



HAL
open science

Apports et limites de la Réalité Virtuelle pour la mise en contexte de l'humain : Évaluation, Collaboration et Apprentissage

Isabelle Milleville-Pennel

► **To cite this version:**

Isabelle Milleville-Pennel. Apports et limites de la Réalité Virtuelle pour la mise en contexte de l'humain : Évaluation, Collaboration et Apprentissage. Informatique [cs]. Rennes 2, 2017. tel-01684325

HAL Id: tel-01684325

<https://hal.science/tel-01684325v1>

Submitted on 9 Apr 2018

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

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

Apports et limites de la Réalité Virtuelle pour la mise en contexte de l'humain : Evaluation, Collaboration et Apprentissage

Habilitation à Diriger des Recherches

Isabelle Milleville-Pennel
Chargée de Recherches CNRS

Institut de Recherche en Communication et Cybernétique de Nantes
(IRCCyN) UMR CNRS 6597

Ecole doctorale Sciences Humaines et Sociales (ED 507 SHS)
Rennes 2

Date de soutenance : 23-01-2017

Vol 1 : Rapport de synthèse des activités de recherche

Jury

Rapporteurs :

Jean-Marie Burkhardt, Directeur de Recherche, IFSTTAR
Michel Denis, Directeur de Recherche, CNRS
Daniel Mestre, Directeur de Recherche, CNRS

Examineurs :

Claude Marin-Lamellet, Directeur de Recherche, IFSTTAR
Franck Ganier, Professeur, Université Bretagne Occidentale
Evelyne Klingler, Directeur de Recherche, ESIEA

Résumé. Au cours des dernières décennies la Réalité Virtuelle (RV) est devenue un outil prisé et parfois incontournable tant pour le grand public que pour de nombreux secteurs professionnels (recherche académique, construction automobile ou naval, etc.). Avec l'utilisation accrue de cette technologie émerge de multiples questionnements d'ordre technique, sociétal et éthique. A travers la synthèse des activités de recherche que j'ai pu mener jusqu'à présent, mon objectif est d'apporter des éclairages à ces différents questionnements en montrant ce qui est faisable à l'heure actuelle en essayant de sortir du fantasme pour montrer la réalité de cette technologie. Ce document de synthèse comprend 5 parties.

Dans la *première partie*, la question de la validité écologique et des limites de la réalité virtuelle est abordée à travers un exemple précis ; les environnements virtuels de conduite automobile. Je m'attacherai tout d'abord à définir ce qu'est la validité d'un EV et de quelles façons l'évaluer. Puis nous verrons en quoi la notion de *présence* dans les EV est cruciale pour en mesurer l'impact sur l'utilisateur. Et enfin nous aborderons la question des limites de cette technologie notamment au travers du mal des simulateurs.

La *seconde partie* de ce document vise à montrer en quoi la réalité virtuelle (RV) peut-être utilisée comme un moyen de mise en contexte de l'individu permettant de mettre en évidence l'implication de divers processus cognitifs dans des activités ciblées. Je m'appuierai pour cela sur les travaux que j'ai réalisés sur simulateur de conduite. Nous verrons notamment que la RV peut s'avérer un complément essentiel dans la mise en place d'un protocole d'évaluation des fonctions cognitives visant à estimer les aptitudes à la conduite de personnes cérébrolésées.

Les *troisième et quatrième parties* concernent l'étude des activités collaboratives à distance en RV. Dans un premier temps, il s'agira de définir comment un référentiel commun (RC) peut s'instaurer entre les opérateurs et plus particulièrement comment une représentation de l'espace peut être partagée et intégrée à ce référentiel commun (Référentiel Spatial Commun : RSC). En second lieu je montrerai en quoi mes travaux ont contribué à : 1- Utiliser les connaissances précédemment acquises sur l'individu afin de créer des situations propices à l'apprentissage et/ou à la simulation de procédures via un environnement virtuel. 2- Créer un environnement adapté aux représentations spatiales d'opérateurs distants et dans lequel ils peuvent interagir et collaborer.

Enfin ce document se terminera par une *cinquième partie* dédiée à la synthèse de mes activités de recherche. J'y conclurai, notamment, sur les atouts et les limites de la RV ainsi que sur le cadrage nécessaire des développements et usages futurs qui seront faits de cette technologie. Pour clore cette partie, j'y présenterai en quoi les recherches que j'ai menées jusqu'à présent ont guidé mes orientations de recherche futures.

Mots clés : Réalité virtuelle, Simulateur de conduite, Validité écologique, Présence, Mal des simulateurs, Evaluation, Collaboration, Apprentissage, Représentation spatiale, Référentiel Commun, Référentiel Spatial Commun.

Remerciements

Je tiens en premier lieu à remercier J.M. Burdhardt pour avoir accepté de superviser ce travail et pour ses conseils. Merci également aux membres du jury d'avoir accepté d'en faire partie et de m'apporter un regard objectif, critique et constructif sur mon travail.

A mes collègues, Camilo, Cédric, Franck et tous les partenaires de recherche avec lesquels j'ai eu le plaisir de travailler, merci pour les échanges scientifiques, les discussions que nous avons pu avoir et le soutien que vous m'avez apporté. Merci notamment à toi, Franck, pour ton écoute, tes conseils et pour m'avoir encouragée à finir mon HDR.

