond aux classifications machine (de la session 1 à la session 6) ; les courbes rouges et vertes correspondent respectivement aux feedbacks corrects à gauche et à droite (de la session 2 à 6 dans la mesure puisque la session 1 est réalisée sans feedback).

La Figure 7.3 présente les moyennes des taux de classification et des taux de feedback de l'ensemble des sujets, et montre clairement l'absence d'effet d'apprentissage sur les 6 sessions. Sur les 8 sujets, seuls 4 ont obtenu un taux de feedback supérieur à 60% sur l'ensemble des 6 sessions. Ces 4 sujets ont donc été soumis au protocole de Réalité Virtuelle.

III.1.2 Le transfert de connaissances du virtuel au réel

Dans cette section, nous présentons les résultats obtenus au protocole de restitution d'un trajet en situation réelle (ainsi qu'aux différents tests papier-crayon) en fonction de la condition d'apprentissage. Trois groupes ont été comparés : un groupe d'apprentissage en virtuel avec interface tapis roulant (n=18), un groupe d'apprentissage en virtuel avec interface ICO (n=4) et un groupe d'apprentissage en situation réelle (n=20).

Nous avons tout d'abord vérifié que les 3 groupes étaient homogènes¹³. Les résultats des ANOVA montrent que les 3 groupes ne diffèrent pas significativement pour les tests de GZ-

¹² Rappelons que ce taux indique le nombre de fois où la réponse du système (aller à droite ou à gauche) correspond à la consigne proposée (imaginer un mouvement à droite ou à gauche).

¹³ Nous avons choisi d'analyser les données à l'aide d'ANOVA à un facteur. Nous sommes conscients que 4 sujets dans le groupe ICO ne permettent pas de tirer des conclusions pertinentes. Les ANOVA ont tout de même été réalisées à titre indicatif.

5 ($p>0.300$), les Cubes de Corsi ($p>0.900$) et le Test de Rotation Mentale ($p>0.200$) (cf. Tableau 7.2).

Mode de Locomotion Genre (Hommes/Femmes) Jeux Vidéos (Joueurs/Non joueurs)	Condition Réelle		Conditions Virtuelles			
	Apprentissage Réel		Apprentissage Tapis roulant		Apprentissage ICO	
	10/10		9/9		1/3	
	10/10		9/9		3/1	
	Moyenne	Ecart Type	Moyenne	Ecart Type	Moyenne	Ecart Type
Age	22,30	2,81	22,61	3,24	22,50	1,73
Habiletés Spatiales						
GZ-5	22,24	10,48	16,68	9,75	16,31	2,68
Test de Rotation Mentale	20,60	9,68	22,28	6,92	13,50	12,12
Cube de Corsi(Total)	18,45	2,89	18,56	2,20	18,50	1,00

Tableau 7.2 : Tableau présentant les performances spatiales moyennes (et les écart types) de chaque groupe d'apprentissage pour le GZ-5, le test de rotation mentale et les cubes de Corsi. La répartition homme/femme ainsi que joueur/non joueur est également indiquée.

Tâche égocentrique de classification de photos (Figure 7.4):

L'ANOVA révèle une différence significative [$F(2,39)= 3,494; p<0.05$]. Les résultats de la condition contrôle sont meilleurs que les résultats ICO et tapis roulant. Ces deux derniers groupes ont d'ailleurs des résultats similaires. Les tests Post Hoc révèlent une différence significative en faveur de la condition réelle comparée à la condition tapis roulant et une tendance à la significativité entre le groupe réel et le groupe ICO ($p>0.08$).

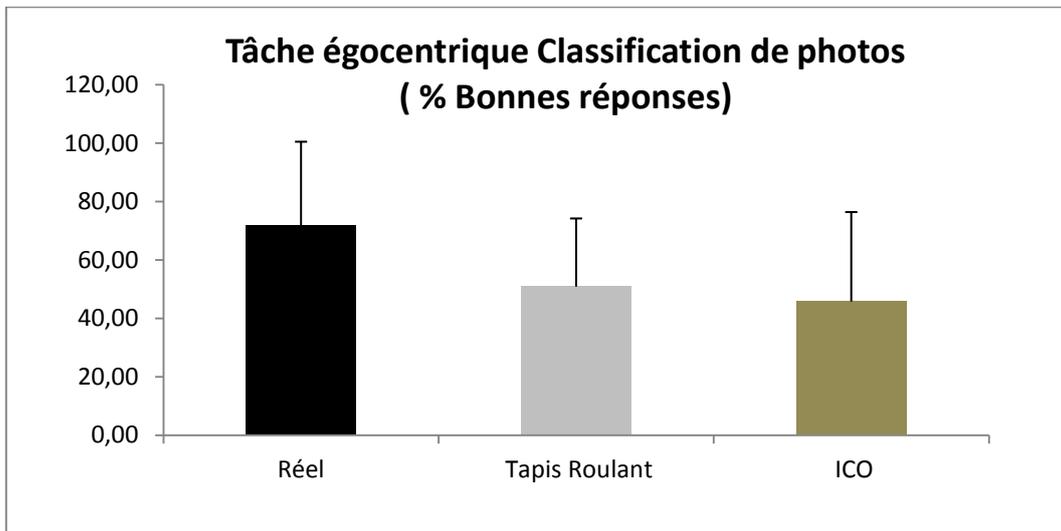


Figure 7.4: Résultats de la classification de photos selon le mode d'apprentissage.

Tâche égocentrique d'estimation de la distance parcourue (Figure 7.5) :

L'analyse statistique concernant l'estimation de la distance parcourue ne montre aucun effet du groupe d'apprentissage ($p < 0.500$).

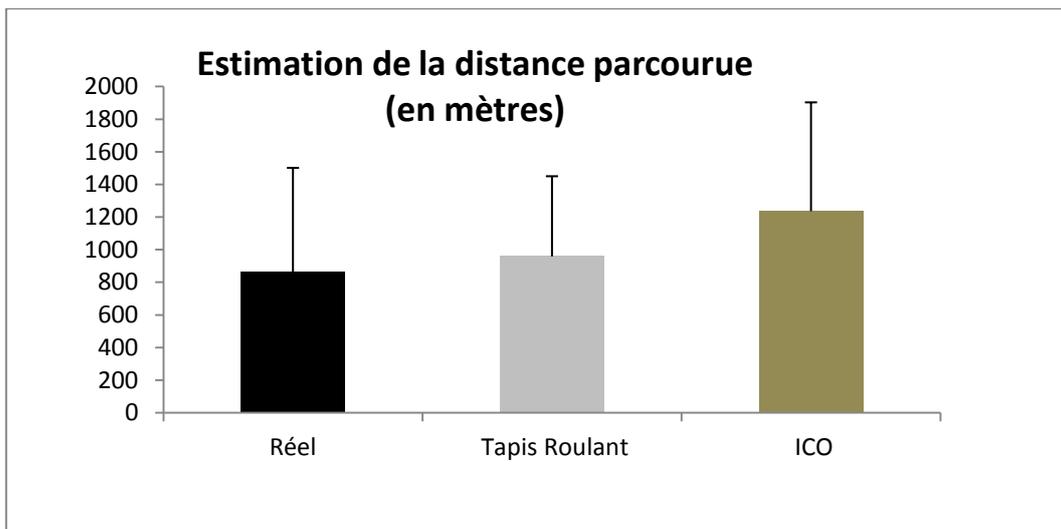


Figure 7.5 : Estimation de la distance parcourue selon le mode d'apprentissage.

Tâche égocentrique d'estimation des directions (Figure 7.6) :

L'analyse statistique ne montre aucun effet du groupe d'apprentissage ($p > 0.200$).

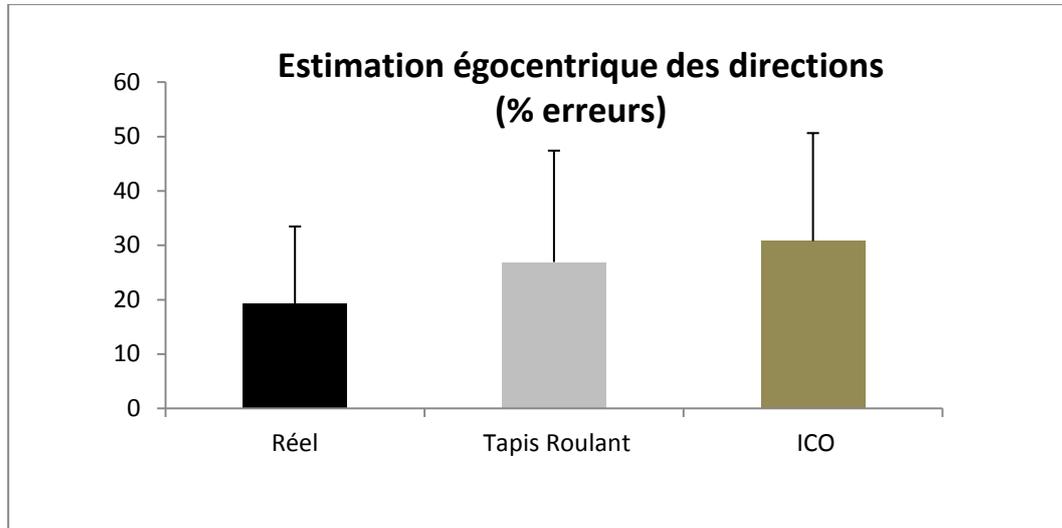


Figure 7.6 : Tâche égocentrique d'estimation des directions.

Tâche allocentrique du dessin du plan du parcours (cf. Figure 7.7):

Encore une fois, l'ANOVA ne révèle aucun effet significatif du groupe d'apprentissage ($p > 0.600$).

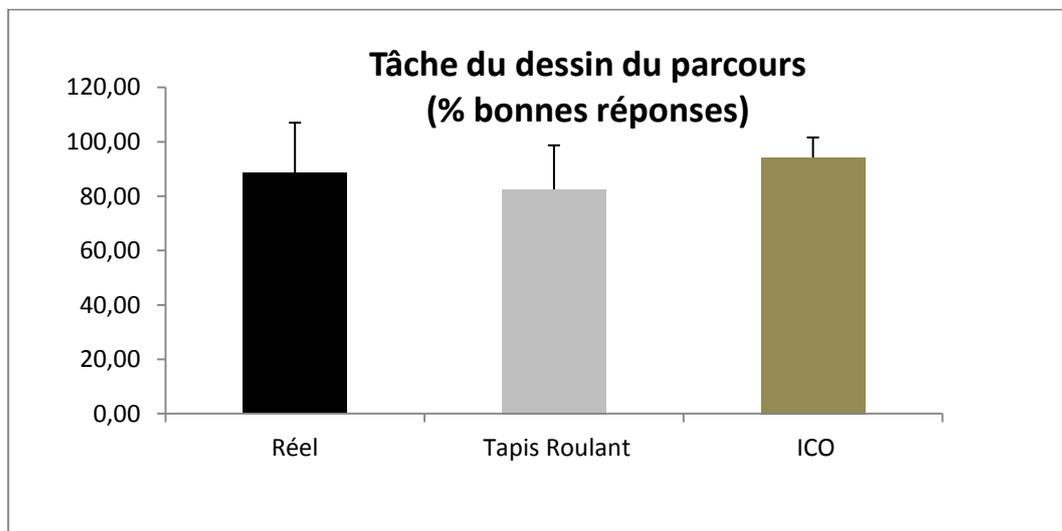


Figure 7.7 : Résultats de la tâche de dessin selon les 3 groupes d'apprentissage.

Tâche allocentrique d'estimation du point de départ du trajet (Figure 7.8) :

Les analyses statistiques ne révèlent aucune différence significative selon le groupe d'apprentissage ($p > 0.600$).

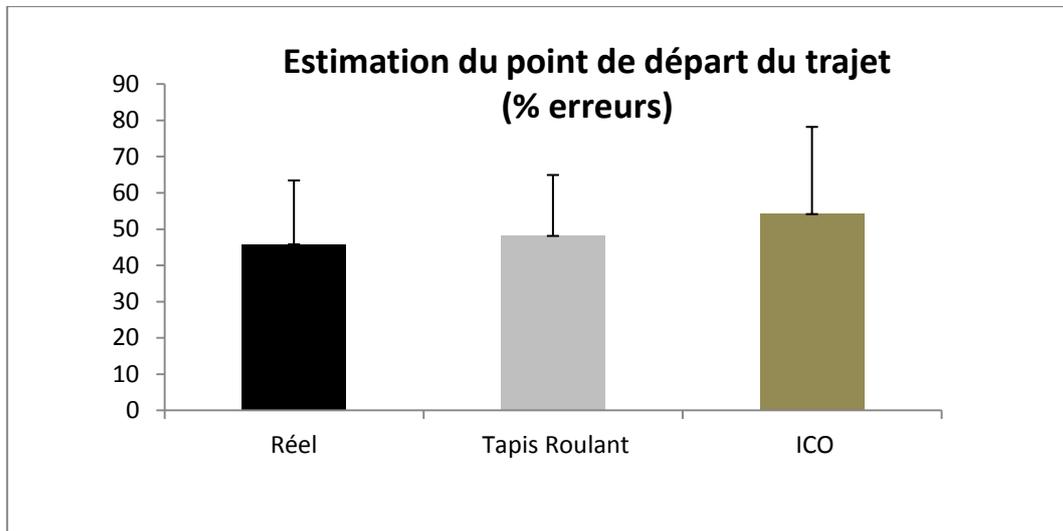


Figure 7.8 : tâche d'estimation du point de départ du trajet.

Tâche de wayfinding (vitesse moyenne et pourcentage d'erreurs de direction) (Figure 7.9 et

Figure 7.10) :

Les analyses statistiques ne montrent aucun effet ni pour la vitesse de restitution ($p > 0.100$) ni pour le pourcentage d'erreurs de direction ($p > 0.300$).

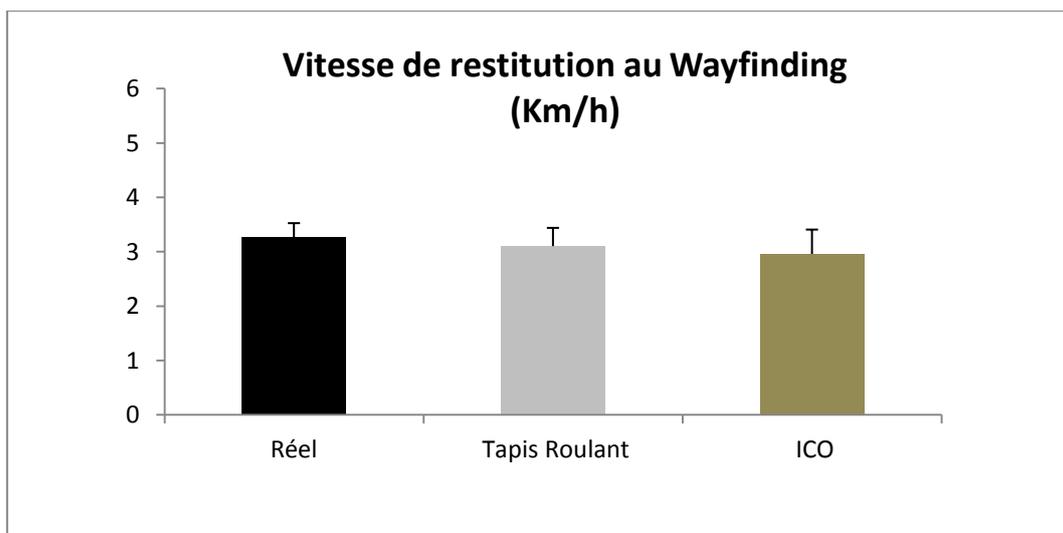


Figure 7.9 : Vitesse moyenne de restitution pour la tâche de wayfinding.

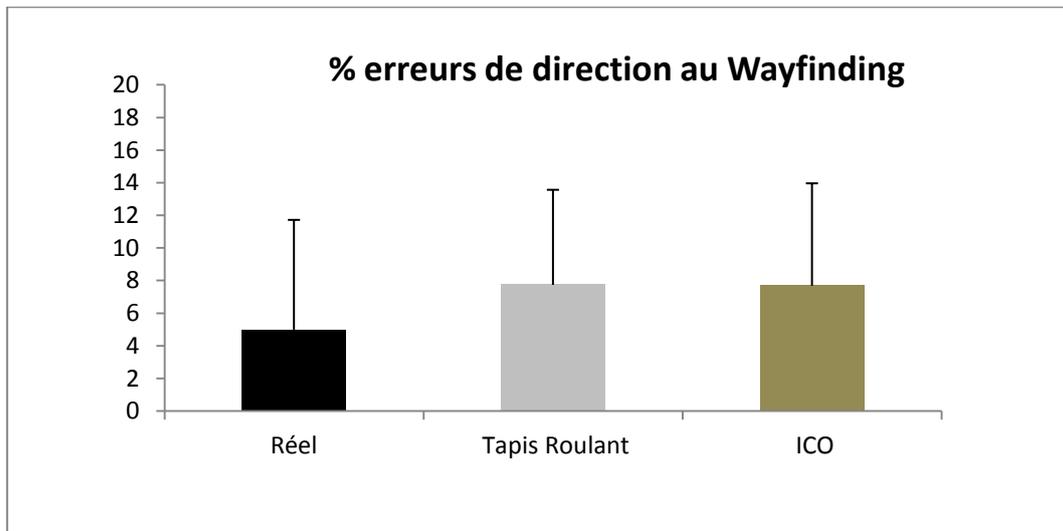


Figure 7.10 : Résultats du pourcentage d'erreurs en wayfinding selon le mode d'apprentissage.

IV. Discussion

Nous nous proposons de discuter, tout d'abord les résultats concernant le protocole d'apprentissage de l'interaction avec l'ICO, puis les résultats concernant le protocole de Réalité Virtuelle.

IV.1 Protocole d'apprentissage du ICO

La difficulté majeure du système ICO réside dans l'ajustement du protocole d'apprentissage permettant au sujet de « contrôler » son activité EEG. Comme nous l'avons vu, aucun sujet n'a présenté d'apprentissage au cours des 6 sessions. Les sujets que nous avons retenus (feedback positif supérieur à 60%) avaient un score relativement élevé dès la première session. Pourtant, le protocole que nous avons établi était directement inspiré des protocoles proposés dans la littérature. Deux éléments sont néanmoins à souligner :

- Les résultats permettent de différencier certains profils : par exemple, certains sujets obtenaient des performances assez stables tout au long des sessions. D'autres sujets montrent une alternance (augmentation ou baisse) des performances, et paradoxalement, pour ce type de profils, la dernière session semblait être une des plus faibles en termes de taux de classification. Une augmentation du nombre de sujets permettraient à l'avenir d'identifier les variables (caractéristiques individuelles) qui permettent de rendre compte de ces patterns de performances ;

- En 2010, Kübler et *al.* ont analysé 137 études utilisant une ICO et ont montré qu'un nombre de sessions d'apprentissage inférieur à 4 semblait insuffisant pour permettre une progression de l'apprentissage. Notre protocole proposait 6 sessions mais il serait intéressant à l'avenir d'augmenter le nombre de sessions afin d'en évaluer l'impact sur les taux de classification et de feedback correct.
- Pour maximiser l'apprentissage et le contrôle de l'utilisateur, Brunner et *al.* (2010) proposent de coupler et synchroniser les signaux de deux ICO basés à la fois sur l'EEG et les potentiels évoqués. Il faut également noter que l'aspect motivationnel et l'intérêt de la tâche sont un atout majeur pour augmenter les performances (Kleih et *al.*, 2010). D'autres études montrent également que la méditation favorise le contrôle EEG par l'utilisateur (Berry et *al.*, 2010).
- D'une façon générale, il s'agit d'un champ de recherche novateur, et de nombreux travaux sont encore nécessaires pour préciser l'impact des caractéristiques individuelles (âge, sexe, etc.), des caractéristiques du protocole d'apprentissage (nombre de séances, durée, type de feedback, etc.), et des paramètres de traitement des activités EEG (en particulier des algorithmes de classification) pour optimiser les performances en ICO.

L'ensemble de ces éléments indiquent clairement que la mise au point de protocoles d'apprentissage pertinents constitue un champ de recherche à part entière et que de nombreuses pistes restent à explorer afin de rendre ces technologies accessibles au plus grand nombre d'utilisateurs.

IV.2 Transfert d'apprentissage du virtuel au réel.

L'objectif de cette seconde expérience est de : 1) comparer le transfert virtuel/réel selon le type d'interacteur utilisé à l'apprentissage : tapis roulant avec orientation, ICO, et apprentissage en situation réelle ; 2) sur le plan plus théorique, discuter l'impact de la composante motrice effective dans l'acquisition de compétences spatiales en particulier sur les composantes égocentriques, allocentriques et sur la reproduction de parcours (wayfinding).

IV.2.1 La composante égocentrique

Concernant la tâche égocentrique de classification de photos, les analyses statistiques montrent une différence significative en faveur du groupe réel. Les résultats des groupes ICO et tapis roulant sont similaires, et les tests post hoc révèlent une différence entre le groupe réel

et le groupe tapis roulant, et une tendance entre le groupe réel et le groupe ICO. Il faut noter que cette tâche consiste à classer, par ordre chronologique, des photos représentant des intersections du parcours réel. Cette tâche met donc en jeu essentiellement la mémoire épisodique et en particulier la composante temporelle. De ce fait, la composante motrice (tapis roulant) de l'interaction avec l'environnement virtuel n'améliore pas les résultats par rapport à la situation sans composante motrice (ICO). Les meilleurs résultats sont cependant obtenus en condition réelle, ce qui semble indiquer que la richesse informationnelle est plus importante que l'implication motrice dans ce type de tâche. Ce constat rejoint les résultats de Wallet et *al.* (2011) montrant que, dans ce type de tâche, la fidélité visuelle de l'EV est plus importante que la modalité d'interaction (active ou passive). Il faut cependant noter que, dans notre expérience précédente (chapitre VI), l'expertise en jeu vidéo permettait d'améliorer les performances, dans ce type de tâche, chez les joueurs utilisant le joystick comme interacteur. On peut donc conclure que, l'expertise dans l'utilisation d'une interface motrice pondère notre conclusion selon laquelle, une composante motrice n'améliore pas les performances dans ce type de tâche.

La tâche égocentrique d'estimation des distances ne montre aucune différence significative selon le mode d'apprentissage. Rappelons que, dans le chapitre 5 (pour mémoire cette expérience manipulait le type d'interacteur tapis roulant vs. Joystick et la présence ou absence de rotation de la tête), nous avons montré que dans cette tâche :

- Les performances étaient optimales dans la condition tapis roulant et ceci avec ou sans possibilité de rotation de la tête ;
- Par contre, lorsque le joystick était utilisé, la possibilité de rotation de la tête perturbait les performances.

De ce fait, le rôle de l'engagement physique et de la rotation semble dépendre de la situation d'interaction. Ces résultats sont en accord avec les données contradictoires de la littérature. En effet, pour certains auteurs, les informations sensorielles relatives au corps jouent un rôle important dans l'estimation des distances (Ruddle et *al.*, 2011a ; Waller et Richardson, 2008), alors que pour d'autres, le flux visuel permettrait une bonne estimation même en l'absence d'informations relatives au corps (Redlick, Jenkin et Harris, 2001; Riecke, Cunningham et Bühlhoff, 2007). Dans notre expérimentation, l'estimation des distances est relativement identique que le sujet utilise un tapis roulant, une ICO, ou encore que l'apprentissage se fasse en situation réelle. Plusieurs éléments peuvent être avancés pour rendre compte de ce résultat :

- Nous pourrions effectivement aller dans le sens de Redlick et *al.* (2001) indiquant que la composante motrice à l'apprentissage n'est pas un élément essentiel dans la mesure où le flux visuel peut permettre une estimation correcte des distances;
- Nous pourrions évoquer la théorie dite psycho neuromusculaire (Abernethy, 2005) ou encore la théorie d'apprentissage symbolique (Abernethy, 2005). La première met l'accent sur la similitude de substrat neural entre mouvement réalisé et mouvement imaginé ; la seconde va plus loin en postulant que le cerveau est apte, de manière symbolique, à planifier une séquence de mouvements sans envoyer d'activité électrique aux muscles. Ces deux théories nuancent donc l'idée selon laquelle l'ICO ne met pas en jeu de composante motrice, même si la nature de cette activité reste « symbolique » ;
- Une autre explication, plus méthodologique, repose sur le faible nombre de sujets exploré dans le groupe ICO. L'augmentation du nombre de sujet (comme perspective à ce travail) permettra d'apporter des éléments d'informations sur ce dernier point.

La tâche égocentrique d'estimation des directions ne révèle pas de différence significative selon le mode d'apprentissage. Nous avons déjà rapporté le fait que cette tâche repose sur un couplage perception action (ie. couplage d'une vue à une direction). Rappelons que dans notre seconde expérience les non joueurs bénéficiaient du tapis roulant avec rotation pour améliorer leurs performances, alors que les joueurs bénéficiaient du joystick avec rotation. Dans les 2 cas, une activité motrice à l'apprentissage favorisait les performances lors de la restitution. Ces résultats ne sont pas complètement en accord avec le résultat de cette présente étude indiquant que l'ICO permet une estimation des directions identique aux conditions d'apprentissage en tapis roulant ou en réel. Il faut indiquer que dans notre protocole ICO (comme dans les protocoles classiques), la direction à suivre lors de l'apprentissage est indiquée non pas par une commande verbale (comme dans les conditions tapis roulant et réel) mais par une flèche (à droite, à gauche ou tout droit) indiquant la direction à suivre lors de chaque intersection. Il est alors possible que ce système d'indication des directions ait renforcé l'apprentissage du couplage entre une intersection et une direction à suivre. Une telle hypothèse reste à vérifier en comparant ces données à une condition ICO reposant sur des commandes verbales (même si cette technique n'est pas couramment utilisée dans la littérature).

IV.2.2 La composante allocentrique

Les tâches allocentriques de dessin du parcours et d'estimation du point de départ ne montrent pas de différences significatives entre les 3 modes d'apprentissage. Dans notre seconde expérience, les résultats à ces tâches ne montraient pas d'effet de l'engagement physique, c'est-à-dire que les performances après apprentissage en réel, en tapis roulant ou au joystick étaient relativement identiques. Notre conclusion était, alors que la composante motrice n'améliorait pas les capacités d'élaboration et de gestion de la représentation spatiale de l'environnement (étape « survey » du modèle L-R-S). Les résultats de cette présente expérience sont en accord avec cette conclusion dans la mesure où les 2 conditions plus motrices (tapis roulant et réel) délivrent des performances similaires à celles de la condition ICO.

IV.2.3 La reproduction du parcours (Wayfinding)

La tâche de wayfinding ne révèle pas de différence significative entre les 3 conditions d'apprentissage. Dans notre seconde expérience, nous observons une différence significative entre l'apprentissage en réel et l'apprentissage au joystick (en faveur du réel). En revanche, la condition tapis roulant était intermédiaire mais ne montrait pas de différence significative avec la condition joystick. Notre conclusion était alors que l'engagement physique n'était pas essentiel pour optimiser les performances de reproduction d'un parcours, dans la mesure où la condition tapis roulant n'améliorait pas les performances en comparaison à la condition joystick. Cette conclusion est en accord avec les résultats de cette présente étude dans la mesure où la condition ICO permet d'obtenir des résultats identiques aux conditions d'apprentissage en réel et au tapis roulant.

L'objectif de cette présente étude était de discuter du rôle de l'engagement physique (et donc des résultats obtenus dans la seconde expérience) en manipulant une condition (ICO) supposée ne pas solliciter d'activité motrice effective. Les résultats obtenus doivent être pris avec précaution compte tenu du faible nombre de sujets participants au groupe ICO. Néanmoins, ils montrent une bonne adéquation avec les résultats de notre précédente expérience, en suggérant que la composante allocentrique et la reproduction du parcours sont plus dépendants du système cognitif que du système moteur (voir modèle proposé par Montello, 2005). En revanche, les résultats concernant les tâches égocentriques doivent faire l'objet d'investigations complémentaires pour préciser les rôles respectifs des informations

sensorielles du corps et du flux visuel dans l'optimisation des performances à ce type de tâche. Enfin, il sera également nécessaire de préciser les mécanismes en jeu dans la gestion d'une ICO, notamment pour ce qui concerne l'hypothèse d'une mise en jeu « symbolique » d'une activité motrice, et du rôle de cette activité dans l'élaboration et la gestion de compétences spatiales.

Chapitre VIII : Discussion et Perspectives

Notre thèse proposait d'étudier l'impact des propriétés d'interaction des interfaces sur le transfert de connaissances spatiales du virtuel vers le réel. Nous étions donc dans le cadre d'un mode d'exploration actif (Wilson et *al.*, 1997) puisque les sujets avaient, pour l'ensemble de nos expérimentations, la possibilité d'interagir avec l'EV. La plupart des expérimentations effectuées dans le cadre de la cognition spatiale à l'aide de la RV proposent des interfaces de déplacement basées sur le clavier ou la souris, ou le joystick (Tlauka et *al.*, 2005 ; Meijer et *al.*, 2009 ; Wilson et *al.*, 1997), qui ne délivrent aucune information vestibulaire (aucun mouvement de tête n'est demandé puisque l'interaction se base sur des mouvements de la main), susceptible pourtant d'optimiser l'acquisition de connaissances spatiales et la représentation interne de la position du corps en environnement réel (Loomis et *al.*, 2001 ; Berthoz et *al.*, 1995) mais également en EV (Chance et *al.*, 1998 ; Ruddle et Lessels, 2006 ; Ruddle et *al.*, 2011a).

Dans ce contexte, nous avons développé 5 interfaces délivrant, selon les modalités d'interaction, peu ou beaucoup d'informations sensorielles relatives à la position du corps dans l'espace :

- Deux basées sur la marche à l'aide d'un tapis roulant (engagement physique fort).
 - o Avec Rotation : le sujet marche sur un tapis roulant et oriente son point de vue dans l'EV à l'aide de la rotation de sa tête : cette interface propose des informations proprioceptives et des informations vestibulaires de translation car la tête est soumise aux accélérations du tapis roulant, et aux informations vestibulaires de rotation car l'orientation de la tête provoque l'orientation du point de vue dans l'EV.
 - o Sans rotation : Le sujet marche sur le tapis roulant qui donne des informations proprioceptives et vestibulaires de translation ; par contre les rotations étaient préprogrammées et ne fournissaient pas d'information vestibulaire de rotation.

- Deux interfaces basées sur le déplacement du poignet grâce à l'utilisation d'un joystick (engagement physique faible et limité à la main).
 - o Avec rotation : Le sujet se déplaçait et s'orientait en inclinant les axes verticaux et horizontaux du joystick ; cette interface ne proposait aucune information vestibulaire (la tête n'était soumise à aucune force d'accélération ou de décélération) et peu d'informations proprioceptives.
 - o Sans Rotation : le sujet se déplaçait en inclinant l'axe vertical du joystick, et les rotations du point de vue étaient préprogrammées.
- Une interface Cerveau Ordinateur (aucun engagement physique corporel) basée sur les signaux cérébraux de l'imagerie motrice effectuée par le sujet. Le sujet devait imaginer le mouvement de sa main gauche (ou droite) pour signifier à l'EV quelle direction il souhaitait prendre. Ainsi, aucune activité motrice n'était effectuée et aucune information vestibulaire n'était présente (la tête n'était soumise à aucune force de translation ou de rotation).

Ces interfaces ont servies à l'implémentation de 3 expérimentations visant les objectifs suivants:

1) la première a évalué l'impact de l'engagement physique de deux interacteurs (tapis roulant vs joystick) avec la possibilité ou non d'effectuer une rotation active du point de vue sur le transfert virtuel/réel de connaissances spatiales. En particulier, nous voulions capturer l'effet d'une stimulation vestibulaire (tapis roulant vs. joystick) de nature translationnelle (sans rotation active de la tête) et rotationnelle (avec rotation active) lors d'un apprentissage en EV (Tableau 8.1)

Interacteurs		Tapis Roulant		Joystick	
		Avec Rotation	Sans Rotation	Avec Rotation	Sans Rotation
Flux Optique	Flux optique translationnel	✓	✓	✓	✓
	Flux optique rotationnel	✓	✓	✓	✓
Informations kinesthésiques	Kinesthésie	✓	✓	✓	✓
Informations vestibulaires	Informations vestibulaires de translations	✓	✓		
	Informations vestibulaires de rotation	✓			

Tableau 8.1: Informations vestibulaires et proprioceptives selon l'interacteur et la Rotation Active.

2) la deuxième expérimentation a comparé les performances de transfert virtuel/réel des connaissances spatiales selon deux interfaces (tapis roulant avec rotation et joystick avec rotation) en faisant varier un facteur interne, ie., l'expérience en jeu vidéo (joueurs Vs non joueurs). En particulier, nous voulions examiner si la pratique des jeux vidéos impactait le traitement vestibulaire lors d'un apprentissage en EV. En d'autres termes, nous voulions examiner si des facteurs internes pouvaient moduler, voire optimiser, le bénéfice d'un traitement vestibulaire lors de l'apprentissage en EV ;

3) la troisième expérimentation visait à extraire l'influence de l'exécution motrice effective sur l'acquisition de connaissances spatiales en comparant l'interface de marche (tapis roulant avec rotation) à une Interface Cerveau-Ordinateur. Ainsi, nous voulions capturer l'effet d'une suppression d'une exécution motrice sur un apprentissage en EV.

L'ensemble de nos résultats sera discuté en termes d'effets sur la composante égocentrique, la composante allocentrique et le transfert virtuel/réel, à l'aide d'une tâche de reproduction de parcours (wayfinding), mais également en relation avec les modèles d'acquisition de connaissances Landmark Route Survey de Siegel et White (1975) et de la théorie des graphes de Gillner et Mallot (1998).

I. La composante égocentrique

Pour rappel, le cadre de référence égocentrique est centré sur le point de vue de l'observateur et peut intégrer les relations spatiales des objets ou points de repère toujours en référence au corps. Le point de vue égocentrique peut donc être lié aux mouvements effectués dans l'environnement et ce type de représentation est dépendant des connaissances des actions associées aux points de repère du trajet (voir chapitre I sur la cognition spatiale de notre partie théorique).

Dans cette partie, nous proposons d'intégrer les résultats obtenus dans nos trois expérimentations concernant la tâche de classification de photos, d'estimations de distance parcourue et d'estimations égocentriques des directions. Ces tâches évaluent la composante égocentrique dans son ensemble (estimation de la distance parcourue) mais aussi dans ses aspects d'ordonnement temporel (classification de photos) ou dans son association avec les actions de changements de directions (estimations égocentriques de directions).

Stimulation vestibulaire translationnelle vs. rotationnelle

Notre première étude montre que lorsque les informations vestibulaires translationnelles sont traitées, les représentations égocentriques sont dans leur ensemble améliorées (ie., amélioration en condition tapis roulant des estimations de distances). Et, lorsqu'en plus, un traitement vestibulaire rotationnel était mené, cela favorisait les représentations égocentrées liées au couplage perception-action (estimations de directions améliorées en tapis roulant avec rotation). Par contre, un traitement vestibulaire (translationnel et rotationnel) n'améliorait pas l'indexation temporelle des représentations égocentriques (pas d'effet du tapis roulant sur la classification de photos). Notons que Wallet *et al.* (2009) proposent que les mécanismes évalués dans la tâche de classification de photos feraient d'avantage appel à des échanges entre représentations égocentrées, indexation temporelle et mise en mémoire (visuelle) de ces représentations. Et, cette mise en mémoire (visuelle) se réalise probablement postérieurement à l'intégration vestibulaire dans les représentations égocentriques, expliquant alors la moindre sensibilité de la tâche de classification de photos aux manipulations vestibulaires. Ainsi, notre travail met en évidence que les informations vestibulaires translationnelles sont essentielles au bon développement des représentations égocentrées, comme déjà démontrés par Ruddle et Lessels (2006), Chance *et al.* (1998).

Plus secondaires, les informations vestibulaires rotationnelles seraient toutefois utiles au couplage « perception-action », c'est-à-dire au couplage entre les représentations égocentrées et les actions de changements de directions. Cela nous amène à proposer que les informations rotationnelles serviraient surtout à alimenter les représentations perceptivo-motrices, particulièrement utiles à la constitution de schémas sensori-moteurs permettant des raccourcis du type « si telle information visuelle alors telle action motrice », raccourcis très efficaces pour routiniser un trajet (Mallot et Gillner, 2000 ; Ruddle *et al.*, 2011a).

A la lumière du modèle L-R-S de Siegel et White (1975), nos travaux indiquent qu'une stimulation vestibulaire translationnelle favorise les niveaux L et R alors qu'une stimulation vestibulaire rotationnelle serait plus favorable aux représentations perceptivo-motrices (ie., représentations issues du couplage perception-action de la théorie des graphes de Gillner et Mallot, 1998).

Stimulation vestibulaire et Expertise vidéo

Dans nos préoccupations scientifiques, nous cherchions également à examiner si un facteur interne, telle que l'expertise en jeu vidéo, influençait le bénéfice d'une stimulation vestibulaire sur la composante égocentrée. Dans ce contexte, nous nous sommes intéressés à l'expertise en jeu vidéo comme une condition de contrôle moteur-expert d'interface de type joystick (Richardson et *al.*, 2011). Cette expertise n'a pas amélioré dans son ensemble la composante égocentrique (ie., pas d'effet expertise sur l'estimation de distances parcourues). Et, de manière plus importante, l'expertise en jeu vidéo ne modifie pas le bénéfice induit par une stimulation vestibulaire complète (supériorité du tapis roulant quelle que soit l'expertise des sujets sur l'estimation de distance parcourue). Ainsi, le bénéfice du traitement vestibulaire sur la composante égocentrée est maintenu aussi bien chez les experts que chez les non experts en jeu vidéo. Et, en conséquence, il peut être avancé que l'amélioration de la composante égocentrée par stimulation vestibulaire n'est pas soumise à l'influence de ce facteur interne.

Néanmoins, l'effet de cette expertise s'exprime en condition de privation vestibulaire (condition « joystick ») mais uniquement sur les tâches impliquant un dialogue entre la composante égocentrique et d'autres mécanismes tels que ceux de l'indexation temporelle des représentations égocentrées (meilleures classifications de photos chez les joueurs) ou ceux du couplage perception-action (meilleures estimations égocentriques de directions chez les joueurs). L'avantage des joueurs s'exercerait donc plutôt sur des opérations qui n'impliquent pas obligatoirement un traitement vestibulaire et n'impactent pas directement la construction des représentations égocentriques. En autres termes, l'avantage des joueurs résiderait plus dans les relations entre la composante égocentrée et la mémoire visuelle et/ou le couplage perception-action. Cette conclusion est conforme à celle de Donohue et *al.*, (2010) et de Richardson et *al.* (2011), pour qui l'avantage des joueurs est vu comme une automatisation plus importante de la coordination sensori-motrice main-œil, facilitant le stockage des informations visuelles, sans interférer sur les processus d'acquisition de connaissances spatiales.

Ainsi, sans modifier la composante égocentrique, l'expertise en jeu vidéo favorise la mise en relation de la composante égocentrée avec d'autres mécanismes (ie., mémoire visuelle et mémoire procédurale). A la lumière du modèle L-R-S de Siegel et White (1975), l'expertise en jeu vidéo ne favoriserait donc aucun des niveaux L-R mais améliorerait les représentations perceptivo-motrices (ie., représentations issues du couplage perception-action de la théorie des graphes de Gillner et Mallot, 1998).

Suppression de l'exécution effectrice et composante motrice

Notre troisième expérimentation visait à étudier l'effet d'une suppression de l'exécution motrice sur l'acquisition des connaissances spatiales en comparant une interface avec stimulation vestibulaire complète simulant la marche (Tapis Roulant avec Rotation) et une ICO (sans exécution motrice). Cette suppression n'a pas détérioré dans son ensemble la composante égocentrée (pas d'effet du type d'interface sur l'estimation de distance parcourue) ni ses relations avec la mémoire visuelle (ie., indexation temporelle évaluée avec la tâche de classification de photos), ni celles du couplage perception-action (pas d'effet du type d'interface sur l'estimation égocentrique de directions). Ces résultats sont surprenants même si le faible nombre de participants en condition ICO amène à une grande prudence quant à leurs interprétations. Si toutefois nous nous engageons dans cette voie, il pourrait être avancé que l'exécution motrice n'est pas essentielle en référence aux théories dite psycho neuromusculaire (Abernethy, 2005) ou d'apprentissage symbolique (Abernethy, 2005). En effet, ces théories mettent l'accent sur la similitude de substrat neural entre mouvement réalisé et mouvement imaginé en sachant que la dernière postule même que le cerveau est apte, de manière symbolique, à « recalculer » de manière interne une séquence de mouvements sans envoyer d'activité électrique aux muscles. Cela revient à dire que si l'ICO supprime l'exécution motrice externe (ie. portée dans l'environnement), elle ne supprime pas l'exécution motrice interne (ie., auto-générée par le sujet), et qu'en conséquence, une stimulation vestibulaire interne serait possible par simulation cognitive. L'augmentation du nombre de sujets dans la condition ICO permettra d'apporter des éléments d'informations sur ce dernier point.

La Figure 8.1 propose une synthèse de nos résultats et de nos interprétations relative à la composante égocentrée. Dans cette figure, s'articulent le type de stimulation sensorielle produite par l'interface du dispositif de RV (ie., intégration de trajet), le modèle cognitif L-R-S de Siegel et White (1975) et la théorie des graphes en relation avec les représentations perceptivo-motrices (Gillner et Mallot, 1998), et les conséquences comportementales sur les tâches égocentrées. En particulier, sont représentés :

- l'effet d'une stimulation vestibulaire translationnelle sur la composante égocentrique,
- l'effet d'une stimulation vestibulaire rotationnelle sur la composante sensorimotrice,
- l'effet de l'expertise en jeu vidéo sur la composante sensorimotrice et sur la mémoire visuelle
- l'existence d'un possible générateur symbolique de stimulations vestibulaires (effet ICO) selon la théorie d'apprentissage symbolique (Abernethy, 2005).

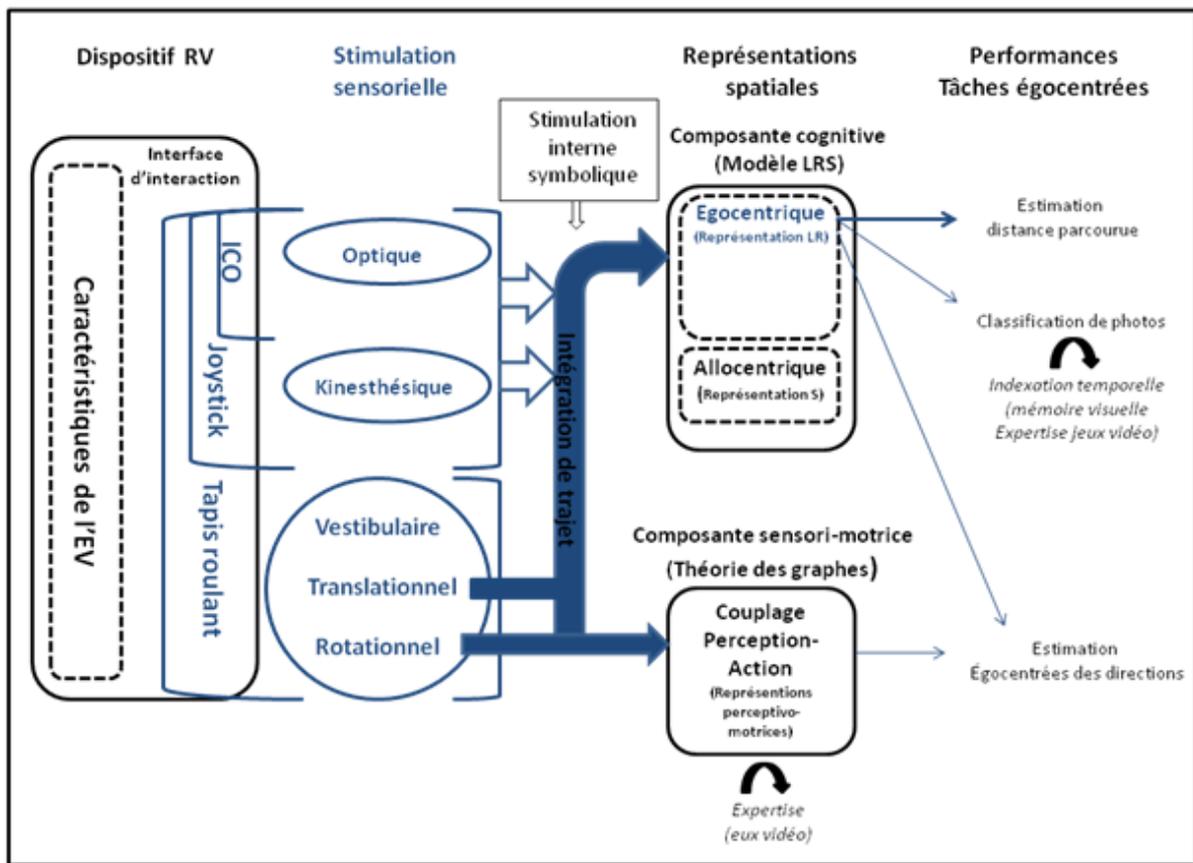


Figure 8.1 : Schéma récapitulatif des résultats et interprétations proposés des effets vestibulaires sur la composante égocentrique.

II. La composante allocentrique

Le point de vue allocentrique correspond à une vue indépendante et externe du sujet, une vue de « survol » que l'on peut assimiler à une carte géographique. A partir d'informations spatiales reconstituées à l'aide de différents points de vue décentrés du corps, une représentation abstraite de l'environnement est créée et autorise la visualisation des relations spatiales des objets qui la composent (voir chapitre I de notre première partie théorique). Dans cette partie, nous proposons d'intégrer les résultats obtenus dans nos trois expérimentations concernant les tâches allocentriques : celle du dessin du trajet et l'estimation du point de départ.