Merci à toi, Robert, pour tout le travail que tu as réalisé sur les divers simulateurs que j'ai pu utiliser et plus encore pour ta bonne humeur constante!

Merci à Patricia pour sa gentillesse.

Merci à mes doctorants pour tout le travail qu'ils ont su accomplir.

Merci à toutes les personnes qui ont participé aux études que je mentionne dans ce document ... et à toutes les autres !

Merci aux amis qui m'ont soutenue, encouragée et même parfois poussée à terminer mon HDR. Merci à toi tout particulièrement, Audrey !

Merci aussi à mes amis Michelle et Bernard pour tout le temps qu'ils ont si gentiment passé à relire ce document et pour leurs précieux conseils.

Réaliser une HDR n'est jamais une chose aisée. C'est un travail qui se construit sur de nombreuses années et dont la rédaction se fait en parallèle des autres activités professionnelles, au compte-goutte, quand on peut ... mais également parfois le soir ou le week-end. Alors pour terminer, un grand merci à ma famille pour sa compréhension et son soutien. Merci à toi, Sébastien, pour avoir souvent enduré découragement, déception et stress. Merci à Maxence et Laure... d'être là !

Table des matières

| | |
|---|-----------|
| Préambule | 7 |
| I- Contexte général | 7 |
| II- Présentation du document..... | 10 |
| Partie 1 : Validités et limites d'un outil immersif | 14 |
| Introduction | 14 |
| I. Validité comportementale | 15 |
| I.1. Validité du comportement de l'environnement simulé..... | 15 |
| I.2. Validité du comportement de l'utilisateur | 16 |
| II. Validité cognitive, validité émotionnelle et sentiment de présence | 18 |
| II.1. Validité cognitive | 20 |
| II.2. Validité émotionnelle | 23 |
| II.3. Le sentiment de présence | 24 |
| II.3.1. Définition | 24 |
| II.3.2. Evaluation de la présence..... | 27 |
| III. Le mal des simulateurs | 31 |
| III.1. Qu'est-ce que le mal des simulateurs ? | 31 |
| III.2. Comment évaluer le mal des simulateurs ? | 32 |
| III.3. Comment expliquer ce phénomène ? | 33 |
| III.4. Quels sont les facteurs susceptibles d'induire le mal des simulateurs ?..... | 34 |
| III.4.1. Facteurs techniques..... | 34 |
| III.4.2. Facteurs individuels | 34 |
| III.4.3. Facteurs psychologiques | 35 |
| IV. Conclusion | 39 |
| Partie 2 : La simulation comme outil d'évaluation | 42 |
| Introduction | 42 |
| I. Exploration visuelle et processus cognitifs déficitaires chez les personnes cérébrolésées | 43 |
| I.1. Quel lien entre les processus cognitifs et l'exploration visuelle ? | 43 |
| I.2. Restriction de la zone d'exploration visuelle | 45 |
| II. Evaluation des aptitudes à la conduite | 50 |
| II.1. Bilan Neuropsychologique..... | 51 |
| II.2. Evaluation sur véhicule réel..... | 51 |
| II.3. Evaluation sur simulateur de conduite | 51 |
| III. Conclusion | 55 |
| Partie 3 : Les EVC seuls ou à plusieurs : la collaboration dans les environnements virtuels | 57 |
| Introduction | 58 |
| I-Quelle définition de la collaboration ? | 58 |
| II- Le référentiel commun | 61 |
| II.1. Définition..... | 61 |
| II.2. Elaboration et mise à jour du RC..... | 63 |
| II.2.1. Elaboration du RC au sein de l'équipe..... | 63 |
| II.2.2. Répartition du RC au sein de l'équipe | 65 |
| II.2.3. Pour résumer..... | 66 |
| II.3. Le rôle de la communication..... | 67 |
| II.4. Le référentiel spatial commun | 68 |
| III- Comment se construit le référentiel spatial commun en RV? | 71 |
| III.1. EVC et représentation commune de l'espace..... | 71 |
| III.2. Quels sont les moyens disponibles pour solutionner le problème ? | 71 |
| III.3. Contenu de l'EV et choix du système de référence pour la communication..... | 73 |

| | |
|--|------------|
| III.3.1. Référence spatiale fixe latéralisée | 73 |
| III.3.2. Influence du contenu de l'EVC en l'absence d'une RSF | 78 |
| III.4. Influence de la fonction de l'opérateur sur la communication spatiale et le RSC | 86 |
| IV- Conclusion | 93 |
| Partie 4 : Communication haptique en RV | 95 |
| Introduction | 95 |
| I. Utilisation de l'haptique pour le transfert de compétences en RV..... | 96 |
| II. Implications de la modalité d'apprentissage sur la collaboration et le RC..... | 104 |
| II.1. Performance lors de la collaboration..... | 105 |
| II.2. Impact sur le RC..... | 106 |
| III- Conclusion..... | 107 |
| Partie 5 : Synthèse et perspectives | 109 |
| I- Contributions principales..... | 109 |
| I.1. Impact de la RV sur les processus psychologiques et cognitifs..... | 109 |
| I.2. Collaboration dans les EVC | 111 |
| I.3. Implications pour l'intervention en Ergonomie Cognitive..... | 111 |
| I.3.1. Développement d'outils d'évaluation et de formation. | 111 |
| I.3.2. Développement d'outil d'aide à la communication et à la compréhension de l'espace dans les EVC. | 112 |
| I.4. Conclusion | 112 |
| II. Perspectives de recherche..... | 114 |
| II.1. Évaluation des processus cognitifs et perceptifs en conduite automobile..... | 115 |
| II.1.1. Processus d'adaptation des stratégies d'exploration visuelle | 115 |
| II.1.2. Processus d'adaptation lors d'une détérioration des fonctions exécutives chez la personne âgée | 117 |
| II.2. EVC et créativité | 118 |
| II.3. Interactions sociales et Robotique Humanoïde..... | 119 |
| Références bibliographiques..... | 121 |

« *Science sans conscience n'est que ruine de l'âme* »
François Rabelais

Préambule

I- Contexte général

Avec l'apparition de la micro-informatique au début des années 60, les prémices d'un changement radical dans nos modes de vie et de travail sont posées. En l'espace d'à peine 40 ans, l'informatique va prendre une part considérable dans notre vie, au point que nous délégons à présent à bon nombre de systèmes informatisés le soin d'assurer notre sécurité (*dromotique, ordinateur de bord,...*), de préserver nos souvenirs (*e-cloud, bases de données*), de « gérer » nos relations sociales (*Facebook, Twiter*) et professionnelles (*linkedin, Researchgate*). Il est indéniable que les nouveaux moyens d'échange et de communication fournis par l'informatique sont de formidables outils favorisant parfois de vrais contacts et une vraie communion d'esprit à distance, même si le contraire est souvent objecté. J'ai pour ma part une très bonne expérience professionnelle avec les outils de communication disponibles sur le net. J'ai ainsi eu la possibilité de rédiger deux projets de recherche en temps réel et avec des discussions passionnées entre les différents partenaires (géographiquement très éloignés) en utilisant en parallèle *Skype* et un *Google doc*. Ces différents outils ont permis un véritable travail de co-rédaction simultanée tout en maximisant les échanges et partages de documents, de façon bien plus efficace qu'une réunion en présentiel où, paradoxalement, les participants ont de plus en plus tendance à s'isoler derrière leurs machines. Bien évidemment dans mon cas il s'agissait d'interlocuteurs distants mais réels. Qu'en est-il des contextes où l'interlocuteur est un avatar (d'une personne réelle ou non) ? Comment éviter dans ce cas que l'utilisateur n'investisse trop sa « relation » avec le virtuel ? Voir sa vie virtuelle ? Depuis près de 20 ans, en effet, nous concédons même le droit aux nouvelles technologies de recréer une réalité plus ou moins proche de la nôtre dans laquelle nous « expérimentons » et parfois « partageons » de nouvelles expériences « virtuelles ». Ces nouveaux environnements sont définis par Blade & Padgette (2002) « comme un ensemble de données tridimensionnelles décrivant un environnement basé sur le monde réel, des objets abstraits ou des données. Ces environnements sont supposés proposer à l'utilisateur une réalité au moins partiellement déconnectée du monde physique réel : une Réalité Virtuelle (RV) basée sur la saturation

(totale ou partielle) d'un ou plusieurs canaux sensoriels par une ou plusieurs interfaces sensorielles ». Ces environnements peuvent être mono ou pluri-utilisateurs et avoir différentes finalités rendant leur utilisation de plus en plus recherchée dans divers domaines professionnels et de la vie privée. Ainsi, ils peuvent consister en :

- Une simulation d'une situation réelle du monde de l'utilisateur (par exemple un simulateur de vol ou de conduite, un nouvel outil d'intervention chirurgicale robotisé, ...). Ces environnements peuvent permettre l'observation de comportements ou de réactions mais également l'apprentissage de nouveaux dispositifs à manipuler.
- Une amplification d'un phénomène réel pour que l'utilisateur en ait une meilleure représentation et en faciliter ainsi la compréhension (par exemple, un phénomène scientifique non observable directement, ou une dimension sensorielle extrapolée pour mieux l'appréhender).
- Un monde artificiel imaginé par des artistes ou par des auteurs de sciences fictions permettant d'avoir de nouvelles expériences différentes de celles du monde réel. Les métavers (ou univers virtuel) en 3D peuvent être classés dans cette catégorie. Ces programmes informatiques permettent à leurs utilisateurs d'incarner des personnages virtuels dans un monde créé par les résidents eux-mêmes. L'EV (environnement virtuel) permet de gérer les interactions entre les différents utilisateurs (réseau social virtuel).

Les nombreux dispositifs techniques développés pour soutenir ces environnements permettent de solliciter tous les sens de l'individu (figure 1). On parlera ainsi de dispositifs immersifs, l'immersion correspondant au degré et à la qualité avec lesquels l'interface du système contrôle les entrées sensorielles pour chaque modalité de perception et d'action (Burkhardt, 2007).