Sur les trois expérimentations menées, la tâche allocentrique de dessin du trajet n'est affectée ni par la stimulation vestibulaire, ni par l'expertise en jeu vidéo, ni par la suppression de l'exécution motrice externe. De la même manière, la tâche d'estimation du point de départ n'a pas été influencée par l'expertise en jeu vidéo ou encore la suppression de l'exécution motrice externe. Par contre, un effet de la stimulation vestibulaire est obtenu sur cette tâche. En particulier, nous avons observé que la stimulation vestibulaire translationnelle (tapis

roulant) générerait de meilleures estimations à cette tâche notamment en comparaison à une condition avec privation vestibulaire (joystick). Ceci rejoint les conclusions récentes de Ruddle et *al.* (2009; 2011a), qui réhabilitent l'engagement physique et la marche comme essentiels à l'élaboration de cartes cognitives. Néanmoins, ce dernier résultat est somme toute marginal, par rapport à l'ensemble des résultats obtenus sur la composante allocentrique, ce qui amène à modérer les conclusions de Ruddle et *al.* sur le rôle essentiel du traitement vestibulaire dans le développement des cartes cognitives. Une hypothèse pourrait concilier ces résultats contradictoires. Il se pourrait, comme la plupart des tests psychométriques, que certaines tâches allocentriques ne soient pas « pures » et soient donc plus ou moins sujettes à une contamination par la composante égocentrique, expliquant alors le bénéfice vestibulaire translationnel sur ce type de tâche. Dans notre cas, la tâche d'estimation du point de départ pourrait tout à fait être contaminée par une stratégie égocentrique utilisant la distance parcourue (ie., représentation égocentrique favorisée par une stimulation vestibulaire translationnelle comme vu précédemment) à partir de laquelle le sujet estimerait dans un spectre angulaire (représentation allocentrique) le point de départ. En ce sens, la tâche de dessin du trajet serait plus « pure » que celle d'estimation du point de départ. Cette dernière hypothèse serait plutôt en faveur de la non contribution du traitement vestibulaire à l'élaboration de carte cognitive, suggérant que ce type d'information sensorielle est inutile pour le plus haut niveau de représentation cognitive de l'espace, c'est-à-dire le niveau « Survey » selon le modèle de Siegel et White (1975).

Ainsi, la conclusion de ces résultats sur la composante allocentrique (cf. Figure 8.2) est que le traitement vestibulaire, l'expertise en jeu vidéo n'affectent probablement pas l'élaboration et/ou l'utilisation de l'étape « carte cognitive », étape qui renvoie au niveau « Survey » du modèle L-R-S de Siegel et White (1975).

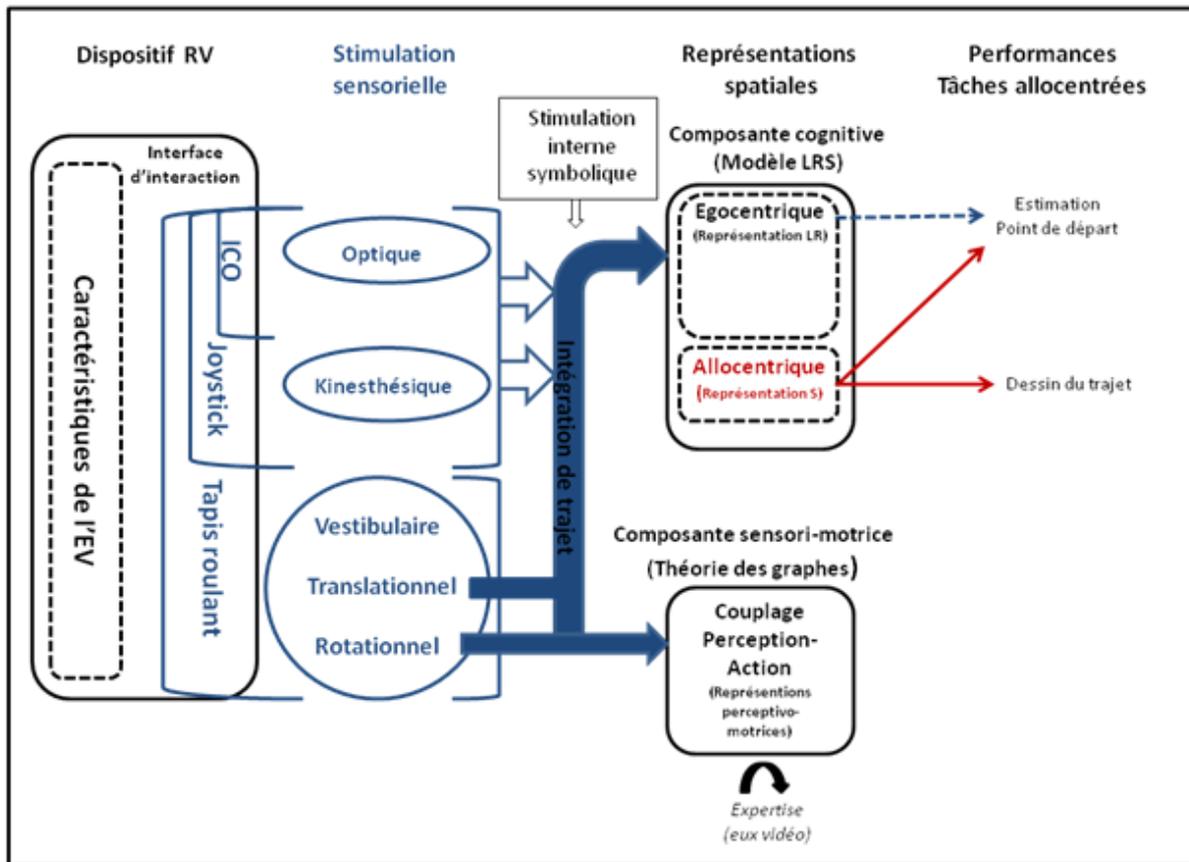


Figure 8.2 : Schéma récapitulatif des résultats et interprétations proposés des effets vestibulaires sur la composante allocentrique.

II.1 Le transfert virtuel/réel (wayfinding)

Pour rappel, cette tâche consistait à restituer le parcours appris à l'aide d'une des différentes conditions d'apprentissage dans l'environnement réel. Dans cette partie, nous proposons d'intégrer les résultats obtenus dans nos trois expérimentations concernant les mesures navigationnelles : vitesse d'exécution du parcours et erreurs de direction.

Concernant les erreurs de directions, un traitement vestibulaire complet (translationnel et rotationnel ; tapis roulant avec rotation) améliore le transfert virtuel-réel de l'apprentissage spatial comparé à un traitement vestibulaire partiel (translationnel ; tapis roulant sans rotation) ou aux situations de privation vestibulaire (joystick avec ou sans rotation). Ce résultat indique que c'est la stimulation vestibulaire de nature rotationnelle qui potentialise la performance de transfert virtuel-réel. Or, comme nous l'avons vu précédemment, le traitement vestibulaire rotationnel n'intervient probablement pas dans l'élaboration des représentations égocentriques, voire pas du tout dans celle des représentations allocentriques. Par contre, comme en témoignait la tâche d'estimation égocentrique des directions, le traitement

vestibulaire rotationnel interviendrait dans le couplage perception-action générant des représentations perceptivo-motrices (telles que définies dans la théorie des graphes, Gillner et Mallot, 1998). En conséquence, il est probable que le bénéfice observé du traitement vestibulaire rotationnel sur les erreurs de directions soit dû aux meilleures représentations perceptivo-motrices qu'il a induites. D'ailleurs, ce résultat est retrouvé dans l'expérimentation 2 où le tapis roulant avec rotation génère de performances proches du réel ce qui n'est pas le cas avec la condition de joystick avec rotation.

Dans le même sens, sur la vitesse d'exécution du trajet, nous observons que seuls les sujets ayant bénéficié d'une rotation active (tapis ou joystick) avaient une vitesse de restitution proche de la condition réelle. Ainsi, un couplage *perception-action rotationnel* privé (main-œil pour joystick) ou non d'une stimulation vestibulaire (œil-corps pour le tapis) améliore la vitesse d'exécution du trajet.

Pris ensemble, ces résultats suggèrent que le couplage *perception - action rotationnel* (vestibulaire ou non) génère de meilleures représentations sensori-motrices qui en retour améliorent les performances de transfert virtuel-réel dans la tâche wayfinding de navigation. Cela confirme que la tâche wayfinding en réel présente une sensibilité au couplage perception-action porté par l'interface utilisé lors de l'apprentissage en EV (Wallet et al., 2009 ; 2011). Ainsi, sans minimiser le rôle des stimulations vestibulaires sur la composante cognitive dans cette tâche, il semble pourtant que celui-ci s'exerce plus sur les représentations perceptivo-motrices, et ceci via un couplage *perception - action rotationnel* (cf. Figure 8.3).

Concernant le facteur interne manipulé, nous n'avons pas observé d'effet de l'expertise en jeu vidéo sur les deux indicateurs de wayfinding. Ce résultat est assez surprenant à la lecture de ceux obtenus dans la première étude. En effet, un effet d'expertise était obtenu sur la tâche égocentrique d'estimation directions, et celui-ci a été interprété comme le reflet d'un meilleur couplage perception-action chez les joueurs de jeu vidéo. Ainsi, se pose la question suivante : pourquoi le meilleur couplage perception action chez les joueurs est effectif pour une tâche papier-crayon (en lien avec la composante égocentrique) et ne l'est pas sur une tâche en réel ? Comme déjà mentionné, cette question a été récemment abordée par Richardson et al. (2011) qui ont observé une corrélation positive entre l'expérience en jeu vidéo et les compétences spatiales en environnement virtuel (dans une tâche de pointage), corrélation qui n'était pas retrouvée pour une restitution en environnement réel, amenant les auteurs à conclure que les jeux vidéo auraient peu d'impact sur les activités de vie quotidienne. Cela revient à dire que le bénéfice d'une expertise en jeu vidéo demeure très limité à certaines tâches, voire peu transférable du virtuel au réel. Ce type d'effet est bien

connu dans les recherches sur l'expertise où les compétences expertes sont reconnues comme intra-domaine et rarement exportables à d'autres domaines, et plus particulièrement pour les habilités sensorimotrices hautement spécialisées : par exemple, Krampe et Ericsson (1996) ont montré que la supériorité des experts pianistes (comparés aux amateurs) est retrouvée sur des tâches consistant à jouer des série de notes de complexité croissante mais ne l'est pas sur des tests de vitesse psychomotrice sur frappe sur un clavier d'ordinateur.

Enfin, concernant la suppression de l'exécution motrice (ICO), aucune modification de performance à la tâche wayfinding n'est observée comparé à la condition avec stimulation vestibulaire complète (tapis roulant avec rotation). Ceci indique encore que l'engagement physique et les informations vestibulaires ne seraient pas nécessairement utiles pour acquérir des informations spatiales en EV et les transférer dans une tâche de navigation en réel.

Ainsi, le bénéfice d'un traitement vestibulaire sur le transfert virtuel-réel des connaissances spatiales pour une tâche de wayfinding semble plus relever d'une optimisation de la composante représentationnelle sensori-motrice (comme décrite dans la théorie des graphes, Gillner et Mallot, 1998) que de la composante cognitive (décrite par le modèle L-R-S, de Siegel et White, 1975) (cf. Figure 8.3).

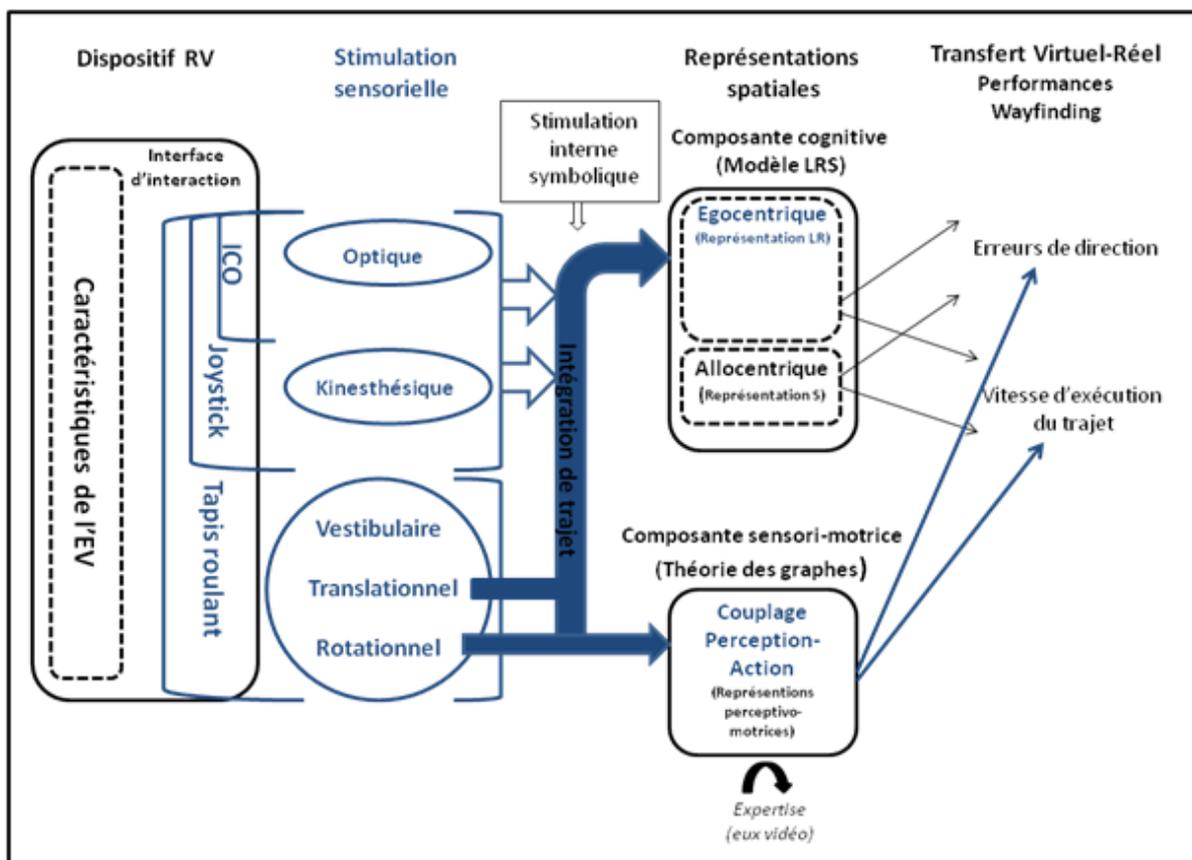


Figure 8.3 : Schéma récapitulatif des résultats et interprétations proposés des effets vestibulaires sur les performances de wayfinding.

III. Perspectives

Nos travaux ouvrent sur plusieurs perspectives que nous proposons de structurer en termes soit de continuité des préoccupations scientifiques animant le présent travail, soit en termes d'applications, en particulier, dans le domaine de la neuropsychologie, et plus particulièrement pour les troubles visuo-spatiaux de patients cérébro-lésés.

III.1 Traitement vestibulaire et apprentissage en EV de connaissances spatiales

Comme soulignés dans la discussion générale de ce chapitre, certains de nos résultats et interprétations sont à renforcer. En particulier:

a) Concernant l'effet du traitement vestibulaire sur les composantes égocentrique et allocentrique : la difficulté majeure que nous avons rencontrée dans notre travail est de disposer de mesures « pures » de la composante égocentrique ou de la composante allocentrique, rendant problématique la capture de l'effet du traitement vestibulaire sur ces deux composantes et ses répercussions ensuite sur la tâche de navigation en réel. Cette difficulté explique certainement pourquoi la plupart des études du domaine se limite à un indicateur, et en particulier pour la composante égocentrique à celui de l'estimation des distances parcourues (eg., Waller et Richardson, 2008), qui semble moins soumis à l'influence d'autres mécanismes tels que l'indexation temporelle en mémoire visuelle (classification de photos) ou le couplage perception-action (estimations égocentriques des directions). Si l'option choisie d'évaluer plusieurs indicateurs de la composante égocentrique rend plus difficile l'interprétation de l'impact du traitement vestibulaire, pour autant, cela a permis de mettre en lumière des effets qui n'auraient pas été capturés autrement (eg., effet vestibulaire rotationnel sur la composante sensori-motrice). De la même manière, pour la composante allocentrique, nous avons évoqué un problème de « pureté » de la tâche d'estimation du point de départ, avec la possible contamination de la tâche par les stratégies égocentriques. Cette possibilité sera évaluée par une prochaine étude en complétant l'expérimentation 1 par un plus grand nombre de participants que nous classerons en deux groupes : ceux ayant des performances très élevées à la tâche égocentrique d'estimation de distance parcourue et ceux ayant de faibles performances. Si les meilleurs estimateurs de distance parcourue ont significativement de meilleures performances à la tâche d'estimation du point de départ comparé aux « mauvais » estimateurs de distance parcourue, alors sera

démontrée la contamination de cette tâche par une stratégie égocentrique. Dans tous les cas, ces perspectives soulignent l'importance de disposer de mesures fiables des composantes égocentriques et allocentriques pour appréhender de façon rigoureuse les effets des différentes interfaces sur les performances spatiales mesurées à partir de l'exposition à un environnement virtuel.

b) Concernant l'effet d'une suppression de l'exécution motrice (effet ICO) : nos résultats montrent que la condition ICO n'induit aucune perte de performances spatiales (égocentrique, allocentrique ou de transfert virtuel-réel des connaissances dans la tâche de wayfinding). Pour interpréter ces résultats, nous nous sommes référés à la théorie de l'apprentissage symbolique proposant que le système cognitif « implémenterait » de manière interne le traitement vestibulaire. Outre le fait que ces résultats peuvent changer avec l'ajout de participants, si tel n'était pas le cas, une autre voie d'explication pourrait être un plus fort engagement attentionnel induit par l'ICO (comparé au tapis roulant), et non une simulation cognitive d'un traitement vestibulaire. Cette hypothèse explicative pourrait être testée en comparant les patterns d'activité EEG avec ICO et sans ICO (tapis roulant et ICO passive). En effet, des travaux au laboratoire ont permis d'identifier des patterns d'activité EEG caractéristiques de l'intensité et de la sélectivité des mécanismes attentionnels (Zheng, Wallet, Sauzón, Gross, N'Kaoua, soumis), qui pourraient guider la différenciation entre « engagement attentionnel vs. simulation cognitive du traitement vestibulaire ».

Aussi, nous souhaitons poursuivre nos investigations sur la méthode, elle-même, de fonctionnement de l'ICO. Il n'est tout de même pas négligeable d'observer que la plupart des participants ne parviennent pas à utiliser correctement l'ICO. Si des progrès technologiques peuvent être attendus sur la méthode de classification des activités EEG (Lotte, 2008), ils ne se feront pas sans une compréhension pleine des mécanismes cognitifs mis en jeu. Et, déterminer si l'ICO induit ou pas une simulation cognitive du traitement vestibulaire ou un meilleur engagement attentionnel pourrait servir à améliorer les méthodes d'apprentissage d'une ICO : par exemple, si la simulation cognitive du traitement vestibulaire est plus prégnante, des méthodes d'entraînement à l'imagerie motrice de mouvements pourraient être efficaces (pour des résultats compatibles, voir Galan et *al.*, 2008) ; à la différence, si l'engagement attentionnel est plus prégnant, des méthodes telles que celles développer dans le paradigme d'engagement attentionnel de Posner (1994) pourraient s'avérer plus efficaces (eg. indigage sur l'environnement pour augmenter la capture attentionnelle, pour des résultats compatibles voir Ron-Angevin et *al.*, 2009 ; Scherer et *al.*, 2007).

c) Concernant l'effet de l'expertise du contrôle du joystick dû à la pratique des jeux vidéo : nos résultats indiquent que cette expertise ne modifie pas vraiment le fonctionnement des composantes cognitives égocentrique et allocentrique mais améliorerait plutôt le couplage perception-action (œil-main, ie., composante sensori-motrice de la théorie des graphes) qui en retour permettrait des traitements visuels de l'environnement plus exhaustifs, fiabilisant l'indexation temporelle des représentations égocentriques en mémoire visuelle (meilleurs scores chez les joueurs sur la tâche égocentrique d'estimation de directions et sur la tâche de classification de photos). Cette interprétation pourrait être étayée par une étude évaluant l'effet de l'expertise lorsque les interfaces (joystick ou tapis roulant) ne permettent pas de mouvements de rotation active (nous avons vu que la rotation active lors des intersections favorisait le couplage perception action c'est-à-dire le couplage d'un point de vue avec une action à réaliser de type tourner à droite ou à gauche). En effet, l'absence de rotation active devrait réduire l'influence du couplage perception-action et donc annuler la supériorité des joueurs sur les tâches d'estimations égocentriques des directions et de classification de photos.

Une autre étude pourrait également comparer l'effet de l'expertise en jeu vidéo selon les deux interfaces suivantes : Joystick avec rotation vs. Joystick translationnel avec rotation vestibulaire (capture de mouvements de la tête pour commander les changements de direction). Dans la dernière condition, le couplage perception-action ne serait plus de type « œil-main » mais « œil-corps », ce qui permettrait d'évaluer si le meilleur couplage perception-action des joueurs est limité au joystick ou transférable au traitement vestibulaire de la position du corps. Ceci reviendrait à examiner si l'expertise au joystick des joueurs est généralisable à d'autres interfaces sensorielles (ie., joystick couplé à la capture du mouvement du corps ou de la tête ; voir pour l'implémentation d'une telle interface, Ruddle et *al.*, 2011a ; Chance et *al.*, 1998 ; Ruddle et Lessels, 2006).

III.2 Applications neuropsychologiques

Notre démarche de recherche s'inscrit dans une perspective plus large visant à utiliser les applications RV pour l'évaluation et la remédiation cognitive et/ou motrice de patients cérébro-lésés.

Par exemple, dans les travaux doctoraux de Marie Dejos, le quartier virtuel de Bordeaux est utilisé auprès de patients atteints de la maladie d'Alzheimer (Démence de Type Alzheimer – DTA) et de personnes âgées. L'objectif de ce travail est d'utiliser les performances spatiales évaluées à l'aide de l'environnement virtuel pour le diagnostic de cette maladie. En effet, 38 % des patients DTA présentent des problèmes de navigation dans leur quotidien et ces problèmes inaugurent souvent la maladie (eg., comportements d'errance) (Henderson, Mack et Williams, 1989).

Les résultats préliminaires de cette étude sont les suivants :

- les mesures égocentriques (classification de photos), allocentriques (dessin du trajet) et les performances de navigation (erreurs de direction) sont significativement altérées chez les patients DTA ;
- L'étude corrélationnelle entre les performances en RV, celles obtenues avec des tests papier-crayons évaluant les processus spatiaux et les mesures des difficultés quotidiennes (ie, échelle de capacités d'autonomie)¹⁴ montrent que chez les âgés, les performances RV sont reliées à la fois aux processus spatiaux mais aussi aux capacités d'autonomie de la personne. Par contre, chez les patients DTA, les relations entre les performances RV et les mesures des processus spatiaux disparaissent (cf. Figure 8.4), suggérant que les tests papiers crayons traditionnels ne mesurent pas les réelles difficultés des patients atteints de DTA. Ainsi, la valeur ajoutée de cette application RV pour le diagnostic de la DTA est de délivrer des mesures spatiales en lien avec les difficultés quotidiennes qui rappellent le, sont les signes inauguraux de la maladie.

¹⁴ Les tests neuropsychologiques étaient constitués du Mini Mental State Evaluation (Folstein, Folstein et McHugh, 1975) évaluant les capacités cognitives et mnésiques, l'échelle de la Mattis (Mattis, 1988), le test de rétention visuel de Benton (1974), Le Trail Making Test A&B (Reitan, 1992) évaluant les fonctions exécutives, le Code de la Wais pour la mesure de la vitesse de traitement (Wechsler, 1981), le Test de Rotation mentale (Vanderberg et Kuse, 1978), et les cubes de Corsi (Corsi, 1972). Les tests questionnaires de difficultés cognitives étaient le CDS (échelle de difficulté cognitive, Derouesné, Dealberto, Boyer, LubinSauron, Piette, Kohler et al., 1993) et le Santa-Barbara Sense of direction scale (Hegarty, Richardson, Montello, Lovelace et Subbiah, 2002).

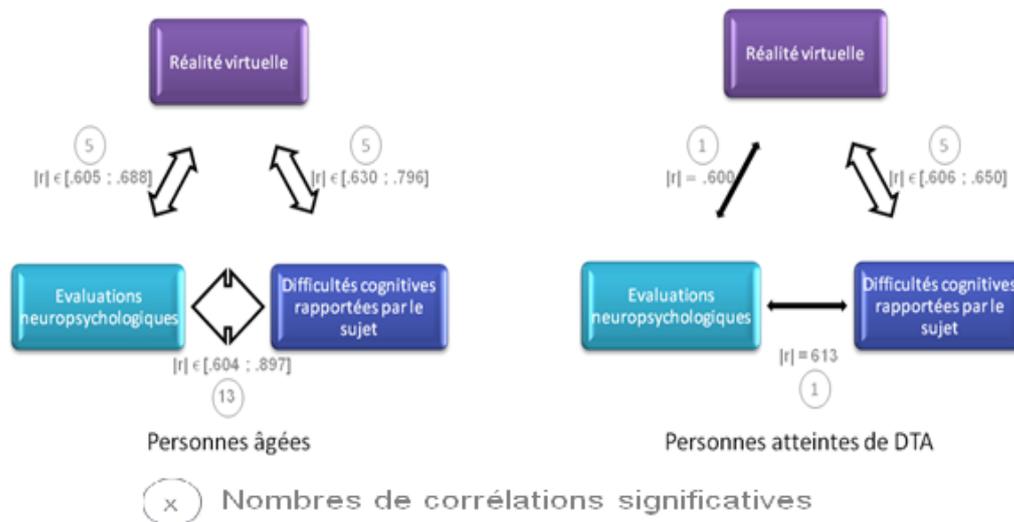


Figure 8.4 : Schématisation des résultats corrélationnels entre performances en RV, tests neuropsychologiques spatiaux, et difficultés cognitives chez les âgés et les DTA (d'après Dejos, Sauzçon, Falière, Aguilova et N'Kaoua,2011).

Cette étude auprès des patients DTA a été réalisée à l'aide de l'interface joystick avec rotation. Comme nous l'avons vu dans nos travaux, ce type d'interface n'aide pas à la mise à jour de la position du corps dans un EV. Or, contrairement à la maladie de Parkinson, au stade précoce de la maladie d'Alzheimer, la composante égocentrique est préservée (la composante allocentrique est par contre fortement altérée; Burgess, Trinkler, King, Kennedy et Cipolotti, 2006). Ainsi, on peut faire l'hypothèse qu'une interface facilitant le traitement vestibulaire tel que le tapis roulant peut être un atout pour ces personnes, et constituer la base d'un programme de stimulation cognitive visant à automatiser l'utilisation du traitement vestibulaire pour renforcer les représentations égocentriques et réduire ainsi les difficultés navigationnelles chez ces patients, et notamment les comportements d'errances.

Enfin, les Interfaces Cerveau Ordinateur constituent certainement une voie d'avenir extrêmement prometteuse dans les interactions avec les environnements virtuels ou avec ce qu'on appelle des serious games (qui combinent des intentions sérieuses avec des aspects ludiques) notamment chez patients présentant des difficultés de type cognitivo-motrices. Nous poursuivons également cette voie, sachant que l'avenir repose certainement sur la capacité à disposer d'interfaces « transparentes » c'est-à-dire d'interfaces les plus adaptées aux contraintes, aux caractéristiques et aux spécificités des utilisateurs.

Annexes

Annexe 1 : Ingénierie de Recherche : Le développement d'EV, d'Interfaces et de Logiciels d'Analyse de l'Activité pour la Cognition

Valorisation scientifique :

Publications écrites

1. Wallet, G., Sauzéon, H., Pala, P. A., **Larrue, F.**, Zheng, X., & N'Kaoua, B. (2011). Virtual/Real transfer of spatial knowledge: benefit from visual fidelity provided in a virtual environment and impact of active navigation. *Cyberpsychology, behavior and social networking*, 14(7-8), 417-23. doi:10.1089/cyber.2009.0187
2. Wallet, G., Sauzéon, H., Rodrigues, J., **Larrue, F.**, & N'Kaoua, B. (2010). Virtual/Real transfer of spatial learning: impact of activity according to the retention delay. *Studies in health technology and informatics*, 154, 145-9. doi:20543287
3. Sauzéon H., Arvind-Pala P., Déjos M., Wallet G., **Larrue F.**, & N'Kaoua B. (*sous presse*) « The assessment of episodic memory using virtual reality »; *Experimental psychology*.
4. Wallet, G., Sauzeon, H., **Larrue, F.**, N'Kaoua, B. (*soumis*). The Impact of Active Navigation on the Transfer of Spatial Learning from Virtual to Real Environments According to the Effect of Viewpoint Displacement.

Communications orales :

1. Taillade, M., Sauzéon, H., Wallet, G., Arvind-Pala, P., **Larrue, F.**, Déjos, M., & N'Kaoua, B. (2009, novembre) *Différences liées au vieillissement normal sur le transfert des connaissances spatiales du virtuel vers le réel*. Congrès SFTAG 18-20 nov2009, Université de Technologie de Troyes.

Communications affichées :

1. Arvind Pala, P., Sauzéon, H. , Wallet, G. , **Larrue, F.** , Déjos, M. , & N'Kaoua, B. (2010, septembre). *Evaluation de la mémoire épisodique dans le vieillissement normal par la réalité virtuelle*. XIème Colloque International sur le Vieillissement Cognitif - JEV 23-24 septembre 2010, Liège, Belgique.
2. **Larrue, F.**, Sauzeon, H , Gross, C., & N'Kaoua, B. (2009, décembre) *Comparaison d'interacteurs de navigation dans le transfert du virtuel au réel ; Joystick VS Tapis Roulant : Application à l'orientation spatiale*. Session Poster PIRSTEC, Paris, Décembre 2009.
3. Arvind Pala, P. Sauzéon , H., Wallet, G., **Larrue, F.** Zheng, X. Déjos, M., & N'Kaoua, B. (2009, octobre). *The assessment of episodic memory using virtual reality*. Atelier de réflexion Pirstec, 23octobre 2009, Paris
4. Arvind Pala, P., Sauzeon, H.,Wallet,G., **Larrue, F.**, Zheng, X., & N'Kaoua, B. (2009, juin). *Assessment of Episodic memory Using Virtual Reality*. CJCSC'09 : Colloque des Jeunes Chercheurs en Sciences Cognitives, Toulouse, 9-11 juin 2009.

En parallèle des travaux de recherche sur la cognition spatiale, des travaux d'ingénierie pour la recherche ont été menés en termes de développement d'environnements virtuels, d'intégration de nouvelles interfaces et de logiciels d'analyse de l'activité motrice au sein l'Equipe CHIC du laboratoire 4136 – Handicap & Système Nerveux. Cette partie présente les phases de recherches et de développements qui ont été nécessaires à l'élaboration de différentes applications de RV et les valorisations scientifiques auxquelles j'ai participé. Sans rentrer dans les détails de la programmation, cette partie présente nos travaux d'ingénierie cognitive alliant la création d'une application 3D et la prise en compte des contraintes utilisateurs (participants expérimentaux, et expérimentateurs). Puis, nous abordons les travaux scientifiques qu'ils ont permis.

I. L'environnement virtuel du quartier de Bordeaux

Un premier environnement virtuel d'un quartier de Bordeaux a été développé afin d'étudier la cognition spatiale et le transfert des apprentissages du virtuel au réel. Le premier objectif de notre activité d'ingénierie de recherche était donc de reproduire le plus fidèlement possible un ensemble d'objets 3D, de points de repères plus ou moins saillants (rues, arbres, maisons, architecture, etc.) locaux et globaux, de scènes en terme de textures, de formes, de taille et de propriétés physiques (hauteurs, distances) qui leur sont propres, selon un cahier des charges bien précis. Une base de données contenant des informations de l'utilisateur, l'interface de déplacement utilisée, permettant la re-visualisation du trajet parcouru devaient être également implémentés. Ces derniers aspects d'ingénierie cognitive correspondent au cahier des charges relatif aux besoins des chercheurs utilisant l'application. Nous allons décrire très brièvement les étapes nécessaires à cette réalisation et les évolutions effectuées au sein de cette thèse.

I.1 La modélisation de l'environnement

I.1.1 La prise de mesures

Une difficulté majeure de cette modélisation consiste en la mesure de l'ensemble des objets et points de repères inclus dans le quartier de Bordeaux. En effet, pour une reproduction visuelle pertinente, nous avons choisi de mesurer l'ensemble des maisons, trottoirs, rues, etc. du quartier réel qui s'étend sur environ 3 km², et qui comprend plus d'une vingtaine de rues (cf. Figure 1).

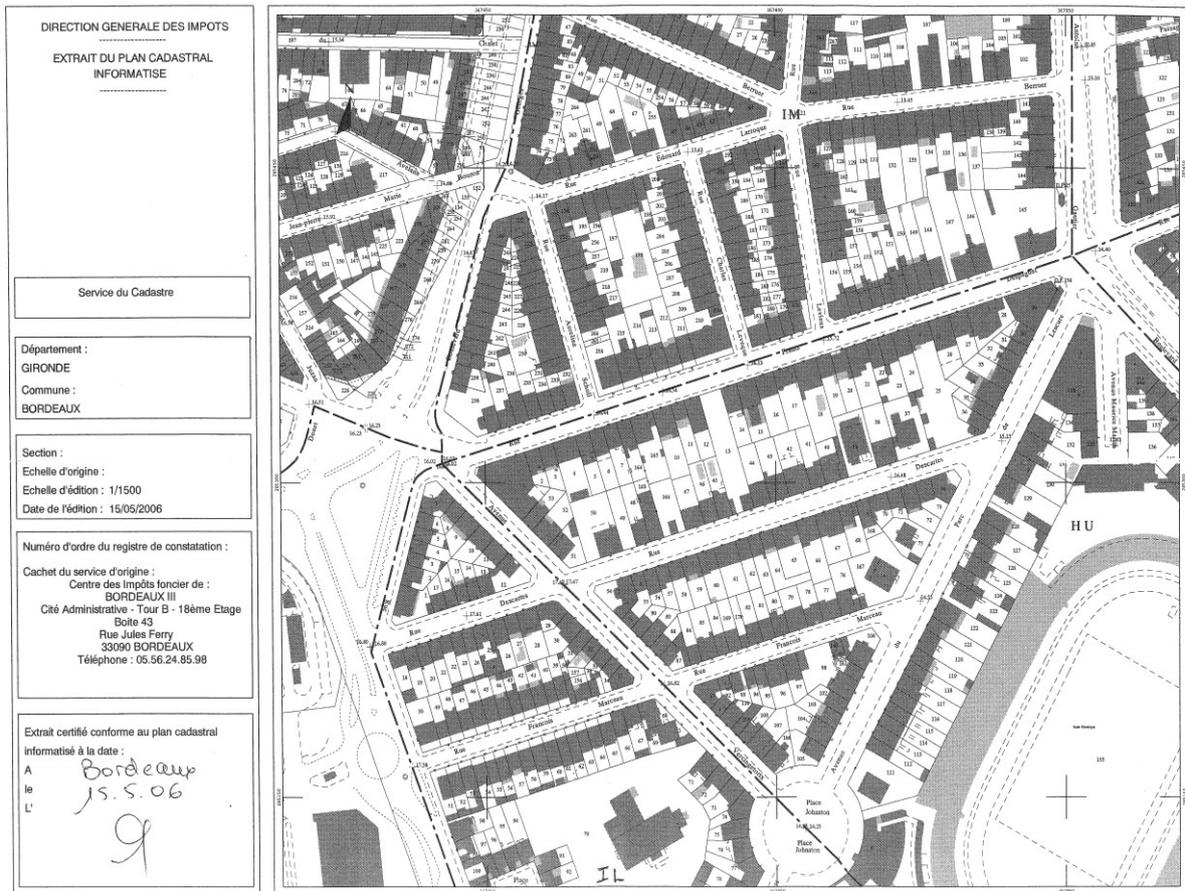


Figure 1: Plan cadastral du quartier de Bordeaux à modéliser. L'ensemble des maisons ainsi que la taille des rues, maisons et des différents objets inclus dans l'environnement sont déjà mesurés.

Les carrés noirs de la Figure 1 représentent le nombre de maisons à modéliser et donnent une information subjective du temps nécessaire à la prise des mesures dans l'environnement réel. Dans un premier temps, nous avons récupéré des plans numériques architecturaux (format AutoCad) de la voirie de Bordeaux. Mais ces plans ne fournissaient pas un ensemble d'objets et de mesures assez précises pour répondre à la qualité de modélisation demandée. Dans un second temps, nous avons opté pour une mesure « manuelle » de l'ensemble des maisons, rues, intersections, etc. à l'aide des plans du cadastre (cf. Figure 1). Les hauteurs des objets et emplacements des arbres, passages piétons, etc. ont été évalués directement sur le terrain. Des photos de chaque objet ont également été prises pour obtenir un modèle visuel de l'objet à atteindre.

I.1.2 L'infographie

L'environnement virtuel a été modélisé à l'aide du logiciel 3DS Max 8.0 (Autodesk®). Ce logiciel (ou modeleur) permet de représenter en 3 dimensions un ou plusieurs d'objets (appelé également scène) en lui attribuant des propriétés telles que des formes, des textures plus ou moins réalistes, et des propriétés physiques. Nous ne rentrerons

pas dans les détails techniques de l'ensemble la modélisation des objets de l'environnement. La Figure 2 présente succinctement les étapes de la modélisation d'une maison. La Figure 3 expose la modélisation finalisée du quartier. Ce premier travail de prise des mesures et de modélisation s'est étalé durant un peu plus de 4 mois.

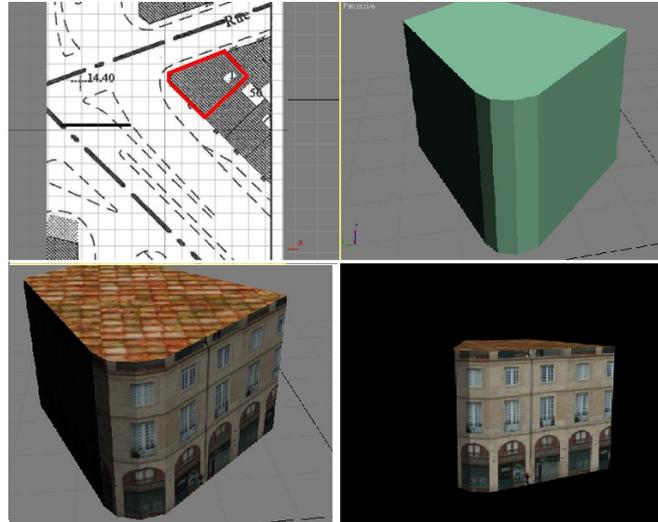


Figure 2 : Modélisation d'une maison dans le logiciel 3DS Max. En haut à gauche : plan cadastral placé en tant que calque dans le modèleur, la forme rouge représente le début de la modélisation des murs d'une maison ;En haut à droite : extraction d'un objet de la forme et de la taille de la maison modélisée. En bas, application des textures et rendu 3D.



Figure 3 : A gauche l'environnement virtuel vu de haut, à droite l'environnement texturé.

I.1.3 La programmation 3D temps réel

Un modèleur ne permet que la modélisation des objets, la création d'animations mais ne donne pas la possibilité d'implémenter différentes interfaces, ni de créer des règles hiérarchiques, sociales, organisationnelles. Cette partie requiert des compétences en programmation 3D temps réel. Par exemple, la programmation temps réel permet d'intégrer différentes interfaces, l'enregistrement de différentes données numériques (position et rotation d'un objet, clic sur un bouton, etc.), la gestion des caméras, des déplacements dans l'EV et

des règles « physiques » lorsqu'une collision intervient entre une caméra et un mur, etc. Des logiciels spécifiques de développement permettent d'intégrer les modèles et objets provenant du modéleur et d'implémenter ensuite les différentes fonctionnalités temps réel demandées. Certains logiciels sont gratuits (Ogre3D, OpenMask développé par l'INRIA) mais nécessitent parfois la connaissance de langages de programmation spécifiques et de leurs fonctionnements, et l'ajout de différents « moteurs » gérant par exemple les calculs physiques et mécaniques des objets dans l'EV, ou encore les calculs sonores. Il faut alors prendre en considération le fonctionnement et les répercussions de ces moteurs entre eux, dont les différentes logiques peuvent parfois devenir problématiques. Une solution consiste à utiliser des logiciels payants qui regroupent un ensemble de moteurs compatibles entre eux. Le logiciel Virtools (Dassault Système©) contient un ensemble de « packs » de fonctionnalités qui accélèrent et simplifient la programmation d'EV. En effet, Virtools Dev 3.5 comprend un moteur graphique, de comportement, de physique, etc. et un SDK (Software Development Kit) permettant de programmer de nouvelles fonctionnalités qui ne sont pas prévues de base par le logiciel. De plus, ce logiciel contient un exporteur permettant de transformer les objets 3D créés à l'aide de 3DS Max en un langage compréhensible et directement utilisable par Virtools. C'est la solution logicielle que nous avons utilisée pour développer l'environnement virtuel du quartier de Bordeaux.

Différentes fonctionnalités ont été mises en place à l'aide de Virtools :

- L'intégration de lumières (limitée car très coûteuse en terme de calcul et peut ralentir l'exécution de l'EV) ;
- Le ciel ;
- La gestion des sols, des collisions et des règles de comportement à appliquer lorsque deux objets ne peuvent être traversés (par exemple, que se passe-t-il lorsque nous essayons de rentrer dans un mur ou une maison).
- Les déplacements passifs des caméras dans l'environnement, c'est-à-dire la programmation de trajets (appelée également « *curve* ») sur lesquels se déplaçaient les caméras.
- Une base de données permettant de créer, modifier des fiches sujets, d'ajouter ou de revisualiser des passations effectuées dans l'EV.
- Un paramétrage de l'application (Vitesse de déplacement, nombre de personnages dans la simulation, type d'interface – joystick ou clavier souris).
- Etc.

Diverses autres fonctionnalités ont également été élaborées, et d'autres inconvénients majeurs sont apparus. Mais notre objectif, encore une fois, n'est pas de présenter le développement

d'une application RV du début jusqu'à la fin, mais de simplifier et de comprendre la complexité technique du développement d'un tel système.

I.1.4 Implémentations de fonctionnalités et publications

Le développement du quartier virtuel de Bordeaux a déjà permis la publication effective de 4 articles faisant partie des travaux doctoraux de Gregory Wallet (2009). Le point d'intérêt majeur de ces 3 réalisations scientifiques était d'évaluer l'impact du mode de navigation sur les apprentissages spatiaux en EV : le mode de navigation (déplacement dans l'EV à l'aide d'un joystick) vs. mode passif (visualisation du trajet sans possibilité d'interagir dans l'EV).

Dans ce contexte, nous avons donc introduit dans l'application une variante d'interaction avec l'EV correspondant au « mode de navigation » avec au menu « utilisateur » la fonctionnalité « navigation active vs. passive ». D'autres fonctionnalités « utilisateurs » ont été ajoutées au fil de l'eau des besoins exprimés pour les expérimentations (ie., choix de complexité du parcours ; choix de fidélité visuelle de l'EV ; choix du point de vue).

Concernant la procédure expérimentale, celle-ci est toujours la même : après l'apprentissage en EV, les sujets rappellent le trajet selon 3 tâches de restitution : une tâche de wayfinding, un dessin du parcours effectué et une classification de photos. Ces 3 tâches ont été précédemment décrites dans notre Modèle d'Analyse (Chapitre 5).

I.1.4.1 Impact du mode de navigation et du délai de rétention

Wallet, G., Sauzéon, H., Rodrigues, J., Larrue, F., & N'Kaoua, B. (2010). Virtual/Real transfer of spatial learning: impact of activity according to the retention delay. *Studies in health technology and informatics*, 154, 145-9. doi:20543287

L'objectif de cet article était d'étudier l'impact de la navigation active sur le délai de rétention des informations spatiales à l'aide du quartier virtuel de Bordeaux.

Bosco et *al.* (2008) avaient rapporté que le délai de rétention (2 secondes vs. 15 vs. 30 secondes) affectait les tâches de type égocentrées mais pas les tâches allocentrées. Ainsi, les représentations de type allocentrique seraient plus stables. Notre but dans cette étude était d'examiner si une navigation active, plutôt favorable aux représentations égocentrées, permet de rendre plus robustes les représentations égocentrées à l'oubli passif (délai de rétention). Un rappel immédiat a été comparé à un rappel à 48 heures sur les 3 tâches impliquant les niveaux Landmark, Route et Survey du modèle L-R-S. Les résultats étaient les suivants :

1. sur la tâche allocentrée (croquis), sont obtenus un maintien de la performance à 48h en condition passive et une augmentation de la performance à 48h en condition active ;
2. Sur la tâche égocentrée (classification de photos), un bénéfice de la navigation active est obtenu en rappel immédiat alors qu'en différé, les performances sont similaires ;
3. Sur le wayfinding, aucune différence concernant le délai de rétention n'est obtenu mais les scores étaient meilleurs en navigation active (comparée à la navigation passive).

Ainsi, si la performance de Wayfinding est plutôt résistante à l'oubli et meilleure après une navigation active, pour autant, les représentations spatiales la sous-tendant diffèrent avec le temps. Pour un même niveau de performance de Wayfinding, une navigation active a favorisé en immédiat les représentations égocentrées alors qu'en rappel différé, elle a favorisé les représentations allocentrées. L'activité motrice renforcerait donc à court terme les représentations égocentrées qui à long terme favoriseraient les représentations allocentrées, conformément au modèle sériel L-R-S. Cette conclusion encore une fois souligne l'intérêt majeur de la RV comme média d'apprentissage où de réels gains à long terme se manifestent.