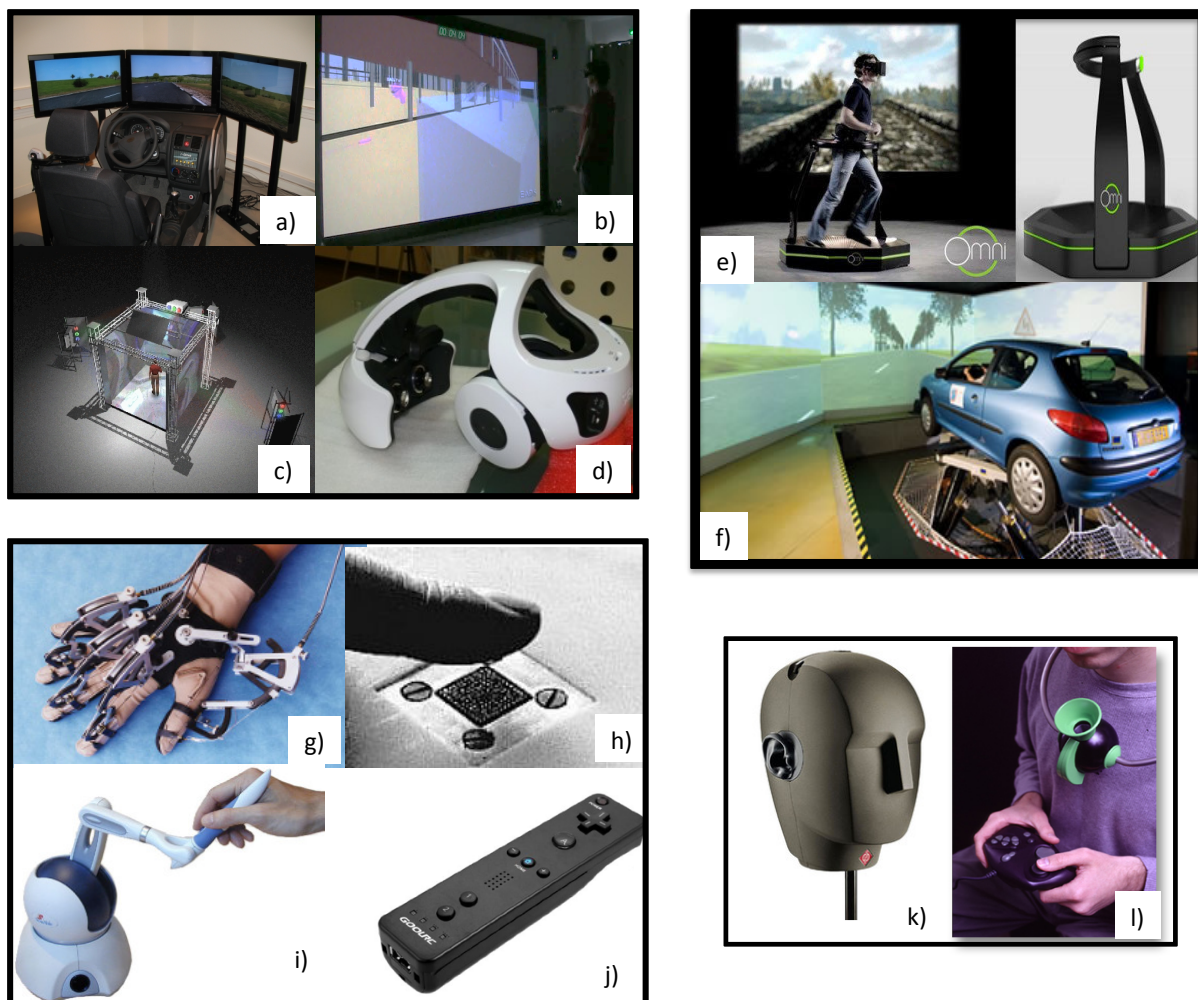


Figure 1: *Dispositif d'immersion visuelle :* a) écrans b) mur immersif c) sascube d) visiocasque. *Dispositifs d'immersion vestibulaire :* e) le tapis de marche Omni f) plate-forme mobile pour simulateur de conduite. *Dispositifs d'immersion tactile et haptique :* g) exosquelette h) contacteurs Exeter i) bras à retour d'effort Phantom j) manette vibrante Wiimote. *Dispositifs d'immersion sonore:* k) tête d'enregistrement sonore binaural pour une restitution par casque audio spatialisée. *Dispositif d'immersion olfactive:* l) diffuseur olfactif.

Les environnements virtuels ont ainsi permis de créer des mondes virtuels à l'intérieur desquels il devient possible de communiquer et d'interagir avec des objets ou d'autres utilisateurs. Nos fonctions mentales y sont dans certains cas sollicitées de façon quasi identique à la réalité et il devient même possible de ressentir des émotions parfois de façon aussi vives que dans le monde réel. Ces environnements sont même utilisés depuis une dizaine d'années pour aider à lutter contre les phobies dans le cadre de thérapies cognitivo-comportementales (Bouchard, 2011 ; Miller, Silva, Bouchard, Bellanger & Taucer-Sanson, 2012). L'intrusion de ces environnements dans nos vies n'est pas sans soulever de nombreuses questions d'ordre sociétal et éthique. Un des principaux questionnements concerne la façon dont nous gérons l'illusion de réalité générée par ces technologies. La

présence notamment de personnages virtuels (avatar de partenaires réels ou simples agents logiciels) interpelle, tant ils sont capables d'induire chez nous des réactions comportementales et émotionnelles mais aussi de simuler des émotions, nous impliquant ainsi dans des relations virtuelles dont il est difficile de mesurer l'impact sur notre vécu psychique. Dans son livre *Alone Together*, S. Turkle (2011) évoque avec beaucoup de justesse ces différents questionnements qu'elle étaye d'exemples pertinents et instructifs. Peut-on envisager, comme le relate S. Turkle, que la vie réelle devienne simplement «(...) *just one more window*» ? une fenêtre réelle parmi d'autres virtuelles, rendues essentielles à la construction psychique de certains individus. S. Turkle cite notamment l'exemple d'un père de famille, marié deux fois : la première avec son épouse officielle et la seconde avec l'avatar d'un(e) participant(e) du site de jeu en ligne *Real life*. Ce qui interpelle dans cet exemple c'est l'importance que la personne accorde à cette vie parallèle : il la considère comme complémentaire et essentielle à son équilibre. Pour lui, elle est aussi réelle que l'autre. En sommes-nous vraiment là ? La confusion avec la réalité est-elle vraiment possible ? Ou pire encore, doit-on craindre que pour un grand nombre de gens, la seule vraie vie (sociale) ne devienne majoritairement virtuelle ?

Enfin, il reste à considérer le risque de mécompréhension ou surestimation des capacités de ces nouveaux outils technologiques. Comment allons-nous gérer les attentes (parfois disproportionnées) qu'elles génèrent chez les futurs utilisateurs ?

Il est bien évident que répondre à toutes ces interrogations est une entreprise « titanique » impliquant la collaboration de nombreuses disciplines (Philosophie des sciences, Psychologie, Sociologie, Informatique). L'objectif de mon travail est bien plus modeste et consiste simplement à montrer ce qui est faisable à l'heure actuelle en essayant de sortir du fantasme pour montrer la réalité de ces technologies. Ainsi, mon but à travers la présentation des travaux que j'ai pu réaliser via l'utilisation de la RV est justement de montrer les limites et les atouts de cette technologie et les divers domaines dans lesquels son utilisation présente un véritable intérêt pour l'individu.

II- Présentation du document

Nous avons vu qu'il existe trois finalités possibles pour la RV. Les deux premières concernent soit la simulation d'un environnement non nécessairement basé sur le réel, issue du monde imaginaire (souvent utilisé à visée ludique), soit la simulation d'un phénomène réel mais non directement observable (phénomène physique, réaction nucléaire...). Ces deux

premiers domaines quoi que très porteurs, n'entrent pas pour l'instant dans mon domaine d'intérêt.

Je me limiterai donc dans le cadre de ce document au troisième domaine d'application de la réalité virtuelle, c'est à dire la reproduction totale ou partielle de la réalité (parfois sous une forme assez épurée). Ici encore différents cas de figures sont envisageables selon l'application visée :

1. EV à visée thérapeutique (comme dans le cas des troubles phobiques). Ces environnements n'entrent pas pour l'instant dans le champ de mon activité de recherche.
2. EV développés dans le but de recréer une situation existante difficile à observer dans la réalité pour en faciliter l'observation. Ici encore de multiples applications sont envisageables. Je me suis tout particulièrement centrée sur trois d'entre elles :
 - Applications dédiées à l'évaluation/investigation. Mes travaux de recherche se sont, pour la moitié d'entre eux, situés dans ce cadre et portent plus particulièrement sur l'évaluation des aptitudes à la conduite automobile. Ce type d'environnement sera l'application principale qui servira de support aux questions abordées dans les parties 1 et 2 de ce document.
 - Applications dédiées à la formation et au transfert d'apprentissage (parties 3 et 4 de ce document)
 - Applications dédiées au travail collaboratif à distance (parties 3 et 4 de ce document).

Dans la *première partie* de ce document nous nous intéresserons tout particulièrement à la question de la validité et des limites de la réalité virtuelle à travers un exemple précis : les environnements virtuels de conduite automobile. Nous nous attacherons tout d'abord à définir ce qu'est la validité d'un EV et de quelles façons l'évaluer. Puis nous verrons en quoi la notion de « présence » dans les EV est cruciale pour en mesurer l'impact sur l'utilisateur. Et enfin nous aborderons la question des limites de cette technologie notamment au travers du mal des simulateurs, trop souvent occulté et/ou négligé par les concepteurs d'EV.

La *seconde partie* de ce document visera à montrer en quoi la réalité virtuelle (RV) peut-être utilisée comme un moyen de recréer des situations de conduite particulières permettant de mettre en évidence l'implication d'un certain nombre de processus cognitifs

chez le conducteur. Notre objectif était notamment d'utiliser les moyens fournis par la RV pour étudier l'influence des fonctions cognitives de plus haut niveau (attention, contrôle cognitif, etc.) sur la façon dont les informations visuelles sont recherchées et utilisées (consciemment ou non) par le conducteur. Pour cela, nous avons dans un premier temps, effectué une étude destinée à vérifier la validité de l'outil à travers l'analyse de différentes variables (oculométrie, tests neuropsychologiques, conduite sur route réelle).

Dans un second temps, nous avons démontré que l'utilisation de la simulation peut s'avérer un complément essentiel dans la mise en place d'un protocole d'évaluation des fonctions cognitives visant à estimer les aptitudes à la conduite de personnes cérébrolésées.