I.1.4.2 La complexité de l'environnement

Wallet, G., Sauz on, H., Rodrigues, J., & N'Kaoua, B. (2009). Transfer of spatial knowledge from a virtual environment to reality: Impact of route complexity and subject's strategy on the exploration. *Journal of Virtual Reality and Broadcasting*, 6, 572-574.

Pour Best (1970), la difficulté de l'apprentissage d'un parcours dépend de sa complexité. La complexité d'un environnement peut se définir par la longueur d'un chemin, le nombre de changements de directions, etc. Peu d'études en RV se sont focalis es sur l'influence de la complexité d'un parcours et son apprentissage. Pourtant, Barlow (2001) montre que la complexité d'un trajet augmente sa difficulté d'apprentissage. Ruddle, Payne et Jones (1997) remarquent également qu'un parcours semble être mieux appris lorsqu'il contient peu de changements de direction et de distance à parcourir. L'objectif de cette étude était donc d'évaluer si le mode de navigation (actif vs. passif) pouvait réduire les effets délétères d'un parcours complexe sur le transfert de connaissances spatiales du virtuel au réel. Les variables manipul es étaient donc le mode de navigation (actif vs passif) et la complexité du parcours (simple vs complexe).

Dans notre EV, un seul chemin de base était défini. Dans ce cadre, différents parcours de longueurs et choix de directions différents ont été ajoutés. Ces nouveaux trajets ont été implémentés à l'aide de « Curve », des courbes pr programm es, sur lesquelles la caméra, en

mode passif se déplaçait. Une touche du clavier permettait à l'expérimentateur de choisir le parcours à évaluer. Huit parcours différents ont été développés afin de tester l'influence de la complexité du parcours sur le transfert de connaissances spatiales.

Le parcours simple mesurait 787 mètres et était composé de 9 rues, 12 intersections, 10 changements de directions alors que le parcours complexe mesurait 1457 mètres et était composé de 14 rues, 18 intersections et 18 changements de direction.

Dans l'ensemble des tâches utilisées, le parcours simple engendrait de meilleurs résultats que le parcours complexe. Principalement :

1. Sur la tâche allocentrée (croquis), la condition active améliore les performances seulement lorsque le parcours est complexe.
2. Sur la tâche égocentrée, (classification de photos), un effet négatif de la condition active est obtenu lorsque que le parcours est complexe, et un effet positif est obtenu sur la condition de parcours simple.
3. Sur la tâche de wayfinding, une navigation active améliore les performances quelle que soit la complexité du parcours.

Finalement, la navigation active sert les connaissances de type allocentrique et dessert les connaissances égocentriques lorsque le trajet est complexe. La encore, si la performance de Wayfinding est meilleure après une navigation active, pour autant, les représentations spatiales la sous-tendant diffèrent selon la complexité du trajet : une navigation active favorise les représentations égocentrées sur les parcours simples alors qu'elle favorise les représentations allocentrées pour les parcours complexes. Plus simplement, l'activité motrice renforce les représentations spatiales adaptées à la complexité du trajet (représentations égocentrées/trajet simple ; représentation allocentrée/trajet complexe). Cette conclusion souligne l'intérêt majeur de la navigation active, et donc de la motricité, dans les comportements spatiaux adaptés.

I.1.4.3 La fidélité visuelle

Wallet, G., Sauzçon, H., Pala, P. A., Larrue, F., Zheng, X., & N'kaoua, B. (2011). Virtual/Real transfer of spatial knowledge: benefit from visual fidelity provided in a virtual environment and impact of active navigation. *Cyberpsychology, behavior and social networking*, 14(7-8), 417-23. doi:10.1089/cyber.2009.0187.

Le concept de la fidélité visuelle d'un environnement a été présenté dans le chapitre III (Interfaces et Cognition Spatiale). Pour rappel, différents termes peuvent l'identifier. Stankiewicz et Kalia (2007) étudie la fidélité visuelle en faisant varier 3 niveaux de qualité visuelle des points de repères : des formes géométriques avec ou sans textures. Waller et *al.* (2001) étudient ce concept à l'aide d'un labyrinthe composé soit de murs texturés, soit de

murs transparents. Dans une autre étude, Meijer et *al.* (2009) font varier la fidélité visuelle d'un supermarché virtuel composé soit de textures photoréalistiques, soit de textures basiques. Les recherches actuelles documentent peu les effets de la fidélité sur le transfert de connaissances spatiales. L'objectif de cet article était donc d'étudier la fidélité visuelle en comparant un environnement détaillé (avec textures) ou épuré (sans texture) selon le mode de navigation (actif vs passif), sur le transfert d'apprentissage du virtuel au réel.

Dans notre EV, une fonctionnalité a été insérée pour permettre la suppression des textures de l'environnement virtuel. Leur représentation était alors de couleur blanche (cf. Figure 4). La programmation de cette fonction a été simple : une touche supprimait la texture et changeait la couleur (appelé *matériel*) de chaque objet de l'EV. Une autre touche permettait de réactiver les couleurs du matériel et textures de chaque objet préalablement sauvegardées.



Figure 4 : A gauche, figure de l'environnement non détaillé. A droite, figure du même environnement en mode détaillé.

Les principaux résultats ont montré que :

1. Sur la tâche allocentrée (croquis), la condition détaillée améliore les performances et plus particulièrement en condition active.
2. Sur la tâche égocentrée (classification de photos), les performances étaient meilleures en environnement détaillé quelle que soit le mode de navigation.
3. l'environnement détaillé améliorerait les performances sur la tâche de wayfinding, quel que soit le mode de navigation utilisé.

Cette étude montre une fois de plus que la tâche de wayfinding est soumise à l'activité motrice de l'interface utilisée. Aussi, plus un EV est visuellement riche, détaillé et se rapproche de la qualité visuelle d'un environnement réel, et plus les performances sur des tâches de configuration spatiale seront élevées (Waller et *al.*, 2001 ; Meijer et *al.*, 2009). L'impact de la fidélité visuelle sur les acquisitions spatiales est donc en lien avec le mode de

navigation proposé et, le réalisme et l'interaction d'une simulation doivent être prise en compte dans le design d'une application EV, notamment lorsque l'objectif est d'acquérir et de restituer des informations spatiales.

I.1.4.4 Le point de vue

Wallet, G., Sauzeon, H., **LARRUE, F.**, N'Kaoua, B. (soumis). The Impact of Active Navigation on the Transfer of Spatial Learning from Virtual to Real Environments According to the Effect of Viewpoint Displacement.

Peu d'études ont porté sur l'importance du point de vue (égocentrique vs allocentrique) lors d'un apprentissage en EV et leur impact sur le transfert spatial du virtuel au réel. Dans l'étude de Foreman, Sandamas et Newson (2004), 4 groupes d'étudiants ont été testés sur un déplacement virtuel dans un couloir contenant 3 objets distincts. Un groupe utilisait une métaphore de marche virtuelle, un second groupe se déplaçait à l'aide d'un clavier selon un point de vue « Vol ». Deux autres groupes (passifs) observaient les groupes Marche et Vol en regardant leur déplacement sur un écran. Les sujets devaient ensuite marcher le long d'un couloir réel et indiquer la position des objets préalablement rencontrés dans l'EV. Aucune différence n'a été trouvée entre les participants actifs et passifs, ni entre le point de vue « Marche » et le point de vue « Vol ». Les auteurs expliquent ce résultat surprenant par la simplicité de la tâche qui ne nécessite pas une exploration stratégique et intensive. La manipulation du point de vue dans l'apprentissage spatial reste donc une question ouverte. L'objectif de cette expérimentation était donc de déterminer si le point de vue (égocentrique ou allocentrique) de la caméra a un impact sur le transfert de connaissances spatiales du virtuel au réel, et si oui, si il est modulé par le mode de navigation (actif ou passif). Le point de vue égocentrique était nommé « Marche » et le point de vue allocentrique « Vol », c'est-à-dire un point de vue à une hauteur de 4 mètres. 2 variables sont donc étudiées : le mode de navigation (passif vs. actif) et le point de vue (Marche vs. Vol).

Les résultats montrent que :

1. Le point de vue allocentrique améliore les performances sur la tâche de dessin du trajet ; par contre, la navigation active améliore les performances lorsque le point de vue est égocentrique.
2. La tâche de classification de photos est favorisée par le point de vue égocentrique notamment quand le mode de navigation est actif.
3. Les performances à la tâche de wayfinding sont améliorées lorsque le point de vue est égocentrique et notamment quand la navigation est active.

Finally, the egocentric point of view improves tasks requiring an egocentric representation of spatial knowledge (photo classification and wayfinding). It is the same for the task of drawing routes which requires an external point of view of the type map and which is improved when the proposed point of view is of the type « Vol ». The egocentric point of view allows for a better acquisition of allocentric representations. In addition, active navigation allows for an optimization of performance, notably when the proposed point of view is egocentric and when the tasks are of the type egocentric. In fact, the sensorimotor activity potentiates the coupling between visual inputs (egocentric points of reference) and motor inputs (direction changes) and would be beneficial notably for the acquisition of the type Route (Siegel and White, 1975). On the contrary, allocentric representations are favored by passive navigation. Witmer, Sadowski and Finkelstein (2002) had already obtained these same results and advanced that passive navigation allows for focusing attention on the comprehension of the EV in the mode « vol ».

In total, this first version of the application – *quartier de Bordeaux* – has allowed for several publications. Currently, it is also used for the doctoral work of Mathieu Taillade (cognitive aging and spatial learning) and that of Marie Déjos (Alzheimer's disease and spatial learning). This application therefore provides a good scientific return. For my doctoral work, an update of the functionalities has been carried out to respond to new experimental needs.

I.1.5 La mise à jour de l'environnement virtuel

An external graphical interface to the simulation has been developed to more easily parametrize the numerous functionalities. The communication between Virtools and this new graphical interface was done with the help of a text file. (cf. Figure 5). This new graphical interface was programmed with the help of the Windev 15 (PCSOFT©) software.

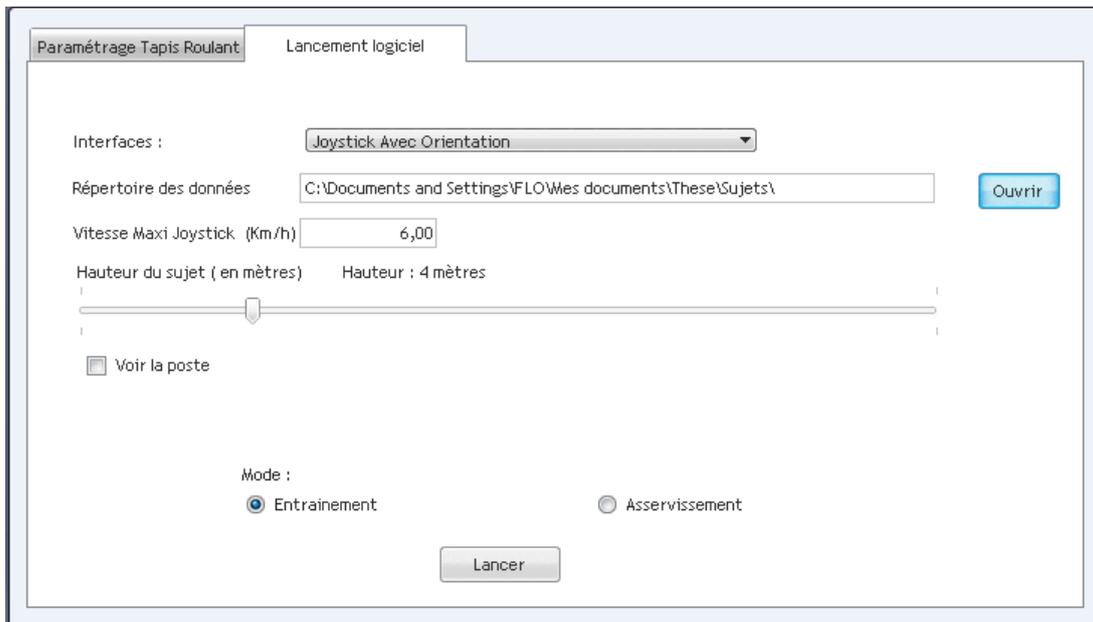


Figure 5 : Capture d'écran de la nouvelle interface de configuration de l'environnement virtuel.

Cette interface graphique permet :

- De sélectionner et paramétrer les interfaces de déplacement,
- D'indiquer le répertoire où l'ensemble des données relatives à l'EV sont enregistrées,
- De définir la hauteur du point de vue, la vitesse maximum de l'interface utilisée, etc.

Deux nouveaux modes apparaissent : un mode d'entraînement où le sujet navigue dans un nouvel environnement virtuel (cf. Figure 6) et permet d'entraîner le sujet avec l'interface proposée dans des conditions identiques au quartier virtuel de Bordeaux, et le mode Asservissement qui reprend exactement les mêmes paramètres du mode Entraînement et les applique au quartier virtuel de Bordeaux.



Figure 6 : Environnement virtuel d'entraînement issu du logiciel Virtools 3.5.

Les principales fonctionnalités ajoutées concernent les interfaces en lien avec mes travaux de thèse. Précédemment, seules les interfaces de déplacement clavier-souris et joystick étaient déjà implémentées dans cette application. Notre sujet de thèse nous a donc amené à intégrer de nouvelles interfaces afin d'étudier l'activité motrice sur le transfert de connaissances spatiales. Nous présentons ici ces nouvelles interfaces. Chaque interface est sélectionnable à l'aide de l'interface graphique (cf. Figure 5). Nous ne rentrerons pas dans des détails trop techniques d'intégration et programmation, notre objectif étant de présenter les concepts généraux des diverses interfaces ajoutées.

L'ensemble des interfaces citées ci-dessous sont celles utilisées dans les 3 premiers chapitres de notre partie empirique, certaines ayant données lieu à des articles soumis ou à des communications affichées.

Le joystick sans rotation

Cette interface consiste pour le sujet à ne modifier que sa vitesse de déplacement dans l'environnement en poussant l'axe du joystick vers l'avant, les changements de direction au niveau des directions étant préprogrammés. La vitesse de déplacement est paramétrée dans l'interface graphique (cf. Figure 5). L'inclinaison de l'axe du joystick était proportionnelle à la vitesse de déplacement dans l'EV. Ainsi, en paramétrant la vitesse maximale de déplacement à 6 km/h, si le sujet poussait l'axe du joystick au maximum, sa vitesse de déplacement était maximale (6 km/h). Par contre, si l'axe du joystick était poussé à sa moitié, sa vitesse était de 3 km/h. Une baisse de l'inclinaison du joystick provoquait toujours un déplacement mais à une vitesse inférieure. Si le joystick était positionné en son milieu, aucun déplacement n'était alors proposé. Chaque pallier de vitesse était programmé de 0,1 km/h en 0,1 km/h. Cette fonctionnalité a été implémentée pour deux raisons : certains sujets étaient perturbés par le manque de sensibilité de l'inclinaison du joystick et le déplacement trop brusque engendré. En effet, l'ancienne interface joystick ne permettait de se déplacer à la vitesse maximale que lorsque le joystick avait atteint un angle d'inclinaison suffisant, et aucune modulation de vitesse n'était permise. Cette nouvelle façon de gérer sa vitesse de déplacement permet d'affiner la vitesse et le contrôle moteur de la main dans l'EV. La deuxième raison concerne l'utilisation du joystick chez les personnes âgées. En effet, plus l'âge avance et plus les troubles moteurs apparaissent, et notamment les tremblements moteurs de la main (cf. infra, chapitre 1, facteurs internes). Ainsi, cette interface minimise les fausses manipulations du joystick dues à des tremblements moteurs de la main non sollicités par le sujet. Il est à noter que nous enregistrons dans un fichier chaque manipulation du joystick ainsi que la vitesse de déplacement. Chaque action (accélération, décélération, arrêt) provoquée par l'inclinaison du

joystick était stockée en fonction du temps. Nous pouvions re-visualiser les événements moteurs effectués par l'utilisateur et nous avons une évaluation de l'activité motrice engendrée par ce type d'interface, plus précisément en termes d'action demandée (nombre d'accélération, décélération, arrêt durant la navigation en Réalité Virtuelle).

Le joystick avec rotation

Le joystick avec rotation utilise les mêmes manipulations et fonctionnalités de déplacement du joystick sans rotation à la différence près que cette interface permet de manipuler la direction du point de vue. Le sujet est donc libre d'effectuer tout mouvement dans l'EV. La rotation à gauche ou à droite était implémentée de manière similaire au déplacement, et pour les mêmes raisons citées précédemment, proportionnelles à l'inclinaison du joystick à gauche ou à droite. Ainsi si le sujet poussait le joystick au maximum sur sa gauche, le point de vue tournait sur la gauche à sa vitesse de rotation maximale. Si le sujet inclinait un peu moins le joystick sur la gauche, le point de vue s'orientait toujours dans la même direction mais avec une vitesse de rotation moins rapide. Si le sujet positionnait l'axe du joystick en son centre, le point de vue ne changeait plus. Chaque action motrice effectuée sur le joystick modifiant la rotation du point de vue à gauche ou à droite était enregistrée dans un fichier texte. Nous pouvions donc évaluer en plus des accélérations, décélération et arrêts, le nombre de commandes motrices demandées pour tourner à gauche ou à droite.

Le tapis sans rotation

Nous avons implémenté une métaphore de la marche basée sur l'utilisation d'un tapis roulant. La Plateforme D'Analyse du Mouvement du CNRS UMR 5227 Mouvement Adaptation Cognition de l'Université Bordeaux Victor Segalen ainsi qu'un tapis roulant COSCOM© entièrement programmable et un télémètre SONAR MZ© ont été mis à notre disposition pour développer cette interface. L'explication de son fonctionnement a été détaillée dans le chapitre 2 de notre partie empirique. Pour rappel, le sujet ne pouvait que modifier la vitesse du tapis roulant en se déplaçant sur celui-ci, les changements de direction étant préprogrammés. Un déplacement vers l'avant du tapis roulant provoquait une accélération du tapis roulant, alors qu'un déplacement vers l'arrière du tapis roulant provoquait une décélération du tapis roulant. Chaque changement de vitesse était associé en temps réel au flux visuel de l'EV. Un SDK (Software Development Kit) a permis de programmer et d'intégrer le tapis roulant à notre EV. Il était notamment possible de modifier l'accélération (7 niveaux) et la vitesse de déplacement du tapis roulant (maximum 40 km/h).

Cette intégration s'est effectuée en langage C++. La vitesse maximale du tapis roulant correspondait à la vitesse paramétrée dans l'interface graphique (cf. Figure 5). Les différentes zones permettant l'accélération ou la décélération du tapis roulant étaient paramétrables (cf. Figure 7). Comme pour l'interface joystick, chaque commande envoyée au tapis roulant provoquait une accélération ou une décélération de 0,1 km/h. Nous enregistrions également toutes les commandes d'accélération, de décélérations et les vitesses associées en fonction du temps dans un fichier texte.

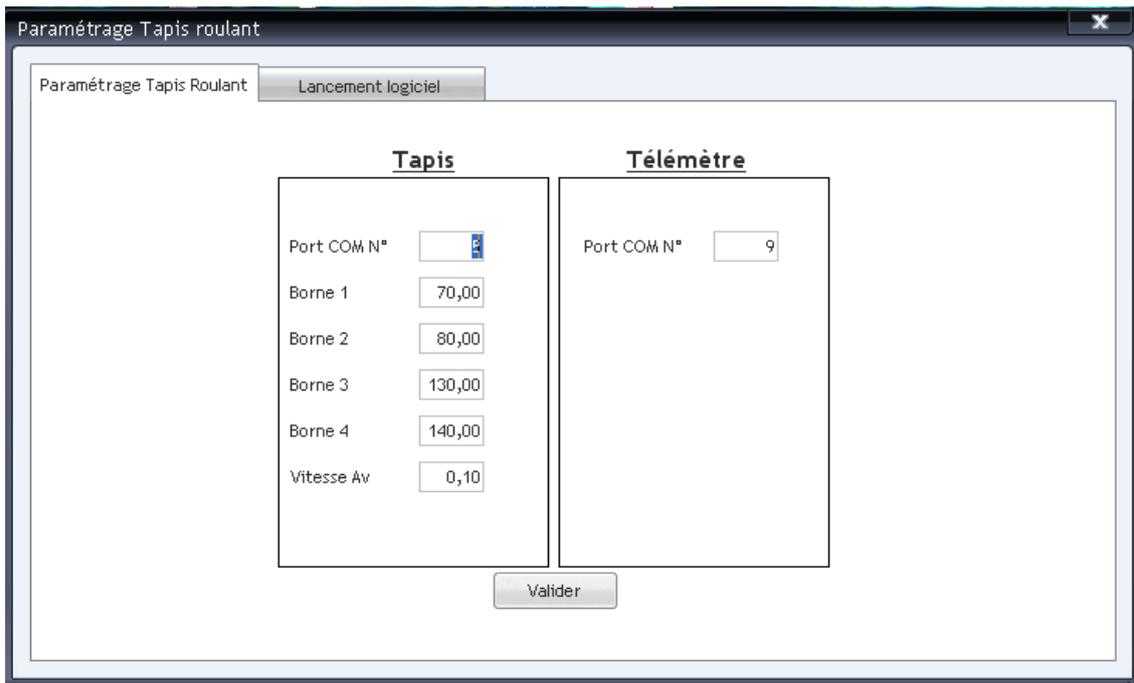


Figure 7 : Interface de paramétrage du tapis roulant.

Le tapis avec rotation

Cette interface a également été détaillée dans la partie Méthode du premier chapitre de la partie empirique. Cette interface se base sur l'interface précédente à la différence près que le sujet peut changer son point de vue en orientant sa tête dans la direction où il souhaite aller. Le problème majeur des tapis unidirectionnels réside dans la difficulté à établir des interactions permettant de choisir sa direction, car ils ne permettent qu'un déplacement sur une dimension. Nous avons utilisé un système de capture de mouvement (Motion Capture) MotionPoint © OptiTrack afin de récupérer en temps réel les mouvements de tête du sujet. Douze caméras permettent de récupérer les positions et orientations de 3 sphères posées sur la tête du sujet. Plus le sujet tournait la tête d'un côté, et plus la vitesse de rotation du point de vue dans l'EV était rapide. Si le sujet tournait un peu moins la tête vers la gauche, la vitesse de rotation était moins rapide. Lorsque le sujet positionnait sa tête dans l'axe de l'écran

(position de repos), la rotation ne s'exécutait plus. Le sujet pouvait donc gérer la vitesse de rotation de son point de vue. Ce système proposait également un SDK permettant l'implémentation informatique de cette technologie dans notre EV. Comme pour la condition précédente, nous récupérons dans un fichier texte les accélérations, décélérations du sujet ainsi que ses rotations effectuées à gauche ou à droite.

L'Interface Cerveau-Ordinateur (ICO)

Cette interface a déjà été détaillée dans le chapitre VII de notre partie empirique. L'ICO permet par différents traitements informatiques, traitement du signal et statistiques de déceler des patterns communs de signaux cérébraux d'une activité mentale qui peuvent être ensuite traduites en commande par un ordinateur. Ainsi, si le sujet pensait au déplacement de sa main gauche, cette interface analysait le signal et provoquait le changement de point de vue du côté demandé par l'utilisateur dans l'EV. Notre interface était basée sur deux classes : un déplacement à gauche et un déplacement à droite. Certaines ICO permettent également de gérer une gestion de la vitesse de déplacement mais les performances actuelles d'une telle interface ne sont actuellement pas assez fiables. Ce type d'interfaces nécessite de nombreuses compétences, notamment en développement informatique, traitement du signal, analyse statistique, etc. Dans notre cas, les signaux cérébraux étaient acquis à l'aide d'un EEG DELTAMED© (à une fréquence de 256 Hz) et OpenVibe® (une application opensource développée par l'INRIA) a permis de s'affranchir partiellement de ces différentes compétences, en proposant des scénarios allant de l'acquisition, l'analyse, le traitement du signal EEG et jusqu'à sa traduction en commandes. Nous avons développé un driver qui permet d'envoyer et de rendre compréhensible le signal acquis par notre système EEG Deltamed et le logiciel OpenVibe. Ce driver est basé sur l'utilisation d'une bibliothèque de fonctions informatiques qui permettait de « commander manuellement » l'EEG. Une fois la communication établie, OpenVibe récupérait et traitait les signaux EEG à l'aide d'un algorithme de type SVM (Support Vector Machine). Il traduisait alors le résultat en commande. Cette commande était au format suivant : entre -1 et 0, le système détectait le signal comme un changement de direction à gauche ; entre 0 et 1 le signal était traité comme une commande de déplacement à droite. Cette valeur représente le pourcentage de sûreté que le système a calculé pour la classification. Plus la valeur était proche de la valeur 1 (ou de -1) et plus l'ordinateur était sûr d'avoir attribué la bonne direction au signal traité. Par contre, plus la valeur était proche de 0 et moins la classification du signal était optimale. Cette valeur

était ensuite envoyée par le protocole VRPN¹⁵ (*Virtual Reality Peripheral Network*) à notre EV. Nous avons dû modifier la version du VRPN d'OpenVibe pour l'adapter à celle incluse de base dans Virtools. Nous avons également implémenté l'acquisition des signaux EEG sur un ordinateur différent de l'ordinateur équipé d'OpenVibe et de l'application EV par soucis de puissance de calcul. Les communications entre les deux machines se sont donc effectuées par un réseau direct basé sur le protocole TCP/IP (cf. Figure 8).

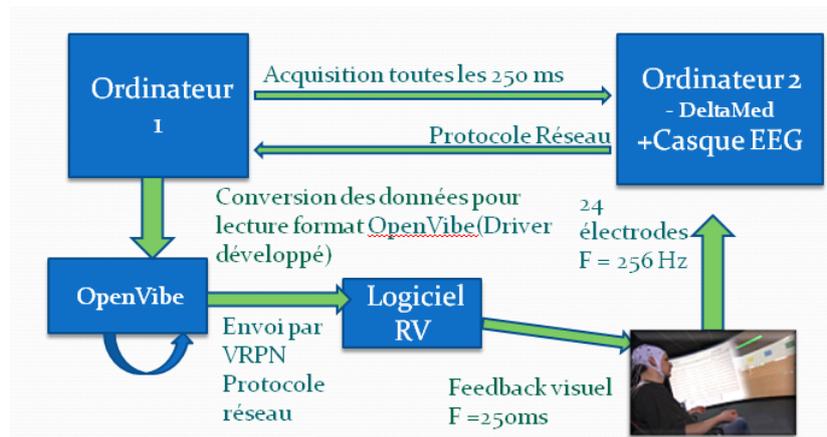


Figure 8 : Schéma technique pour l'acquisition des signaux EEG et l'ICO.

Au final, l'application - *quartier de Bordeaux* supporte aujourd'hui un large panel de fonctionnalités allant des propriétés de l'EV (eg. fidélité visuelle) des tâches proposées (entraînement, trajets simple à complexes) jusqu'aux interfaces d'interaction (joystick, tapis, ICO). La structure de ces fonctionnalités est présentée dans la Figure 9.

¹⁵ Bibliothèque libre qui permet de faire communiquer simplement des périphériques avec des logiciels de RV, et notamment par le biais d'un réseau

Fonctionnalités de l'application Quartier Virtuel de Bordeaux

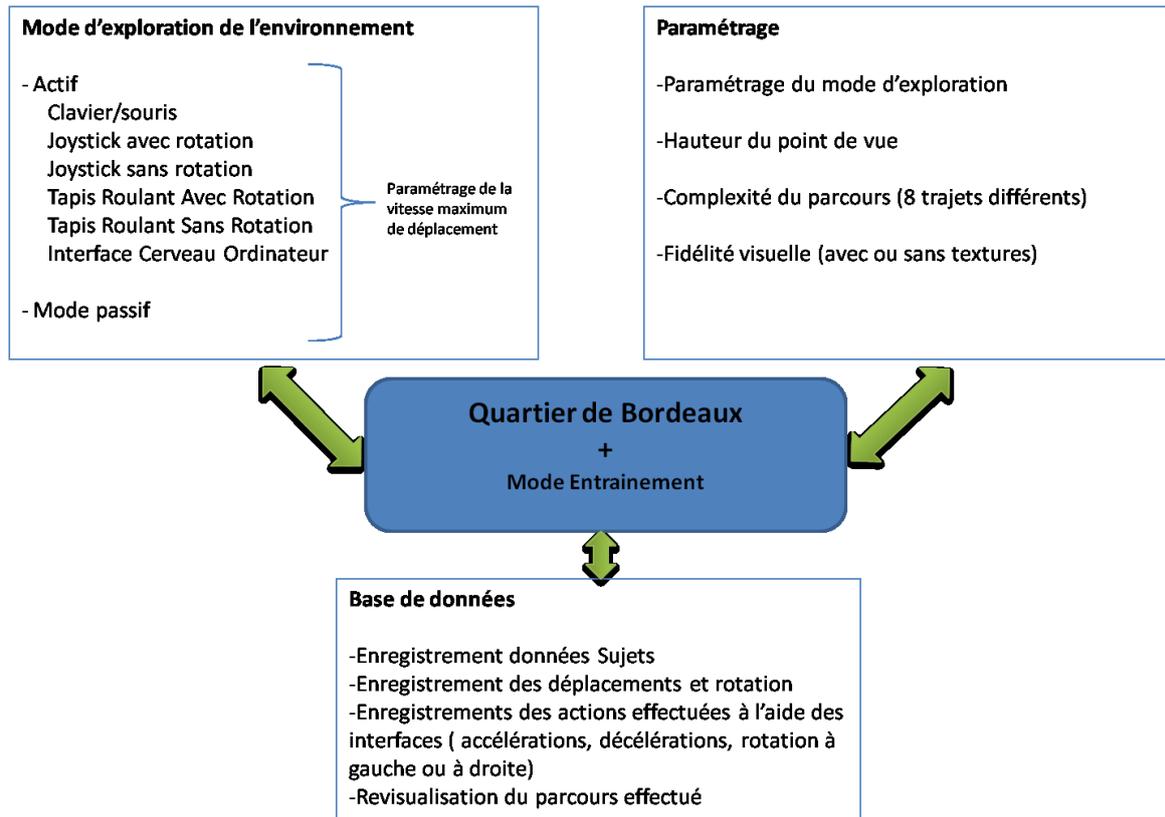


Figure 9 : Structure des fonctionnalités implémentées dans le quartier virtuel de Bordeaux.

Evidemment, ces nouvelles fonctionnalités ouvrent des perspectives d'application, notamment sur les thématiques de santé du laboratoire (vieillesse normale et pathologique et patient cérébro-lésé).

I.2 Logiciel d'analyse d'activité Virtuel/Réel

Nous avons également développé un logiciel d'analyse des différentes activités motrices effectuées durant l'apprentissage et la restitution des connaissances spatiales. Le nombre important d'informations récoltées durant chaque expérimentation rendait leurs exploitations et leurs interprétations difficiles. Ce logiciel, développé en langage Windev (PCSOFT ©), permet de revisualiser une expérimentation (apprentissage virtuel ou réel, et restitution dans l'environnement réel) et donne un ensemble d'informations assez précises sur l'activité motrice du sujet. Nous allons décrire succinctement les fonctionnalités de ce logiciel.

Notre logiciel permettait de synchroniser l'ensemble des données récoltées lors de l'apprentissage virtuel, notamment les positions, directions, orientation de la caméra dans l'EV ainsi que les informations concernant le nombre d'accélération, décélération et

rotations effectuées avec l'interface utilisée. Nous pouvons retracer sur un graphique le trajet parcouru, ainsi que les courbes de vitesse du sujet. De plus, dans notre EV, des murs invisibles étaient positionnés à chaque entrée et sortie d'intersections. Lors de la navigation en EV, nous enregistrions également le temps lorsqu'une collision était détectée entre ces murs et notre caméra. Nous avons donc des données concernant les déplacements et les actions effectuées (accélérations, décélérations, rotation), la vitesse et le temps passé, à l'intérieur et à l'extérieur de chaque intersection, cela quelque soit l'interface de déplacement utilisée.

En condition d'apprentissage et de restitution en environnement réel, les sujets étaient équipés d'un GPS et d'une caméra. Nous récupérons les données de position du sujet ainsi que les stimulations visuelles qu'il avait perçues. Notre logiciel permet également de synchroniser ces données et d'avoir des informations équivalentes à celles acquises en environnement virtuel. Nous pouvons ainsi comparer simultanément les activités motrices effectuées en condition virtuel ou réel (cf. Figure 10).

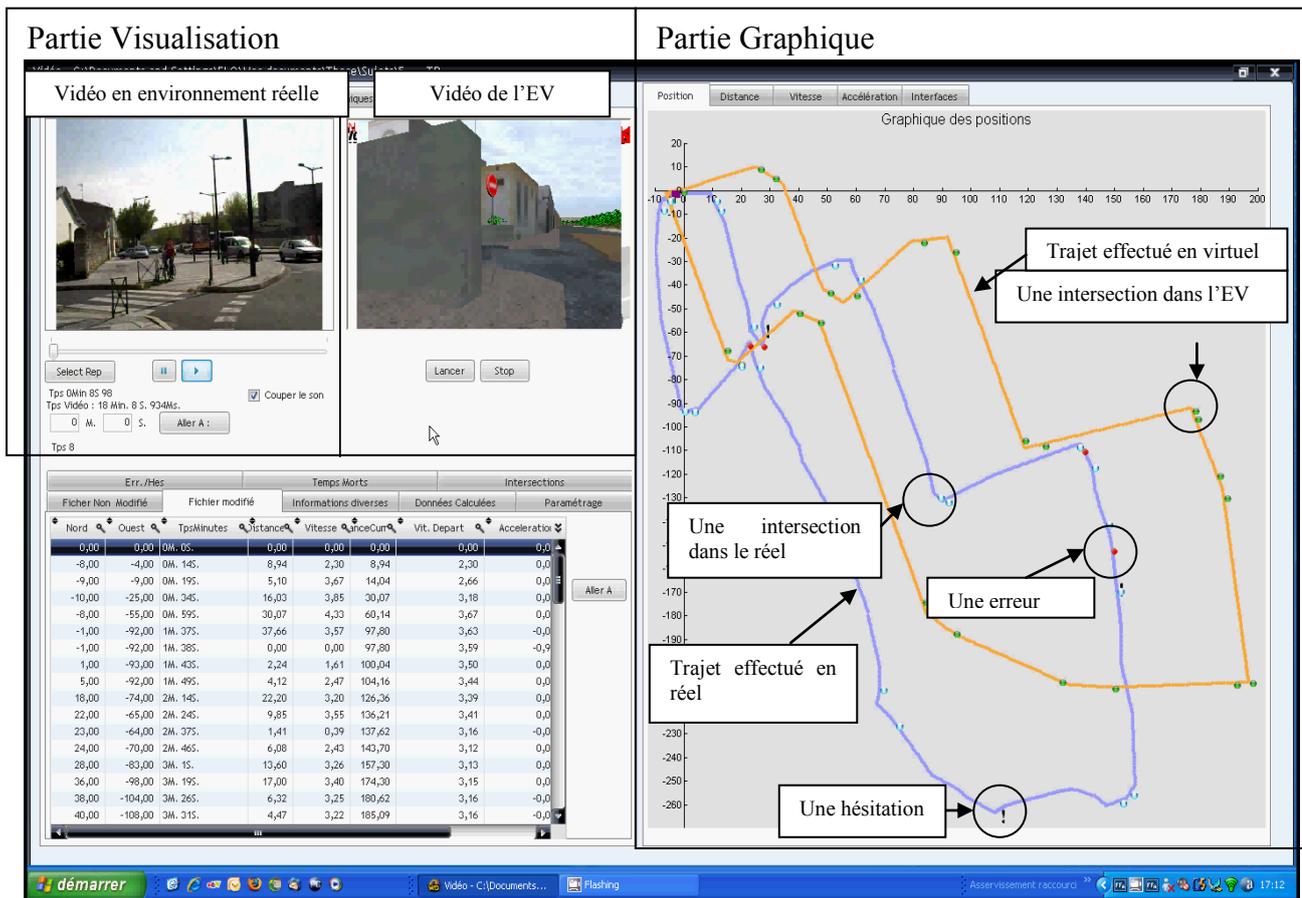


Figure 10 : Capture écran du logiciel d'analyse d'activité virtuel/réel.

Notre logiciel se décompose de la façon suivante : en haut à gauche la zone de visualisation des acquisitions vidéo (à gauche, la restitution en environnement réel et à droite l'apprentissage, ici en virtuel) et à droite la partie Graphique qui englobe différentes informations de position, de vitesses, etc. sous forme de graphiques.

Intéressons nous à la partie Visualisation. Chaque film (virtuel ou réel) est synchronisé avec les informations relatives au déplacement du sujet. Les tableaux situés en dessous de cette zone proposent des informations concernant la restitution du parcours en environnement réel, notamment le nombre d'erreurs et d'hésitations et leurs positions, les données GPS, les vitesses à l'intérieur et hors de chaque intersection, etc. Nous retrouvons ici l'ensemble des informations issues de l'environnement réel.

La partie de droite correspond à différents graphiques qui synchronisent les données communes à l'apprentissage et à la restitution des informations. Par exemple, sur la Figure 10, la courbe bleue correspond aux données GPS du trajet restitué en environnement réel, et la courbe orange correspond aux données de position acquises en condition d'apprentissage (ici en condition virtuelle). Chaque courbe est cliquable et permet d'accéder à l'ensemble des informations de ce moment précis (les vidéos se déplacent également automatiquement). Des symboles ont été définis : les deux points verts et les deux points bleus correspondent à des

entrées et sorties d'intersections (en bleu, dans l'environnement réel et en vert dans l'environnement virtuel). Les points rouges correspondent à des erreurs, et les points d'exclamations à des pauses/hésitations dans la phase de restitution en environnement réel.

La Figure 11 présente des graphiques de distance et de vitesse au cours du temps. On s'aperçoit que les informations concernant les erreurs, hésitations, intersections en apprentissage ou en restitution sont toujours précisées. Il est donc possible de connaître la distance parcourue dans une intersection, sa vitesse moyenne, etc., à n'importe quel moment du trajet.

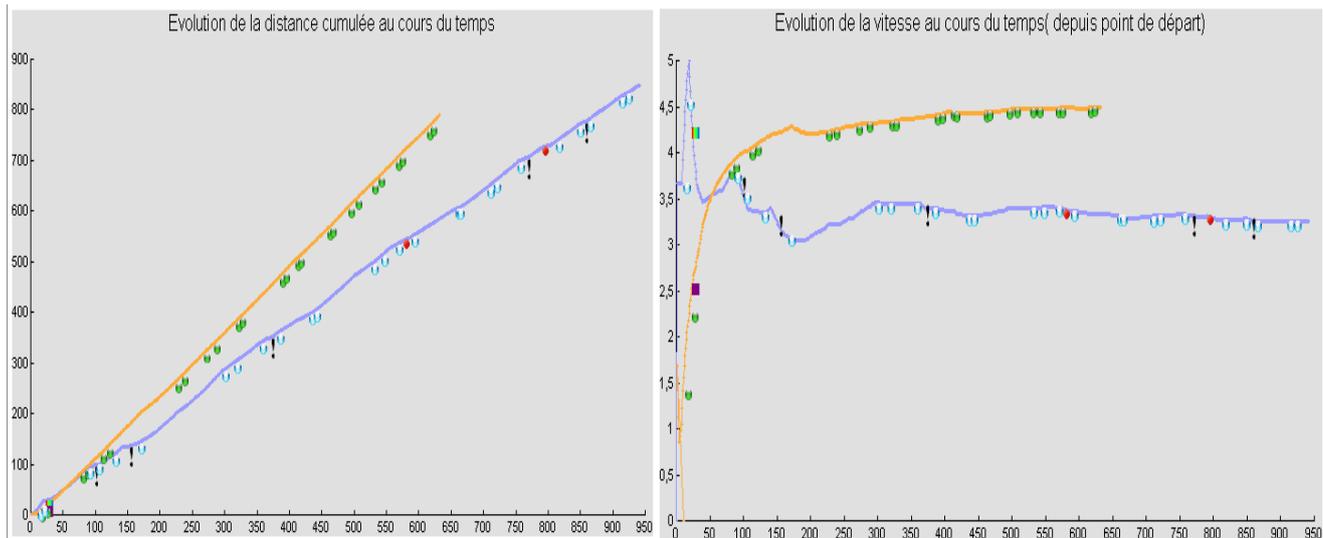


Figure 11 : Schémas des graphiques proposés par le logiciel d'analyse d'activité virtuel/réel.

Le logiciel permet également d'avoir des données sur la façon d'utiliser les interfaces en EV. Par exemple, la Figure 12 présente l'évolution des accélérations/décélérations effectuées en condition tapis roulant. Il est ainsi possible de connaître les différentes valeurs des vitesses, leurs nombres, à l'intérieur ou à l'extérieur des intersections, le nombre d'arrêt, etc.

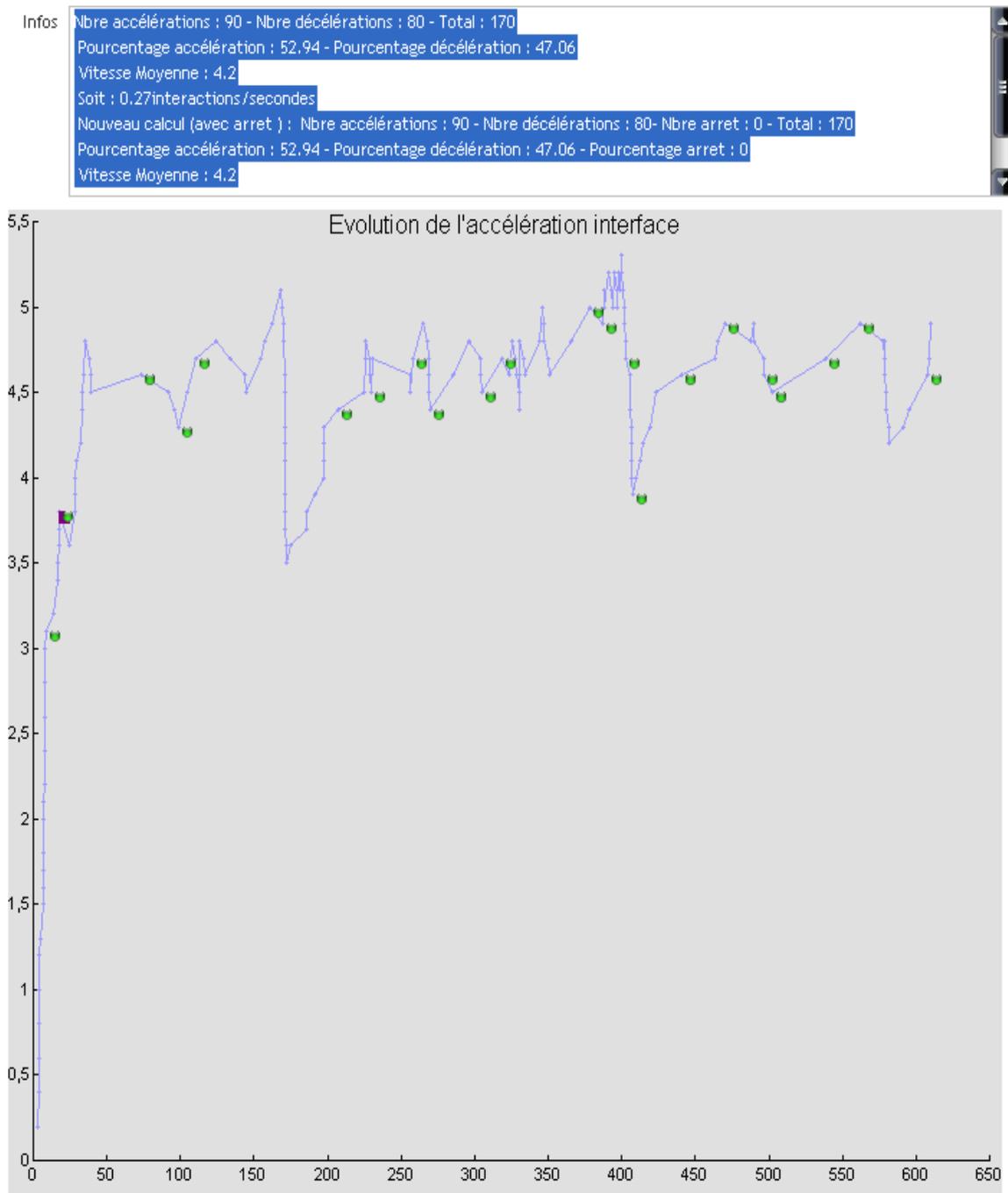


Figure 12 : Graphique présentant l'évolution de la vitesse et le nombre d'accélérations/décélérations/arrêt effectués avec une interface.

Ces mêmes informations sont également disponibles pour les rotations (cf. Figure 13).