Les troisième et quatrième parties de mon activité présentées dans ce document concernent l'étude des activités collaboratives à distance. Dans ce cadre, la RV est utilisée, dans un premier temps, comme un moyen d'accéder aux processus cognitifs et sensori-moteurs impliqués dans ces situations. En second lieu, la RV est également abordée comme un but en soi et deux objectifs sont alors poursuivis : le premier consiste à utiliser les connaissances précédemment acquises sur l'individu afin de créer des situations propices à l'apprentissage et/ou à la simulation de procédures via l'environnement virtuel. Le second objectif est de créer un environnement adapté au fonctionnement de l'individu et dans lequel des opérateurs distants peuvent interagir et collaborer. Dans ce dernier cas, nous nous sommes attachés à définir les informations visuelles et/ou haptiques nécessaires à la mise en place d'une représentation commune de la situation, efficiente pour l'ensemble des opérateurs impliqués dans la collaboration.

Enfin, ce document se terminera par une *cinquième partie*, en premier lieu dédiée à la synthèse de mes activités de recherche et dans laquelle je m'attacherai à présenter leurs contributions à une meilleure utilisation de la RV. J'y conclurai, notamment, sur ses atouts et ses limites ainsi que sur le cadrage nécessaire des développements et usages futurs qui seront faits de cette technologie. En second lieu et pour clore cette partie, j'y présenterai en quoi mes recherches menées jusqu'à présent ont guidé mes orientations de recherches futures.

Il est important de noter que lors de la rédaction de ce document j'ai volontairement opté pour un format de présentation de mes travaux totalement intégré aux domaines de recherche auxquels ils étaient associés. Néanmoins, afin d'en faciliter la visibilité et dans une

optique d'évaluation rapide de mes activités de recherche, chaque section y faisant directement référence a été grisée.

Partie 1 : Validités et limites d'un outil immersif

Cette partie de mon activité a donné lieu aux publications et communications suivantes :

- Milleville-Pennel, I., & Charron, C. (2015a).** Driving for real or on a fixed-base simulator: Is it so different? An explorative study. *Presence*, 24(1), 74-91.
- Milleville-Pennel, I., & Charron, C. (2015b).** Do mental workload and presence experienced when driving a real car predispose drivers to simulator sickness? An exploratory study. *Accident Analysis and Prevention*, 74, 192-202.
- Milleville-Pennel, I., & Charron, C. (2013).** Quelle(s) validité(s) pour un simulateur de conduite: étude exploratoire. *ÈPIQUE'2013* (pp. 381-387). ARPEGE Science Publishing, Presse Universitaires de Bruxelles asbl.
- Milleville-Pennel, I. (2008).** A visual sign of lateral acceleration for steering assistance. *International Journal of Human Computer Studies*, 66, 145-157.

Introduction

Une des premières questions que je vais aborder à travers ce chapitre concerne la crainte d'une confusion entre le virtuel et le réel. J'ai toujours été surprise de constater le décalage qui existait entre cette croyance souvent rencontrée auprès du grand public mais aussi des collègues ou autres chercheurs (issus des sciences humaines comme de l'informatique) et les critiques souvent avancées par ces mêmes personnes à l'encontre de l'usage de la RV lorsqu'il s'agit d'étudier le comportement humain. Il est, en effet, fréquemment objecté qu'en tant que situation artificielle la RV ne peut pas permettre de transposer à la réalité les observations effectuées. Qu'en est-il réellement ? Répondre à cette question revient à soulever la question de la validité de cette technologie par rapport à la réalité. Cette question est beaucoup plus complexe qu'elle n'y paraît. En effet, de quoi parlons-nous lorsque nous parlons de validité ? De la qualité de la réactivité de l'environnement en réponse à nos actions ? De la capacité de l'environnement à induire chez nous le comportement attendu ? Des émotions que les événements survenant dans l'environnement suscitent chez nous ? Différentes sortes de validité peuvent ainsi être évoquées selon que l'on s'intéresse à la performance ou aux dimensions cognitives et psychologiques de l'activité. Ainsi, pour qu'un EV soit valide, il faut :

- qu'il se comporte de façon identique à la réalité (cf section I.1).
- qu'il induise les mêmes comportements chez l'utilisateur que ce qui aurait été observé dans la réalité (de façon relative ou absolue ; cf section I.2).

- qu'il sollicite les fonctions cognitives de l'utilisateur de la même façon que dans la réalité (cf section II.1).
- qu'il induise les mêmes réactions émotionnelles que la réalité (cf section II.2).
- qu'il génère le sentiment d'être réellement présent dans cette « autre réalité » (cf. section II.3).
- qu'il ne perturbe pas l'état physique ou psychique de l'utilisateur (cf section III).

Il serait donc plus pertinent de parler « des » validités d'un EV. Cette question sera abordée dans ce chapitre à travers une activité particulière : la conduite automobile.

I. Validité comportementale

I.1. Validité du comportement de l'environnement simulé

Le comportement de l'environnement simulé peut-être plus ou moins réaliste selon le degré de similitude dont on a besoin par rapport à la situation considérée mais aussi selon que l'activité de l'utilisateur impliquera l'ensemble de l'EV ou simplement une partie de celui-ci. On distinguera ainsi la validité du comportement global de l'EV de celle de l'objet d'intérêt particulier dans l'EV sur lequel l'utilisateur va orienter son attention de façon privilégiée. Ce sera, par exemple, le cas d'un simulateur de chirurgie où la simulation de la zone à opérer répondra à des exigences en matière de réalisme bien plus grandes que la partie de la simulation dédiée à la salle d'intervention. Dans le cas d'un simulateur de conduite on peut, de la même façon, distinguer le comportement de l'environnement routier proprement dit (autres usagers, infrastructure etc..) et le comportement du véhicule conduit bien que l'un et l'autre présentent les mêmes nécessités en termes de validité comportementale. Cependant, puisque le véhicule conduit dans l'EV sera réellement manipulé par l'utilisateur, il sollicitera le participant d'une façon particulière. D'une manière générale on parlera de validité physique lorsqu'il s'agira de décrire le comportement du simulateur de conduite ainsi que la façon dont il réagira aux actions du conducteur, au contexte et aux événements de conduite présents dans l'EV. La validité physique concernera tout particulièrement le degré de correspondance qu'il pourra y avoir d'une part, entre les composants du véhicule, leur agencement et leurs propriétés dynamiques et, d'autre part, leurs homologues dans la réalité. Il est généralement admis que la validité physique est plus importante sur les simulateurs à base mobile que sur ceux à base fixe (Godley, Triggs & Fildes, 2002).