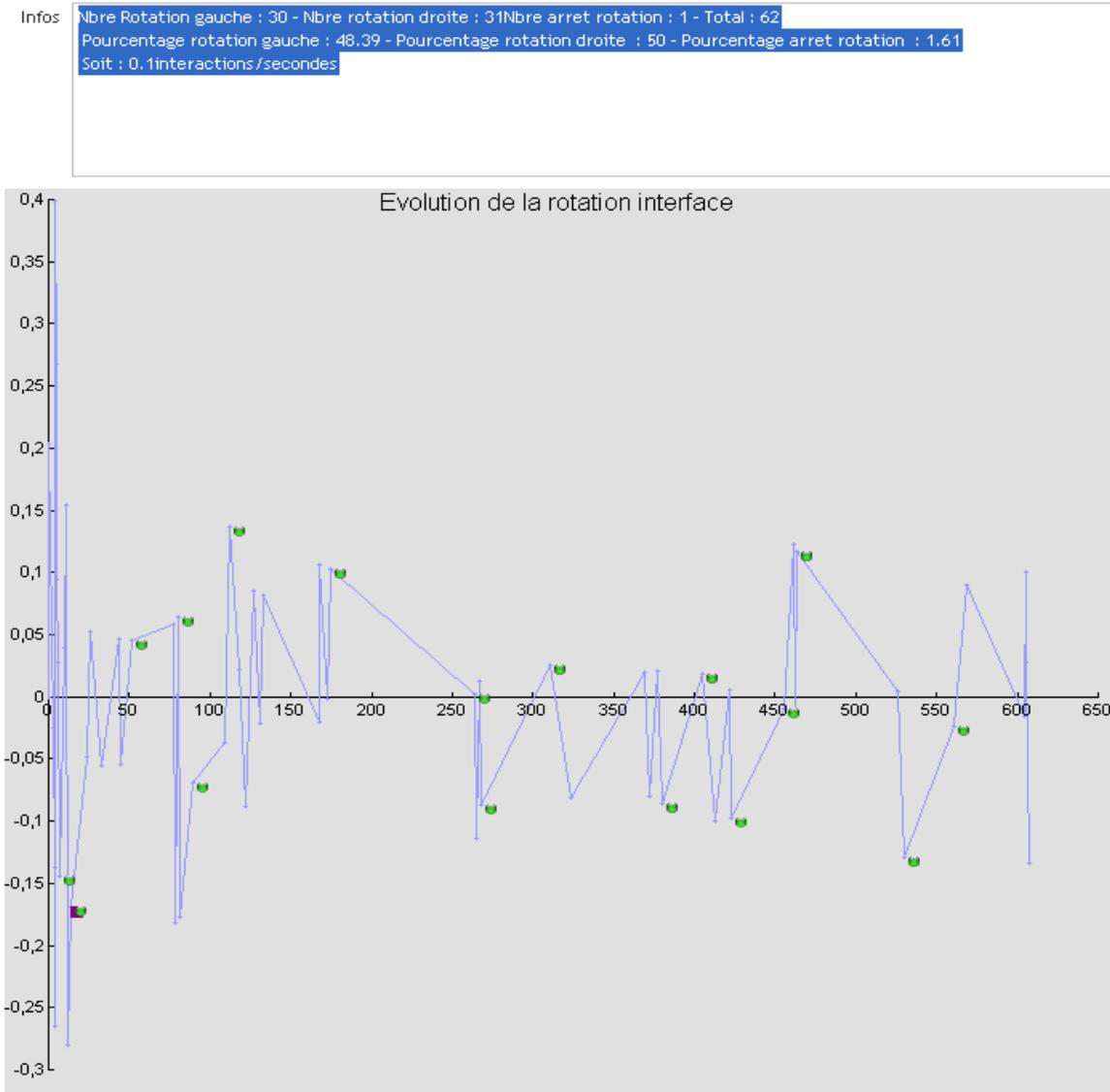


Figure 13 : Graphique des rotations hors et dans les intersections au cours du temps. Les valeurs négatives correspondent aux rotations vers la gauche et les valeurs positives aux rotations vers la droite.

Ce logiciel permet d'étudier la cognition spatiale sous des angles différents de la littérature actuelle et notamment par une analyse motrice plus précise de l'utilisation des interfaces. Par exemple, nous avons pu observer que les sujets ayant navigué en condition joystick avec rotation effectuaient plus d'accélérations/décélérations et rotations que les sujets ayant navigué à l'aide du tapis roulant et de la rotation. Ce logiciel pourrait permettre de quantifier le coût cognitif et moteur lié à une interface. Nos futures investigations proposeront une analyse de ce type concernant l'utilisation des processus moteurs mis en jeu en EV dans la cognition spatiale.

II. L'appartement virtuel

Nous avons développé un deuxième environnement virtuel représentant un appartement qui se divise en 4 pièces : une cuisine, une salle à manger, une salle de bain, une chambre. Un des enjeux était d'effectuer des activités de vie quotidienne dans cet appartement virtuel et d'évaluer les informations transférées dans le réel. La modélisation a été effectuée par un professionnel, et nous avons développé la partie programmation 3D temps réel, toujours à l'aide du logiciel Virtools 3.5.

3 versions de l'appartement (cf. Figure 14) ont été déclinées : une version passive où le sujet, pendant 50 secondes, visualisait un déplacement dans chaque pièce, une condition active de type clavier/souris où le sujet, pendant 50 secondes, naviguait librement dans chaque pièce et une troisième version où le sujet naviguait durant 50 secondes dans chaque pièce à l'aide d'un joystick.

II.1 Evaluation de la mémoire épisodique

Sauzçon H., Arvind-Pala P., Déjos M., Wallet G., **Larrue F.**, Guitton, P., N'Kaoua B. « The assessment of episodic memory using virtual reality »; *Experimental psychology (sous presse)*.

Comme nous l'avons vu, la mémoire est essentielle pour effectuer de nombreuses tâches de la vie quotidienne. Une trace en mémoire (épisodique) est considérée comme la fixation du contenu et du contexte d'un évènement, incluant l'intégration d'aspects sensorimoteurs (visuel, tactile et auditif), émotionnels, et les aspects psychologiques propres à l'individu (Tulving, 2002). La mémoire s'évalue généralement de la manière suivante : dans une première phase on présente un matériel que le sujet doit apprendre. Dans une seconde phase, le sujet doit effectuer un rappel libre puis indicé du matériel, incluant ou non une tâche de reconnaissances. Ce type de protocole est utilisé dans la CVLT (California Verbal Learning Test, Delis, Kramer, Kaplan et Ober, 2000) qui constitue l'un des outils le plus utilisé pour évaluer la mémoire auprès d'adulte. D'après Brooks, Attree, Rose, Clifford et Leadbetter (1999), les informations motrices semblent améliorer la mémoire (épisodique). Cependant, il n'existe pas de protocole en RV ayant testé la mémoire épisodique et le mode de navigation. Or, nos différentes études montrent un avantage certain du mode navigation actif sur la mémorisation d'un parcours. L'objectif de cette recherche était donc d'étudier l'apprentissage actif vs passif sur la mémoire épisodique à l'aide d'une tâche basée sur la CVLT. Dans ce cadre, 44 sujets jeunes ont navigué dans un premier appartement virtuel, qui contenait un ensemble d'objets spécifiques à chaque pièce. Peu de temps, après ils, étaient

invités à rappeler tous les objets mémorisés (rappel libre 1). Cette procédure était répétée (rappel libre 2). Puis, les participants ont visualisé un deuxième appartement qui comprenait alors d'autres objets spécifiques à chaque pièce et des objets partagés par les 2 appartements. Et, un rappel libre des objets était demandé (Rappel libre B). Pour chaque EV, les objets ont été regroupés selon 4 catégories sémantiques : les objets liés à la salle de bain, à la chambre, à la cuisine et enfin à la salle à manger. Enfin, une tâche de reconnaissance des objets du premier EV était proposée, en sachant que ces derniers étaient mélangés parmi des leurres du deuxième appartement et des leurres sémantiques (des objets non présents dans les 2 versions de l'appartement mais reliés sémantiquement aux objets cibles). Les sujets ont navigué soit en condition active à l'aide d'un clavier et d'une souris ou alors en condition passive c'est-à-dire en visualisant un déplacement pré enregistré. Quel que soit le mode de navigation, les sujets ne pouvaient rester que 50 secondes dans chaque pièce. Quatre composantes de la mémoire ont été évaluées : l'effet d'apprentissage (rappels libres 1 et 2), l'oubli actif (effet d'interférence entre les deux environnements), les stratégies d'encodage et de récupération, et les fausses reconnaissances. Les résultats des travaux sur la CVLT classique ont été retrouvés à l'aide de cette expérimentation. Notamment, nous avons trouvé un effet concernant l'apprentissage, l'oubli, les stratégies de mémorisation et les fausses reconnaissances. De plus, les sujets en condition active avaient de meilleures performances concernant l'apprentissage, les stratégies de récupération et la sensibilité aux fausses reconnaissances (comparé à la condition passive). Ces effets ont été interprétés comme le résultat de la sensibilité de certains processus de la mémoire (appelés « item-spécifiques », Hunt et Einstein, 1981) à l'enrichissement sensoriel (ici moteur) lors de l'encodage.



Figure 14 : A gauche, vue de la chambre, à droite vue allocentrique des 5 pièces de l'appartement.

D'autres expériences sont en cours de développement, notamment chez les personnes âgées afin d'évaluer si la RV pourrait permettre de retrouver les résultats de la littérature en situation réelle, concernant le déclin liés à l'âge de la mémoire, et d'évaluer un éventuel effet bénéfique de la navigation active sur les performances en mémoire de ce type de population (travaux doctoraux de Prashant Arvind Pala). Dans la même optique, des travaux sont réalisés auprès de personnes présentant une démence de type Alzheimer en stade précoce puisque la mémoire est le trouble caractéristique de cette maladie (Travaux doctoraux de Marie Déjos). Ainsi, mes travaux d'ingénierie de recherche m'ont permis de participer à de nombreuses recherches menées au sein du laboratoire EA 4136 tout en enrichissant mes propres travaux doctoraux.

Annexe 2 - Article 1: Differences in spatial learning transfer from virtual to real according to body-based manipulations.

Les résultats de ce chapitre ont été soumis dans la revue « Journal Experimental of Psychology : Applied » sous le titre suivant :

LARRUE, F., Sauzeon, H., Foloippe, D., Wallet, G., Gross, C. & N’Kaoua, B. (submitted).
Differences in spatial learning transfer from virtual to real according to body-based manipulations.

Title: Differences in spatial learning transfer from virtual to real depending on body-based input.

Authors: Florian LARRUE¹, Hélène Sauz eon¹, Deborah FOLOPPE¹, Gregory Wallet¹, Christian GROSS², & Bernard N'Kaoua¹.

Affiliations:

1 - Laboratoire EA- 4136 Handicap & Système Nerveux, Equipe CHIC (Communication Handicap Interaction Communication), Université Bordeaux Segalen

2 - CNRS UMR 5293, Institut des Maladies Neurod eg en eratives, Université Bordeaux Segalen

Corresponding Author: Florian LARRUE (florian.larrue@u-bordeaux2.fr)

Abstract:

This research investigated the influence of both physical engagement and rotational movement action (RMA) effects during route learning in a virtual urban district, focusing on spatial knowledge transfer from virtual to real environments, by measuring performance in egocentric vs. allocentric tasks. This was achieved by manipulating the impact of walking interfaces known to involve extensive (unidirectional treadmill) or minor physical engagement (joystick). We also investigated the role of active turning to capture the possible role of rotational vestibular information in physical engagement (with and without RMA condition). The main results revealed that: 1) the treadmill condition induced more accurate egocentric estimates of distance walked as well as better allocentric estimates of starting point compared to the joystick condition; 2) in the RMA condition with treadmill, participants egocentric estimates (walked distance and angular direction) were more accurate, as was their wayfinding performance in real condition (i.e. direction errors). Thus, extensive physical engagement increased the accuracy of both egocentric and allocentric estimates, whereas rotational vestibular information selectively enhanced egocentric estimates, which, in turn, enhanced wayfinding performance under real ambulatory navigation conditions. These findings are discussed in terms of relationships between cognitive and sensorimotor processes.

Keywords: Virtual- Real transfer; Spatial learning; Interface-related motor activity, body-based information.

Spatial cognition refers to the cognitive processes associated with the development of a comprehensive understanding of a spatial environment and the utilization of that knowledge for various purposes. Processes involved in spatial cognition are necessary for many daily life situations, such as shopping in supermarkets (*e.g.*, finding a product in a section) and driving, and are often affected by neurological diseases (*e.g.*, Alzheimer), brain trauma, etc. (see for review: Rizzo & Buckwalter, 1997). Virtual Reality (VR) is widely used to study spatial cognition and as a learning medium for enhancing performance in subsequent navigational tasks (Waller, Hunt, & Knapp, 1998; Wallet, Sauzeon, Rodrigues, & Nkaoua, 2009). Indeed, VR provides interactive simulations of dynamic, three-dimensional, multimodal environments (Fuchs et al., 2006). Recent literature stresses that navigational tasks involve sensorimotor and cognitive processes (Lambrey, Viaud-Delmon, & Berthoz, 2002; Ruddle, Mohler, Volkova, & Bühlhoff, 2011), but the respective roles of and these two types of processes in navigation performance in both real and virtual environments, as well as the relationships between them, have not yet been fully elucidated (Bossard, Kermarrec, Buche, & Tisseau, 2008). The purpose of this study was to address some sensorimotor aspects involved in participant-VR interactions and assess their influence on the transfer of spatial learning from virtual environment (VE) to a real environment. Specifically, we focused on the manipulation of locomotion interfaces known to imply extensive (unidirectional treadmill) or minor physical engagement (joystick). We also investigated the role of active turning to capture the possible role of rotational vestibular information in physical engagement (Ruddle, Volkova, & Bühlhoff, 2011b). This enabled us to analyze the influence of both physical engagement and active rotational effects on spatial knowledge transfer from virtual to real in egocentric vs. allocentric spatial-knowledge tasks (Lambrey, Samson, Dupont, Baulac, & Berthoz, 2003; Wilson, Foreman, Gillett, & Stanton, 1997).

Landmark-route-survey framework

According to the “landmark – route – survey” (L-R-S) model (Siegel & White, 1975), building the structure of environment spatial knowledge and the acquisition process of spatial knowledge of new environments consists of three stages (Ishikawa & Montello, 2006; Montello, 1998; Pick & Lockman 1981). Firstly, spatial cognition is based on the acquisition of several *landmarks* in the environment. These landmarks are integrated into the memory by their shape, structure, and/or sociocultural meaning (Golledge, 1999). Secondly, the subject links the landmarks and learns the *routes* between them. At this level, s/he is able to build a mental representation of a route from a departure point to an arrival point using the various landmarks (Thorndyke & Goldin, 1983). These first two levels correspond to egocentric-type representations (*i.e.*, the body serves as a reference). Finally, the subject develops *survey* knowledge. S/he builds a topographical representation of the environment, including all the associated spatial information (*i.e.*, landmarks and routes), making it possible to infer a representation of the entire environment, thus making it possible to estimate Euclidean distances and contemplate shortcuts (Presson, DeLange, & Hazelrigg, 1989). At this final level of knowledge, the representation is similar to a "plane view" and is also known as "survey-type" knowledge: the mental representation of the environment is complete and allocentric (*i.e.*, an external point serves as a reference). These three stages in knowledge acquisition need not follow a strict order but may be obtained in a parallel process (Ishikawa & Montello, 2006). In many situations, acquisition of all the knowledge levels is not necessary and the overview is not used, as it is only required to plan shortcuts or new paths in an environment, while the second level may be sufficient to reproduce a route in an environment.

VR-based studies: spatial learning and sensorimotor activity

When VR is used as medium for spatial learning, one key challenge is to understand what spatial knowledge learned from the VE is transferred into real life and identify factors that

promote these transfers. Previous findings indicated that spatial learning from VE was very similar to that acquired in a real environment, irrespective of the type of subjects investigated (e.g., healthy subjects: Péruch & Wilson, 2004; Wallet et al., 2009; or patients with traumatic brain injury: Brooks, 1999). Among the factors affecting spatial knowledge transfer from VR to real, studies of the degree of sensorimotor activity have provided some insights into the role of sensorimotor processes in spatial learning (Péruch, Vercher, & Gauthier, 1995; Ruddle, Payne, & Jones 1997; Wallet, Sauzeon, Rodrigues, & N’Kaoua, 2008). Wilson et al. (1997) distinguished between two types of VR exploration: active vs. passive mode. The active mode is usually implemented as a condition where sensorimotor feedbacks and the control of an interface (joystick, glove, keyboard, etc.) are required to navigate in the VE, while the passive mode usually refers to exploration where the subject has no interaction with the VE. According to Bowman (1999), an ergonomic approach to active navigation with metaphors for virtual displacement requires an interface with three basic components: direction/target selection (user indicates motion direction), velocity/acceleration selection (user defines speed and acceleration), and input conditions (systems making it possible to interact with the VE).

In VR studies, the effects of the active mode on the virtual-real transfer of spatial knowledge have not proved consistent but some results have encouraged authors to assume that the benefit of an active mode depends on the type of spatial knowledge required by the recall task (Wilson et al., 1997; Ruddle & Péruch, 2004, Wallet et al., 2009; 2011). Research by Wallet and co-workers using the L-R-S model indicated, for example, that the benefit is greater in tasks is based on egocentric spatial representation (L-R levels) compared to those mainly driven by allocentric spatial representation (S level) (Wallet, Sauzéon, Rodrigues, Larrue, & N’Kaoua, 2010; Wallet et al., 2011). As an example, Wallet et al. (2011) studied spatial learning transfer in active versus passive mode, with three tasks as specific or global probes of egocentric and allocentric representation: chronological photo classification (egocentric or L-R levels), sketch mapping (allocentric or S level), and a wayfinding task

(egocentric and allocentric or L-R-S levels). They found an active mode benefit on all the tasks when the VE was visually detailed, whereas the active mode deteriorated performance in the chronological photo classification task when the VE was not detailed. This uneven benefit of the active mode on tasks depending on egocentric representation was interpreted as a strengthening of the perception-action coupling, made possible only by the visual enrichment of the VE. In other words, sensorimotor processes involved in active mode particularly promote the perception-action coupling that facilitates the transfer of the lowest levels of spatial knowledge. This provided evidence that sensorimotor activity in a VE is a sensitive dimension in the virtual-real transfer of spatial knowledge according to the L-R-S model.

Among the theoretical accounts stressing sensorimotor activity, the graph approach is central in giving an essential role to the enacted spatial representations (Mallot & Gillner, 2000). According to this approach, spatial cognition is a byproduct of both the sensorimotor and cognitive components. The starting point of the graph approach is the distinction between a cognitive and perception–action system: the cognitive system underlies the development of internal representations (similar to the L-R-S model), while the perception-action system generates representations that associate motor responses with views or places (*i.e.*, perception-action coupling). Also, the former system is assumed to be mainly involved in implementing spatial strategies based on configuration (survey-based), while the latter is particularly involved in implementing route-based strategies (Mallot & Gillner, 2000). In other words, tasks based on allocentric or survey representation may probe the cognitive system more specifically, whereas egocentric route-based tasks are likely to probe both cognitive and perception-action systems. Specifically, the perception-action component is formalized as subject movement and all sensorimotor processes involved therein, including all systems concerning body-based information, including body/head position and spatial orientation.

The body-based information for spatial acquisition is usually sub-divided into three main classes of information (Ruddle & Péruch, 2004; Hegarty, Montello, Richardson, Ishikawa, & Lovelace, 2006; Banton, Stefanucci, Durgin, Fass, & Proffitt, 2005). First, visual information, notably optic flow, consists of all visual input used to detect forms, textures, semantic landmarks, movements of objects, etc. (Gibson, 1950) always in accord with body position. Importantly, Kearns, Warren, Duchon, & Tarr (2002) and Bardy (2006) decomposed optic flow into translational optic flow (movement to another position with the same orientation) and rotational optic flow (turning). Second, the vestibular system provides translational (acceleration/deceleration of the head and body) as well as rotational information (rotation of the head and body). Third, kinesthetic information, which refers to internal copies of motor commands sent by the central nervous system to muscles and other brain areas, making it possible to anticipate the consequences of a movement (Bardy, 2006) and form a perception of our body in the environment. A review of VR literature revealed very few studies addressing the influence of precise elements of sensorimotor activities on measuring spatial learning. Waller & Richardson (2008) studied the influence of optic flow and body-based information in a virtual environment on subsequent egocentric distance estimations in a real environment. Interestingly participants tended to overestimate distances in the physical world after interacting with an immersive VE including optic flow and body-based information, while they performed better after interacting with a VE in blindfolded condition. These findings support the hypothesis that visual information during the VE interaction has less impact than body-based information on the accuracy of subsequent egocentric distance estimation. Waller et al. hypothesized that people underestimated egocentric distances within immersive VEs as they were unaware of the consequences of their actions. This hypothesis strongly supports theoretical approaches, such as the graph framework (Mallot & Gillner, 2000), considering that physical action plays a fundamental role, emphasizing the inseparable complementarity of perception and action (*e.g.*, Gibson, 1979; Hommel, Musseler,

Aschersleben, & Prinz, 2001; Warren, 2006). In a more rational explanation for this hypothesis, Waller et al.(2008), suggested that the underestimation of egocentric distances was probably due to the low level of body-based information (proprioceptive, vestibular, or efferent information) provided by the design of the locomotion interfaces of the desktop VEs, i.e., keyboards or joysticks,. Indeed, VE locomotion interfaces, such as treadmills, that provide more realistic body-based information, have previously proved more efficient in enabling accurate VE egocentric distance estimates (Mohler et al., 2007). Empirical evidence supporting the key role of body-based information in the influence of the locomotion interface on the accuracy of egocentric distance estimates would be more convincing. A direct comparison between low limited (*i.e.*, Joystick) and more extensive body-based information (*i.e.*, treadmill) should provide some insight into this question. In this vein, Ruddle & Lessels (2009) compared different interfaces (walking in VE/HMD, Keyboard/HMD and mouse/Keyboard coupled to a desktop display) and found that the walking VR group performed better than groups using HMD/keyboard interface or desktop displays for navigational search tasks (finding targets hidden inside boxes in a room-sized space). This was also consistent with the findings by Grant & Magee (1998), showing that people performed better on wayfinding tasks in the real world if they had previously been exposed to VE using a walking interface rather than a joystick. Thus, the benefit of enriched body-based interaction provided by a walking interface has been observed in complex navigational tasks driven by low and high levels of spatial knowledge (according to the L-R-S framework). Therefore, a direct comparison of locomotion interfaces offering differing complexity of body-based information demonstrated the superiority of walking over a joystick interface on navigational performance. However, Grant and Magee's study did not provide information about the enhancement of L-R-S spatial knowledge achieved using this type of locomotion interface. Finally, Ruddle et al. (2011b) recently addressed the role of both translational and rotational vestibular information on the accuracy of participants' cognitive maps (survey

knowledge). In fact, the role of translational vestibular information was studied in a VE, using different locomotion interfaces (translational displacements with walking or treadmill vs. no translational displacements with joystick), sometimes with the possibility of really turning the head (i.e., rotational vestibular condition or not) during rotational movement. They also reported that walking, as well as the treadmill condition, significantly improved the accuracy of participants' cognitive maps, measured using direction and allocentric distance estimates but, on its own, vestibular rotational-based information had no effect. These results agree with those of Ruddle & Péruch (2004), who found that the rotational component was negligible for tasks mainly driven by allocentric spatial representation.

From the overall findings, the extent of body-based information provided by a treadmill locomotion interface (compared to a joystick) was considered largely favorable for spatial learning in a VE, due to the improvement in egocentric (Waller & Richardson, 2008) and allocentric spatial representation (Ruddle et al., 2011a), as well as navigational measurements (Grant & Magee, 1998; Ruddle & Lessels 2009). In contrast, the addition of rotational vestibular stimulation was identified as negligible by measuring allocentric spatial representation (Ruddle & Péruch, 2004; Ruddle et al., 2011b) (to our knowledge, no reports are available concerning egocentric spatial representation). Taken together, these findings suggest that treadmill locomotion provides extensive body-based information, thus inducing strong dialogue or relationships between the perception-action component and the cognitive component, according to the graph approach (Mallot & Gillner, 2000). In contrast, rotational vestibular stimulation does not offer this type of dialogue. Combining the effects of an enriched body-based interface (treadmill vs. joystick) with vestibular stimulation and measuring both egocentric and allocentric representations was likely to provide insight into the dialogue or relationships between the perception-action and cognitive components in VR based-spatial learning tasks.

Consequently, the aim of this study was to investigate the impact of two different locomotion modes (Treadmill vs. Joystick with or without Rotational Movement Action (RMA with vs. without rotation) on performance in tasks specifically or globally mobilizing of L-R-S levels as follows: i) Landmark-Route levels, referring to egocentric representations, were probed using a chronological photo classification and egocentric distance and direction estimates; ii) Survey levels, referring to allocentric representation, were probed using a sketch mapping and an allocentric orientation estimate of the starting point; and iii) a wayfinding task to probe the global implementation of L-R-S knowledge in reaching a navigational aim in a real situation.

METHOD

VR was assessed as a spatial learning medium using a spatial learning paradigm that involved acquiring a path, either in a real environment (baseline condition) or its virtual replica (virtual conditions) (Brooks, 1999; Wallet et al., 2010; 2011). The acquisition path in the VE was assessed according to four interface conditions, such as navigation mode (see Table 1): (1) Treadmill with RMA (translational and rotational optic flow, kinesthetic information, rotational vestibular and a little translational vestibular information); (2) Treadmill without RMA (translational and rotational optic flow, kinesthetic information, little translational vestibular information and no rotational vestibular information); (3) joystick with RMA (stimulated translational and rotational optic flow); (4) Joystick without RMA (translational and rotational optic flow, kinesthetic information). Following reality- or VR-based path acquisition, the participants completed several tasks to assessing their spatial knowledge according to the L-R-S model, included a wayfinding task in a real situation to assess the virtual/real transfer.

Insert Table 1

Participants

Participants were 92 student volunteers from Bordeaux Segalen University (46 men and 46 women): 20 students were assigned to the Reality-based path acquisition condition (baseline condition), and 72 to the VR -based path acquisition condition. In the latter condition, 18 participants were assigned to each of interface condition (4 interfaces * 18 participants): (1) Treadmill with RMA, (2) Treadmill without RMA, (3) Joystick with RMA, and (4) joystick without RMA. All the participants had normal or corrected-to-normal vision and were native French speakers, right-handed, and had at least a bachelor's or equivalent degree. Their ages ranged from 18 to 30 years. The five composed groups were balanced for gender and the video-gamer distribution (χ^2 procedure $p>.05$)(Table 2). In addition, there was no significant difference in spatial abilities among the five groups, as assessed with the GZ-5 test (Guilford & Zimmerman, 1948), Mental Rotation Test (MRT) (Peters et al., 1995; Shepard & Metzler, 1971; Vandenberg & Kuse, 1978), and the Corsi's block-tapping test (from the WMS III, Weschler, 2001) (respectively, $p>0.300$ $p>0.800$; $p>0.600$). The GZ-5test is commonly considered a measurement of spatial translation ability. MRT is used to measure spatial visualization and mental rotation abilities. Corsi's test is used to measure the direct visual-spatial memory span (number of sequences correctly reproduced by the participant) and the reverse visual-spatial memory span (number of sequences correctly reproduced in reverse order, from the last pointed to the first pointed).

Insert Table 2

Material

The environment

The real environment was a 9km² area near Bordeaux hospital. The VE was a 3D scale model of the real environment, with realistic and visual stimuli. The scale of the real

environment was faithfully reproduced (measurements of houses, streets, etc.) and photos of several building facades were applied to geometric surfaces in the VE. Significant local and global landmarks (*e.g.*, signposts, signs, and urban furniture) and urban sounds were included in the VE to make the simulation more realistic. VE was laboratory-developed using Virtools Dev 3.5™ and modified to integrate new interfaces and collect additional data. Irrespective of the learning group (virtual or real condition), the itinerary was presented to subjects on the basis of an egocentric frame of reference, at head height. It was characterized by an irregular closed loop, 780 m in length, with thirteen crossroads and eleven directional changes.

Apparatus

Material used in the darkened laboratory room was a DELL Precision M6300 laptop computer (RAM: 3GHz; processor: Intel Core 2 Duo T9500 2,60 Ghz) with an Nvidia Quadro FX 1600M graphics card (256Mo), a 2 x 1.88 meter screen (to facilitate proper immersion of the subject), a projector (Optoma/ThemeScene from Texas Instrument) with rear projection. The participants were placed two meters from the display screen.

Interface modeling

Four interfaces were modeled: 1) Treadmill with RMA, (2) Treadmill without RMA, (3) Joystick with RMA, and (4) joystick without RMA.

The two treadmill conditions(with and without RMA) included an HP COSCOM programmable (speed, declination and acceleration) treadmill with serial Cable Ownership coupled to a Software Development Kit and an MS-EZ1 sonar telemeter . This interface enabled users to modify the VE's visual display in real time to match his/her walking speed, with a maximum of 6 km/h. Acceleration and deceleration were applied by means of a Sonar MS-EZ1 telemeter that monitored the subject's movements on the treadmill. Treadmill surface was divided into three parts: one for accelerating, one for walking normally, and one for decelerating. No acceleration or deceleration information was sent to the treadmill when the subject was in the walk zone. In contrast, when the subject walked into the acceleration or

deceleration zone, the sonar detected length changes in the subject's position, and instructed the computer to accelerate or decelerate until the subject returned to the walk zone (Figure 1). Finally, the subject remaining in the deceleration zone for a prolonged period induced a stop in the environment. In the two treadmill-based conditions, users were able to walk, accelerate, decelerate, and stop in the virtual environment, thus receiving physical input including optic flow, as well as kinesthetic and translational vestibular information.

INSERT FIGURE 1

The treadmill condition with Rotational Movement Action (RMA) also added rotational vestibular information. In the RMA condition, the subject walked on the treadmill and was informed that his/her point of view in the VE would be controlled by head rotation. Head rotation movements were captured by means of a head band with three little balls (forming a triangle), which reflected infrared light (analyzed by 12 OPTITRACK video-cameras, Motion point™). Motion capture was processed in real time: when a subject turned his/her head, the system updated the visual optic flow at a rate correlated with the head movement rotation angle (the greater the rotation angle, the faster the modification in rotational optic flow, reflecting natural head movements). The treadmill condition without RMA was the same as the condition with RMA, except that subject was informed that the interface did not allow for any rotational movement control.

In both joystick conditions (with and without RMA), movement was controlled by a Saitek™ X52 Flight System. In the two joystick conditions, forward speed, ranging from 0 to 6 km/h, was proportional to the pressure on the device, which was also used to control translational movement. Consequently, the joystick conditions differed from the treadmill conditions in providing no vestibular information. The RMA joystick condition added horizontal joystick movements, coupled to changes in rotational optic flow to simulate turning

in the VE to mimic direction changes during walking. Turning speed was proportional to the magnitude of horizontal joystick movement, similar to natural head movement. In contrast, in the "no RMA" condition, subjects were informed that horizontal movement was not available and turning at intersections would be automatic. Apart from the fact that, in the RMA condition, subjects had access to horizontal rotation, but not in the "non-RMA condition", the two joystick conditions offered the same body based-information, including translational and rotational optic flow and kinesthetic information.

Procedure

Each participant completed a three-phase procedure: (1) spatial ability tests, to assess the subject's characteristics (see above); (2) learning phase: the route-learning task under one of the five conditions (real vs. four virtual conditions); (3) restitution phase, consisting of six spatial knowledge-based tasks.

- *Learning phase* - Route learning under real conditions was the baseline, providing referential performance by learning a real route in an urban environment (Waller et al., 1998). The participants walked at their own speed, were instructed which direction to take at each corner, and were free to explore their surroundings visually (head and eye movements). Route learning in the VE was similar to the real condition except for the interface (Treadmill with RMA vs. Treadmill without RMA vs. Joystick with RMA vs. Joystick without RMA). In the two RMA conditions (treadmill and joystick), the directions were indicated verbally by an experimenter situated behind the participant. Position, time, and interactions (acceleration, deceleration, turning left and right, and collisions) were stored on the computer throughout the experiment for VE.

The initial training phase was considered to be completed when the participant was able to use the interface successfully in tasks assessing the sequential manipulation of the interface in another VE. In addition, after VR exposure, the participants completed a simplified simulator sickness questionnaire (SSQ) (Kennedy, Lane, Berbaum, & Lilienthal,

1993) to measure the negative side effects of being immersed in graphically-rendered virtual worlds.

Path learning software was developed to analyze the subject's position and time data in VE or in the real condition, to ensure the similarity of path learning in real and virtual conditions (Figure 2). In the real-world condition, learning data was acquired using a Magellan™ GPS CrossOver, as well as a video recorded using an AIPTEK™ mini Pocket DV8900 camera mounted on a bicycle helmet worn by the subject.

The software computed the learning speed, expressed in Km/h.

INSERT FIGURE 2

- *Restitution phase* - Six tasks were performed by each subject, in an order counterbalanced across subjects.

Egocentric photograph classification task: twelve real photographs of intersections were presented to the participants in a random order. Subjects were required to arrange the photographs in chronological order along the path they had learned. The time limit for this task was ten minutes. The results were scored as follows: one point for a photo in the correct position and 0.5 point for each photo in a correct sequence, but not correctly placed along the path (e.g., positioning photos 4-5-6 in the right order but not placing them correctly in the overall sequence earned 1.5points). This paper-pencil task assessed the subjects' ability to recall landmarks and route knowledge within an egocentric framework (Wallet et al., 2010, 2011; Aguirre, & D'Esposito , 1999).

Egocentric distance estimation task: Each participant was asked to give a verbal estimate the distance walked (in meters) and the figure was noted by the experimenter. There are many methods for recording and analyzing distance estimate data (Montello, 1991). The one used in the present study quantified the participants' knowledge of the distances walked between the

starting and ending points, which is known to be accurate when participants have acquired well-developed route knowledge (Waller et al., 1998; Barlow, 2001).

Egocentric directional estimation task: This task was computer-based and consisted of presenting a series of twelve real photographs of intersections, taken from a walker's perspective, in random order. Each photograph was displayed at the top of the screen, above an 8-point compass. The participant was instructed to select the compass direction in which they were facing on the learned path when the photograph was taken. The angular error was averaged. Directional estimates are expected to be accurate when participants have acquired well-developed route knowledge.

Allocentric sketch-mapping task: Participants were required to draw a freehand sketch of the visualized route. The time limit for this task was ten minutes and one point was scored for each correct change of direction. This paper-pencil task is known to measure survey knowledge (Waller et al., 2010; 2011; Morganti, Carassa, & Geminiani, 2007).

Allocentric point starting estimation task. This computer-based task consisted of presenting a series of twelve real photographs of intersections, taken from a walker's point of view, in random order. Each photograph was displayed at the top of the screen, above an 8-point compass. For each photograph, the participant was instructed to select the compass direction of the starting point of the learned path. The number of angular errors was averaged. These direction estimates are expected to be accurate when participants have memorized a well-developed, map-like representation of the walked environment, which enables them to identify the intersection presented, locate it on the route, and consider the viewpoint presented (Ruddle et al., 2011a; Iachini & Logie, 2003). This task measures survey knowledge.

Real wayfinding task consisted of reproducing the learned path in real conditions. Direction errors were calculated and expressed in percentages (with a maximum error score of 13). When a participant made a mistake, s/he was stopped and invited to turn in the right direction. This wayfinding task may be considered a naturalistic assessment of navigational abilities

based on the use of landmarks, as well as route and survey knowledge (Wallet et al., 2011). In addition, restitution path software was developed to analyze the subject's position and time data, in order to measure restitution speed (like the learning software, a Magellan GPS CrossOver and helmet-mounted video camera were used for data capture).

Dependent measurements and statistical analyses: As the main aim of the study was to compare the performance of the four virtual learning interfaces in developing real learning, all the measurements for each of the four virtual conditions were transformed into z score to normalize the virtual data according to the referential performance in the real condition, as follows: $(X - M_{\text{real}}) / \sigma_{\text{real}}$ where X is the dependent variable value for each subject in a given virtual condition, M_{real} and σ_{rea} are the mean and standard deviation values, respectively, for dependent variables in the (real) baseline condition. This z transformation quantifies the performance deviations in each virtual condition from the mean performance in the real condition, as follows: a positive z value indicated that the performance score in the virtual condition was higher than the Real Group (and inversely for negative scores).

Each of the dependent measurements (learning speed score and restitution scores) was subjected to an ANOVA [2 (interactors: Treadmill Vs Joystick) x 2 (Rotational Movement Action: With VS Without)] analysis, with between-subject measures for each factor. The Fisher procedure was used for post-hoc comparisons ($p < .05$).

In addition, Bravais-Pearson correlation coefficients were used to evaluate possible relationships between learning speed and each of the restitution scores (Table4).

RESULTS

Speed during learning phase: Z scores were globally positive, indicating that speed during the learning phase was significantly faster in VR ($|z| > 2$) than in the control condition (Table 3). The ANOVA analysis revealed a significant effect of interactors [$F(1,68) = 114,488$; $p < 0,0001$], with higher speeds during the learning phase in joystick conditions compared to

the treadmill. In addition, RMA had no significant effect ($p>.900$), but the two-way interaction ("Interface x RMA") was significant [$F(1,68)=13,342$; $p<0,001$]. This indicated that the difference in speed during the learning phase between Joystick and treadmill conditions was even greater without RMA than with RMA. The post-hoc comparisons revealed that there were significant speed differences among all VR learning conditions: speeds in joystick condition were higher than in treadmill condition, but RMA in joystick condition induced a speed decrease, whereas speed was higher on the treadmill with RMA than without (Figure 3).

INSERT TABLE 3 / INSERT

FIGURE 3

Egocentric photograph classification task: Globally, z scores in VR conditions were similar to those in the real condition ($|z|<1$). The ANOVA revealed no significant effect (Interactor effect, $p>0.600$; RMA effect, $p>0.700$; and "interactor x RMA" effect, $p>0.400$), indicating similar performance in all four experimental VR conditions (Table 3).

Egocentric distance estimation task: The mean z scores in the VR conditions were similar to those in the real condition ($|z|<1$). The ANOVA revealed a significant effect for each factor [Interactor effect, $F(1,68)=4,801$; $p<0.05$; RMA effect, $F(1,68)=12,28$; $p<0.001$], with the Joystick groups overestimating distances compared to the treadmill groups and the groups with RMA overestimating distances compared to those without (Table 3). In addition, the two-way interaction effect was significant [$F(1,68)=4,44$; $p<0.05$]. The post-hoc comparisons indicated that distances were only overestimated in the Joystick with RMA condition compared to the other VR conditions (Figure 4).

INSERT FIGURE 4

Egocentric direction estimation task: The mean z scores in the VR conditions were similar to those in the real condition ($|z| < 1$). The ANOVA for mean angular error revealed that the two effects taken separately were not significant (Interactor effect, $p > 0.800$; RMA effect, $p > 0.800$), but the two-way interaction was significant [$F(1,68) = 4,026$; $p < 0.05$] (Table 3). Estimated direction estimates were more accurate in the Joystick without RMA and Treadmill with RMA than the two other VR conditions (i.e., Joystick with RMA and Treadmill without RMA) (Figure 5).

INSERT FIGURE 5

Allocentric Sketch mapping task: The mean z scores in the VR conditions were similar to those in the real condition ($|z| < 1$) (Table 3). The ANOVA did not reveal any significant effects for the interactor or RMA factors (respectively, $p > 0.800$; $p > 0.300$; two-way interaction effect, $p > 0.100$). The performance on this task did not reveal any differences among the four experimental VR conditions (Table 3).

Allocentric starting point estimation task: The z scores in the VR conditions were similar to those in the real condition ($|z| < 1$). The only significant interactor effect [$F(1,68) = 4,356$; $p < 0.05$] revealed by ANOVA was that the two Joystick conditions resulted in poorer performance than the two treadmill conditions. No other effects were significant (RMA effect, $p > 0.200$; two-way interaction effect, $p > 0.800$).

Wayfinding task (speed and direction error measurements): Analysis of the mean z scores for the speed measurements indicated that the speeds in both RMA conditions (treadmill and joystick) were similar to those in the real condition ($|z| < 1$) whereas speeds in the two conditions without RMA were slower than the real condition ($|z| > 1$). This was confirmed by the ANOVA results, revealing a significant effect for RMA [$F(1,68) = 4,206$; $p < 0.05$], i.e., the group with RMA performed better than the one without RMA but less well than the control

condition. No other difference was found (interactor effect, $p>0.800$; two way-interaction, $p>0.900$).

For the direction error measurements, analysis of the mean z scores indicated that some VR learning conditions achieved similar scores to those in the real condition ($|z|<1$), while others were poorer ($|z|>1$). This was also confirmed by the ANOVA results, revealing a significant a two-way interaction [$F(1,68)=4.019$; $p<0.05$]. Analysis of the means revealed that the best performance occurred in the Treadmill with RMA condition. Post-hoc comparisons showed that performance was better in the treadmill with RMA than without RMA condition (Figure 6). Other simple effects were not significant (interactor effect, $p>0.800$; RMA effect, $p>0.300$).

INSERT FIGURE 6 / INSERT

Table 4

To summarize: first, the learning speed was higher in the joystick conditions, particularly without RMA. Second, the effects of interactors and RMA factors differed according to the restitution scores. Specifically, the main results were as follows:

- The best egocentric estimates of total distance were obtained with treadmill learning and without RMA conditions; in addition, the poorest estimates were given in the joystick with RMA condition;
- The best egocentric angular directions estimates were given in the Treadmill with RMA and Joystick without RMA conditions;
- The best allocentric starting point estimates were obtained in treadmill conditions, irrespective of RMA;
- On the wayfinding task, the best performance in terms of direction errors was obtained in the treadmill with RMA condition and restitution speed was higher in both conditions with RMA (Treadmill and joystick).

In addition, no significant correlation was observed between learning speed measurements and overall restitution scores.

DISCUSSION

This research investigated the influence of both physical engagement and rotational movement action (RMA) effects, focusing on spatial knowledge transfer from virtual to real environments, by measuring performance in egocentric vs. allocentric tasks. This was achieved by manipulating the impact of walking interfaces known to involve extensive (unidirectional treadmill) or minor physical engagement (joystick). We also investigated the role of active turning to capture the possible role of rotational vestibular information in physical engagement. The results are discussed in terms of physical engagement, translational and rotational vestibular influences, and spatial representation, as well as relationships between cognitive and sensorimotor processes.

Physical engagement and translational vestibular influence on VR transfer of spatial learning (treadmill vs. joystick)

The physical engagement effect was inferred by comparing the treadmill and joystick conditions without RMA as translational walking metaphors. These two conditions mainly differ in terms of body-based information, with the treadmill offering more translational vestibular information than the joystick condition.

Our results showed that the treadmill induced more accurate estimates of egocentric distance and allocentric starting point compared to the joystick conditions. Thus, our findings concerning egocentric distance estimates confirmed by Waller and Richardson's (2008) assumption that body-based information during VE interaction had a major impact on the accuracy of subsequent egocentric distance estimates, due to the inseparable complementarity of perception and action in developing an egocentric representation of a route (*e.g.*, Gibson,

1979; Hommel et al., 2001; Warren, 2006). This also supported previous results, indicating that translational vestibular information affected the ability to update egocentric spatial information (Chance, Beall, & Loomis, 1998). Moreover, the observation that the treadmill condition gave the most accurate allocentric estimates (i.e., task starting point) is consistent with the report by Ruddle et al. (2009; 2011b) that physical engagement induced by treadmill and walking had a beneficial impact on allocentric estimates that rely on good development of the subject's cognitive map. Thus, our findings confirmed that body-based information provided by the Treadmill condition (i.e. translational vestibular information) enhanced the learning of egocentric distance and configurational route knowledge. In fact, the treadmill induced better spatial learning than the joystick condition. Consequently, our findings provided a direct evidence of the benefits of extensive physical engagement on both egocentric and allocentric representations. In other words, the translational vestibular information provided by the treadmill condition probably facilitates the development of the three levels of spatial knowledge, according to the L-R-S model (Siegel & White, 1975). One hypothesis could be that the treadmill's benefit in spatial learning was related to learning speed (lower speed in treadmill than joystick conditions) but no correlations were identified between learning speed in VR and spatial restitution measurements. Thus, exposure time due to learning speed cannot be considered the only explanation of the treadmill's positive impact on spatial learning. In addition, other egocentric and allocentric representation measurements (in the photograph classification and sketch mapping tasks, respectively) did not reveal any differences between the two interactor conditions. This indicated that the benefits of physical engagement on the treadmill did not apply to all types of egocentric and allocentric measurements. In fact, spatial knowledge tasks requiring estimation were more sensitive to physical engagement than other tasks (photo classification and sketch mapping). Further investigation is required to clarify this point.

As described above, these initial results comparing treadmill vs. joystick control revealed differences in spatial learning from VE according to the walking metaphor used. This suggested that the specific perception-action coupling involved in each interface condition affected the quality of spatial learning. The superiority of treadmill over Joystick indicated that more physical engagement enhanced translational vestibular information, thus rendering spatial learning in VE more efficient, as measured by the accuracy of egocentric and allocentric representations.

In light of two-component models of navigation, i.e., the graph approach, including the cognitive vs. sensorimotor component distinction (Mallot & Gillner, 2000), the treadmill's superiority for spatial learning in VE may be assumed to result from an enriched dialogue between the two components, thanks to greater physical engagement. In contrast, less efficient spatial learning with the joystick may be interpreted as resulting from poor dialogue between the two components, due to a lack of body-based information and/or the failure of the cognitive component to manage the physical information provided by joystick movements.

Translational and rotational vestibular influence on VR transfer of spatial learning (two-way interaction effects between Interactor and RMA)

To capture the influence of both translational and rotational vestibular information on spatial learning from VE, we focused on the two-way interaction between the interactor and the RMA factor. To recapitulate, translational and rotational vestibular information was only provided by the treadmill condition with RMA. In contrast, both joystick conditions (with and without RMA) provided little or no rotational vestibular information.

Two-way interaction effects were observed on two measurements related to egocentric representations (i.e., distance and angular direction estimates) as well as the navigational measurement (i.e. direction errors in the wayfinding task), but not on measurements related to

allocentric representations (i.e., starting point estimates and sketch mapping scores). In other words, egocentric and navigational measurements were sensitive to additional vestibular rotational information, whereas allocentric measures were not. This corroborates the study by Ruddle et al (2011b), showing that vestibular rotational-based information, on its own, had no effect on allocentric estimates produced after VR exposure in the treadmill condition. The lack of effect of vestibular rotational information on allocentric measurements is in accord with the report by Ruddle and Péruch (2004) that the rotational component is likely to be negligible for tasks mainly driven by allocentric spatial representation.

Specifically, in the treadmill conditions, the RMA condition produced the best egocentric angular direction estimates, as well as the lowest direction error score in the wayfinding. Grant & Magee (1998) previously demonstrated that people performed better on wayfinding tasks in the real world if they had previously been exposed to VE using a walking interface rather than a joystick. Nevertheless, as rotational movement actions (RMA) were not controlled in their study, the superiority of walking interface over joystick may have been induced by freedom of RMA rather than the physical engagement provided by the treadmill, as demonstrated in our study.

More importantly, our study offered the first evidence that vestibular rotational information in treadmill conditions favored the development of more accurate egocentric representations, which, in turn, promoted a more efficient virtual-real transfer of spatial knowledge, resulting in a better performance on the navigational task in real conditions. So, in light of two-component models (i.e., cognitive vs. sensorimotor components, e.g., Mallot & Gillner, 2000), the more accurate egocentric representations observed in the treadmill + RMA condition may be interpreted as the result of an enriched dialogue between the cognitive and the sensorimotor components, thanks to available vestibular rotational information. Also, the relationship between the accuracy of egocentric representations and wayfinding performance is not actually surprising. Several studies have already shown that wayfinding performance is

closely related to the development of both ego- and allocentric representations (Lambrey et al, 2003; Wallet et al., 2008; 2009; 2010; 2011). Nevertheless, recent findings by our research team (Wallet, Sauzéon, Larrue, & NKaoua, submitted) revealed that the relationship between wayfinding performance and ego-and allocentric representations were strongly mediated by the viewpoint from which the virtual environment is displayed. Specifically, with an egocentric viewpoint, as in the present study, wayfinding performance was strongly related to the accuracy of egocentric measurements, whereas when an allocentric viewpoint (at 4 meters) was used, wayfinding performance was strongly related to the accuracy of allocentric measurements. To account for these results, we hypothesized that the viewpoint modality had a direct influence on the nature of the spatial knowledge developed: the fact that spatial survey information is not directly available in a VE seen from an egocentric viewpoint favors spatial knowledge development based on serial processes from egocentric to allocentric knowledge (as originally described by Siegel and White);. In contrast, when survey information is available from an allocentric viewpoint, this favors spatial knowledge development based on parallel processes where egocentric and allocentric knowledge are built simultaneously (as recently described by Ishikawa & Montello, 2006). Thus, we assume that, when learning is presented from an egocentric viewpoint, wayfinding performance depends on the accuracy of egocentric representations, whereas it depends on allocentric representations when learning is presented from an allocentric viewpoint. According to this assumption, the benefits of the treadmill with RMA condition on two egocentric estimates (i.e., distance and angular direction), as well as wayfinding measurement (i.e. direction errors), is directly attributable to the egocentric viewpoint adopted during the learning phase. This means that the vestibular rotational information in the treadmill conditions favors the development of more accurate egocentric representations, in a serial process that reinforces the relationship between egocentric representations and accurate wayfinding performance. When an allocentric viewpoint is adopted during learning, is this type of reinforced

relationships due to enriched vestibular information afforded by the treadmill condition with RMA is unlikely to occur. This hypothesis requires further investigations to clarify the role of vestibular information in spatial knowledge development, in terms of serial and parallel processes.

Unexpectedly, other two-way interaction effects were also observed in the joystick conditions. Indeed, in the joystick interface conditions, the poorest egocentric estimates of both total distance and angular directions occurred with RMA. It is difficult to interpret these findings, due to a lack of spatial learning studies focusing on the RMA effect within the joystick interface. However, one hypothesis is that vertical and horizontal hand movements do not provide adequate metaphors of translational and rotational displacements to implement a dialogue between the cognitive and sensorimotor systems that contribute to spatial learning. This challenges the debate on the possible advantage of active navigation with a joystick (compared to simple observation), where some studies detected a benefit for spatial learning performances (Peruch et al., 1995; Carassa, Geminiani, Morganti, Varotto, 2003; Wallet et al., 2011; Waller et al., 1998; Ruddle et al., 2011b) but others did not (Wilson et al., 1997; Wilson, 1999; Wilson, & Peruch, 2002). Indeed, subjects in the joystick without RMA condition produced better egocentric estimates (i.e., distance and angular direction) compared to the same interface with RMA. Thus, translational displacement with the joystick facilitated the production of more accurate egocentric estimates. Consequently, the joystick interface may offer an advantage for spatial learning under certain circumstances (translational control), but not others (translational and rotational controls). Further investigation is required to elucidate the reasons for this effect, in order to design more effective VR-based spatial learning applications. It should be noted that, for example, joystick interfaces are more widely used than treadmills, since they are less expensive, easier to implement from a technological standpoint, and also often adapted to the user's needs, notably for people with mobility issues, like the elderly, patients with Parkinson's or Alzheimer's diseases, or people with

sensorimotor injuries (McGee et al., 2000; Rizzo, Schultheis, Kerns, & Mateer, C. 2004; Skelton, Bukach, Laurance, Thomas, & Jacobs, 2000; Lloyd, Powell, Smith, & Persaud, 2006). Therefore, clarifying the impact of joystick use represents a major research challenge and is essential to resolve fundamental issues for clinical neuropsychological applications.

From these overall findings, during translational displacements in treadmill conditions, extensive physical engagement increased the accuracy of both egocentric and allocentric estimates (compared to joystick interface conditions). Also, adding rotational vestibular information in treadmill conditions selectively enhanced egocentric estimates and led to a more efficient virtual-real transfer of spatial learning in a wayfinding task. Thus, the walking activity implemented in the treadmill condition with RMA was particularly useful in facilitating the subsequent use of egocentric representations to perform navigation tasks efficiently under natural conditions.

Taken together, these findings agree with those of Ruddle et al. (2011b) and Carassa et al. (2003), stating that physical engagement favors the development of accurate allocentric representations or cognitive mapping. Furthermore, these results also emphasized the role of physical engagement in developing accurate egocentric representations, used subsequently to implement efficient navigational strategies that enhanced wayfinding performance in real walking conditions. These experimental findings confirm theoretical approaches such as the graph framework (Mallot & Gillner, 2000), highlighting the fundamental role played by physical action in spatial learning, thus reinforcing the underlying dialogue between sensorimotor and cognitive components. Obviously, as VR is being promoted as a medium for spatial learning further research should be devoted to elucidating interface-related motor activity.

Table 1

Experimental design summary of interface conditions based on the three main classes of body-based information (optic flow, kinesthetic and vestibular information) according to Ruddle et al., 2011b.

Interfaces Body-Based Information			Treadmill		Joystick	
			With RMA	Without RMA	With RMA	Without RMA
Optic Flow	Translational Optic Flow					
	Rotational Optic Flow					
Kinesthetic Information	Kinesthetic Information					
	Vestibular information	Translational Vestibular Information				
Rotational Vestibular Information						

Notes: The contoured line corresponds to the Treadmill vs. Joystick comparison (with vs. without translational vestibular information). The contoured column corresponds to the "with vs. without RMA" comparison in treadmill condition (with vs. without rotational vestibular information).

Table 2
 Characteristics and spatial test ability results for each VR condition.

Interactors	Reality Acquisition		VR-Based Acquisition							
			Treadmill				Joystick			
	RMA		With RMA	Without RMA	With RMA	Without RMA	With RMA	Without RMA	With RMA	Without RMA
Name	G5 (Baseline)		G1	G2	G3	G4				
Gender (Men/Women)	10 /10		9 /9	9 /9	9 /9	9 /9				
Video Games (Gamers/Non Gamers)	10 /10		9 /9	10 /8	9 /9	9 /9				
	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
Age	22.30	2.81	22.61	3.23	23.83	3.31	21.88	2.19	23.00	3.69
Spatial Abilities										
GZ-5	22.23	10.47	18.68	9.74	23.51	9.01	25.84	12.92	22.81	9.26
Mental Rotation Test	20.60	9.68	22.27	6.91	19.38	8.93	21.83	5.92	21.50	8.39
Corsi's Cube (general)	18.45	2.89	18.55	2.20	18.38	2.89	18.11	1.60	17.44	2.45
Corsi's Cube (direct)	9.25	1.80	9.55	1.542	9.33	1.74	9.22	1.06	8.72	1.90
Corsi's Cube (indirect)	9.20	1.70	9.00	1.18	9.05	1.51	8.88	1.53	8.72	1.17

Table 3

Mean performance and standard deviation in terms of learning speed and restitution scores for each VR learning condition, taking interactor and RMA factors into account.

	Interfaces		Treadmill				Joystick			
			With RMA		Without RMA		With RMA		Without RMA	
	Restitution tasks	Score	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD
Learning phase	Learning phase	Z Score Mean Speed	4.51	1.77	2.79	2.80	7.89	2.03	9.68	1.21
	Egocentric Photograph classification task	Z Score	-0.71	0.80	-0.94	0.77	-0.78	0.82	-0.67	0.96
Restitution tasks - Z Score	Egocentric Distance estimation task	Z Score Distance	0.07	0.79	-0.19	0.65	0.91	0.86	-0.18	0.97
	Egocentric Direction estimations Task	Z Score Mean angular error	-0.36	0.78	-0.06	0.55	-0.09	0.60	-0.38	0.50
	Allocentric Sketch mapping task	Z Score	-0.17	0.87	-0.31	1.09	-0.61	1.34	0.03	0.97
	Allocentric starting point estimation task	Z Score Mean angular error	-0.09	0.51	0.13	0.84	0.28	0.70	0.44	0.68
	Wayfinding Task	Z Score Mean Speed	-0.62	1.29	-1.10	0.93	-0.56	1.45	-1.13	0.68
Z Score Percentage Error		0.40	0.86	1.22	1.60	1.03	1.25	0.71	0.94	

Table 4

Relationship between learning speed and restitution score (Table 4): correlation analyses revealed that the learning speed measurement was not significantly correlated with any of the restitution scores.

Restitution Tasks	Score	p	Correlation
Egocentric Photograph classification task	Z Score	0.40	0.10
Egocentric Distance estimation task	Z Score Distance	0.65	0.05
Egocentric Direction estimations task:	Z Score Mean angular error	0.18	-0.16
Allocentric Sketch mapping task	Z Score	0.86	0.02
Allocentric point starting estimation task	Z Score Mean angular error	0.07	0.21
Wayfinding task	Z Score Mean Speed	0.45	0.08
	Z Score Percentage Error	0.39	0.10

Figure 1
Characteristics of interactions with the Treadmill

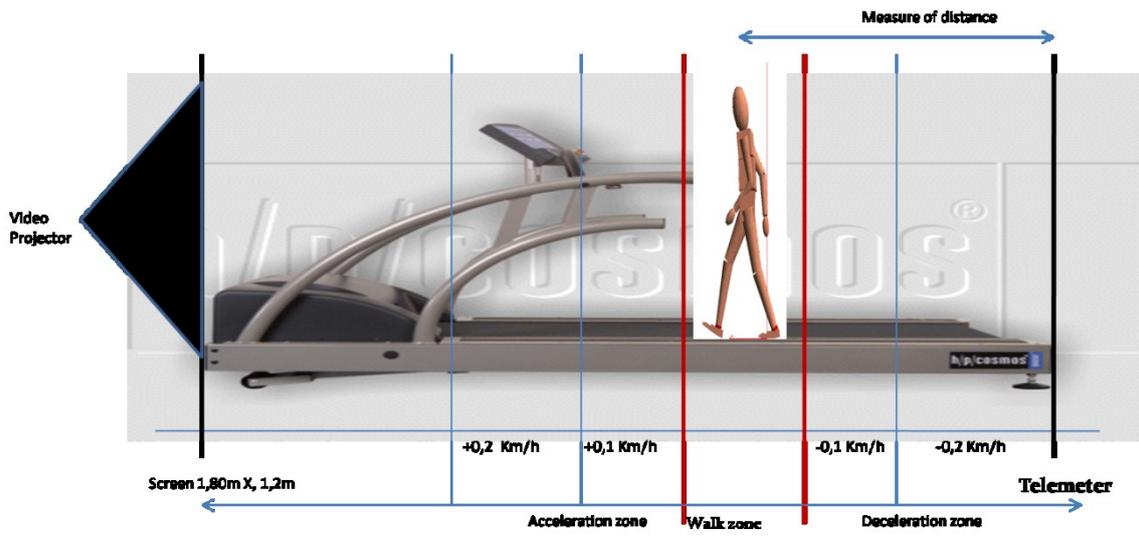


Figure 2

Screen capture of learning path software; the left panel replays the path in real and VR conditions (top), together with the position and time data (bottom); the right panel provides an overview of the performed path as a function of time.

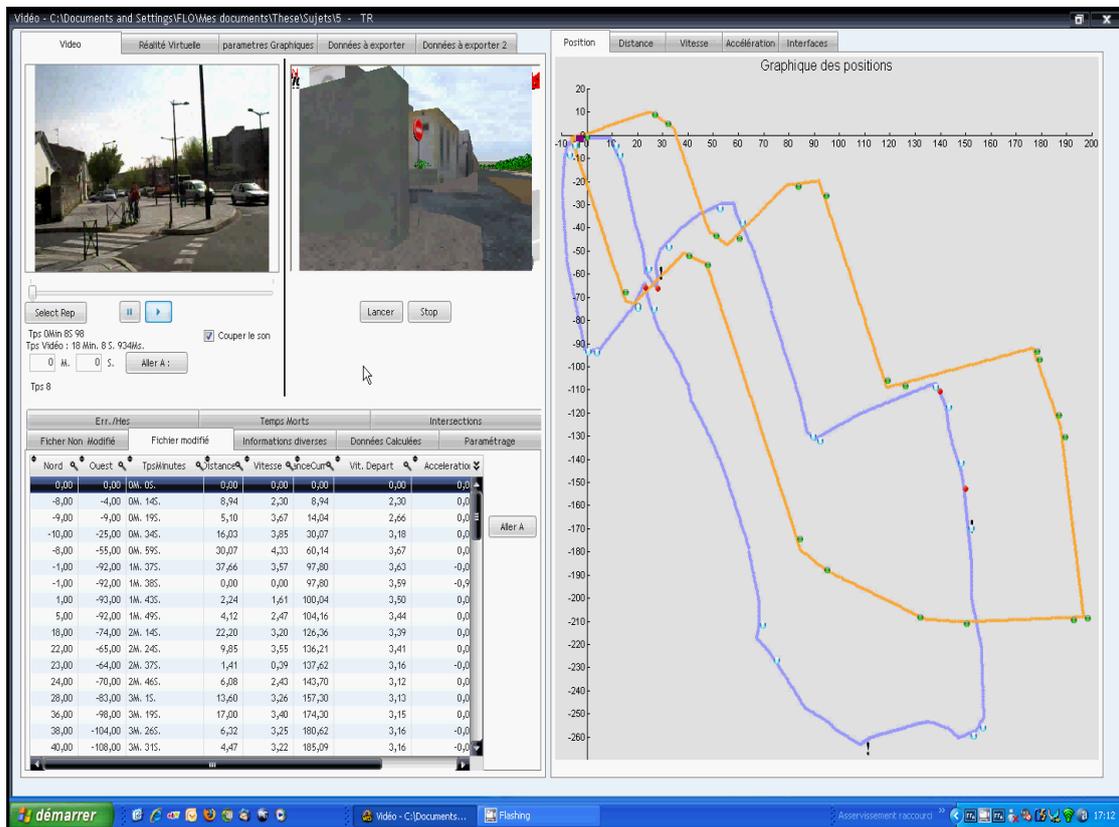
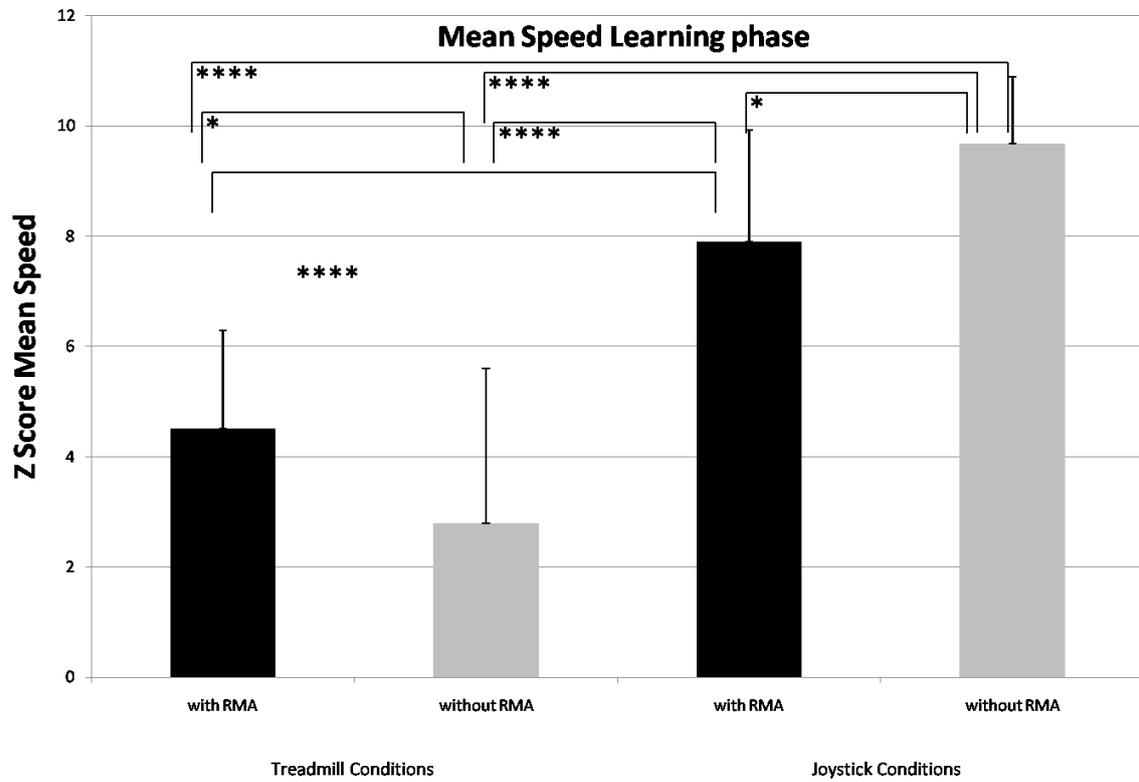


Figure 3

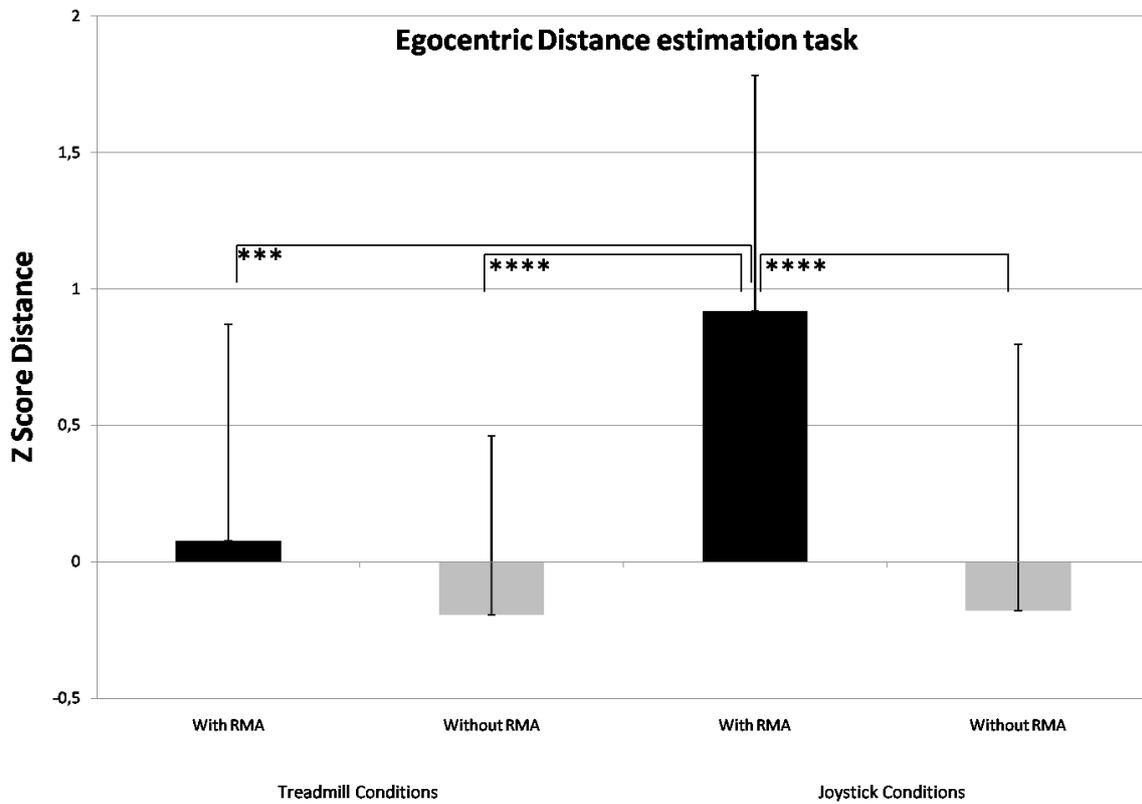
Z Score means and standard deviations for the learning phase, taking interactors and RMA conditions into account.



Note: For Post-Hoc comparison, **** p<0,0001; *** p<0,001; ** p<0,01; * p<0,05

Figure 4

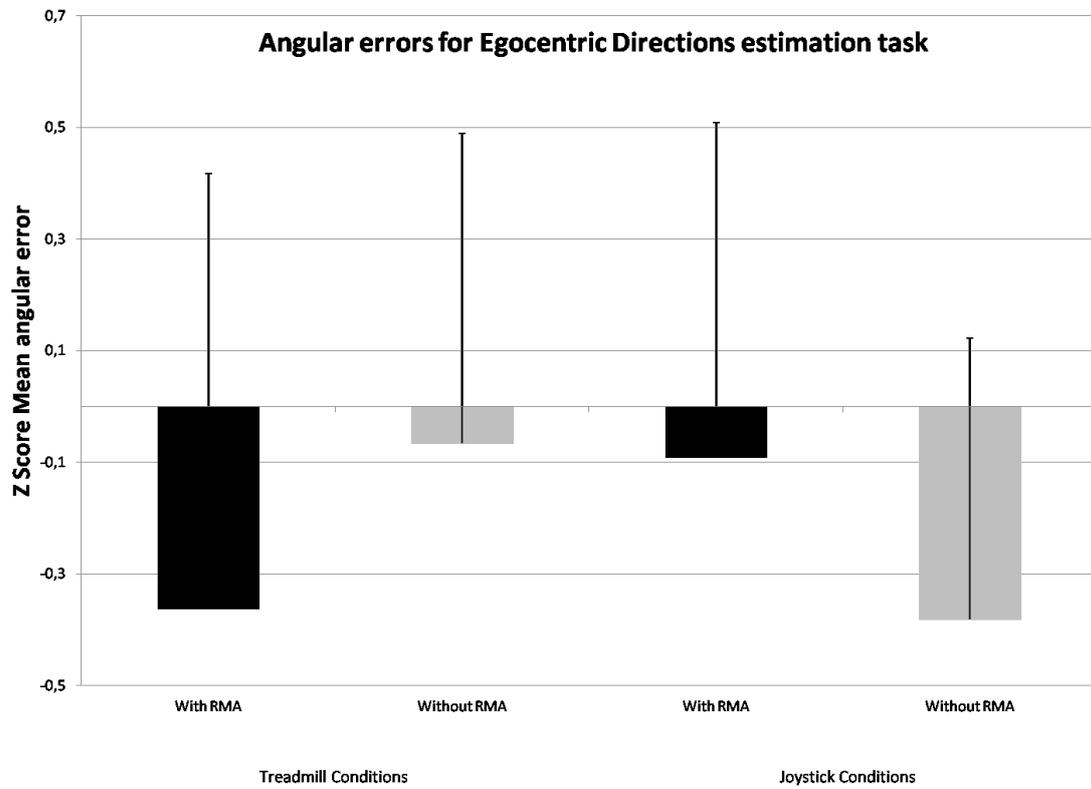
Z Score means and standard deviations for egocentric distance estimates, taking interactors and RMA conditions into account.



Note: For Post-Hoc comparison, **** p<0,0001; *** p<0,001; ** p<0,01; * p<0,05

Figure 5

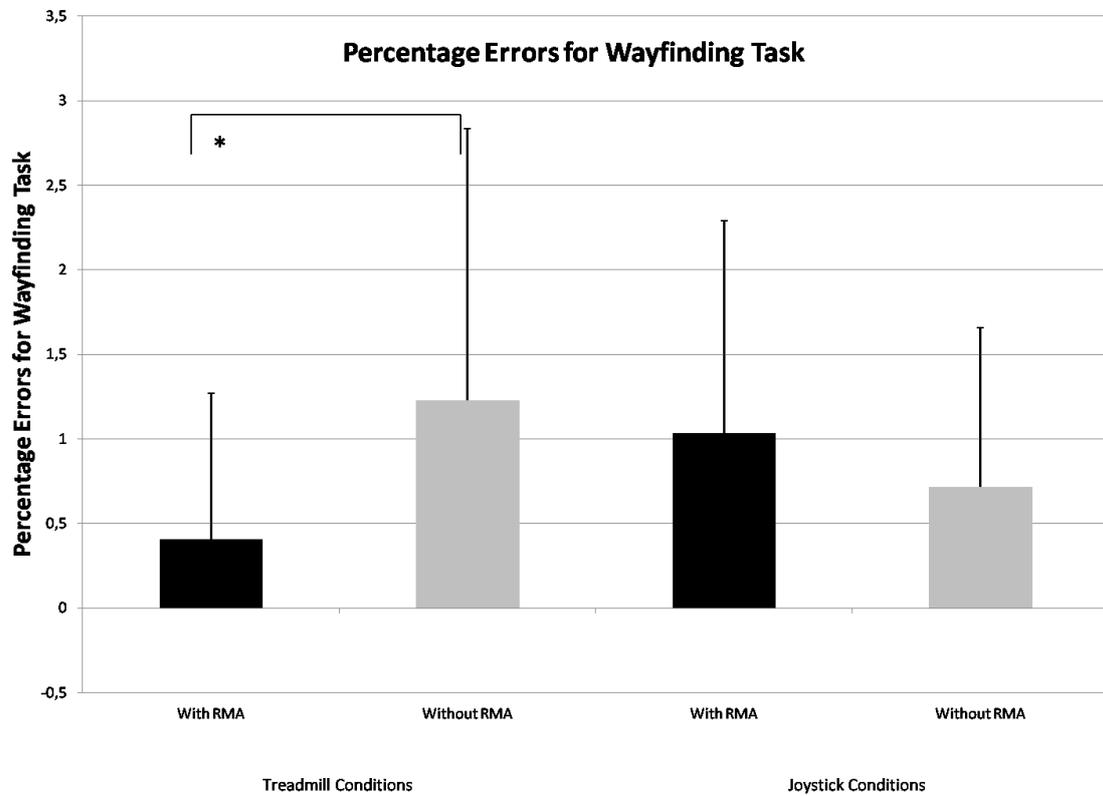
Z Score means and standard deviations for mean angular error of egocentric direction estimates, taking interactors and RMA conditions into account.



Note: For Post-Hoc comparison, **** $p < 0,0001$; *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$

Figure 6

Z-Score means and standard deviations for percentage error in Wayfinding Task, taking interactors and RMA conditions into account



Note: For Post-Hoc comparison, **** p<0,0001; *** p<0,001; ** p<0,01; * p<0,05

Bibliography

- Aguirre, G. K., & D'Esposito, M. (1999). Topographical disorientation: a synthesis and taxonomy. *Brain: a journal of neurology*, *122 (Pt 9)*, 1613-28.
- Banton, T., Stefanucci, J., Durgin, F., Fass, A., & Proffitt, D. (2005). The Perception of Walking Speed in a Virtual Environment. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, *14(4)*, 394-406. doi:10.1162/105474605774785262
- Bardy, B. G. (2006). Perception et régulation du mouvement humain : plaidoyer pour une biologie physique. *Journal de la Société de Biologie*, *200(2)*, 135-143. doi:10.1051/jbio:2006016
- Barlow, T. (2001). Acquisition of Route Knowledge Through Navigation in a Virtual Environment. *International Journal of Cognitive Ergonomics*, *5(3)*, 279-295. doi:10.1207/S15327566IJCE0503_9
- Bossard, C., Kermarrec, G., Buche, C., & Tisseau, J. (2008). Transfer of learning in virtual environments: a new challenge? *Virtual Reality*, *12(3)*, 151-161. doi:10.1007/s10055-008-0093-y
- Bowman, D. (1999). Formalizing the Design, Evaluation, and Application of Interaction Techniques for Immersive Virtual Environments. *Journal of Visual Languages & Computing*, *10(1)*, 37-53. doi:10.1006/jvlc.1998.0111
- Brooks, B. (1999). Route Learning in a Case of Amnesia: A Preliminary Investigation into the Efficacy of Training in a Virtual Environment. *Neuropsychological Rehabilitation*, *9(1)*, 63-76. doi:10.1080/713755589
- Carassa, A., Geminiani, G., Morganti, F., & Varotto, D. (2003). Active and passive spatial learning in a complex virtual environment: the effect of efficient exploration. *Cognitive Processing. International Quarterly of Cognitive Science*, *3-4*, 65-81.
- Chance, S. S., Gaunet, F., Beall, A. C., & Loomis, J. M. (1998). Locomotion Mode Affects the Updating of Objects Encountered During Travel: The Contribution of Vestibular and

Proprioceptive Inputs to Path Integration. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 7(2), 168-178. doi:10.1162/105474698565659

Fuchs, P., Moreau, G., Arnaldi, B., Chauffaut, A., Coquillart, S., & Donikian, S.(2006). Volume 1 L'homme et l'environnement virtuel. In P. D. L. D. Mines (Eds.), *Le Traité de la réalité virtuelle* (3rd ed.). Les Presses de l'École des mines, Paris.

Gibson, J. J. (1950). *The perception of the visual world*. Oxford England: Houghton Mifflin.

Gibson, J. (1979). *The ecological approach to visual perception*. Boston, MA US: Houghton, Mifflin and Company.

Golledge RG. (1999) Human wayfinding and cognitive maps. In *Wayfinding behavior*. Baltimore, MD: John Hopkins University Press, pp. 5–45.

Grant, S. C., & Magee, L. E. (1998). Navigation in a virtual environment using a walking interface. In S. L. Goldberg and J. A. Ehrlich (Eds.), *The Capability of Virtual Reality to Meet Military Requirements* (pp. 81-92). New York: NATO.

Guilford, J. P., & Zimmerman, W. S. (1948). The Guilford-Zimmerman Aptitude Survey. *Journal of Applied Psychology*, 32(1), 24-34. doi:10.1037/h0063610

Hegarty, M., Montello, D., Richardson, A., Ishikawa, T., & Lovelace, K. (2006). Spatial abilities at different scales: Individual differences in aptitude-test performance and spatial-layout learning. *Intelligence*, 34(2), 151-176. doi: 10.1016/j.intell.2005.09.005.

Hommel, B., Müsseler, J., Aschersleben, G., & Prinz, W. (2001). The Theory of Event Coding (TEC): A framework for perception and action planning. *Behavioral and Brain Sciences*, 24(5), 849-937.

Iachini, T., & Logie, R. H. (2003). The role of perspective in locating position in a real-world, unfamiliar environment. *Applied Cognitive Psychology*, 17(6), 715-732. doi:10.1002/acp.904

Ishikawa, T., & Montello, D. R. (2006). Spatial knowledge acquisition from direct experience in the environment: individual differences in the development of metric knowledge and the

integration of separately learned places. *Cognitive psychology*, 52(2), 93-129. doi:10.1016/j.cogpsych.2005.08.003

Kearns, M. J., Warren, W. H., Duchon, A. P., & Tarr, M. J. (2002). Path integration from optic flow and body senses in a homing task. *Perception*, 31(3), 349–374.

Kennedy, R., Lane, N., Berbaum, K., & Lilienthal, M. (1993). Simulator Sickness Questionnaire: An Enhanced Method for Quantifying Simulator Sickness. *The International Journal of Aviation Psychology*, 3(3), 203-220. doi:10.1207/s15327108ijap0303_3

Lambrey, S. (2002). Influence of a sensorimotor conflict on the memorization of a path traveled in virtual reality. *Cognitive Brain Research*, 14(1), 177-186. doi:10.1016/S0926-6410(02)00072-1

Lambrey, S., Samson, S., Dupont, S., Baulac, M., & Berthoz, A. (2003). Reference frames and cognitive strategies during navigation: is the left hippocampal formation involved in the sequential aspects of route memory? *International Congress Series*, 1250, 261-274. doi:10.1016/S0531-5131(03)00997-X

Lloyd, J., Powell, T. E., Smith, J., & Persaud, N. V. (2006). Use of a virtual-reality town for examining route-memory , and techniques for its rehabilitation in people with acquired brain injury. *Proceedings of the 6th International Disability, Virtual Reality and Associated Technologies*, (pp 175 -182), Esbjerg.

Mallot, H. A., & Gillner, S. (2000). Route navigating without place recognition: What is recognised in recognition-triggered responses? *Perception*, 29(1), 43-55. doi:10.1068/p2865

McGee, J. S., Zaag, C. van der, Buckwalter, J. G., Thiebaut, M., Van Rooyen, a, Neumann, U., et al. (2000). Issues for the Assessment of Visuospatial Skills in Older Adults Using Virtual Environment Technology. *CyberPsychology & Behavior*, 3(3), 469-482. doi:10.1089/10949310050078931.

Mohler, B. J., Thompson, W. B., Creem-Regehr, S. H., Willemsen, P., Pick, Jr., H. L., & Rieser, J. J. (2007). Calibration of locomotion resulting from visual motion in a treadmill-

based virtual environment. *ACM Transactions on Applied Perception*, 4(1), 4-es.
doi:10.1145/1227134.1227138

Montello, D. R. (1991). The measurement of cognitive distance: Methods and construct validity. *Journal of Environmental Psychology*, 11(2), 101-122. ACADEMIC PRESS LTD.

Montello, D. R. (1998). A new framework for understanding the acquisition of spatial knowledge in large-scale environments. *Spatial and temporal reasoning in geographic information systems*, 29(4), 143-154. Oxford University Press.

Morganti, F., Carassa, A., & Geminiani, G. (2007). Planning optimal paths: A simple assessment of survey spatial knowledge in virtual environments. *Computers in Human Behavior*, 23(4), 1982-1996. doi:10.1016/j.chb.2006.02.006

Peters, M., Laeng, B., Latham, K., Jackson, M., Zaiyouna, R., & Richardson, C. (1995). A redrawn Vandenberg and Kuse mental rotations test: different versions and factors that affect performance. *Brain and cognition*, 28(1), 39-58. doi:10.1006/brcg.1995.1032

Péruch, P., Vercher, J., & Gauthier, G. M. (1995). Acquisition of Spatial Knowledge Through Visual Exploration of Simulated Environments. *Ecological Psychology*, 7(1), 1.

Péruch, P., & Wilson, P. N. (2004). Active versus passive learning and testing in a complex outside built environment. *Cognitive Processing*, 5(4), 218-227. doi:10.1007/s10339-004-0027-x

Pick, H.L.J., & Lockman, J.J. (1981) From frames of reference to spatial representations. In Liben, L.S., Patterson, A.H., Newcombe, N., (Eds) *Spatial representation and behavior across the life span*, (pp. 39-61). New York: Academic Press.

Presson, C. C., DeLange, N., & Hazelrigg, M. D. (1989). Orientation specificity in spatial memory: What makes a path different from a map of the path? *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 15(5), 887-897. doi:10.1037/0278-7393.15.5.887

- Rizzo, A. A., & Buckwalter, J. G. (1997). Virtual reality and cognitive assessment and rehabilitation: the state of the art. *Studies in health technology and informatics*, 44, 123-45.
- Rizzo, A., Schultheis, M., Kerns, K., & Mateer, C. (2004). Analysis of assets for virtual reality applications in neuropsychology. *Neuropsychological Rehabilitation*, 14(1), 207-239. doi:10.1080/09602010343000183
- Ruddle, R. A., Payne, S. J., & Jones, D. M. (1997). Navigating buildings in "desk-top" virtual environments: Experimental investigations using extended navigational experience. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 3(2), 143-159. doi:10.1037/1076-898X.3.2.143
- Ruddle, R. A., & Péruch, P. (2004). Effects of proprioceptive feedback and environmental characteristics on spatial learning in virtual environments. *International Journal of Human-Computer Studies*, 60(3), 299-306. doi:10.1016/j.ijhcs.2003.10.001
- Ruddle, R. A., & Lessels, S. (2009). The benefits of using a walking interface to navigate virtual environments. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, 16(1), doi:10.1145/1502800.1502805
- Ruddle, R. A., Volkova, E., Mohler, B., & Bühlhoff, H. H. (2011a). The effect of landmark and body-based sensory information on route knowledge. *Memory & Cognition*, 39(4), 686-699. doi:10.3758/s13421-010-0054-z
- Ruddle, R. A., Volkova, E., & Bühlhoff, H. H. (2011b). Walking improves your cognitive map in environments that are large-scale and large in extent. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, 18(2), 1-20. doi:10.1145/1970378.1970384
- Siegel, A. W., & White, S. H. (1975). The development of spatial representations of large-scale environments. *Advances in child development and behavior*, 10, 9-55.
- Skelton, R. W., Bukach, C. M., Laurance, H. E., Thomas, K. G., & Jacobs, J. W. (2000). Humans with traumatic brain injuries show place-learning deficits in computer-generated virtual space. *Journal of clinical and experimental neuropsychology*, 22(2), 157-75. doi:10.1076/1380-3395(200004)22:2;1-1;FT157

Thorndyke, P.W., & Goldin, S.E. (1983). Spatial learning and reasoning skill, In. Pick, H.L. and Acredolo, L.P. (Eds.) *Spatial Orientation: Theory, Research and Application*, (pp. 195–217). New York: Plenum Press.

Vandenberg, S. G., & Kuse, A. R. (1978). Mental rotations, a group test of three-dimensional spatial visualization. *Perceptual and motor skills*, 47(2), 599-604.

Waller, D., Hunt, E., & Knapp, D. (1998). The Transfer of Spatial Knowledge in Virtual Environment Training. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 7(2), 129-143. doi:10.1162/105474698565631

Waller, D., & Richardson, A. R. (2008). Correcting distance estimates by interacting with immersive virtual environments: effects of task and available sensory information. *Journal of experimental psychology. Applied*, 14(1), 61-72. doi:10.1037/1076-898X.14.1.61

Wallet, G., Sauzéon, H., Rodrigues, J., & N’Kaoua, B. (2008). Use of virtual reality for spatial knowledge transfer. *Proceedings of the 2008 ACM symposium on Virtual reality software and technology - VRST '08* (p. 175). New York, New York, USA: ACM Press. doi:10.1145/1450579.1450616

Wallet, G., Sauzéon, H., Rodrigues, J., & N’Kaoua, B. (2009). Transfer of spatial knowledge from a virtual environment to reality: Impact of route complexity and subject’s strategy on the exploration mode. *Journal of Virtual Reality and Broadcasting*, 6(4), 572–574.

Wallet, G., Sauzéon, H., Rodrigues, J., Larrue, F., & N’kaoua, B. (2010). Virtual/Real transfer of spatial learning: impact of activity according to the retention delay. *Studies in health technology and informatics*, 154, 145-9

Wallet, G., Sauzéon, H., Pala, P. A., Larrue, F., Zheng, X., & N’kaoua, B. (2011). Virtual/Real transfer of spatial knowledge: benefit from visual fidelity provided in a virtual environment and impact of active navigation. *Cyberpsychology, behavior and social networking*, 14(7-8), 417-23. doi:10.1089/cyber.2009.0187

Wallet, G., Sauzéon, H., Larrue, F., & NKaoua, B. (Submitted). The Impact of Active/Passive Navigation on the Transfer of Spatial Learning from Virtual to Real Environments According to the Route Length and Spatial Task Used.

Warren, W. H. (2006). The dynamics of perception and action. *Psychological review*, *113*(2), 358-89. doi:10.1037/0033-295X.113.2.358

Wechsler, D. (2001). *Échelle clinique de mémoire de Wechsler-3ème édition*. ECPA.2001.

Wilson, P., Foreman, N., Gillett, R., & Stanton, D. (1997). Active Versus Passive Processing of Spatial Information in a Computer-Simulated Environment. *Ecological Psychology*, *9*(3), 207-222. doi:10.1207/s15326969eco0903_3

Wilson, P. N. (1999). Active Exploration of a Virtual Environment Does Not Promote Orientation or Memory for Objects. *Environment and Behavior*, *31*(6), 752-763. doi:10.1177/00139169921972335

Wilson, P. N. , & Péruch, P. (2002). The influence of interactivity and attention on spatial learning in a desktop virtual environment. *Current Psychology of Cognition*, *21*, 601-633.

Annexe 3 - Article 2: Interface and Gaming Experience Influence on Spatial Transfer: Egocentric vs. Allocentric Tasks

Les résultats de ce chapitre ont été soumis dans la revue « Journal Experimental Of Psychology : Applied » sous le titre suivant :

LARRUE, F., Sauzeon, H., Foloppe, D., Wallet, G., Gross, C. et N’Kaoua (submitted).
Interface and Gaming Experience Influence on Spatial Transfer: Egocentric vs. Allocentric Tasks.

Title: Interface and Gaming Experience Influence on Spatial Transfer: Egocentric vs. Allocentric Tasks.

Authors: Florian LARRUE¹, Hélène Sauz eon¹, Deborah FOLOPPE¹, Gregory Wallet¹, Christian GROSS², & Bernard N'KAOUA¹.

Affiliations:

1 Laboratoire EA- 4136 Handicap & Système Nerveux, Equipe CHIC (Communication Handicap Interaction Communication), University of Bordeaux Victor Segalen

2 CNRS UMR 5293, Institut des Maladies Neurod eg en eratives, University of Bordeaux Victor Segalen

Corresponding Author: Florian LARRUE (florian.larrue@u-bordeaux2.fr)

Abstract:

The main purpose of this study is to assess the influence of physical engagement (manipulated by navigating in a Virtual Environment using a joystick or treadmill) and video game experience (gamers vs. non-gamers) on the transfer of spatial abilities from virtual to real environments. Performances were evaluated using tasks mobilizing different levels of spatial abilities as follows: i) egocentric representations (chronological classification task and tasks such as egocentric estimates of distance and direction); ii) allocentric representation (sketch mapping and allocentric orientation estimates of the starting point); and iii) a wayfinding task to reach a navigational goal in a real situation. The results show that the effect of sensory activity during learning is maximized in tasks that have an egocentric component, and in which performances are enhanced by a perceptual-motor coupling during learning (association between a point of view and an action), such as a wayfinding or egocentric estimation task (distance or direction). By contrast, a minimal effect is observed for tasks that preferentially involve cognitive processes, such as an egocentric photograph classification task or allocentric tasks. These results are discussed in terms of physical engagement and body-based information and in light of both the L-R-S model (Siegel & White, 1975) and the graph theory (Gillner & Mallot, 1998).

Keywords: Virtual- Real transfer; Spatial learning; Joystick, Treadmill, Gaming Experience.

Spatial cognition concerns processes that are used to acquire spatial knowledge from different sources and events in order to perform navigation activities for many daily life situations such as navigation in a supermarket (e.g. to find a product in a section), driving networks (for example, see Hegarty, Montello, Richardson, Ishikawa, & Lovelace, 2006; see the review in Rizzo & Buckwalter, 1997), etc. Virtual Reality (VR) creates dynamic simulations, three-dimensional and multimodal environments and is based on communication with a computer (Fuchs et al., 2006). Consequently, VR is widely used to study spatial cognition and some evidence supports the theory that spatial knowledge acquisition in a virtual environment is similar to knowledge acquisition in a real environment (e.g. Péruch & Wilson, 2004; Witmer, 1996). Consequently, VR is specifically used as a learning tool in order to prepare the participants and to enhance their performances in the subsequent real tasks (Waller, Hunt, & Knapp, 1998; Wallet, Sauzeon, Rodrigues, & Nkaoua, 2009; Wallet et al., 2011). In this vein, a main research interest in the field of spatial cognition is to assess the variables that enhance the transfer of spatial learning from a virtual to a real environment. In particular, one variable that has been the focus of numerous studies is the mode of navigation in a virtual environment (VE). Wilson, Foreman, Gillett, and Stanton (1997) defined two different modes: a passive mode, where participants do not interact with the VE, and an active mode, where participant is given sensorimotor feedback through the control of an interface during navigation. Different authors have shown that active navigation has a positive effect on the transfer of spatial learning (Wallet, Sauzeon, Rodrigues, & N'Kaoua, 2008; Wallet et al., 2009; 2010; 2011; Peruch, Vercher, & Gauthier, 1995), while others found few or no benefits (Wilson et al., 1997; Wilson, 1999; Wilson & Peruch, 2002).

Moreover, when different interfaces are manipulated, participant characteristics such as video game experience have been identified as critical variables (Waller, 2000). Regular video game practice has been recently demonstrated to be an advantage when navigating in a virtual

environment but not when navigating in a real environment (Richardson, Powers, & Bousquet, 2011).