Par ailleurs, on peut également considérer uniquement la validité de ce qui est simulé dans l'environnement indépendamment de son interaction avec l'utilisateur (comportement des autres véhicules les uns par rapport aux autres, comportement des piétons) et/ou au contraire regarder la validité de la façon dont l'EV réagit aux actions de l'utilisateur (réaction du véhicule, réactions des autres usagers, collision avec les objets de l'EV).

I.2. Validité du comportement de l'utilisateur

La validité comportementale renvoie, quant à elle à la représentativité du comportement observé par rapport à la réalité. On peut distinguer deux composants de cette validité, selon que l'on s'intéresse à reproduire le comportement de l'utilisateur de façon absolue (validité absolue) ou de façon relative (validité relative). Par exemple, sur simulateur de conduite, la validité absolue renvoie au degré de proximité entre les valeurs numériques associées aux variables comportementales observées sur simulateur et le véhicule réel (comme la vitesse, le positionnement sur la voie, etc...). On parlera de validité relative lorsque la même tendance pour un effet est observée sur simulateur et dans la réalité indépendamment des valeurs numériques absolues correspondant aux variables considérées. De nombreux travaux tendent à accréditer la validité comportementale du simulateur de conduite. Par exemple, Mayhew, Simpson, Wood, Lonero, Clinton, & Johnson (2011) ont montré une forte corrélation entre des tests effectués sur simulateur et sur route concernant les erreurs de conduite (stop, violation de signaux routiers, inattention, vitesse excessive, etc.) et l'anticipation du danger (sur la base de quinze scénarios différents mettant en scène des événements accidentogènes). Concernant la vitesse, Bella (2008) a montré que les profils de vitesse observés sur simulateur de conduite à base fixe, établissaient une bonne correspondance avec ceux observés avec le même conducteur en situation réelle. Concernant la validité absolue, la seule différence statistiquement significative entre les vitesses sur route et sur simulateur concerne les configurations routières peu coûteuses, comme les très longues tangentes (1100 m) ou les virages peu sévères (500m de rayon de courbure) succédant à une longue descente (Bella, 2008 ; Bittner, Simsek, Levison & Campbell, 2002). Selon Bella (2008), étant donné que les vitesses plus importantes rencontrées sur simulateur le sont aussi bien sur simulateur à base fixe que sur simulateur à base mobile, cela serait dû à une minimisation du risque perçu sur simulateur par rapport à la route réelle. Cette minimisation viendrait à priori des signaux visuels disponibles sur le simulateur étant donné que l'apport d'indices vestibulaires ne résout pas le problème.

Les travaux que nous avons réalisés sur simulateur de conduite à base fixe tendent à abonder dans ce sens (Milleville-Pennel, 2008). Ces travaux montrent en effet que l'utilisation d'indices visuels subsymboliques destinés à augmenter la perception du risque sur simulateur permet de réduire la vitesse en virage. Nous avons pour cela introduit des bandeaux noirs en haut et en bas de l'écran central (H3, 02m L2, 28m) d'un simulateur de conduite à base fixe (cabine Faros et logiciel Sim2 développé par l'équipe MSIS de l'INREST). L'inclinaison des bandeaux variait en fonction de l'accélération latérale et était déclenchée à partir d'une valeur seuil de 0,3G (figure I.1(1)). Lorsque les conducteurs n'étaient pas informés de leur présence (perception inconsciente de l'indice visuel), l'inclinaison des bandeaux avait pour effet d'augmenter la sensation de vitesse en virage et ainsi le risque perçu, avec pour effet consécutif de réduire la vitesse, notamment dans les virages sévères (figure I.1 (2)).