In this context, the aim of our study is to assess the role of: i) physical engagement and body-based information, as observed in two interfaces that require either a high level of physical engagement (the treadmill condition) or a low level of physical engagement (the joystick condition); and ii) the effect of video game expertise on the transfer of spatial abilities from a virtual to a real situation.

The spatial cognition framework and sensorimotor activity

According to the “landmark – route – survey” (L-R-S) model (Siegel & White, 1975), there are three levels in the structure of environment spatial knowledge and the acquisition process of spatial knowledge of new environments (Ishikawa & Montello, 2006; Montello, 1998; Pick & Lockman 1981). First, spatial cognition is based on the acquisition of several *landmarks* in the environment. These landmarks are integrated into the memory by their shape, structure, and/or sociocultural meaning (Golledge, 1999). Second, the participant links the landmarks together and learns the *routes* between them. At this level, s/he is able to build a mental representation of a route from a departure point to an arrival point using the various landmarks (Thorndyke & Goldin, 1983). These two first levels correspond to egocentric-type representations (i.e. the body serves as a reference). Last, the participant develops *survey* knowledge. S/he builds a topographical representation of the environment, including all the associated spatial information (i.e. landmarks and routes), making it possible to infer the entire environment representation in order to estimate Euclidean distances and contemplate shortcuts (Presson, DeLange, & Hazelrigg, 1989). At this final level of knowledge, the representation is similar to a "plane view" and is also called "survey-type" knowledge. The mental representation of the environment is complete and allocentric (i.e. an external point serves as a reference). These three stages in knowledge acquisition do not have to follow a

strict order and may be obtained in a parallel process (Ishikawa & Montello, 2006). In many situations, the acquisition of all the knowledge levels is not necessary and knowledge of the overview is not used. The last level allows people to take shortcuts or new paths in an environment; however, the second level may be sufficient enough to reproduce a route in an environment. Given these limitations, alternative theories have been developed, notably the graph approach which stresses sensorimotor activity, in giving an essential role in the enacted spatial representations (Gillner & Mallot, 1998). According to this approach, spatial cognition is a byproduct of both the sensorimotor component and the cognitive component. The starting point of the graph approach is the distinction between a cognitive and perception–action system: the cognitive system underlies the development of internal representations (similar to the L-R-S model) and the perception-action system generates representations that associate motor responses with views or places (i.e. perception-action coupling). In addition, the former system is assumed to primarily implement spatial strategies based on the configuration (survey-based), while the latter is particularly used to implement strategies based on the route (route-based) (Gillner & Mallot, 1998). In other words, tasks based on an allocentric or survey representation might probe more the cognitive system, whereas tasks based on an egocentric route might probe both the cognitive and perception-action systems. More precisely, the perception-action component is formalized as participant movement and all the sensorimotor processes involved, including all systems that concern body-based information and provide information about the body/head position and orientation in the navigated space. The body-based information used for spatial acquisition is usually subdivided into three main classes of information (Ruddle & Péruch, 2004; Hegarty, et al., 2006; Banton, Stefanucci, Durgin, Fass, & Proffitt, 2005). First, visual information, and notably optic flow, consists of all visual input that allows the detection of shapes, textures, semantic landmarks, movements of objects, etc. (Gibson, 1950), always with respect to body position. Kearns, Warren, Duchon, & Tarr (2002) and Bardy (2006) broke down optic flow into translational optic flow (relative to

moving to another position with the same orientation) and rotational optic flow (relative to turning). Second, the vestibular system provides translational vestibular information (acceleration/deceleration of the head and body) as well as rotational vestibular information (rotation of the head and body). Third, kinesthetic information, which refers to internal copies of motor commands sent by the central nervous system to the muscles and other areas of the brain, would allow the participants to anticipate the consequences of a movement (Bardy, 2006) and to perceive their body in the environment. Different studies have shown that body-based information has an impact on spatial learning (Klatzky, Loomis, Beall, Chance, & Golledge, 1998; Berthoz et al., 1995) and spatial representations. For example, Campos, Byrne, & Sun (2010) studied the relationship between optic flow and body-based information and found that the best spatial representations were produced when both of these components are present. Moreover, body-based information promotes egocentric spatial representation (Chance, Beall, & Loomis, 1998; Klatzky et al., 1998) and is necessary to improve action-perception coupling (Tversky, 2000), and more generally, spatial abilities.

Virtual reality and the transfer of spatial learning

Many works have used VR to assess or rehabilitate different types of patients, such as patients with brain injuries (Brooks, 1999; Matheis et al., 2007) or children with hyperactivity disorders (Rizzo et al., 2000). The goal is to place patients in virtual situations that are similar to real-life situations in order to improve the diagnostic or to improve the effects of virtual learning on daily living activities (Lee et al., 2003; Klinger, Cao, Douguet, & Fuchs, 2009; Rizzo & Buckwalter, 1997). The problem is then to identify the variables that promote the transfer from a virtual to a real environment (Wallet, Sauzéon, Rodrigues, Larrue, & N'kaoua, 2010; Péruch, & Wilson, 2004; Witmer, 1996). In general, the factors that influence the transfer of spatial abilities have been classified as internal (characteristics of the participants) and external factors (characteristics of the VR systems and learning/recall conditions) (Wallet

et al., 2011). Among the external factors, one of the most studied is the mode of exploration (Wilson et al., 1997). The active exploration mode is usually used when sensorimotor feedback and the control of an interface (a joystick, glove, keyboard, etc.) are needed to navigate in the VE, while the passive exploration mode usually refers to a condition in which the participant does not interact with the VE. The literature reports varying results concerning the effect of the active or passive mode on spatial transfer. Some authors have shown that performances improve with the active mode compared to the passive mode (Wallet, Sauzeon, Rodrigues, & N’Kaoua, 2008; Wallet et al., 2009; 2010; 2011; Peruch, Vercher, & Gauthier, 1995), whereas others found no benefits at all (Wilson et al., 1997; Wilson, 1999; Wilson & Peruch, 2002). One possible explanation for this discrepancy is that most VR studies use a joystick, mouse or keyboard interface to move around in the VE and these types of interfaces do not promote body-based information (Waller & Richardson, 2008), which is considered as being highly important for spatial acquisition (Grant & Magee, 1998; Ruddle et al., 2011b). For example, Grant and Magee (1998) compared different route learning methods, such as walking the route in the real environment, walking it in a VR, learning it using a joystick, learning it by studying a map, and learning it by studying photographs, and showed that walking the route in a VR was a good interface in terms of transferring spatial abilities. A few studies have used more sophisticated interfaces such as a treadmill to simulate walking or a wearing a HMD (Head Mounted Display), which can capture head movements and adjust the environment to the point of view of the person wearing the helmet. Ruddle and Lessels (2009) compared different interfaces (walking in a VR while wearing a HMD, using a keyboard coupled to a HMD and using a mouse coupled to a conventional computer screen) and found that the participants who walked in the VR performed better on a navigational search task (the participants had to find targets that had been hidden inside boxes in a room-sized space). A locomotion interface, such as a treadmill, provides more realistic body-based information and has been shown to be more efficient in terms of obtaining accurate egocentric distance

estimates in a VE (Mohler et al., 2007). Ruddle et al. (2011b) have recently reported that the walking and treadmill conditions significantly improved the accuracy of the participants' cognitive maps (i.e. survey or allocentric representation), which are measured using allocentric direction and distance measurements. From the overall findings, it appears that the extent of body-based information provided by treadmill locomotion interface (compared to joystick) could be largely favorable for spatial learning in VE by including an improvement of the egocentric spatial representation measures (Waller & Richardson, 2008), allocentric spatial representation measures (Ruddle et al., 2011a) and navigational measures (Grant & Magee, 1998; Ruddle & Lessels, 2009). Recently, for the first time, the effect of body-based information was specifically addressed with regards to spatial learning transfer by comparing the treadmill and joystick interfaces (Larrue et al., submitted). The main finding showed that the participants performed best using the treadmill interface, compared to the joystick interface, for both the egocentric and allocentric indicators as well as the spatial learning transfer (wayfinding performance).

Physical engagement plays an important role in spatial learning in VR, and another crucial variable is video game expertise. There is an abundance of video games available today and they can be classified into categories such as action, adventure, dance, driving, fighting games, simulations, sports and strategy (Spence & Feng, 2010); all of these types of games involve different cognitive processes. For example, aircraft simulators require the analysis and planning of actions, while a Tetris-like game focuses on mental rotation skills. Feng, Spence and Pratt (2007) found that the act of playing action video games eliminated the classical gender differences on spatial attention and mental rotation tests. By contrast, this effect was not found when there is no action in the video game. Boot, Kramer, Simons, Fabiani, and Gratton (2008) tested attention, memory and executive control in gamers and non-gamers using three types of video games (action, puzzle and strategy). Irrespective of the video game practiced, superiority for gamers is reported in terms of object tracking, mental

rotation, change of objects stored in the visual short-term, and switching from one task to another. In this study, non-gamers were allowed to train for a period of 20 hours in order to gain experience with video games; however, these participants did not improve their mental rotation performance, probably because despite the training, the gamers still have more gaming experience. Moreover, the spatial resolution of vision and visual acuity is better for the gamers (Green & Bavelier, 2003), both for central and peripheral vision. Nevertheless, in this last study, these differences can be reduced with training (about 30 hours). Donohue et al. (2010) used a video game experiment to show an increase in the multisensory integration of information on two tasks that measured visual and auditory judgments. Boot et al. (2008) showed that extensive video game practice may improve flexible strategies as well as the attentional engagement. The impact of video games has also been studied in persons with a traumatic injury (Caglio et al., 2009): one patient was trained to play a driving simulator for 1.5 hours at a time, three times per week over a period of five weeks. Neuropsychological tests assessing short-term memory (verbal and visual), visual-spatial memory, working memory, verbal learning and executive functions were performed before and after exposure (two months) and showed a significant improvement for most neuropsychological tests, including spatial abilities.

Therefore, although many studies have focused on the relationship between video game experience and spatial skills, the impact of video game practice is either rarely addressed in VR-based spatial navigation studies or sometimes not at all in studies that focus on the transfer of spatial learning from virtual to real environments. Richardson et al. (2011) used a target pointing task in a VE and showed that gamers create a better mental representation of the environment than non-gamers, whereas in real conditions, gamers do not perform better than non-gamers. Thus, we decided to address the influence of the physical engagement provided by the interface (at its maximum with the treadmill interface and in the real environment and at its minimum with the joystick interface) and the effect of video game

experience (gamers vs. non-gamers) on performances in tasks that mobilize different levels of spatial abilities (in light of the L-R-S model) as follows: i) the Landmark-Route levels, referring to egocentric representations, are probed with a chronological photograph classification task and egocentric distance and direction estimates; ii) the Survey level, referring to allocentric representation, is investigated with a sketch mapping task and allocentric orientation estimates of the starting point; and iii) a wayfinding task is used to investigate the overall implementation of L-R-S knowledge in order to reach a navigational goal in a real situation.

METHOD

To assess VR as a spatial learning tool, we used a spatial learning paradigm that consisted of an acquisition of a path either within a real environment (the baseline condition) or within its virtual replica (the virtual conditions) (Wallet et al., 2010; 2011). Path acquisition within the VE using three locomotion interface conditions (the treadmill, joystick and the real conditions) vs. two levels of video game experience (gamers and non-gamers): (1) gamers in the treadmill condition 2) non-gamers in the treadmill condition; (3) gamers in the joystick condition; (4) non-gamers in the joystick condition; (5) gamers in the real condition; (6) non-gamers in the real condition. After the participants learned the path in either the real condition or the VR, the participants were asked to complete several tasks in order to assess their spatial knowledge using the L-R-S model, which included a wayfinding task in a real situation to assess the virtual/real transfer.

Participants

Fifty-six student volunteers from Bordeaux Segalen University (28 men and 28 women) participated in this study: 20 students were assigned to the reality-based path acquisition condition (baseline condition) and 36 to the VR-based path acquisition condition.

For the VR condition, 18 students were assigned to the joystick condition and 18 to the treadmill condition. All of the groups were composed of nine gamers and nine non-gamers (see Table 1). All of the participants were native French speakers, right-handed, with normal or corrected to normal vision and a bachelor's degree or, at the very least, an equivalent degree. The participants were between the ages of 18 and 30. The six composed groups were not significantly different in terms of gender (χ^2 test $p > 0.05$) (Table 1). In addition, the six groups were not significantly different with respect to the spatial abilities assessed with the GZ-5 test (Guilford & Zimmerman, 1948), Mental Rotation Test (MRT) (Peters et al., 1995; Shepard & Metzler, 1971; Vandenberg & Kuse, 1978) and Corsi's block-tapping test (from the WMS III, Weschler, 2001) (respectively, $p > 0.100$ $p > 0.700$; $p > 0.900$). The GZ-5 test is commonly used to measure the spatial translation ability and the MRT is used as a measurement of spatial visualization and mental rotation abilities. Corsi's test is used to measure the direct visual-spatial memory span (number of sequences correctly reproduced by the participant) and the reverse visual-spatial memory span (number of sequences correctly reproduced in reverse order, from the last sequence seen to the first sequence seen).

INSERT TABLE 1

Material

The environment

The real environment was a 9 km² area near the Bordeaux hospital. The VE developed in our laboratory using Virtools 3.5™ was a 3D scale model of the real environment, with realistic and visual stimuli. The scale of the real environment was faithfully reproduced (sizes and widths of houses, streets, etc.) and photographs of several buildings facades were applied to the geometric surfaces of the VE. The VE included major local and global landmarks (e.g. signposts, signs, and street furniture) as well as urban sounds in order to make the simulation more realistic. Participants in both learning groups (the virtual and real conditions) were given

an itinerary that was based on an egocentric frame of reference, at head height. This itinerary was characterized by a 780 m long irregular closed loop that contained thirteen crossroads and eleven directional changes.

Apparatus

The darkened laboratory room contained the following material: a portable DELL Precision M6300 computer (RAM: 3GHz; processor: Intel Core 2 Duo T9500 2.60 Ghz) with a Nvidia Quadro FX 1600M graphic card (256 Mb), a 2 x 1.88 meter screen (large enough so that the participant could immerse themselves properly in the VE), a projector (Optoma/ThemeScene from Texas Instrument) with rear projection. The participants sat two meters away from the display screen.

Interface modeling

Two interfaces were modeled: 1) the treadmill interface, which allowed the participants to turn their head, (2) the joystick interface, which allowed the participants to turn their head.

The treadmill condition included a programmable HP COSCOM treadmill (speed, declination and acceleration) with a serial Cable Ownership coupled to a Software Development Kit and a MS-EZ1 telemeter. This interface enabled the user to modify the visual display of the VE in real time with respect to his/her walking speed, with a maximum threshold set to 6 km/h. The participant was able to accelerate and decelerate using the MS-EZ1 sonar range finder, which monitored the participants' position on the treadmill. The treadmill surface was divided into three parts: one part was used to accelerate (toward the top part of the treadmill surface), another was used to walk normally (the middle part of the treadmill surface), and the third part was used to decelerate (toward the bottom part of the treadmill surface; see Figure 1). When participant was in the walking in the middle part of the treadmill, no acceleration or deceleration information was sent to treadmill. By contrast, when

participant walked on either the top part of the treadmill (the acceleration zone) or the bottom part of the treadmill (the deceleration zone), the sonar detected length changes in the participant's position and then told the computer to accelerate or decelerate as long as the participant did not go back to the middle part of the treadmill (the walking zone). Finally, the participant was able to stop in the environment if s/he stayed in the deceleration zone for a prolonged period of time. Thus, this treadmill-based interface enabled the user to walk, accelerate, decelerate, or stop in the environment.

To perform an active rotation with the treadmill interface and to add rotational vestibular information, the participant used the treadmill to move through the environment and was told that s/he could orient the point of view in the VE by rotating his/her head. These participants wore a head band with three little spheres (forming a triangle) on it that reflected infrared light (analyzed by 12 OPTITRACK video-cameras, Motion point™) to capture their head movements. The motion capture was in real time such that when participant turned his/her head, the system updated that visual optic flow with an execution speed relative to the rotation angle of head movement (a higher rotation angle resulted in a quicker restitution of the rotational optic with respect to the natural head movement). This unidirectional locomotion interface provided body based-information including optic flow, kinesthetic information, and translational and rotational vestibular information (with the use of motion capture).

INSERT FIGURE 1

The joystick (Saitek™ X52 Flight System) condition allowed the participants to vertically tilt the joystick forward with the result that the further forward the participant tilted the joystick, the faster s/he was able to move within the VE (between 0 and 6 km/h). The participant controlled his/her translational movement and his/her displacement speed with the joystick. Horizontal joystick manipulations were coupled to vertical joystick manipulations in

order to change the rotational optic flow by simulating a turn in the VE with respect to direction changes while walking. Regarding the vertical manipulations, the magnitude of the horizontal manipulation was expressed proportionally to the turning speed (higher horizontal manipulations produced quicker turns with respect to the natural head movement). Thus, the joystick condition provided body based-information including the translational and rotational optic flow and kinesthetic information; this condition differed from the treadmill condition in that it did not provide vestibular information.

Procedure

For each participant, the procedure was broken down into three phases: (1) the completion of spatial ability tests to provide information about the participant's characteristics (see above); (2) a learning phase: the route-learning task under one of the three conditions (one real vs. two virtual conditions); (3) a restitution phase: the completion of six spatial knowledge-based tasks.

- *Learning phase* - Route learning in the real condition is the baseline condition and was used to provide referential performances for when the route was learned in a real urban environment (Waller et al., 1998). The participants walked at their own speed and were free to visually explore the environment (using head and eye movements). At each intersection, the participants were given directions to be followed. Route learning in the VE was similar to the real environment; the directions were verbally indicated by experimenter situated behind the participant. The position, time and interactions (accelerations, decelerations, left and right turns, collisions) were stored all throughout the VE experiment using a computer.

A training phase was performed beforehand and ended when the participant was able to successfully use the interface in tasks assessing the sequential manipulations of the interface in a different VE. The participants finished the experiment when they were able to accelerate, decelerate, walk, stop, and to turn both left and right within the interface. In

addition, after VR exposure, the participants completed a simplified simulator sickness questionnaire (SSQ) (Kennedy, Lane, Berbaum, & Lilienthal, 1993) in order to measure the negative side effects from being immersed in the graphically rendered virtual worlds.

The path learning software was developed to analyze the data on the participant's positions and time in either the VE or the real environment in order to ensure that the path learning process was similar in the real and virtual conditions. In the real condition, learning data was collected using a Magellan™ Crossover GPS; the participants also wore a bicycle helmet with a AIPTEK™ mini Pocket DV8900 camera fixed to the top for video recording purposes. This software was used to calculate the learning speed, which was expressed in km/h.

- *Restitution phase* - Each participant performed six tasks, the order of which was counterbalanced across the participants.

Egocentric photograph classification task: twelve real photographs of intersections were presented to the participants in a random order. The participant had to arrange the photographs in chronological order with respect to the learned path. They were allotted ten minutes to perform this task. Points were awarded as follows: one point was given for a photograph in the right position, 0.5 points for each photograph that follows the correct consecutive order (for example, if photographs 4, 5 and 6 are in the right order but not at the correct temporal place, 1.5 points were awarded instead of three points). We transformed this score into a correct response percentage. This paper-pencil task is seen as an indication of the ability to recall landmarks and route knowledge according to an egocentric frame of reference (Wallet et al., 2010, 2011; Aguirre, & D'Esposito, 1999).

Egocentric distance estimation task: Each participant was asked to estimate how far they walked (in meters). Distance estimates were reported verbally and written down by the experimenter. There are many methods for recording and analyzing distance estimate data (Montello, 1991). The one used in the present study quantifies the participants' knowledge of

the distances walked between the start and end points, which is known to be accurate when participants have well-developed route knowledge (Waller et al., 1998; Barlow, 2001).

Egocentric directional estimation task: This task was computer-based and involved the successive presentation of real photographs of intersections taken from a walker's point of view (the set comprised twelve photographs presented in random order). Each photograph was displayed at the top of the screen, and at the same time, the participant was given an 8-point compass rose. For each photograph, the participant was instructed to select one of the arrows on the compass rose and to point to the direction that corresponded to the previously learned path. We measured the mean percentage errors. These measures are expected to be accurate when the participants have well-developed level of route knowledge.

Allocentric sketch-mapping task: Participants had to draw freehand a map of the visualized route. They were allotted ten minutes for this task. One point was attributed for each time they correctly drew a change of direction. We transformed this score in a correct response percentage. This paper-pencil task is known to measure survey knowledge (Waller et al., 2010; 2011; Morganti, Carassa, & Geminiani, 2007).

Allocentric starting point estimation task. This task was computer-based and consisted of successively presenting real photographs of intersections from a walker's point of view (the set comprised twelve photographs presented in random order). Each photograph was displayed at the top of the screen, and at the same time, the participant was given an 8-point compass rose was placed down. For each photograph, the participant was instructed to select one of the arrows on the compass rose and to point to the start direction of the previously learned path. The mean percentage error was averaged. These measures are accurate when the participants have, in their memory, a well-developed map-like representation of the walked environment in order to be able to identify the presented intersection, to mentally place it in the environment and to assess the position and point of view with respect to the starting point

(Ruddle et al., 2011a; Iachini & Logie, 2003). Therefore, performances on this task are related to survey knowledge.

The real wayfinding task consisted of reproducing the learned path in real conditions. Direction errors were calculated and expressed in percentages (with a maximum error score of 13). When an error occurred, the participant was stopped and was told the correct direction to take. As such, this wayfinding task can be seen as a naturalistic measure of navigational abilities based on the use of landmark, route and survey knowledge (Wallet et al., 2011). In addition, restitution path software was developed to analyze the participant's positions across time to measure restitution speed (similarly to the learning software, data were captured with a Magellan Crossover GPS and a helmet camera).

Dependant measures and statistical analyses:

Each dependant measure (learning score and restitution scores) was analyzed using an ANOVA [3 (locomotion mode: treadmill vs. joystick vs. real condition) x 2 (gaming experience: gamers vs. non-gamers)] analysis with between-subject measures for each factor (Table 2). The post-hoc comparisons were performed with the Fisher procedure (with $p < 0.05$).

INSERT TABLE 2

RESULTS

Speed of learning phase:

The ANOVA analysis revealed a significant effect for locomotion mode [$F(2,50) = 113.517$; $p < 0.0001$] where the speed of learning was higher in the joystick condition compared to the treadmill condition and real condition. There was no significant effect of gaming experience and the two-way interaction between locomotion mode and gaming experience was not significant (respectively, $p > 0.100$, $p > 0.600$). The post-hoc comparisons showed differences

between the three modes of locomotion: the speed of learning was faster in the joystick condition, followed by the treadmill condition, and then the real condition.

Egocentric photograph classification task: The ANOVA revealed a significant effect for the locomotion mode [$F(2,50) = 5.890; p < 0.01$]; the scores were better for the real condition than for VR learning conditions. The post-hoc comparisons showed a significant difference between the real learning condition and the two VR conditions and no differences between the treadmill and joystick condition.

No difference was found for gaming experience ($p > 0.300$); however, the two-way-interaction between locomotion mode and gaming experience was significant [$F(2,50) = 4.941; p < 0.02$] (see Figure 2). In the joystick condition, the gamers had better results than the non-gamers, whereas for the real condition, the non-gamers performed better than the gamers (the results of both groups are relatively similar for treadmill) condition).

INSERT FIGURE 2

Egocentric distance estimation task: The ANOVA showed only a significant effect for the locomotion mode [$F(2,50) = 5.249; p < 0.01$]. The actual distance of the route is 780 meters. The distance calculated for the real condition was closest to this measure, followed by the treadmill condition, and then by the joystick condition (the distance estimation was overestimated). The post-hoc comparisons showed differences between the real and joystick conditions, and the treadmill and joystick conditions, but not between the real and treadmill conditions. There was no significant difference with respect to gaming experience ($p > 0.200$) or the two-way interaction between locomotion mode and gaming experience ($p > 0.500$).

Egocentric direction estimations Task: The ANOVA analysis was only significant for the two-way interaction between locomotion mode and gaming experience [$F(2,50) = 3.395$; $p < 0.05$]. (see Figure 3). For the joystick condition, the gamers had better results than the non-gamers, whereas in the treadmill condition, the non-gamers performed better than the gamers (the performances were best for the real condition and were relatively similar between the two groups) No other differences were found (locomotion mode: $p > 0.100$; gaming experience: $p > 0.700$).

INSERT FIGURE 3

Allocentric sketch mapping task: The ANOVA did not show any differences for the locomotion mode or gaming experience and two-way interaction between locomotion mode and gaming experience was not significant (respectively, $p > 0.200$, $p > 0.500$, $p > 0.500$).

Allocentric starting point estimation task: The ANOVA did not show any differences for the locomotion mode or gaming experience and the two-way interaction between locomotion mode and gaming experience was not significant (respectively, $p > 0.500$, $p > 0.600$, $p > 0.100$).

Wayfinding task (speed and direction error measures):

The ANOVA analysis did not show a significant effect with respect to the speed of restitution (locomotion mode effect $p > 0.100$; gaming experience effect, $p > 0.500$; “locomotion vs. gaming experience effect, $p > 0.500$). Regarding the error measures, the ANOVA analysis was significant [$F(2,50) = 4.428$; $p < 0.02$] for the locomotion mode. The treadmill condition had better results than the joystick condition, but the real condition showed better results than the VR conditions. The post-hoc comparisons only showed significant differences between the real and joystick condition. No other significant differences were found (gaming

experience: $p > 0.900$; two-way interaction between locomotion mode and gaming experience: $p > 0.600$).

DISCUSSION

The main purpose of our work concerned the influence of physical engagement (provided by the interface) and the level of video game experience (gamers vs. non-gamers) on the transfer of spatial abilities from virtual to real situations. In order to assess the participants' performances, a wayfinding task was performed in a real environment, as well as different tasks assessing egocentric or allocentric components of spatial abilities.

Egocentric component

A significant "locomotion mode" effect was observed in the egocentric photograph classification task. A significant difference was also observed between the real condition and the two virtual conditions, but not between the two virtual conditions. In this egocentric classification task, an interaction between "learning mode" and "gaming experience" was also observed: gamers are better after learning with a joystick compared to the real condition, whereas non-gamers are better after learning in the real condition compared to the joystick condition (the performances for the gamers and non-gamers are similar in the treadmill condition). For the non-gamers, the lack of differences between the two virtual conditions can be explained by the fact that physical engagement (low for the joystick condition, high for the treadmill condition) does not enhance performances in this task. These results agree with those of Wallet et al. (2009) who found, by using a similar task, that an active learning condition (with a joystick) has no effect on performances compared to a passive condition (where the participant did not interact with the VE), regardless of the complexity of the route to be remembered. They concluded that the perception-action coupling (association of a point of view with a direction, for example to turn left at an intersection) promoted by an active

learning would not have a salient effect on this type of task. For these authors, this task mainly involves visual memory and the ability to associate a visual scene to its episodic temporal context (i.e. chronological order of the intersections). Thus, the richness of the visual information obtained in the real condition promotes these processes, which explains the enhanced performances in this condition compared to the two virtual conditions. This hypothesis seems to be confirmed by Wallet et al. (2011), who showed that a high visual fidelity of the VE (degree of realism) improves performances in this type of classification task. However, in this study, these authors did not manipulate the participants' level of video game experience. Therefore, our study highlights the fact that for the gamers, their performances in the joystick condition are similar to their performances in the real condition, and that the performances in these two conditions are better than for the treadmill condition. These results agree with the results presented by Donohue et al. (2010), who compared the performances of gamers and non-gamers in a task in which the participants had to detect a chronological sequence of visual and auditory stimuli. This study showed that the gamers did not perform better than the non-gamers in this temporal judgment task. We can also propose the hypothesis that the specific ability in visuospatial attention and visual perception developed by the level of video game experience (Green & Bavelier, 2006; Green & Bavelier, 2007) allowed the gamers to extract the salient information needed to perform this classification task with a joystick in an VE as effectively as if in a real environment.

In the egocentric distance estimation task, performances were better in the real and treadmill conditions than in the joystick condition, irrespective of the level of video game experience. Thus, the physical engagement and body-based information provided by the real and treadmill conditions allow a better estimation of the path distance in this task. These findings are consistent with the results given by Waller and Richardson (2008), which showed that body-based information was important in order to best estimate distances in a VE, and by Ruddle et al. (2011b), who also found that the best distance estimations occurred in the treadmill

condition compared to the joystick condition. Contrary to the classification task, this distance estimation task is enhanced by sensory motor activity during learning, and in our work, the physical engagement provided by the treadmill (compared to joystick) allows the participants to perform almost as well as when they learn in a real environment.

Furthermore, a significant interaction between the locomotion mode and gaming experience was observed in the direction estimation task. The gamers' performances in the real and joystick conditions are similar and better than in the treadmill condition, whereas the non-gamers' performances were nearly the same in the treadmill condition and the real condition, and were better than in the joystick condition. This task, which associates a point of view (an intersection) with an action, probably via the perception-action system (Gillner & Mallot, 1998), is facilitated by motor activity during the learning phase, but the efficiency of this motor activity depends on the level of video game experience. In this task, the non-gamers need high physical engagement (the treadmill condition) and body-based information to perform almost as well in the virtual condition as in the real condition, whereas the games only need a joystick. We can thus assume that for gamers, the lack of body-based information associated with the use of a joystick (compared to the treadmill condition), is compensated by the specific ability developed with this interface. In addition, another interesting result in our study is that the level of expertise in an interface (e.g. the joystick condition) seems to prevent the ability to learn a new (and more ecological) interface, to the extent that the non-gamers are better than the gamers in the treadmill condition.

Allocentric component

Locomotion mode and gaming experience did not have a significant effect on the allocentric starting point estimation task and the sketch mapping task. Therefore, physical engagement and gaming experience do not affect the development of cognitive maps, also called the Survey Level in the L-R-S Model described by Siegel & White (1975). It has already been

suggested that sensory motor activity has a greater impact on the egocentric component than on the allocentric component of spatial abilities. For example, in the neuropsychology literature, it has been shown that patients with movement disorders (such as Parkinson's disease) have difficulty recalling local landmarks (Burgess, 2008) and sequential associations (Nagy, Myers, Benedek, Shohamy & Gluck, 2007) underlying egocentric strategies. By contrast, pathologies that affect more the cognitive and memory sphere (such as Alzheimer's disease) results in difficulties with allocentric but not egocentric strategies. For example, Burgess, Trinkler, Kennedy and Cipolotti (2006) showed impaired allocentric representations and preserved egocentric representations in a patient suffering from Alzheimer's disease. Thus, the allocentric strategies are not sustained by the cortical structures involved in motricity (such as the basal ganglia and striatum); rather, they are more linked to the hippocampus formation underlying memory functions (Burgess, 2008). However, it should still be noted that in recently published literature on VR, Ruddle et al. (2011b) showed that sensory motor activity (walking) during learning in a VR improves the development of allocentric representations. Therefore, further investigations are needed to specify the role of body-based information and physical engagement on the allocentric component of spatial abilities.

Wayfinding task

A significant mode of locomotion effect was found with respect to direction errors in the wayfinding task: the performances were better in the real condition, followed by the treadmill condition, and finally by the joystick condition. The post-hoc comparisons showed a significant difference between the joystick and real conditions. Ruddle et al. (2011b) also compared a treadmill and joystick condition and showed the importance of high physical engagement for navigation in a large environment. Other authors have underlined the importance of body-based information on spatial information acquisition, especially when the

participant is walking in a VE situation (Chance et al., 1998; Ruddle & Lessels, 2009). An important point to note is that the joystick condition does not permit a good transfer from virtual to real environments, irrespective of the level of video game practice. An unusual and more ecological interface seems more relevant for the transfer even if there are no significant differences between the treadmill and joystick condition. These results agree with those found by Richardson et al. (2011), who determined that gaming experience has little impact on real environment. In a VE target pointing task, these authors showed that gamers create better mental representation of the VE than non-gamers. By contrast, in the real condition, they found that the level of video game expertise and the cognitive processes acquired with gaming experience did not have any impact. Richardson et al. (2011) concluded that there would be few correlations between gaming experience and performances in real environments; also, vestibular and kinesthetic information should take precedence over video game experience in daily life. This result should be considered particularly in studies using VR to reeducate patients in the hope of obtaining benefits in daily life activities.

Conclusion

Our findings provide relevant information for the debate on the benefit of an active mode in VE learning; some studies have already shown benefits for spatial navigation (Peruch et al., 1995; Carassa, Geminiani, Morganti, Varotto, 2003; Wallet et al., 2011), while others have not (Wilson et al., 1997; Wilson, 1999; Wilson, & Peruch, 2002). The effect of sensory activity during learning depends on the spatial restitution task. Its benefits are maximized on tasks that have an egocentric component, and in which the performances are enhanced by a perceptual-motor coupling during learning (association between a point of view and an action), such as wayfinding or egocentric estimation tasks. By contrast, a minimal effect is observed for tasks that preferentially involve cognitive processes such as an egocentric photograph classification task or allocentric tasks.

Moreover, video game practice is beneficial in that it acts preferentially on egocentric tasks (classification and egocentric direction estimation tasks); the joystick condition is not very effective with regards to the transfer of spatial abilities from virtual to real environments. This last result encourages researchers to look for more ecological interfaces that will provide a more positive impact on daily life activities.

Table 1

The participants' characteristics and results (mean and standard deviation) from the spatial abilities test for each learning condition.

		Baseline Condition				VR Condition							
Locomotion						Treadmill learning				Joystick learning			
Mode		Real learning											
Gaming													
Experience		Gamers		Non-Gamers		Gamers		Non-Gamers		Gamers		Non-Gamers	
Name		G5		G6		G1		G2		G3		G4	
Gender													
(Male/Female)		5/5		5/5		5/4		4/5		4/5		5/4	
		Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
Age		21.11	1.36	23.22	2.99	21.66	2.95	23.66	3.42	22.11	2.57	21.55	1.87
Spatial abilities													
GZ-5		22.78	9.89	21.70	11.54	18.19	9.61	16.58	9.98	23.75	10.09	26.44	13.58
Rotation													
Mental Test		18.70	7.68	22.50	11.44	21.77	8.19	19.00	6.53	24.00	5.31	20.55	6.89
Corsi's Cube													
(General)		18.70	2.26	18.20	3.52	18.77	2.16	18.22	2.27	19.00	2.00	17.55	1.130
Corsi's Cube													
(Direct)		9.50	1.58	9.00	2.06	9.66	1.87	9.33	1.32	9.66	1.41	9.22	0.97
Corsi's Cube													
(Indirect)		9.20	1.14	9.20	2.20	9.11	0.78	8.88	1.26	9.33	1.58	8.33	1.32

Table 2

Performances (means and standard deviation) on spatial tasks (egocentric, allocentric and wayfinding) according to the mode of locomotion and gaming experience.

Locomotion modes		Real				Treadmill				Joystick			
Gaming Experience		Gamers		Non-Gamers		Gamers		Non-Gamers		Gamers		Non-Gamers	
Restitution tasks	Score	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD
Learning phase	Mean Speed	3.23	0.29	3.22	0.22	4.41	0.45	4.18	0.39	5.32	0.35	5.07	0.62
Egocentric													
photograph classification task	% correct responses	64.58	26.44	78.75	30.83	5.50	2.04	5.55	3.58	8.27	2.59	4.16	1.56
Egocentric distance estimation task													
	Distance	706.00	603.42	1024.20	659.03	934.44	705.30	1250.00	491.17	1511.11	445.65	1464.44	620.38
Egocentric direction estimation task													
	Mean % errors	16.15	15.58	22.30	12.80	38.46	20.35	23.07	14.39	22.22	15.59	35.04	22.13
Exocentric Sketch mapping task													
	% correct responses	81.54	22.42	90.00	13.59	10.44	1.66	9.88	2.71	9.22	3.07	10.11	3.516
Exocentric starting point estimation task													
	Mean errors	52.50	21.17	39.17	10.43	46.29	16.19	57.40	15.83	52.77	19.09	49.07	20.60
Wayfinding task													
	Mean speed	3.28	0.31	3.25	0.21	3.16	0.24	2.98	0.38	3.11	0.40	3.14	0.36
	% Errors	6.15	7.07	3.85	6.54	8.65	5.84	9.39	6.40	11.10	7.79	12.81	9.42

Figure 1

Characteristics of the interactions with the treadmill

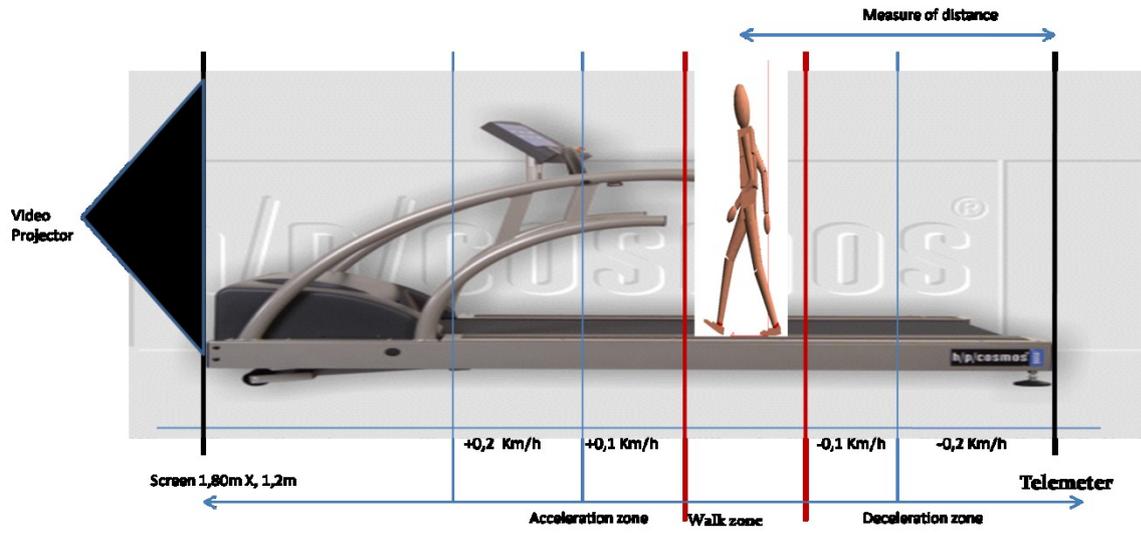


Figure 2

Score on the egocentric photograph classification task according to the Locomotion Modes and Gaming Experience

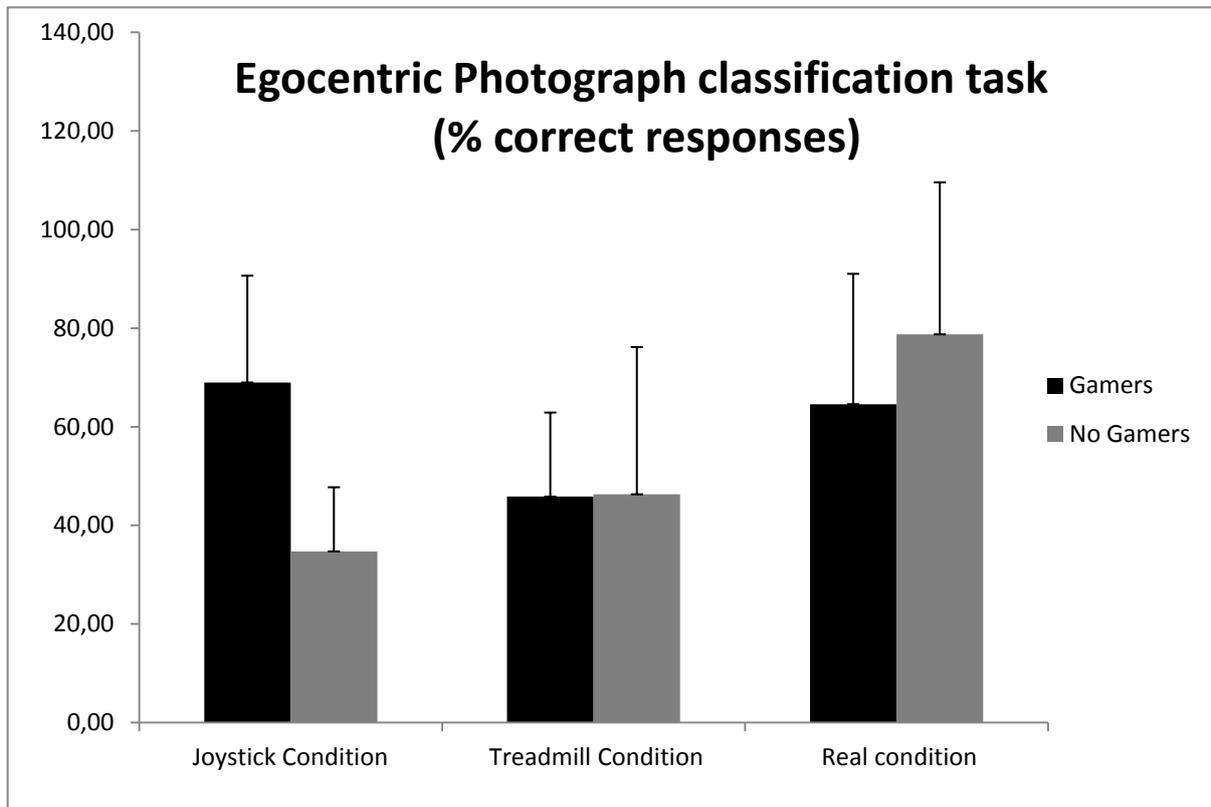
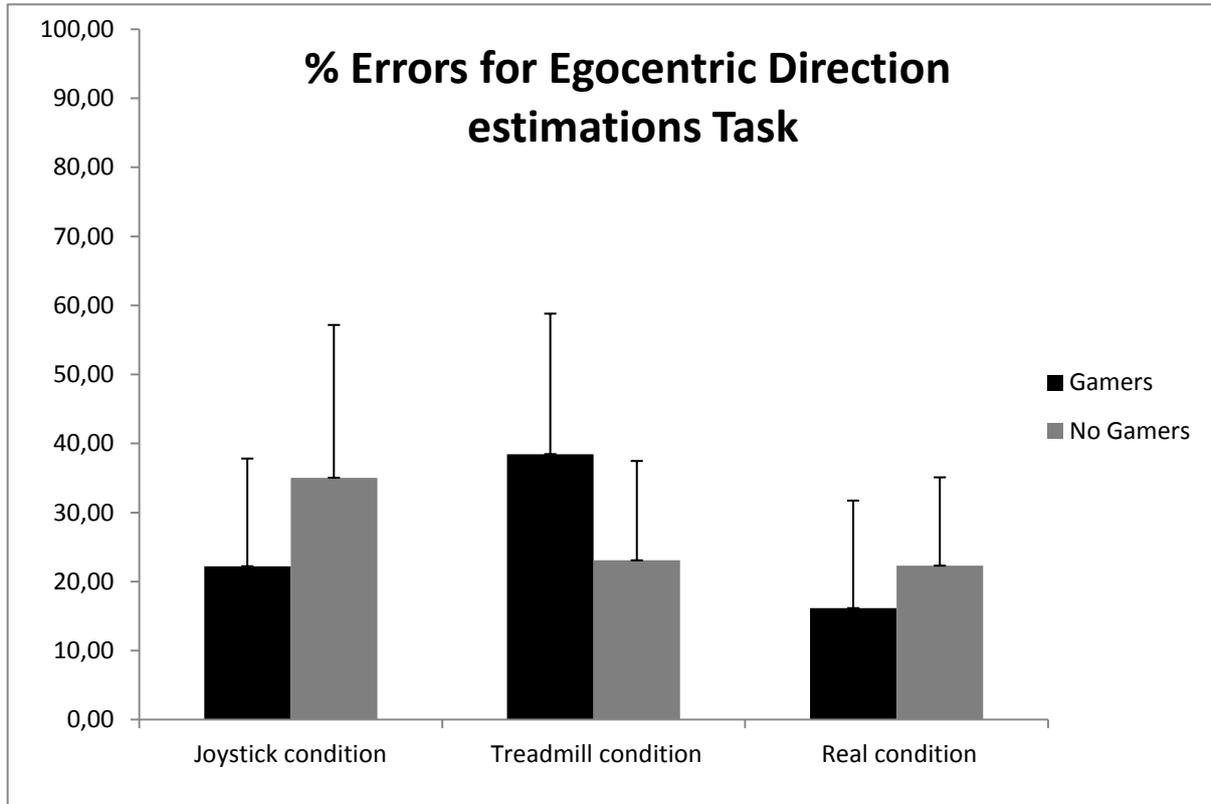


Figure 3

Score on the egocentric direction estimation task according to the Locomotion Modes and Gaming Experience



Bibliography

- Aguirre, G. K., & D'Esposito, M. (1999). Topographical disorientation: a synthesis and taxonomy. *Brain: a journal of neurology*, *122 (Pt 9)*, 1613-28.
- Banton, T., Stefanucci, J., Durgin, F., Fass, A., & Proffitt, D. (2005). The Perception of Walking Speed in a Virtual Environment. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, *14(4)*, 394-406. doi:10.1162/105474605774785262
- Bardy, B. G. (2006). Perception et régulation du mouvement humain : plaidoyer pour une biologie physique. *Journal de la Société de Biologie*, *200(2)*, 135-143. doi:10.1051/jbio:2006016
- Barlow, T. (2001). Acquisition of Route Knowledge Through Navigation in a Virtual Environment. *International Journal of Cognitive Ergonomics*, *5(3)*, 279-295. doi: 10.1207/S15327566IJCE0503_9.
- Berthoz, A., Israël, I., Georges-François, P., Grasso, R., & Tsuzuku, T. (1995). Spatial memory of body linear displacement: what is being stored? *Science (New York, N.Y.)*, *269(5220)*, 95-8.
- Boot, W. R., Kramer, A. F., Simons, D. J., Fabiani, M., & Gratton, G. (2008). The effects of video game playing on attention, memory, and executive control. *Acta psychologica*, *129(3)*, 387-98. doi:10.1016/j.actpsy.2008.09.005
- Brooks, B. (1999). Route Learning in a Case of Amnesia: A Preliminary Investigation into the Efficacy of Training in a Virtual Environment. *Neuropsychological Rehabilitation*, *9(1)*, 63-76. doi:10.1080/713755589
- Brooks, B.M., Attree, E.A., Rose, F.D., Clifford, B.R., & Leadbetter, A.G. (1999). The specificity of memory enhancement during interaction with a virtual environment. *Memory*, *7(1)*, 65-78.
- Caglio, M., Latini-Corazzini, L., D'agata, F., Cauda, F., Sacco, K., Monteverdi, S., Zettin, M., et al. (2009). Video game play changes spatial and verbal memory: rehabilitation of a single

case with traumatic brain injury. *Cognitive processing*, 10 Suppl 2, S195-7.
doi:10.1007/s10339-009-0295-6

Campos, J. L., Byrne, P., & Sun, H.-J. (2010). The brain weights body-based cues higher than vision when estimating walked distances. *The European journal of neuroscience*, 31(10), 1889-98. doi:10.1111/j.1460-9568.2010.07212.x

Carassa, A., Geminiani, G., Morganti, F., & Varotto, D. (2003). Active and passive spatial learning in a complex virtual environment: the effect of efficient exploration. *Cognitive Processing. International Quarterly of Cognitive Science*, 3-4, 65-81.

Castelli, L., Latinicorazzini, L., & Geminiani, G. (2008). Spatial navigation in large-scale virtual environments: Gender differences in survey tasks. *Computers in Human Behavior*, 24(4), 1643-1667. doi:10.1016/j.chb.2007.06.005

Chance, S. S., Gaunet, F., Beall, A. C., & Loomis, J. M. (1998). Locomotion Mode Affects the Updating of Objects Encountered During Travel: The Contribution of Vestibular and Proprioceptive Inputs to Path Integration. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 7(2), 168-178. doi:10.1162/105474698565659

Cutmore, T. (2000). Cognitive and gender factors influencing navigation in a virtual environment. *International Journal of Human-Computer Studies*, 53(2), 223-249. doi:10.1006/ijhc.2000.0389

Donohue, S. E., Woldorff, M. G., & Mitroff, S. R. (2010). Video game players show more precise multisensory temporal processing abilities. *Attention, perception & psychophysics*, 72(4), 1120-9. doi:10.3758/APP.72.4.1120

Feng, J., Spence, I., & Pratt, J. (2007). Playing an action video game reduces gender differences in spatial cognition. *Psychological science*, 18(10), 850-5. doi:10.1111/j.1467-9280.2007.01990.x

Fuchs, P., Moreau, G., Arnaldi, B., Chauffaut, A., Coquillart, S., & Donikian, S.(2006). Volume 1 L'homme et l'environnement virtuel. In P. D. L. D. Mines (Eds.), *Le Traité de la réalité virtuelle (3rd ed.)*. Les Presses de l'École des mines, Paris.

Gaunet, F., Vidal, M., Kemeny, A., & Berthoz, A. (2001) Active, passive and snapshot exploration in a virtual environment: Influence on scene memory, reorientation and path memory. *Cognitive Brain Research*, 11, 409-420.

Gibson, J. J. (1950). *The perception of the visual world*. Oxford England: Houghton Mifflin.

Gillner, S., & Mallot, H. a. (1998). Navigation and acquisition of spatial knowledge in a virtual maze. *Journal of cognitive neuroscience*, 10(4), 445-63. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/9712675>

Golledge RG. (1999) Human wayfinding and cognitive maps. In *Wayfinding behavior*. Baltimore, MD: John Hopkins University Press, pp. 5–45.

Granek, J. a, Gorbet, D. J., & Sergio, L. E. (2010). Extensive video-game experience alters cortical networks for complex visuomotor transformations. *Cortex; a journal devoted to the study of the nervous system and behavior*, 46(9), 1165-77. Elsevier Srl. doi:10.1016/j.cortex.2009.10.009

Grant, S. C., & Magee, L. E. (1998). Navigation in a virtual environment using a walking interface. In S. L. Goldberg and J. A. Ehrlich (Eds.), *The Capability of Virtual Reality to Meet Military Requirements* (pp. 81-92). New York: NATO.

Green, C. S., & Bavelier, D. (2007). Action-video-game experience alters the spatial resolution of vision. *Psychological science*, 18(1), 88-94. doi:10.1111/j.1467-9280.2007.01853.x

Guilford, J. P., & Zimmerman, W. S. (1948). The Guilford-Zimmerman Aptitude Survey. *Journal of Applied Psychology*, 32(1), 24-34. doi:10.1037/h0063610

- Hegarty, M., Montello, D., Richardson, A., Ishikawa, T., & Lovelace, K. (2006). Spatial abilities at different scales: Individual differences in aptitude-test performance and spatial-layout learning. *Intelligence*, 34(2), 151-176. doi: 10.1016/j.intell.2005.09.005.
- Iachini, T., & Logie, R. H. (2003). The role of perspective in locating position in a real-world, unfamiliar environment. *Applied Cognitive Psychology*, 17(6), 715-732. doi:10.1002/acp.904
- Ishikawa, T., & Montello, D. R. (2006). Spatial knowledge acquisition from direct experience in the environment: individual differences in the development of metric knowledge and the integration of separately learned places. *Cognitive psychology*, 52(2), 93-129. doi:10.1016/j.cogpsych.2005.08.003
- Kearns, M. J., Warren, W. H., Duchon, A. P., & Tarr, M. J. (2002). Path integration from optic flow and body senses in a homing task. *Perception*, 31(3), 349-374.
- Kennedy, R., Lane, N., Berbaum, K., & Lilienthal, M. (1993). Simulator Sickness Questionnaire: An Enhanced Method for Quantifying Simulator Sickness. *The International Journal of Aviation Psychology*, 3(3), 203-220. doi:10.1207/s15327108ijap0303_3
- Klatzky, R. L., Loomis, J. M., Beall, A. C., Chance, S. S., & Golledge, R. G. (1998). Spatial Updating of Self-Position and Orientation During Real, Imagined, and Virtual Locomotion. *Psychological Science*, 9(4), 293-298. doi:10.1111/1467-9280.00058
- Klinger, E., Cao, X., Douguet, A.-S., & Fuchs, P. (2009). Designing an ecological and adaptable virtual task in the context of executive functions. *Studies in health technology and informatics*, 144, 248-52. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19592774>
- Krampe, R. Th., & Ericsson, K. A. (1996). Maintaining excellence: Deliberate practice and elite performance in younger and older pianists. *Journal of Experimental Psychology: General*, 125, 331-359.
- Lackner, J. R., & DiZio, P. (2005). Vestibular, proprioceptive, and haptic contributions to spatial orientation. *Annual review of psychology*, 56, 115-47. doi:10.1146/annurev.psych.55.090902.142023

Lambrey, S., Viaud-Delmon, I., & Berthoz, A. (2002). Influence of a sensorimotor conflict on the memorization of a path traveled in virtual reality. *Brain research. Cognitive brain research*, 14(1), 177-86. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12063141>

Lambrey, S., Samson, S., Dupont, S., Baulac, M., & Berthoz, A. (2003). Reference frames and cognitive strategies during navigation: is the left hippocampal formation involved in the sequential aspects of route memory? *International Congress Series*, 1250, 261-274. doi:10.1016/S0531-5131(03)00997-X

Larrue, F., Sauzeon, H., Foloppe, D., Wallet, G., Gross, C. & N'kaoua (submitted). Differences in spatial learning transfer from virtual to real depending on body-based input.

Lee, J. H., Ku, J., Cho, W., Hahn, W. Y., Kim, I. Y., Lee, S.-M., Kang, Y., et al. (2003). A virtual reality system for the assessment and rehabilitation of the activities of daily living. *Cyberpsychology & behavior : the impact of the Internet, multimedia and virtual reality on behavior and society*, 6(4), 383-8. doi:10.1089/109493103322278763

Mallot, H. a, & Gillner, S. (2000). Route navigating without place recognition: What is recognised in recognition-triggered responses? *Perception*, 29(1), 43-55. doi:10.1068/p2865

Matheis, R. J., Schultheis, M. T., Tiersky, L. a, DeLuca, J., Millis, S. R., & Rizzo, A. (2007). Is learning and memory different in a virtual environment? *The Clinical neuropsychologist*, 21(1), 146-61. doi:10.1080/13854040601100668

Moffat, S.D., Hampson, E., & Hatzipantelis, M. (1998) Navigation in a virtual maze: sex differences and correlation with psychometric measures of spatial ability in humans. *Evolution and Human Behaviour*, 19, 73-87.

Mohler, B. J., Thompson, W. B., Creem-Regehr, S. H., Willemsen, P., Pick, Jr., H. L., & Rieser, J. J. (2007). Calibration of locomotion resulting from visual motion in a treadmill-based virtual environment. *ACM Transactions on Applied Perception*, 4(1), 4-es. doi:10.1145/1227134.1227138

- Montello, D. R. (1991). The measurement of cognitive distance: Methods and construct validity. *Journal of Environmental Psychology, 11*(2), 101-122. ACADEMIC PRESS LTD.
- Montello, D. R. (1998). A new framework for understanding the acquisition of spatial knowledge in large-scale environments. *Spatial and temporal reasoning in geographic information systems, 29*(4), 143-154. Oxford University Press.
- Montello, D.R. (2005). Navigation. In P. Shah et A. Miyake (Eds.), *The Cambridge handbook of visuospatial thinking* (pp. 257-294). Cambridge: Cambridge University Press.
- Morganti, F., Carassa, A., & Geminiani, G. (2007). Planning optimal paths: A simple assessment of survey spatial knowledge in virtual environments. *Computers in Human Behavior, 23*(4), 1982-1996. doi:10.1016/j.chb.2006.02.006
- Nori, R., Grandicelli, S., & Giusberti, F. (2009). Individual Differences in Visuo-Spatial Working Memory and Real-World Wayfinding. *Swiss Journal of Psychology, 68*(1), 7-16. doi:10.1024/1421-0185.68.1.7
- Pépin, M., & Dorval, M. (1988). Effets de la pratique de jeux vidéo sur deux mesures d'habiletés visuo-spatiales. *Revue Québécoise de Psychologie, 9*(1), 34-43.
- Péruch, P., Vercher, J., & Gauthier, G. M. (1995). Acquisition of Spatial Knowledge Through Visual Exploration of Simulated Environments. *Ecological Psychology, 7*(1), 1.
- Péruch, P., & Wilson, P. N. (2004). Active versus passive learning and testing in a complex outside built environment. *Cognitive Processing, 5*(4), 218-227. doi:10.1007/s10339-004-0027-x
- Peters, M., Laeng, B., Latham, K., Jackson, M., Zaiyouna, R., & Richardson, C. (1995). A redrawn Vandenberg and Kuse mental rotations test: different versions and factors that affect performance. *Brain and cognition, 28*(1), 39-58. doi:10.1006/brcg.1995.1032
- Pick, H.L.J., & Lockman, J.J. (1981) From frames of reference to spatial representations. In Liben, L.S., Patterson, A.H., Newcombe, N., (Eds) *Spatial representation and behavior across the life span*, (pp. 39-61). New York: Academic Press.

- Presson, C. C., DeLange, N., & Hazelrigg, M. D. (1989). Orientation specificity in spatial memory: What makes a path different from a map of the path? *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 15(5), 887-897. doi:10.1037/0278-7393.15.5.887
- Richardson, A. E., Powers, M. E., & Bousquet, L. G. (2011). Video game experience predicts virtual, but not real navigation performance. *Computers in Human Behavior*, 27(1), 552-560. doi:10.1016/j.chb.2010.10.003
- Rizzo, A. A., & Buckwalter, J. G. (1997). Virtual reality and cognitive assessment and rehabilitation: the state of the art. *Studies in health technology and informatics*, 44, 123-45.
- Rizzo, A. A., Buckwalter, J. G., Bowerly, T., Van Der Zaag, C., Humphrey, L., Neumann, U., Chua, C., et al. (2000). The Virtual Classroom: A Virtual Reality Environment for the Assessment and Rehabilitation of Attention Deficits. *CyberPsychology & Behavior*, 3(3), 483-499. doi:10.1089/10949310050078940
- Ruddle, R. A., & Péruch, P. (2004). Effects of proprioceptive feedback and environmental characteristics on spatial learning in virtual environments. *International Journal of Human-Computer Studies*, 60(3), 299-306. doi:10.1016/j.ijhcs.2003.10.001
- Ruddle, R. A., & Lessels, S. (2009). The benefits of using a walking interface to navigate virtual environments. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, 16(1), doi:10.1145/1502800.1502805
- Ruddle, R. A., Volkova, E., Mohler, B., & Bühlhoff, H. H. (2011a). The effect of landmark and body-based sensory information on route knowledge. *Memory & Cognition*, 39(4), 686-699. doi:10.3758/s13421-010-0054-z
- Ruddle, R. A., Volkova, E., & Bühlhoff, H. H. (2011b). Walking improves your cognitive map in environments that are large-scale and large in extent. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, 18(2), 1-20. doi:10.1145/1970378.1970384

- Shepard, R. N., & Metzler, J. (1971). Mental Rotation of Three-Dimensional Objects. *Science*, *171*(3972), 701-703. doi:10.1126/science.171.3972.701
- Siegel, A. W., & White, S. H. (1975). The development of spatial representations of large-scale environments. *Advances in child development and behavior*, *10*, 9-55.
- Spence, I., & Feng, J. (2010). Video games and spatial cognition. *Review of General Psychology*, *14*(2), 92-104. doi:10.1037/a0019491
- Terlecki, M. S., & Newcombe, N. S. (2005). How Important Is the Digital Divide? The Relation of Computer and Videogame Usage to Gender Differences in Mental Rotation Ability. *Sex Roles*, *53*(5-6), 433-441. doi:10.1007/s11199-005-6765-0
- Thorndyke, P.W., & Goldin, S.E. (1983). Spatial learning and reasoning skill, In. Pick, H.L. and Acredolo, L.P. (Eds.) *Spatial Orientation: Theory, Research and Application*, (pp. 195–217). New York: Plenum Press.
- Tversky, B. (2000). *Levels and structure of spatial knowledge. Cognitive Mapping - Past, present and future*. R. Kitchin and S. Freundschuh. London, Routledge : 24-43.
- Vandenberg, S. G., & Kuse, A. R. (1978). Mental rotations, a group test of three-dimensional spatial visualization. *Perceptual and motor skills*, *47*(2), 599-604.
- Waller, D., Hunt, E., & Knapp, D. (1998). The Transfer of Spatial Knowledge in Virtual Environment Training. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, *7*(2), 129-143. doi:10.1162/105474698565631
- Waller, D. (2000). Individual differences in spatial learning from computer-simulated environments. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, *6*(4), 307-321. doi:10.1037//1076-898X.6.4.307
- Waller, D., & Richardson, A. R. (2008). Correcting distance estimates by interacting with immersive virtual environments: effects of task and available sensory information. *Journal of experimental psychology. Applied*, *14*(1), 61-72. doi:10.1037/1076-898X.14.1.61

Wallet, G., Sauzéon, H., Rodrigues, J., & N'Kaoua, B. (2008). Use of virtual reality for spatial knowledge transfer. *Proceedings of the 2008 ACM symposium on Virtual reality software and technology - VRST '08* (p. 175). New York, New York, USA: ACM Press. doi:10.1145/1450579.1450616

Wallet, G., Sauzéon, H., Rodrigues, J., & N'Kaoua, B. (2009). Transfer of spatial knowledge from a virtual environment to reality: Impact of route complexity and subjects strategy on the exploration mode. *Journal of Virtual Reality and Broadcasting*, 6(4), 572–574.

Wallet, G., Sauzéon, H., Rodrigues, J., Larrue, F., & N'kaoua, B. (2010). Virtual/Real transfer of spatial learning: impact of activity according to the retention delay. *Studies in health technology and informatics*, 154, 145-9

Wallet, G., Sauzéon, H., Pala, P. A., Larrue, F., Zheng, X., & N'kaoua, B. (2011). Virtual/Real transfer of spatial knowledge: benefit from visual fidelity provided in a virtual environment and impact of active navigation. *Cyberpsychology, behavior and social networking*, 14(7-8), 417-23. doi:10.1089/cyber.2009.0187

Wechsler, D. (2001). *Échelle clinique de mémoire de Wechsler-3ème édition*. ECPA.2001..

Wilson, P., Foreman, N., Gillett, R., & Stanton, D. (1997). Active Versus Passive Processing of Spatial Information in a Computer-Simulated Environment. *Ecological Psychology*, 9(3), 207-222. doi:10.1207/s15326969eco0903_3

Wilson, P. N. (1999). Active Exploration of a Virtual Environment Does Not Promote Orientation or Memory for Objects. *Environment and Behavior*, 31(6), 752-763. doi:10.1177/00139169921972335

Wilson, P. N. , & Péruch, P. (2002). The influence of interactivity and attention on spatial learning in a desktop virtual environment. *Current Psychology of Cognition*, 21, 601-633.

Witmer, B. (1996). Virtual spaces and real world places: transfer of route knowledge. *International Journal of Human-Computer Studies*, 45(4), 413-428. doi:10.1006/ijhc.1996.0060

Table des illustrations

<i>Figure 1.1: Test de rotation mentale de Vanderberg et Kuse(1978).</i>	10
<i>Figure 1.2: Test des cubes de Corsi(1972).</i>	11
<i>Figure 1.3: Test de Guilford et Zimmerman(1948).</i>	12
<i>Figure 1.4: Modèle sériel d'acquisition des connaissances L-R-S de Siegel et White (1975).</i>	16
<i>Figure 1.5: Modèle de Lynch (1960), illustré sur notre environnement virtuel.</i>	18
<i>Figure 1.6 : Schéma de la théorie des graphes, selon Gillner et Mallot (1998).</i>	21
<i>Figure 2.1 : Classification de différents dispositifs selon la distinction Richesse Sensorielle Vs Interactivité adapté de (Steuer,1992), repris du Traité de la Réalité Virtuelle, L'homme et son environnement (Fuchs et al., 2006).</i> .	38
<i>Figure 2. 2 : Boucle « perception, Cognition, Action » en RV, tiré du Traité de la Réalité Virtuelle (Fuchs et al.,2006).</i>	41
<i>Figure 2.3: Schéma des 3 niveaux d'immersion et d'interaction en Réalité virtuelle, tiré du Traité de la Réalité Virtuelle (Fuchs et al., 2006).</i>	44
<i>Figure 2.4 : Exemple de visiocasque.</i>	46
<i>Figure 2. 5 : Exemple d'un système CAVE où l'utilisateur est plongé dans un cube sur lequel l'environnement est projeté. Le sujet est ici équipé de lunettes stéréoscopiques pour permettre une perception en relief de l'EV.</i>	46
<i>Figure 2.6: A gauche, un dôme ; à droite un écran semi cylindrique collaboratif.</i>	47
<i>Figure 2.7 : le système Haptic WorkStation®. Ce système est composé de nombreux moteurs.</i>	48
<i>Figure 2.8 : Schéma représentant une interface dans son ensemble.</i>	49
<i>Figure 2.9 : Le système Powered Shoes, Iwata et al. (2006), Université de Tsukuba, Japon.</i>	51
<i>Figure 2.10 : le système CirculaFloor, , Iwata et al. (2005), Université de Tsukuba, Japon.</i>	52
<i>Figure 2.11 : LaCcybersphere © de l'université de Warwick, Angleterre.</i>	52
<i>Figure 2.12 : Exemple d'un système de motion capture (Motion Point Optitrack©).</i>	53
<i>Figure 2.13: Système Sarcos TreadPort ©.</i>	53
<i>Figure 2.14: le tapis omnidirectionnel CyberWalk©.</i>	54
<i>Figure 2.15 : le système Sarcos Uniport©.</i>	55
<i>Figure 2.16 : Métaphore de la main virtuelle (Bolt,1980) (Image du Traité de la Réalité Virtuelle, Fuchs et al., 2006)</i>	56
<i>Figure 2.17 : la technique du ray casting, image tiré du Traité de la Réalité Virtuelle (Fuchs et al.,2006).</i>	57
<i>Figure 3.1 : Test des deux barrages de Zazzo (1972).</i>	60
<i>Figure 3.2 : A gauche la classe virtuelle, à droite les interacteurs permettant d'agir sur la classe virtuelle (Source Adams et al.,2009).</i>	62
<i>Figure 3.3 : Transfert virtuel/réel et facteurs internes influençant sa qualité.</i>	64
<i>Figure 3.4 : Transfert virtuel/réel et facteurs externes influençant sa qualité.</i>	70
<i>Figure 3.5: Ruddle et al. (2011). Impression écran des 4 EV : a) pas de points de repères supplémentaires b) points de repères locaux c) points de repères globaux d) points de repères locaux et globaux.</i>	75
<i>Figure 3.6 : Interfaces visuelles de 144° proposées par Lessels et Ruddle (2004).</i>	78
<i>Figure 3.7: Etude des propriétés de la marche à l'aide de la motion capture (Schellenback et al.,2010).</i>	82
<i>Figure 3.8 : (Ruddle et al.,2011). A gauche, marche physique sur un tapis roulant unidirectionnel et visualisation de l'EV avec HMD. A droite marche physique sur un tapis omnidirectionnel. Les boules blanches sur les deux images correspondent au tracking de position et de tête à l'aide la motion capture.</i>	87
<i>Figure 3.9: Position et noms de la classification internationale des électrodes (image provenant de lathèse de Fabien Lotte, 2008 – tiré de http://www.wikipedia.org).</i>	89
<i>Figure 3.10: Electrode invasive placée dans le cerveau d'un individu.</i>	89
<i>Figure 3.11 : Exemple d'implantation d'électrodes pour des signaux Ecog : a)Photo lors de l'implantation d'une grille de 64 électrodes sur le cortex cérébral. B) Radiographie du crâne d'un individu implanté de 64 électrodes sur le cortex cérébral.</i>	90
<i>Figure 3.12: rythmes du cerveau mesurés par EEG image tirée de la thèse de (Lotte, 2008).</i>	92

Figure 3.13 : Schéma de fonctionnement d'une ICO (Lotte et al., 2007).....	93
Figure 3.14: logiciel Openvibe et feedback visuel par le handball.....	96
Figure 4.1 : Tableau récapitulatif des différentes interfaces proposées, avec la possibilité ou non d'effectuer activement des rotations dans l'EV.	101
Figure 4.2 : Plan cadastral du parcours, ayant permis sa modélisation.....	104
Figure 4.3: Vue de l'environnement virtuel ;Vue de l'environnement réel	104
Figure 4.4 : Capture d'écran du logiciel d'analyse d'activité cognitive et motrice : à gauche, l'environnement réel et l'EV, à droite les différents graphiques des positions, vitesses, accélérations et manipulations des interfaces (en bleu le réel, en orange le virtuel).	107
Figure 4.5: Test d'estimation de direction et du point de départ du trajet.	109
Figure 5.1: Plateforme d'Analyse du Mouvement de l'UMR 5227, CNRS, Université Bordeaux Victor Segalen.	117
Figure 5.2: Fonctionnalités de déplacement avec le joystick (l'axe vertical permet d'avancer, l'axe horizontal permet d'orienter son point de vue à gauche ou à droite).....	118
Figure 5.3: Schéma du mode de fonctionnement du tapis roulant COSCOM@.	119
Figure 5.4: Schéma de fonctionnement de la rotation au tapis roulant (vue de haut).	120
Figure 5.5: Z scores moyens pour la vitesse d'apprentissage.....	123
Figure 5.6: Z scores moyens à la tâche de classification de photos	123
Figure 5.7: Z scores moyens pour l'estimation de distance parcourue	124
Figure 5.8: Z scores moyens aux estimations de directions.....	125
Figure 5.9: Z scores moyens à la Tâche allocentrique du plan du parcours	125
Figure 5.10: Z scores moyens d'erreurs angulaires pour la tâche d'estimation du point de départ	126
Figure 5.11: Z scores moyens pour la vitesse de restitution en Wayfinding.....	126
Figure 5.12: Z scores moyens du pourcentage d'erreurs au wayfinding	127
Figure 6.1 : Vitesse moyenne d'apprentissage.....	137
Figure 6.2 : Performances au classement de photos.....	138
Figure 6.3 : Estimation de la distance selon le mode d'apprentissage et l'expérience en jeu vidéo.	138
Figure 6.4 : Pourcentages d'erreurs à la tâche d'estimation des directions selon le mode d'apprentissage et l'expérience en jeu vidéo.	139
Figure 6.5 : Pourcentages de bonnes réponses à la tâche de croquis	140
Figure 6.6: Pourcentage d'erreurs pour la tâche d'estimation du point de départ du trajet	140
Figure 6.7: Vitesse moyenne en phase de restitution.....	141
Figure 6.8 : Pourcentage d'erreurs de direction pour la tâche de wayfinding	141
Figure 7.1 : Photo d'un sujet utilisant l'interface ICO dans notre quartier virtuel de Bordeaux.....	150
Figure 7.2 : A gauche, session sans feedback ; à droite session d'entraînement avec feedback (OpenVibe, INRIA).	151
Figure 7.3 : Taux en pourcentage de classification et de feedback durant l'apprentissage pour les 8 sujets.	154
Figure 7.4: Résultats de la classification de photos selon le mode d'apprentissage.	156
Figure 7.5 : Estimation de la distance parcourue selon le mode d'apprentissage.	156
Figure 7.6 : Tâche égocentrique d'estimation des directions.	157
Figure 7.7 : Résultats de la tâche de dessin selon les 3 groupes d'apprentissage.....	157
Figure 7.8 : tâche d'estimation du point de départ du trajet.	158
Figure 7.9 : Vitesse moyenne de restitution pour la tâche de wayfinding.	158
Figure 7.10 : Résultats du pourcentage d'erreurs en wayfinding selon le mode d'apprentissage.....	159
Figure 8.1 : Schéma récapitulatif des résultats et interprétations proposées des effets vestibulaires sur la composante égocentrique.....	171
Figure 8.2 : Schéma récapitulatif des résultats et interprétations proposés des effets vestibulaires sur la composante allocentrique.....	173
Figure 8.3 : Schéma récapitulatif des résultats et interprétations proposés des effets vestibulaires sur les performances de wayfinding.....	175
Figure 8.4 : Schématisation des résultats corrélationnels entre performances en RV, tests neuropsychologiques spatiaux, et difficultés cognitives chez les âgés et les DTA (d'après Déjos, cite sa conf).	180

Figure 1 : Plan cadastral du quartier de Bordeaux à modéliser. L'ensemble des maisons ainsi que la taille des rues, maisons et des différents objets inclus dans l'environnement sont déjà mesurés.	185
Figure 2 : Modélisation d'une maison dans le logiciel 3DS Max. En haut à gauche : plan cadastral placé en tant que calque dans le modeleur, la forme rouge représente le début de la modélisation des murs d'une maison ; En haut à droite : extraction d'un objet de la forme et de la taille de la maison modélisée. En bas, application des textures et rendu 3D.....	186
Figure 3 : A gauche l'environnement virtuel vu de haut, à droite l'environnement texturé.	186
Figure 4 : A gauche, figure de l'environnement non détaillé. A droite, figure du même environnement en mode détaillé.	191
Figure 5 : Capture d'écran de la nouvelle interface de configuration de l'environnement virtuel.	194
Figure 6 : Environnement virtuel d'entraînement issu du logiciel Virtools 3.5.	194
Figure 7 : Interface de paramétrage du tapis roulant.	197
Figure 8 : Schéma technique pour l'acquisition des signaux EEG et l'ICO.	199
Figure 9 : Structure des fonctionnalités implémentées dans le quartier virtuel de Bordeaux.	200
Figure 10 : Capture écran du logiciel d'analyse d'activité virtuel/réel.	202
Figure 11 : Schémas des graphiques proposés par le logiciel d'analyse d'activité virtuel/réel.	203
Figure 12 : Graphique présentant l'évolution de la vitesse et le nombre d'accélérations/décélérations/arrêt effectuées avec une interface.	204
Figure 13 : Graphique des rotations hors et dans les intersections au cours du temps. Les valeurs négatives correspondent aux rotations vers la gauche et les valeurs positives aux rotations vers la droite.	205
Figure 14 : A gauche, vue de la chambre, à droite vue allocentrique des 5 pièces de l'appartement.	208

Liste des tableaux

<i>Tableau 5.1: Informations vestibulaires et proprioceptives selon l'interacteur et le type de Rotation.</i>	<i>115</i>
<i>Tableau 5.2: Moyenne et écart type des facteurs internes et des habiletés aux tests spatiaux.</i>	<i>116</i>
<i>Tableau 5.3 : Moyennes et écart-types obtenus à l'ensemble des tests de restitution.....</i>	<i>122</i>
<i>Tableau 6.1 : Tableau des répartitions, âge, sexe et résultats aux différents tests papiers crayons.</i>	<i>135</i>
<i>Tableau 6.2 : Moyenne et écart type des différentes variables mesurées lors de la restitution selon le mode d'apprentissage et l'expertise en Jeux Vidéo.</i>	<i>136</i>
<i>Tableau 7.1 : Taux (en pourcentages) de Classifications correctes lors des sessions d'apprentissage ICO.....</i>	<i>153</i>
<i>Tableau 7.2 : Tableau présentant les performances spatiales moyennes (et les écart types) de chaque groupe d'apprentissage pour le GZ-5, le test de rotation mentale et les cubes de Corsi. La répartition homme/femme ainsi que joueur/non joueur est également indiquée.....</i>	<i>155</i>
<i>Tableau 8.1: Informations vestibulaires et proprioceptives selon l'interacteur et la Rotation Active.....</i>	<i>166</i>

Bibliographie

A

Abernethy, B., Hanrahan, S., Kippers, V., Mackinnon, L. et Pandey, M. (2005). *The Biophysical Foundations of Human Movement*, Palgrave Macmillan, 2nd ed., p.285-288.

Adams, R., Finn, P., Moes, E., Flannery, K. et Rizzo, A. S. (2009). Distractibility in Attention/Deficit/Hyperactivity Disorder (ADHD): the virtual reality classroom. *Child neuropsychology: a journal on normal and abnormal development in childhood and adolescence*, 15(2), 120-35. doi:10.1080/09297040802169077

Alington, D. E., Leaf, R. C. et Monaghan, J. R. (1992). Effects of stimulus color, pattern, and practice on sex differences in mental rotations task performance. *The Journal of psychology*, 126(5), 539-53. doi:1491364

Allen, G. L. (1999). Cognitive Abilities in the Service of Wayfinding: A Functional Approach. *The Professional Geographer*, 51(4), 555-561. doi:10.1111/0033-0124.00192

Allen, G. L., Kirasic, K. C., Rashotte, M. et Haun, D. B. M. (2004). Aging and path integration skill: kinesthetic and vestibular contributions to wayfinding. *Perception et psychophysics*, 66(1), 170-9. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15095949>.

Amorim, M. (2004). *"Je m'oriente donc je suis"*, *Approches phénoménologiques et fonctionnelles du changement de point de vue*. (Unpublished HDR dissertation). Université Paris Sud XI, Paris, France.

Arnaldi, B., Fuchs, P. et Tisseau, J. (2003). *Chapitre 1 du volume 1 du traité de la réalité virtuelle*. Les Presses de l'Ecole des Mines de Paris.

Arnaldi, B. (2003a). *Introduction à la Réalité Virtuelle. Module de Cours*. Récupéré sur <ftp://ftp.irisa.fr/local/siames/Bruno/CoursRV2-inter.pdf>. IRISA.

Arthur, E. J., Hancock, P. et Chrysler, S. T. (1997). The perception of spatial layout in real and virtual worlds. *Ergonomics*, 40(1), 69-77. doi:10.1080/001401397188387

Ashraf, M.A. (2005). « *La 3D interactive en temps réel comme aide à l'acquisition des connaissances spatiales : Etude de l'influence du mode d'exploration* » (Thèse de maîtrise, Faculté des études supérieures de l'Université Laval, Québec).

Astur, R. S., Ortiz, M. L. et Sutherland, R. J. (1998). A characterization of performance by men and women in a virtual Morris water task: *Behavioural Brain Research*, 93(1-2), 185-190. doi:10.1016/S0166-4328(98)00019-9

B

Baddeley, A. D. (1986). *Working memory*. Oxford, England, Clarendon Press.

Baddeley, A.D. (1990). *Human memory: Theory and practice* (p. 208). Hove, UK: Psychology Press.

Bakker, N. H., Werkhoven, P. J. et Passenier, P. O. (1999). The Effects of Proprioceptive and Visual Feedback on Geographical Orientation in Virtual Environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 8(1), 36-53. doi:10.1162/105474699566035

Baños, R. M., Botella, C., Rubió, I., Quero, S., García-Palacios, A. et Alcañiz, M. (2008). Presence and emotions in virtual environments: the influence of stereoscopy. *Cyberpsychology et behavior : the impact of the Internet, multimedia and virtual reality on behavior and society*, 11(1), 1-8. doi: 10.1089/cpb.2007.9936.

Banton, T., Stefanucci, J., Durgin, F., Fass, A. et Proffitt, D. (2005). The Perception of Walking Speed in a Virtual Environment. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 14(4), 394-406. doi:10.1162/105474605774785262

Barlow, T. (2001). Acquisition of Route Knowledge Through Navigation in a Virtual Environment. *International Journal of Cognitive Ergonomics*, 5(3), 279-295. doi: 10.1207/S15327566IJCE0503_9.

Bastian, H. C. (1880). The brain as an organ of mind, *International Scientific Series XXIX, 4th ed.* (pp. 543 (Cited by Jones, 1972, p. 1304). London.

Benton, A. (1974). *Revised visual retention test*. New York, NY: Psychological Corporation.

Berry, D., Lakey, C. et Sellers, E. (2010). Attentional manipulations can enhance P300-based BCI performance, M-5, *The 4th International BCI meeting*, Asilomar, CA, USA.

Berthoz, A., Israel, I., Georges-Francois, P., Grasso, R. et Tsuzuku, T. (1995). Spatial memory of body linear displacement: what is being stored? *Science*, 269(5220), 95-98. doi:10.1126/science.7604286

Berthoz, A. (1997). Parietal and hippocampal contribution to topokinetic and topographic memory. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B Biological Sciences Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*, 352(1360), 1437-1448.

Berthoz, A. (1999). Parietal and hippocampal contribution to topokinetic and topographic memory. Dans Burgess, N., Jeffery, K.J., O'Keefe, J. (Eds) *The hippocampal and parietal foundations of spatial cognition*, (pp. 381-403). Oxford: Oxford University Press.

Best, G. (1970). Direction finding in large buildings. Dans : CANTER D. (Ed.) *Architectural Psychology*. (pp . 72 – 75). London : RIBA Publication.

Bioulac, B., Burbaud, P., Cazalets, J. et Gross, C. (2005). Fonctions motrices. *EMC - Kinésithérapie*, 1(4), 183-233. doi:10.1016/j.emckns.2005.10.001

Blade, M. F. et Watson, W. S. (1955). Increase in spatial visualization test scores during engineering study. *Psychological Monographs: General and Applied*, 69(12), 1-13. doi:10.1037/h0093697

Blankertz, B., Sannelli, C., Halder, S., Hammer, E., Kübler, A., Müller, K., Curio, G. et Dickhaus, T. (2010). Neurophysiological predictor of SMR-based BCI performance. *Neuroimage*, vol.51(4): p.1303–1309.

Bolt, R. A. (1980). Put-that-there: Voice and gesture at the graphics interface. *Computer Graphics*, pages 262–270.

Boot, W. R., Kramer, A. F., Simons, D. J., Fabiani, M. et Gratton, G. (2008). The effects of video game playing on attention, memory, and executive control. *Acta psychologica*, 129(3), 387-98. Elsevier B.V. doi: 10.1016/j.actpsy.2008.09.005.

Bosco, A., Longoni, A. M. et Vecchi, T. (2004). Gender effects in spatial orientation: cognitive profiles and mental strategies. *Applied cognitive psychology*, 18(5), 519-532. doi: 10.1002/acp.1000.

Bosco, A., Picucci, L., Caffò, A. O., Lancioni, G. E. et Gyselinck, V. (2008). Assessing human reorientation ability inside virtual reality environments: the effects of retention interval and landmark characteristics. *Cognitive processing*, 9(4), 299-309. doi:10.1007/s10339-008-0210-6

Bowman, D. a, Koller, D. et Hodges, L. F. (1998). A methodology for the evaluation of travel techniques for immersive virtual environments. *Virtual Reality*, 3(2), 120-131. doi:0.1007/BF01417673

Bowman, D. (1999). Formalizing the Design, Evaluation, and Application of Interaction Techniques for Immersive Virtual Environments. *Journal of Visual Languages & Computing*, 10(1), 37-53. doi: 10.1006/jvlc.1998.0111.

Bowman, D. A., Davis, E. T., Hodges, L. F. et Badre, A. N. (1999a). Maintaining spatial orientation during travel in an immersive virtual environment. *Presence*, 8(6), 618–631.

Bowman, D. (1999b). *Interaction Techniques for Common Tasks in Immersive Virtual Environments*. (Thèse de doctorat, Georgia Institute of Technology).

Brooks, B.M., McNeil, J.E., Rose, F.D., Greenwood, R.J., Attree, E.A. et Leadbetter, A.G. (1999). Route learning in a case of amnesia: A preliminary investigation into the efficacy of training in a virtual environment. *Neuropsychological Rehabilitation*, 9, 63-76.

Brooks, B. M., Attree, E. A., Rose, F. D., Clifford, B. R. et Leadbetter, A. G. (1999). The specificity of memory enhancement during interaction with a virtual environment. *Memory*, 7, 65–78.

Brooks, B. M., Rose, F. D., Potter, J., Jayawardena, S. et Morling, A. (2004). Assessing stroke patients' prospective memory using virtual reality. *Brain injury: [BI]*, 18(4), 391-401. doi:10.1080/02699050310001619855

Brunner, C., Allison, B., Krusienski, D., Kaiser, V., Müller-Putz, G., Pfurtscheller, G. et Neuper, C. (2010). Improved signal processing approaches in an offline simulation of a hybrid BCI, *Neurosc. Meth.*, vol.188(1): p.165-173.

Buch, E., Weber, C., Cohen, L., Braun, C., Dimyan, M., Ard, T., Mellinger, J., Caria, A., Soekadar, S., Fourkas, A. et Birbaumer, N. (2008). Think to move: a neuromagnetic BCI system for chronic stroke. *Stroke*. vol.39: p.910–917.

Burdea, G. et Coiffet, P. (1993). *La Réalité Virtuelle*. Hermès.

Burgess, N., Trinkler, I., King, J., Kennedy, A. et Cipolotti, L. (2006). Impaired allocentric spatial memory underlying topographical disorientation. *Reviews in the neurosciences*, 17(1-2), 239-51. doi:16703955

Bystrom, K.-E., Barfield, W. et Hendrix, C. (1999). A Conceptual Model of the Sense of Presence in Virtual Environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 8(2), 241-244. doi:10.1162/105474699566107

C

Cabestaing, F. et Rakotomamonjy, A. (2007). Introduction aux BCI, Dans *Actes du 21eme Colloque sur le Traitement du Signal et des Images (GRETSI'07)*, (Troyes, France), pp. 617-620.

Caglio, M., Latini-Corazzini, L., D'agata, F., Cauda, F., Sacco, K., Monteverdi, S., Zettin, M. et al. (2009). Video game play changes spatial and verbal memory: rehabilitation of a single case with traumatic brain injury. *Cognitive processing*, 10 Suppl 2, S195-7. doi:10.1007/s10339-009-0295-6

Campos, J. L., Byrne, P. et Sun, H.-J. (2010). The brain weights body-based cues higher than vision when estimating walked distances. *European Journal of Neuroscience*, 31(10), 1889-1898. doi: 10.1111/j.1460-9568.2010.07212.x.

Carassa, A., Geminiani, G., Morganti, F. et Varotto, D. (2003). Active and passive spatial learning in a complex virtual environment: the effect of efficient exploration. *Cognitive Processing. International Quarterly of Cognitive Science*, 3-4, 65-81.

Castelli, L., Latinicorazzini, L. et Geminiani, G. (2008). Spatial navigation in large-scale virtual environments: Gender differences in survey tasks. *Computers in Human Behavior*, 24(4), 1643-1667. doi:10.1016/j.chb.2007.06.005

Chance, S. S., Gaunet, F., Beall, A. C. et Loomis, J. M. (1998). Locomotion Mode Affects the Updating of Objects Encountered During Travel: The Contribution of Vestibular and Proprioceptive Inputs to Path Integration. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 7(2), 168-178. doi:10.1162/105474698565659

Chen, J. L. et Stanney, K. M. (1999). A Theoretical Model of Wayfinding in Virtual Environments: Proposed Strategies for Navigational Aiding. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 8(6), 671-685. doi:10.1162/105474699566558

Chen, C.-H., Chang, W.-C. et Chang, W.-T. (2009). Gender differences in relation to wayfinding strategies, navigational support design, and wayfinding task difficulty. *Journal of Environmental Psychology*, 29(2), 220-226. doi:10.1016/j.jenvp.2008.07.003

Cherney, I. D. (2008). Mom, Let Me Play More Computer Games: They Improve My Mental Rotation Skills. *Sex Roles*, 59(11-12), 776-786. doi: 10.1007/s11199-008-9498-z.

Coluccia, E., Iosue, G. et Antonellabrandimonte, M. (2007). The relationship between map drawing and spatial orientation abilities: A study of gender differences. *Journal of Environmental Psychology*, 27(2), 135-144. doi:10.1016/j.jenvp.2006.12.005

Conroy, R.A. (2001). *Spatial Navigation in Immersive Virtual Environments*. (Thèse de Doctorat, Department of Architecture, University College London, London).

Colom, R., Contreras, M. J., Shih, P. C. et Santacreu, J. (2003). The Assessment of Spatial Ability with a Single Computerized Test. *European Journal of Psychological Assessment*, 19(2), 92-100. doi:10.1027//1015-5759.19.2.92

Coquillard, S., Fuchs, P., Grosjean, J. et Hachet, M. (2006). Les techniques d'interaction pour les primitives comportementales virtuelles. Dans Fuchs, P., Moreau, G., Burkhardt, J.M. et Coquillard, S. *Le traité de la réalité virtuelle Volume II : l'Interfaçage, l'immersion et l'interaction en environnement virtuel*. Mines de Paris.

Corsi, P. M. (1972). *Human memory and the medial temporal region of the brain* (Thèse de doctorat, McGill University, Montreal).

Craske, B. et Crawshaw, M. (1975). Shifts in kinesthesia through time and after active and passive movement. *Perceptual and motor skills*, 40(3), 755-61. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/1178361>

Cushman, L. A., Stein, K. et Duffy, C. J. (2008). Detecting navigational deficits in cognitive aging and Alzheimer disease using virtual reality. *Neurology*, 71(12), 888-95. doi:10.1212/01.wnl.0000326262.67613.fe

Cutmore, T., Hine, T., Maberly, K., Langford, N. et Hawgood, G. (2000). Cognitive and gender factors influencing navigation in a virtual environment. *International Journal of Human-Computer Studies*, 53(2), 223-249. doi:10.1006/ijhc.2000.0389

D

Darken, R. P. et Sibert, J. L. (1996). Wayfinding strategies and behaviors in large virtual worlds. *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems common ground - CHI '96* (pp. 142-149). New York, New York, USA: ACM Press. doi:10.1145/238386.238459

Darken, R. P., Cockayne, W. R. et Carmein, D. (1997). The omni-directional treadmill. *Proceedings of the 10th annual ACM symposium on User interface software and technology - UIST '97* (pp. 213-221). New York, New York, USA: ACM Press. doi:10.1145/263407.263550

Darken, R. P., Allard, T. et Achille, L. B. (1998). Spatial Orientation and Wayfinding in Large-Scale Virtual Spaces: An Introduction. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 7(2), 101-107. doi:10.1162/105474698565604

Day, B. L. et Fitzpatrick, R. C. (2005). Virtual head rotation reveals a process of route reconstruction from human vestibular signals. *The Journal of physiology*, 567(Pt 2), 591-7. doi:10.1113/jphysiol.2005.092544

De Luca, A., Mattone, R., Robuffo Giordano, P. et Bulthoff, H. H. (2009). Control design and experimental evaluation of the 2D CyberWalk platform. *2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 5051-5058. Ieee. doi:10.1109/IROS.2009.5354610

Dejos, M., Sauzéon, H., Falière, A., Aguilova, L. et N'Kaoua B.(2011). La réalité virtuelle au service du dépistage des troubles de la cognition spatiale dans la maladie d'Alzheimer. *6ème journées de l'AFRV (10-12 oct)*, Bidart, France.

Delis, D. C., Kramer, J. H., Kaplan, E. et Ober, B. A. (2000). *California verbal learning test: Adult version manual* (2nd 756ed.). San Antonio, TX: Psychological Corporation.

Derouesné, C., Dealberto, M. J., Boyer, P., Lubin, S., Sauron, B., Piette, F., Kohler, F. et al. (1993). Empirical evaluation of the 'Cognitive Difficulties Scale' for assessment of memory complaints in general practice: A study of 1628 cognitively normal subjects aged 45-75 years. *International Journal of Geriatric Psychiatry*, 8(7), 599-607. doi:10.1002/gps.930080712

Dobson, S. H., Kirasic, K. C. et Allen, G. L. (1995). Age-related differences in adults' spatial task performance: Influences of task complexity and perceptual speed. *Aging, Neuropsychology, and Cognition*, 2(1), 19-38. doi:10.1080/13825589508256587

Donohue, S. E., Woldorff, M. G. et Mitroff, S. R. (2010). Video game players show more precise multisensory temporal processing abilities. *Attention, perception & psychophysics*, 72(4), 1120-9. doi:10.3758/APP.72.4.1120

Downs, R. et Stea, D. (1977). *Maps in minds: Reflections on cognitive mapping*. New York: Harper and Row.

Driscoll, I., Hamilton, D. A., Yeo, R. A., Brooks, W. M. et Sutherland, R. J. (2005). Virtual navigation in humans: the impact of age, sex, and hormones on place learning. *Hormones and behavior*, 47(3), 326-35. doi:10.1016/j.yhbeh.2004.11.013

Driskell, J., Copper, C. et Moran, A. (1994). Does mental practice improve performance? *Applied Psychology*, vol.79: p.481-492.

F

Feng, J., Spence, I. et Pratt, J. (2007). Playing an action video game reduces gender differences in spatial cognition. *Psychological science : a journal of the American Psychological Society / APS*, 18(10), 850-5. doi: 10.1111/j.1467-9280.2007.01990.x.

Fernandes, K. J., Raja, V. et Eyre, J. (2003). Cybersphere. *Communications of the ACM*, 46(9), 141. doi:10.1145/903893.903929

Finks, R. (1989). Reinterpreting visual patterns in mental imagery. *Cognitive Science*, 13(1), 51-78. doi:10.1016/0364-0213(89)90011-6

Foley, J. E. et Cohen, A. J. (1984). Working Mental Representations of the Environment. *Environment and Behavior*, 16(6), 713-729. doi:10.1177/0013916584166603

Foley, J., Van Dam, A., Feiner, S. et Hugues, J.(1996). *Computer graphics Principles and Practice*. Addison-Wesley, 2e edition.

Folstein, M. F., Folstein, S. E. et McHugh, P. R. (1975). "Mini-mental state." *Journal of Psychiatric Research*, 12(3), 189-198. doi:10.1016/0022-3956(75)90026-6

Foreman, N., Sandamas, G. et Newson, D. (2004). Distance underestimation in virtual space is sensitive to gender but not activity-passivity or mode of interaction. *Cyberpsychology & behavior : the impact of the Internet, multimedia and virtual reality on behavior and society*, 7(4), 451-7. doi:10.1089/cpb.2004.7.451

Fuchs , P. (1996). *Les interfaces de la réalité virtuelle*. Les Presses de l'Ecole des Mines de Paris. ISBN 2-9509954-0-3.

Fuchs, P., Nashashibi, F. et Lourdeaux, D. (1999). A theoretical approach of the design and evaluation of a virtual reality device, 11-20. Retrieved from <http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsid=1368763>

Fuchs, P., Moreau, G., Berthoz, A. et Vercher, J.L. (2006). *Le traité de la réalité virtuelle Volume I : L'homme et son environnement*. Mines de Paris.

Fuchs, P., Burkhardt, J.M. et Moreau, G. (2006). Approche théorique et pragmatique de la réalité virtuelle. Dans Fuchs, P., Moreau, G., Burkhardt, J.M. et Coquillart, S. *Le traité de la réalité virtuelle Volume II : l'Interfaçage, l'immersion et l'interaction en environnement virtuel*. Mines de paris

Fuchs, P., Moreau, G., Burkhardt, J.M. et Coquillart, S. (2006). *Le traité de la réalité virtuelle Volume II : l'Interfaçage, l'immersion et l'interaction en environnement virtuel*. Mines de paris.

G

Galán, F., Nuttin, M. et Lew, E.(2008). A brain-actuated wheelchair: Asynchronous and non-invasive Brain-computer interfaces for continuous control of robots. *Clinical Neurophysiology*.;119(9):2159-2169.

Gaunet, F., Vidal, M., Kemeny, A. et Berthoz, A. (2001). Active, passive and snapshot exploration in a virtual environment: influence on scene memory, reorientation and path memory. *Cognitive Brain Research*, 11(3), 409-420. doi:10.1016/S0926-6410(01)00013-1

Gentiletti, G.G., Gebhart, J.G., Acevedo, R.C., Yáñez-Suárez, O. et Medina-Bañuelos, V. (2009). Command of a simulated wheelchair on a virtual environment using a brain-computer interface. *IRBM- Ingénierie et Recherche Biomedicale / BioMedical Engineering and Research*, 30 (5-6), pp. 218-225.

Gillner, S. et Mallot, H. A. (1998). Navigation and acquisition of spatial knowledge in a virtual maze. *Journal of cognitive neuroscience*, 10(4), 445-63. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/9712675>

Golledge, R.G. (1999) Human wayfinding and cognitive maps. Dans Baltimore and London (Ed) *Wayfinding Behavior*, (pp. 5-45). The John Hopkins University Press.

Graf, W. et Klam, F. (2006). Le système vestibulaire : anatomie fonctionnelle et comparée, évolution et développement. *Comptes Rendus Palevol*, 5(3-4), 637-655. doi:10.1016/j.crpv.2005.12.009

Granek, J. a, Gorbet, D. J. et Sergio, L. E. (2009). Extensive video-game experience alters cortical networks for complex visuomotor transformations. *Cortex; a journal devoted to the study of the nervous system and behavior*, 1-13. Elsevier Srl. doi:10.1016/j.cortex.2009.10.009

Grant, S.C. et Magee, L.E., (1998). Contributions of proprioception to navigation in virtual environments. *Human Factors* 40, 489–497

Green, C. S. et Bavelier, D. (2003). Action video game modifies visual selective attention. *Nature*, 423(6939), 534-7. doi:10.1038/nature01647

Green, C. S. et Bavelier, D. (2007). Action-video-game experience alters the spatial resolution of vision. *Psychological science : a journal of the American Psychological Society / APS*, 18(1), 88-94. doi: 10.1111/j.1467-9280.2007.01853.x.

Guger, C., Schlögl, A., Neuper, C., Walterspacher, D., Strein, T. et Pfurtscheller, G. (2001). Rapid prototyping of an EEG-based brain-computer interface (BCI). *IEEE transactions on neural systems and rehabilitation engineering: a publication of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 9(1), 49-58. doi:10.1109/7333.918276

Guger, C., Edlinger, G., Harkam, W., Niedermayer, I. et Pfurtscheller et G. (2003). How many people are able to operate an EEG-based brain-computer interface (BCI), *Neural Systems and Rehabilitation Engineering, IEEE Transactions*, vol.11(2): p.145–147.

Guilford, J. P. et Zimmerman, W. S. (1948). The Guilford-Zimmerman Aptitude Survey. *Journal of Applied Psychology*, 32(1), 24-34. doi:10.1037/h0063610

H

Halder, S., Agorastos, D., Veit, R., Hammer, E., Lee, S., Varkuti, B., Bogdan, M., Rosenstiel, W., Birbaumer N. et Küble, A. (2011). Neural mechanisms of BCI control. *NeuroImage*, vol.55(4), p. 1779-1790.

Hegarty, M., Richardson, A. E., Montello, D. R., Lovelace, K. et Subbiah, I. (2002). Development of a self-report measure of environmental spatial ability. *Intelligence*, 30, 425–447.

Henderson, V. W., Mack, W. et Williams, B. W. (1989). Spatial disorientation in Alzheimer's disease. *Archives of Neurology*, 46(4), 391-394.

Hinckley, K., Pausch, R., Goble, J. C. et Kassell, N. F. (1994). Passive real-world interface props for neurosurgical visualization. *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems celebrating interdependence - CHI '94* (pp. 452-458). New York, New York, USA: ACM Press. doi:10.1145/191666.191821

Hoffman, H. G., Patterson, D. R., Carrougher, G. J. et Sharar, S. R. (2001). Effectiveness of virtual reality-based pain control with multiple treatments. *The Clinical journal of pain*, 17(3), 229-35. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11587113>

Hollerbach, J. M., Xu, Y., Christensen, R. et Jacobsen, S. C. (2000). Design specifications for the second generation Sarcos Treadport locomotion interface. Dans *Haptics Symposium, ProcASME Dynamic Systems and Control Division*, Orlando, DSC-Vol. 69–72, 1293–1298.

Hommel, B., Müsseler, J., Aschersleben, G. et Prinz, W. (2001). The Theory of Event Coding (TEC): a framework for perception and action planning. *The Behavioral and brain sciences*, 24(5), 849-78; discussion 878-937. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12239891>

Hunt, R. R. et Einstein, G. O. (1981). Relational and item-specific information in memory. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 20, 497–514.

Huteau, M. (1987). *Style Cognitif et Personnalité : la Dépendance-Indépendance à l'Egard du Champ*. Presses Universitaires de Lille.

I

Iwata, H., Yano, H., Fukushima, H. et Noma, H. (2005). CirculaFloor [locomotion interface]. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 25(1), 64-67. doi:10.1109/MCG.2005.5

Iwata, H., Yano, H. et Tomioka, H. (2006). Powered shoes. *ACM SIGGRAPH 2006 Emerging technologies on – SIGGRAPH '06* (p. 28). New York, New York, USA: ACM Press. doi:10.1145/1179133.1179162

J

Johns, C. (2002). *The spatial learning method* (Mémoire de maîtrise, Université de Cap Town).

K

Kalfat, H. et Sauzéon, H. (2009). Le processus de vieillissement et la vieillesse. Dans E. Trouvé (Ed.) *L'ergothérapie auprès des personnes âgées*, Edition SOLAL, pp 1-16.

Kearns, M. J., Warren, W. H., Duchon, A. P. et Tarr, M. J. (2002). Path integration from optic flow and body senses in a homing task. *Perception*, 31(3), 349–374.

Kennedy, R. S., Lane, N. E., Berbaum, K. S. et Lilienthal, M. G. (1993). Simulator Sickness Questionnaire: An enhanced method for quantifying simulator sickness. *International Journal of Aviation Psychology*, 3(3), 203–220.

Kirasic, K. C. (2000). Age differences in adults' spatial abilities, learning environmental layout, and wayfinding behavior. *Spatial Cognition and Computation*, 2(2), 117-134. doi:10.1023/A:1011445624332

Kitchin, R. (1994). Cognitive maps: What are they and why study them? *Journal of Environmental Psychology*, 14(1), 1-19. doi:10.1016/S0272-4944(05)80194-X

Klatzky, R.L., Loomis, J.M., Beall, A.C., Chance, S.S. et Golledge, R.G. (1998). Spatial updating of self-position and orientation during real, imagined, and virtual locomotion. *Psychological Science*, 9, 293-298.

Kleih, S. C., Nijboer, F., Halder, S. et Kübler, a. (2010). Motivation modulates the P300 amplitude during brain-computer interface use. *Clinical neurophysiology: official journal of the International Federation of Clinical Neurophysiology*, 121(7), 1023-1031. International Federation of Clinical Neurophysiology. doi:10.1016/j.clinph.2010.01.034

Klinger, E. (2005). *Apports de la réalité virtuelle à la prise en charge de troubles cognitifs et comportementaux* (Thèse de Doctorat. École Nationale Supérieure des Télécommunications. Paris, France).

Klobassa, D., Vaughan, T., Brunner, P., Schwartz, N., Wolpaw, J., Neuper, C. et Sellers, E. (2009). Toward a highthroughput auditory P300-based BCI, *Clinical Neurophysiology*, vol.120: p.1252–1261.

Kosslyn, S.M. (1975). Information representation in visual images. *Cognitive Psychology*, 7, 341-370.

Kosslyn, S.M., Ball, T.M. et Reiser, B.J. (1978) Visual images preserve metric spatial information: evidence from studies of image scanning. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 4(1), 47-60.

Kosslyn, S.M. (1990) Mental imagery. Dans Osherson, D.N., Kosslyn S.M., Hollerback, J.M., (Eds.), *Visual cognition and action: an invitation to cognitive science*, Vol. 2, (pp. 73 97). Cambridge, MA: MIT Press.

Krampe, R. Th. et Ericsson, K. A. (1996). Maintaining excellence: Deliberate practice and elite performance in younger and older pianists. *Journal of Experimental Psychology: General*, 125, 331-359.

Krusienski, D. J., Sellers, E. W., Cabestaing, F., Bayoudh, S., McFarland, D. J., Vaughan, T. M. et Wolpaw, J. R. (2006). A comparison of classification techniques for the P300 Speller. *Journal of neural engineering*, 3(4), 299-305. doi:10.1088/1741-2560/3/4/007

Kübler, A., Mattia, D., George, H., Doron, B. et Neuper, C. (2010). How much learning is involved in BCI control? *The 4th International BCI meeting*, Asilomar, CA, USA.

L

Lalor, E. C., Kelly, S. P., Finucane, C., Burke, R., Smith, R., Reilly, R. B. et McDarby, G. (2005). Steady-State VEP-Based Brain-Computer Interface Control in an Immersive 3D Gaming Environment. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2005(19), 3156-3164. doi:10.1155/ASP.2005.3156

Lambrey, S., Viaud-Delmon, I. et Berthoz, A. (2002). Influence of a sensorimotor conflict on the memorization of a path traveled in virtual reality. *Brain research. Cognitive brain research*, 14(1), 177-86.

Lambrey, S., Samson, S., Dupont, S., Baulac, M. et Berthoz, A. (2003). Reference frames and cognitive strategies during navigation: is the left hippocampal formation involved in the sequential aspects of route memory? *International Congress Series*, 1250, 261-274. doi: 10.1016/S0531-5131(03)00997-X.

Lawton, C. a. (1994). Gender differences in wayfinding strategies: Relationship to spatial ability and spatial anxiety. *Sex Roles*, 30(11-12), 765-779. doi:10.1007/BF01544230

Le Proux de La Rivière, J.B. (2005). *Suivi vidéo du mouvement vidéo pour l'interaction* (Thèse de doctorat. Université Bordeaux I, Bordeaux, France).

Lebedev, M. a et Nicolelis, M. a L. (2006). Brain-machine interfaces: past, present and future. *Trends in neurosciences*, 29(9), 536-46. doi:10.1016/j.tins.2006.07.004

Lecuyer, A., Lotte, F., Reilly, R. B., Leeb, R., Hirose, M. et Slater, M. (2008). Brain-Computer Interfaces, Virtual Reality, and Videogames. *Computer*, 41(10), 66-72. doi:10.1109/MC.2008.410

Lee J., Ryu J., Jolesz F., Cho Z., Yoo Z. (2009). BCI via real-time fMRI: Preliminary study on thought controlled robotic arm, *Neuroscience Letters*, vol.450(1): p.1-6.

Leeb, R., Scherer, R., Keinrath, C., Guger, C. et Pfurtscheller, G. (2005). Exploring virtual environments with an EEG-based BCI through Motor Imagery, *Biomed. Technik*, vol.52: p.86-91.

Leeb R., Friedman D., Muller-Putz G., Scherer R., Slater M. et Pfurtscheller G. (2007). Self-paced (asynchronous) BCI control of a wheelchair in virtual environments: a case study with a tetraplegic. *Computational Intelligence and Neuroscience*, special issue: "Brain-Computer Interfaces: Towards Practical Implementations and Potential Applications", article ID 79642, p.1-8.

Lessels, S. et Ruddle, R. A. (2004). Changes in navigational behaviour produced by a wide field of view and a high fidelity visual scene. *Proceedings of the 10th Eurographics Symposium on Virtual Environments EGVE'04*, 71-78. Eurographics. Retrieved from <http://eprints.whiterose.ac.uk/4962/>

Lezak, M. D., Howieson, D. B. et Loring, D. W. (2004). *Neuropsychological Assessment* (4th ed.). New York : Oxford University Press.

Liang, J. et Green, M.(1994). JDCAD : A highly interactive 3D modeling system. *Computers and Graphics*, 18(4) :499–506.

Linn, M.C. et Petersen, A.C. (1985) Emergence and characterization of sex differences in spatial ability: a meta-analysis. *Child Development*, 56(6), 1479- 1498.

Lloyd, J., Powell, T. E., Smith, J. et Persaud, N. V. (2006). Use of a virtual-reality town for examining route-memory , and techniques for its rehabilitation in people with acquired brain injury. *Virtual Reality*, (2000), 175-182.

Loomis, J. M., Klatzky, R. L., Golledge, R. G. et Philbeck, J.W. (1999). Human navigation by path integration. Dans R.G. Golledge (Ed.),*Wayfinding behavior: Cognitive mapping and other spatial processes* (pp. 125–151). Baltimore: Johns Hopkins University Press.

Loomis, J. M., Klatzky, R. L. et Golledge, R. G. (2001). Navigating without vision: basic and applied research. *Optometry and vision science : official publication of the American Academy of Optometry*, 78(5), 282-9.

Lotte, F., Lécuyer, A. et Arnaldi, B. (2007). "*Les Interfaces Cerveau-Ordinateur : Utilisation en Robotique et Avancées Récentes*", Journées Nationales de la Recherche en Robotique, *invited paper*.

Lotte F., (2008). *Study of Electroencephalographic Signal Processing and Classification Techniques towards the use of Brain-Computer Interfaces in Virtual Reality Applications* (Thèse de doctorat, Department of informatics, Institut National des Sciences Appliquées, Rennes, France).

Lotte, F. et Renard, Y. (2008). Self-Paced Brain-Computer Interaction with Virtual Worlds: A Quantitative and Qualitative Study “ Out of the Lab .” *Applied Sciences*, 3-8.

Lotte, F., van Langenhove, A., Lamarche, F., Ernest, T., Renard, Y., Arnaldi, B. et Lécuyer, A. (2010). Exploring Large Virtual Environments by Thoughts Using a Brain–Computer

Interface Based on Motor Imagery and High-Level Commands. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 19(1), 54-70. doi:10.1162/pres.19.1.54

Lynch, K.(1960). *The Image of the City*. Cambridge: MIT Press.

M

MacFarlane Smith, I. (1964). *Spatial Ability. Its Educational and Social Significance*. London: University of London Press Ltd.

Mallot, H. et Gillner, S. (2000). Route navigating without place recognition: What is recognised in recognition-triggered responses? *Perception*, 29(1), 43-55. doi:10.1068/p2865

Mahmood, O., Adamo, D., Briceno, E. et Moffat, S. D. (2009). Age differences in visual path integration. *Behavioural brain research*, 205(1), 88-95. doi: 10.1016/j.bbr.2009.08.001.

Marié R.M., Klinger E., Chemin I. et Josset, M. (2003). Cognitive Planning assessed by Virtual Reality. Dans : *VRIC 2003, Laval Virtual Conference*, pp 119-125. Laval, France.

Marié R.M., Chemin I., Lebreton S. et Klinger, E. (2005). Cognitive Planning Assessment and Virtual Environment in Parkinson's Disease. Dans : *VRIC - Laval Virtual (Richir S, Taravel B, eds)*, pp 115-119. Laval.

Mattis, S. (1988). *Dementia Rating Scale: Professional manual*. Odessa, FL: Psychological AssessmentResources.

Martin, R. (1972). *Test des commissions (2nde édition)*. Bruxelles: Editest.

McGee, M. G. (1979). Human spatial abilities: Psychometric studies and environmental, genetic, hormonal, and neurological influences. *Psychological Bulletin*, 86(5), 889-918. doi:10.1037/0033-2909.86.5.889

McGee, J. S., Zaag, C. van der, Buckwalter, J. G., Thiebaut, M., Van Rooyen, a, Neumann, U. et al. (2000). Issues for the Assessment of Visuospatial Skills in Older Adults Using Virtual Environment Technology. *CyberPsychology et Behavior*, 3(3), 469-482. doi: 10.1089/10949310050078931.

- McNamara, T. P., Ratcliff, R. et McKoon, G. (1984). The mental representation of knowledge acquired from maps. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 10(4), 723-732. doi:10.1037/0278-7393.10.4.723
- McNamara, T. P., Hardy, J. K. et Hirtle, S. C. (1989). Subjective hierarchies in spatial memory. *Journal of experimental psychology. Learning, memory, and cognition*, 15(2), 211-27. doi:2522511
- McNamara, T. P., Rump, B. et Werner, S. (2003). Egocentric and geocentric frames of reference in memory of large-scale space. *Psychonomic bulletin et review*, 10(3), 589-95. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/14620351>
- Meijer, F., Geudeke, B. L. et van den Broek, E. L. (2009). Navigating through virtual environments: visual realism improves spatial cognition. *Cyberpsychology et behavior : the impact of the Internet, multimedia and virtual reality on behavior and society*, 12(5), 517-21. doi:10.1089/cpb.2009.0053
- Mittelstaedt, M. et Mittelstaedt, H. (1980). Homing by path integration in a mammal. *Naturwiss*, 67 (11), 566-567.
- Mittelstaedt, M.-L. et Mittelstaedt, H. (2001). Idiothetic navigation in humans: estimation of path length. *Experimental Brain Research*, 139(3), 318-332. doi:10.1007/s002210100735
- Moar, I. et Bower, G. H. (1983). Inconsistency in spatial knowledge. *Memory & Cognition*, 11(2), 107-113. doi:10.3758/BF03213464
- Moffat, S. D., Hampson, E. et Hatzipantelis, M. (1998). Navigation in a "Virtual" Maze: Sex Differences and Correlation With Psychometric Measures of Spatial Ability in Humans. *Evolution and Human Behavior*, 19(2), 73-87. doi:10.1016/S1090-5138(97)00104-9
- Moffat, S. D., Zonderman, a B. et Resnick, S. M. (2001). Age differences in spatial memory in a virtual environment navigation task. *Neurobiology of aging*, 22(5), 787-96. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11705638>

Moffat, S. D., Elkins, W. et Resnick, S. M. (2006). Age differences in the neural systems supporting human allocentric spatial navigation. *Neurobiology of aging*, 27(7), 965-72. doi: 10.1016/j.neurobiolaging.2005.05.011.

Moffat, S. D. (2009). Aging and spatial navigation: what do we know and where do we go? *Neuropsychology review*, 19(4), 478-89. doi: 10.1007/s11065-009-9120-3.

Mohler, B.J., Thompson, W.B., Creem-Regehr, S.H., Willemsen, P., Pick, H.L. et Rieser, J.J. (2007). Calibration of locomotion due to visual motion in a treadmill-based virtual environment. *ACM Trans. Appl. Percept.*, 4, 20–32.

Montello, D.R. (1998). A new framework for understanding the acquisition of spatial knowledge in large-scale environments. Dans Egenhofer, M.J., Golledge, R.G. (Eds.) *Spatial and temporal reasoning in geographic information systems* (pp. 143-154). New York: Oxford University Press.

Montello, D.R. (2005). Navigation. Dans P. Shah et A. Miyake (Eds.), *The Cambridge handbook of visuospatial thinking* (pp. 257-294). Cambridge: Cambridge University Press.

Morganti, F., Carassa, a et Geminiani, G. (2007). Planning optimal paths: A simple assessment of survey spatial knowledge in virtual environments. *Computers in Human Behavior*, 23(4), 1982-1996. doi: 10.1016/j.chb.2006.02.006.

Morris, C., Bransford, J. et Franks, J. (1977). Levels of processing versus transfer appropriate processing. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 16(5), 519-533. doi:10.1016/S0022-5371(77)80016-9

Moyer, R. S. (1973). Comparing objects in memory: Evidence suggesting an internal psychophysics. *Perception et Psychophysics*, 13(2), 180-184. doi:10.3758/BF03214124

N

N’Kaoua et Sauzéon H. (2008). Evaluation cognitive et neuropsychologique à l’aide des applications RV. Dans JM. Mazaux, P. Pradat-Diehl & V. Brun (Ed.), *Rééducation instrumentalisée après cérébrolésion vasculaire*, Edition Masson.

Neuper, C. et Pfurtscheller, G. (2001). Event-related dynamics of cortical rhythms: frequency-specific features and functional correlates. *International Journal of Psychophysiology*, vol.43: p.41-58.

Nijholt, A. et Tan, D. (2007). Playing with Your Brain : Brain-Computer Interfaces and Games. *Brain*.

Nijboer, F., Furdea, A., Gunst, I., Mellinger, J., McFarland, D., Birbaumer, N. et Kübler, A. (2008). An auditory BCI. *Neuroscience Methods*, vol.167: p.43–50.

Nori, R., Grandicelli, S. et Giusberti, F. (2009). Individual Differences in Visuo-Spatial Working Memory and Real-World Wayfinding. *Swiss Journal of Psychology*, 68(1), 7-16. doi:10.1024/1421-0185.68.1.7

O

O'Keefe, J. et Nadel, L. (1978). *The hippocampus as a cognitive map*. Clarendon Press. Oxford.

Ouramdane, N., Otmane, S. et Mallem, M. (2009). Interaction 3D en réalité virtuelle. Etat de l'art. *Techniques et sciences informatiques*, 28(8), 1017-1049. doi:10.3166/tsi.28.1017-1049

P

Paivio, A. (1978). Mental comparisons involving abstract attributes. *Memory & Cognition*, 6(3), 199-208. doi:10.3758/BF03197447

Passini, R. (1984). *Wayfinding in architecture*. New York: Van Nostrand Reinhold Company.

Pépin, M. et Dorval, M. (1988). Effet de la pratique de jeux vidéo sur deux mesures d'habileté visuo-spatiale. *Revue Québécoise de Psychologie*, vol 9, no 1.

Péruch, P., Vercher, J. L. et Gauthier, G. M. (1995). Acquisition of spatial knowledge through visual exploration of simulated environments. *Ecological Psychology*, 7(1), 1-20.

Péruch, P. et Wilson, P.N. (2004). Active versus passive learning and testing in a complex outside built environment. *Cognitive Processing*, 5(4), 218-227.

Peters, M., Laeng, B., Latham, K., Jackson, M., Zaiyouna, R. et Richardson, C. (1995). A redrawn Vandenberg and Kuse mental rotation test: Different versions and factors that affect performance. *Brain and Cognition*, 28, 39–58.

Pfurtscheller, G. et Neuper, C. (2001). Motor imagery and direct brain-computer communication. *Proceedings of the IEEE*, 89(7), 1123-1134. doi:10.1109/5.939829

Pfurtscheller, G., Leeb, R., Keinrath, C., Friedman, D., Neuper, C., Guger, C. et Slater, M. (2006). Walking from thought. *Brain research*, 1071(1), 145-52. doi:10.1016/j.brainres.2005.11.083

Piaget, J. et Chomsky, N. (1979). *Théories du langage, théories de l'apprentissage*. Seuil.

Pick, H.L.J. et Lockman, J.J. (1981). From frames of reference to spatial representations. Dans Liben, L.S., Patterson, A.H., Newcombe, N., (Eds) *Spatial representation and behavior across the life span*, (pp. 39-61). New York: Academic Press.

Postma, A., Jager, G., Kessels, R. P. C., Koppeschaar, H. P. F. et van Honk, J. (2004). Sex differences for selective forms of spatial memory. *Brain and cognition*, 54(1), 24-34. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/14733897>

Posner, M. I. (1994). Attention: The Mechanisms of Consciousness. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 91(16), 7398-7403. doi:10.1073/pnas.91.16.7398

Prothero, J. et Hoffman, H. (1995). Widening the field-of-view increases the sense of presence in immersive virtual environments. *Human Interface Technology Laboratory Technical Report TR95*, 2, 95–5

Pylyshyn, Z. (1989). The role of location indexes in spatial perception: a sketch of the FINST spatial-index model. *Cognition*, 32(1), 65-97.

R

Ramos Murguialday, A., Hill, J., Bensch, M., Martens, S., Halder, S., Nijboer, F., Schoelkopf, B., Birbaumer, N. et Gharabaghi, A. (2011). Transition from locked in to completely locked-in state: A physiological analysis, *Clinical Neurophysiology*, vol.122(5), p.925-933.

Redlick, F. P., Jenkin, M. et Harris, L. R. (2001). Humans can use optic flow to estimate distance of travel. *Vision research*, 41(2), 213-9. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11163855>

Reitan, R. M. (1992). *Trail Making Test: Manual for administration and scoring*. Tucson, AZ: Reitan Neuropsychology Laboratory.

Renard, Y., Lotte, F., Gibert, G., Congedo, M., Maby, E., Delannoy, V., Bertrand, O. et al. (2010). OpenViBE: An Open-Source Software Platform to Design, Test, and Use Brain-Computer Interfaces in Real and Virtual Environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 19(1), 35-53. doi:10.1162/pres.19.1.35

Richardson, J. T. E. (1994). Gender differences in mental rotation. *Perceptual and Motor Skills*, 78, 435-448.

Richardson, A. E., Powers, M. E. et Bousquet, L. G. (2011). Video game experience predicts virtual, but not real navigation performance. *Computers in Human Behavior*, 27(1), 552-560. Elsevier Ltd. doi: 10.1016/j.chb.2010.10.003.

Riecke, B.E., Van Veen, H.A.H.C. et Bühlhoff, H.H. (2002). Visual homing is possible without landmarks: A path integration study in virtual reality. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments* 11, 443-473.

Riecke, B. E., Cunningham, D. W. et Bühlhoff, H. H. (2007). Spatial updating in virtual reality: the sufficiency of visual information. *Psychological research*, 71(3), 298-313. doi:10.1007/s00426-006-0085-z

Rizzo, A. A. et Buckwalter, J. G. (1997). Virtual reality and cognitive assessment and rehabilitation: the state of the art. *Studies in health technology and informatics*, 44, 123-45. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/10175336>.

Rizzo, A., Schultheis, M., Kerns, K. et Mateer, C. (2004). Analysis of assets for virtual reality applications in neuropsychology. *Neuropsychological Rehabilitation*, 14(1), 207-239. doi:10.1080/09602010343000183.

Ron-Angevin, R. et Díaz-Estrella, A. (2009). Brain-computer interface: changes in performance using virtual reality techniques. *Neuroscience letters*, 449(2), 123-7. doi:10.1016/j.neulet.2008.10.099

Rose, F. D., Brooks, B. M. et Rizzo, A. a. (2005). Virtual reality in brain damage rehabilitation: review. *Cyberpsychology & behavior : the impact of the Internet, multimedia and virtual reality on behavior and society*, 8(3), 241-62; discussion 263-71. doi:10.1089/cpb.2005.8.241

Ruddle, R. a, Payne, S. J. et Jones, D. M. (1997). Navigating buildings in “desktop” virtual environments: Experimental investigations using extended navigational experience. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 3(2), 143-159. doi:10.1037/1076-898X.3.2.143

Ruddle, R. A., Payne, S. J. et Jones, D. M. (1999). Navigating Large-Scale Virtual Environments: What Differences Occur Between Helmet-Mounted and Desk-Top Displays? *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 8(2), 157-168. doi:10.1162/105474699566143

Ruddle, R. et Péruch, P. (2004). Effects of proprioceptive feedback and environmental characteristics on spatial learning in virtual environments. *International Journal of Human-Computer Studies*, 60(3), 299-326. doi:10.1016/j.ijhcs.2003.10.001

Ruddle, R. (2005). Review: 3D User Interfaces: Theory and Practice Doug A. Bowman , Ernst Kruijff , Joseph J. LaViola Jr. , Ivan Poupyrev. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 14(1), 117-118. doi:10.1162/pres.2005.14.1.117

Ruddle, R. A. et Lessels, S. (2006). For efficient navigational search, humans require full physical movement, but not a rich visual scene. *Psychological Science*, 17, 460–465.

Ruddle, R. A. et Lessels, S. (2009). The benefits of using a walking interface to navigate virtual environments. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, 16(1), 1-18. doi:10.1145/1502800.1502805

Ruddle, R. a, Volkova, E., Mohler, B. et Bühlhoff, H. H. (2011). The effect of landmark and body-based sensory information on route knowledge. *Memory & cognition*, 39(4), 686-99. doi: 10.3758/s13421-010-0054-z.

Ruddle, R. A., Volkova, E. et Bühlhoff, H. H. (2011a). Walking improves your cognitive map in environments that are large-scale and large in extent. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, 18(2), 1-20. doi:10.1145/1970378.1970384

S

Sandstrom, N. J., Kaufman, J. et Huettel, S. A. (1998). Males and females use different distal cues in a virtual environment navigation task. *Brain research. Cognitive brain research*, 6(4), 351-60. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/9593991>

Sancaktar, I. et Demirkan, H. (2008). Spatial updating of objects after rotational and translational body movements in virtual environments. *Computers in Human Behavior*, 24(6), 2682-2696. doi:10.1016/j.chb.2008.03.013.

Sanelli, C., Braun, M., Tangermann, M. et Mller, K. (2008). Estimating noise and dimensionality in BCI data sets: Towards BCI illiteracy comprehension, *Proceedings of the 4th International BCI Workshop and Training Course*.

Sas, C. et O'Hare, G. M. P. (2003). Presence Equation: An Investigation into Cognitive Factors Underlying Presence. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 12(5), 523-537. doi:10.1162/105474603322761315

Satalich, G. (1995). *Navigation and Wayfinding in Virtual Reality: finding proper Tools and Cues to Enhance Navigation Awareness* (Master of Science in Engineering, University of Washington).

Schellenbach, M., Lövdén, M., Verrel, J., Krüger, A. et Lindenberger, U. (2010). Adult age differences in familiarization to treadmill walking within virtual environments. *Gait et posture*, 31(3), 295-9. doi:10.1016/j.gaitpost.2009.11.008

Scherer, R., Lee, F., Schlögl, A., Leeb, R., Bischof, H. et Pfurtscheller, G. (2007). EEG-based interaction with virtual worlds: A self-paced three class Brain-Computer Interface. *Workshop of the International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology ACE 2007 BrainPlay'07: Playing with Your Brain, Brain-Computer Interfaces and Games*, s.45-48.

Scribante, V. (2000). *Impact de deux facteurs d'influence sur l'acquisition des connaissances spatiales* (Unpublished Master's thesis, Université de Genève).

Seeber, F.P.(1981). *A study of the effect upon physics achievement of the use of spatial reasoning in the teaching of introductory physics* (thèse de doctorat, Rutgers the State University of New Jersey - New Brunswick).

Sellers, E., Krusienski, D., McFarland, D. et Wolpaw, J. (2007). *Non-invasive brain-computer interface research at the Wadsworth Center*. Dans G. Dornhege, J. Millan, T. Hinterberger, D. McFarland, K. Müller (Eds.), *Towards Brain-Computer Interfacing*. Cambridge, MA: The MIT Press: p. 31-42.

Sellers, E., Turner, P., Sarnacki, W., McManus, T., Vaughan, T. et Matthews, R. (2009). A Novel Dry Electrode for Brain-Computer Interface, ed. J A Jacko, *Human-Computer Interaction, Part II, Lecture Notes In Computer Science*, vol 5611: p. 623-631.

Shepard, R. N. et Metzler, J. (1971). Mental Rotation of Three-Dimensional Objects. *Science*, 171(3972), 701-703. doi:10.1126/science.171.3972.701

Siegel, A. W. et White, S. H. (1975). The development of spatial representations of large-scale environments. *Advances in child development and behavior*, 10, 9-55. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/1101663>

Siegel, A.W. (1981). *The externalization of cognitive maps by children and adults*: In search of ways to ask better questions. Dans Liben, L. S Patterson A. H., Newcombe, N. (Eds.) *Spatial representation and behavior across the life span*. New York: Academic Press

Sims, V. K. et Mayer, R. E. (2002). Domain specificity of spatial expertise: The case of video game players. *Applied Cognitive Psychology*, 16(1), 97–115.

Sinai, M. J., Krebs, W. K., Darken, R. P., Rowland, J. H., Mccarley, J. S. (1999). Egocentric distance perception in a virtual environment using a perceptual matching task. Dans *Proceedings of the 43rd Annual Meeting Human Factors and Ergonomics Society*. vol. 43, pp. 1256–1260.

Skelton, R. W., Bukach, C. M., Laurance, H. E., Thomas, K. G. et Jacobs, J. W. (2000). Humans with traumatic brain injuries show place-learning deficits in computer-generated virtual space. *Journal of clinical and experimental neuropsychology*, 22(2), 157-75. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/10779831>.

Slater, M., Usoh, M. et Steed, A. (1995). Taking steps: the influence of a walking technique on presence in virtual reality. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, 2(3), 201-219. doi:10.1145/210079.210084

Slater, M. (2003). A Note on Presence Terminology. *Emotion*, 1-5.

Spence, I. et Feng, J. (2010). Video games and spatial cognition. *Review of General Psychology*, 14(2), 92-104. American Psychological Association. doi: 10.1037/a0019491.

Stankiewicz, B. J. et Kalia, A. A. (2007). Acquisition of structural versus object landmark knowledge. *Journal of experimental psychology. Human perception and performance*, 33(2), 378-90. doi:10.1037/0096-1523.33.2.378

Steuer, J. (1992). Defining Virtual Reality: Dimensions Determining Telepresence. *Journal of Communication*, 42(4), 73-93. doi:10.1111/j.1460-2466.1992.tb00812.x

Strehl, U., Leins, U., Goth, G., Klinger, C., Hinterberger, T. et Birbaumer, N. (2006). Self-regulation of Slow Cortical Potentials: A New Treatment for Children With Attention-Deficit/Hyperactivity Disorder. *Pediatrics*, peds.2005-2478. doi: 10.1542/peds.2005-2478.

Stumpf, H., t Eliot, J. (1995). Gender-related differences in spatial ability and the k factor of general spatial ability in a population of academically talented students. *Personality and Individual Differences*, 19(1), 33-45. doi:10.1016/0191-8869(95)00029-6

T

Tan, D.S., Gergle, D., Scupelli, P. et Pausch, R. (2006). Physically large displays improve performance on spatial tasks. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction* 13, 71-99.

Terlecki, M. S. et Newcombe, N. S. (2005). How Important Is the Digital Divide? The Relation of Computer and Videogame Usage to Gender Differences in Mental Rotation Ability. *Sex Roles*, 53(5-6), 433-441. doi: 10.1007/s11199-005-6765-0.

Thorndyke, P. W. et Stasz, C. (1980). Individual differences in procedures for knowledge acquisition from maps. *Cognitive Psychology*, 12(1), 137-175. doi:10.1016/0010-0285(80)90006-7

Thorndyke, P.W. (1980). *Performance models for Spatial and Locational Cognition*. Washington, D.C., The RAND Corporation.

Thorndyke, P. W. (1981). Distance estimation from cognitive maps. *Cognitive Psychology*, 13(4), 526-550. doi:10.1016/0010-0285(81)90019-0.

Thorndyke, P. W. et Hayes-Roth, B. (1982). Differences in spatial knowledge acquired from maps and navigation. *Cognitive Psychology*, 14(4), 560-589. doi:10.1016/0010-0285(82)90019-6

Thorndyke, P.W. et Goldin, S.E. (1983) Spatial learning and reasoning skill, Dans Pick, H.L. and Acredolo, L.P. (Eds.) *Spatial Orientation: Theory, Research and Application*, (pp. 195–217). New York: Plenum Press.

Tlauka, M., Brolese, a, Pomeroy, D. et Hobbs, W. (2005). Gender differences in spatial knowledge acquired through simulated exploration of a virtual shopping centre. *Journal of Environmental Psychology*, 25(1), 111-118. doi:10.1016/j.jenvp.2004.12.002

Tolman, E. C. (1948). Cognitive maps in rats and men. *Psychological review*, 55(4), 189-208.
Tulving, E. (2002). Episodic memory: from mind to brain. *Annual Review of Psychology*, (53), 1-25.

Tversky, B. (2000). What maps reveal about spatial thinking. *Developmental Science*, 3 (3), 281-300.

Tversky, B. (2000). Levels and structure of spatial knowledge. *Cognitive Mapping - Past, present and future*. R. Kitchin and S. Freundschuh. London, Routledge : 24-43.

U

Usuh, M., Arthur, K., Whitton, M. C., Bastos, R., Steed, A., Slater, M. et Brooks, F. P. (1999). Walking > walking-in-place > flying, in virtual environments. *Proceedings of the 26th annual conference on Computer graphics and interactive techniques - SIGGRAPH '99*, 359-364. New York, New York, USA: ACM Press. doi:10.1145/311535.311589

V

Vandenberg, S. G. et Kuse, A. R. (1978). Mental rotations, a group test of three-dimensional spatial visualization. *Perceptual and motor skills*, 47(2), 599-604. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/724398>

Vercher, J.L. (2003). *Effets de la latence en réalité virtuelle et en téléopération*. Communication présentée aux 4^{ème} Journées Nationales de Recherche en Robotique (JNNR 2003), Clermont-Ferrand, France.

Waller, D., Hunt, E. et Knapp, D. (1998). The transfer of spatial knowledge in virtual environment training. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 7(2), 129-143.

Waller, D. (2000). Individual differences in spatial learning from computer-simulated environments. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 6(4), 307-321. doi:10.1037//1076-898X.6.4.307

Waller, D., Knapp, D. et Hunt, E. (2001). Spatial Representations of Virtual Mazes: The Role of Visual Fidelity and Individual Differences. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 43(1), 147-158. doi:10.1518/001872001775992561

Waller, D. et Richardson, A. R. (2008). Correcting distance estimates by interacting with immersive virtual environments: Effects of task and available sensory information. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 14(1), 61-72.

Wallet, G., Sauzeon, H., Rodrigues, J. et N’Kaoua, B. (2008). Use of virtual reality for spatial knowledge transfer: effects of passive/active exploration mode in simple and complex routes for three different recall tasks. *15th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology 2008*, Bordeaux, 27-29 octobre 2008.

Wallet (2009). *Cognition spatiale et transfert virtuel/réel des apprentissages*. (Thèse de doctorat, Université Bordeaux 2 Victor Segalen).

Wallet, G., Sauzeon, H., Rodrigues, J. et N’Kaoua, B. (2009). Transfer of spatial knowledge from a virtual environment to reality: Impact of route complexity and subject's strategy on the exploration mode, *Journal of Virtual Reality and Broadcasting* 6, no. 4, February 2009, VRIC 2008 Special Issue, urn:nbn:de:0009-6-17577, ISSN 1860-2037.

Wallet, G., Sauzéon, H., Rodrigues, J., Larrue, F. et N’Kaoua, B.(2010). Virtual / Real Transfer of Spatial Learning : Impact of Activity According to the Retention Delay. *Stud Health Technol Inform.* 2010;154:145-9.

Wallet, G., Sauzéon, H., Pala, P. A., Larrue, F., Zheng, X. et N'kaoua, B. (2011). Virtual/Real Transfer of Spatial Knowledge: Benefit from Visual Fidelity Provided in a Virtual Environment and Impact of Active Navigation. *Cyberpsychology, behavior and social networking*, 1-9. doi: 10.1089/cyber.2009.0187.

Wallet, G., Sauzéon, H., Larrue, F. et N'Kaoua, B.(Submitted). The Impact of Active/Passive Navigation on the Transfer of Spatial Learning from Virtual to Real Environments According to the Route Length and Spatial Task Used.

Ward, S. L., Newcombe, N. et Overton, W. F. (1986). Turn Left at the Church, Or Three Miles North: A Study of Direction Giving and Sex Differences. *Environment and Behavior*, 18(2), 192-213. doi:10.1177/0013916586182003

Warren, W. H. (2006). The dynamics of perception and action. *Psychological review*, 113(2), 358-89. doi:10.1037/0033-295X.113.2.358

Wechsler, D. (1981). *Manual for the Wechsler Adult Intelligence Scale-Revised*. Psychological Corporation, New York.

Wechsler, D. (2001). *Échelle clinique de mémoire de Wechsler-3ème édition*. ECPA.2001.

Weiss, E., Kemmler, G., Deisenhammer, E., Fleischhacker, W. et Delazer, M. (2003). Sex differences in cognitive functions. *Personality and Individual Differences*, 35(4), 863-875. doi: 10.1016/S0191-8869(02)00288-X.

Weisman, J. (1981). Evaluating Architectural Legibility: Wayfinding in the Built Environment. *Environment and Behavior*, 13(2), 189-204. doi:10.1177/0013916581132004

Wickens, C. D. (1992). Virtual reality and education. *[Proceedings] 1992 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics* (pp. 842-847). IEEE. doi:10.1109/ICSMC.1992.271688

Wilson, P., Foreman, N., Gillett, R. et Stanton, D. (1997). Active Versus Passive Processing of Spatial Information in a Computer-Simulated Environment. *Ecological Psychology*, 9(3), 207-222. doi:10.1207/s15326969eco0903_3

Wilson, P. N. (1999). Active exploration of a virtual environment does not promote orientation or memory for objects. *Environment et Behavior*, 31:752–63.

Wilson, P. N. et Péruch, P. (2002). The influence of interactivity and attention on spatial learning in a desktop virtual environment. *Current Psychology of Cognition*, 21, 601–633.

Witmer, B. G. et Singer, M. J. (1998). Measuring Presence in Virtual Environments: A Presence Questionnaire. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 7(3), 225-240. doi:10.1162/105474698565686

Witmer, B. G., Sadowski, W. J. et Finkelstein, N. M. (2002). VE-Based Training Strategies for Acquiring Survey Knowledge. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 11(1), 1-18. doi:10.1162/105474602317343622

Wolpaw, J. R., Birbaumer, N., McFarland, D. J., Pfurtscheller, G. et Vaughan, T. M. (2002). Brain-computer interfaces for communication and control. *Clinical Neurophysiology*, 113(6), 767-791. doi: 10.1016/S1388-2457(02)00057-3

Z

Zazzo, R. (1972). *Manuel pour l'examen psychologique de l'enfant* (3e éd.). Neuchâtel : Delachaux et Niestlé.

Zheng, X., Wallet, G. Sauzéon, H., Gross, C. et N'Kaoua, B. (soumis). Attention component by EEG activity. *Journal Of PsychoPhysiology*.

Zimmermann, P. et Fimm, B. (1994). *Tests d'évaluation de l'attention (TEA)*. Version française 1.02. Jeronim. Vera Fimm, Psytest Würselen.

Zhu, H., Sun, Y., Zeng, J. et Sun, H. (2011). Mirror neural training induced by VR in BCI may provide a promising approach for the autism therapy, *Medical Hypotheses*, vol.76(5): p.646-647.