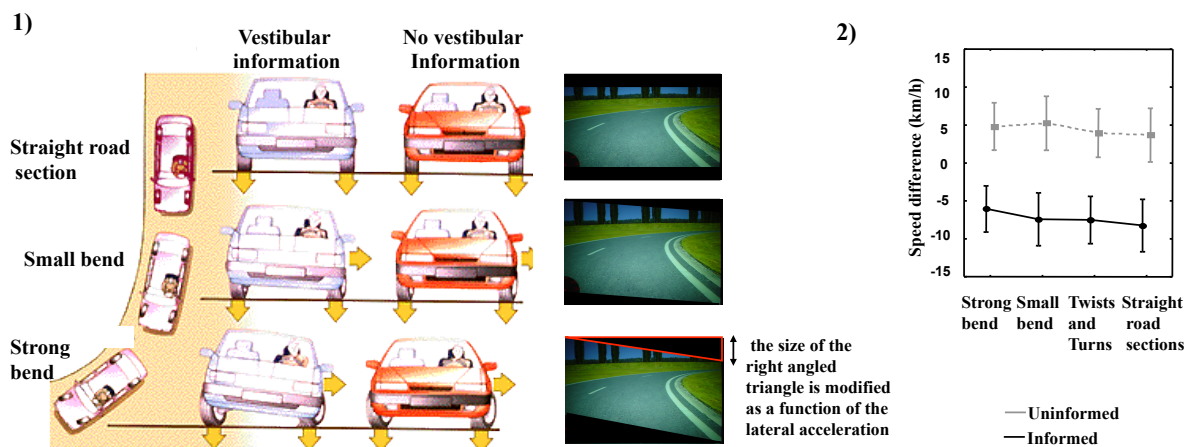


Figure 1.1: 1) Inclinaison du cadre de référence en fonction de la position du véhicule. 2) Influence de l'inclinaison du cadre de référence sur la vitesse.

Un autre argument en faveur de la validité comportementale du simulateur provient de travaux montrant qu'il peut être un bon prédicteur de la performance de conduite réelle (Patomella & Kottorp, 2005) même sur le long terme et parfois de façon plus pertinente qu'une évaluation traditionnelle sur route réelle (Lew, Poole, Ha Lee, Jaffe et al. 2005). Ainsi, Lew et al. (2005), ont comparé la performance sur route (estimée à l'aide du *Driving Performance Inventory* (DPI)) et sur simulateur (estimée à l'aide du DPI et du *automatic Simulator Performance Index*, (SPI)) à la performance sur route dix mois plus tard (DPI). Ils observent que le premier test sur route ne présente aucune corrélation statistiquement significative avec celui réalisé dix mois plus tard, contrairement à l'évaluation réalisée sur simulateur.

II. Validité cognitive, validité émotionnelle et sentiment de présence

Je m'attarderai ici tout particulièrement sur une de mes études à laquelle je renverrai régulièrement et dont les nombreux résultats m'ont permis de contribuer à l'éclaircissement des différents composants de la validité écologique évoquée dans cette section ainsi que dans la section suivante (cf section III).

Je vais dans un premier temps présenter l'objectif global de cette étude ainsi que la méthodologie que nous avons suivie pour la réaliser. Les différents résultats obtenus seront ensuite discutés en lien avec la littérature existante dans le domaine, au fur et à mesure que j'aborderai les différents types de validité concernés par ces deux sections.

Nous avons donc réalisé une étude à titre exploratoire (**Milleville-pennel & Charron, 2015a, b**) destinée à évaluer la validité cognitive d'un simulateur de conduite à base fixe comparé à un véhicule réel. Nous avons ciblé deux types de véhicules réels : le véhicule personnel des conducteurs et un véhicule auto-école. Cette dernière condition nous semblait intéressante à considérer car elle ressemblait davantage sur certains aspects aux conditions de conduite sur simulateur. Le conducteur ne connaissait pas le véhicule, il se sentait en situation de test et certaines des situations vécues pouvaient parfois sembler « inhabituelles ». Quatorze conducteurs expérimentés (cinq femmes et neuf hommes âgés de 22 à 48 ans) ont contribué à cette étude. Les participants avaient tous conduit leur véhicule personnel la veille ou le matin même, ce qui constituait la condition de comparaison de base appelée véhicule personnel (VP). Pour des raisons de sécurité, il nous était impossible de demander aux participants de conduire leur véhicule personnel pendant l'étude. Concernant la conduite sur simulateur (condition S), les participants étaient équipés d'un électrocardiomètre (montre Polar RS800CX multisports) et étaient priés de s'installer dans le simulateur de conduite de l'IRCCyN dans une position confortable. Il s'agissait d'une cabine Octal équipée de trois écrans, d'une boîte de vitesse manuelle à cinq vitesses, d'un tableau de bord type Opel et d'un jeu complet de manettes de commandes (figure 1.2). L'environnement de simulation était créé par le logiciel CANNeRII utilisé avec le modèle de véhicule dynamique CALLAS (Lechner, Delanne, Schaefer, & Schmitt, 1997). Il était demandé aux participants de conduire comme ils le faisaient habituellement, sur la voie de droite et en respectant les limitations de vitesse. Le trajet comprenait des sections de route de ville et de campagne et durait environ trente minutes (incluant cinq minutes de pause). Le contexte de conduite était favorable : conduite de jour par beau temps avec une circulation modérée. Le trajet comportait de nombreux stops, des feux de signalisation, des ronds-points. Après avoir conduit, les participants devaient

compléter trois questionnaires : le questionnaire SSQ destiné à mesurer le mal des simulateurs (Lane & Kennedy, 1988) celui du NASA TLX et un autre destiné à mesurer le ressenti psychologique des conducteurs (Questionnaire of Psychological Feeling ; QPF).



Figure 1.2: simulateur de conduite OCTAL.

Concernant la conduite sur véhicule auto-école (condition VAE), le participant était équipé de l'électrocardiomètre et était ensuite prié de s'installer dans le véhicule dans une position confortable (véhicule de type Renault Clio3 diesel, équipé d'une boîte de vitesse manuelle à cinq vitesses). Il lui était demandé d'effectuer un parcours routier d'environ cinquante minutes (incluant les dix minutes nécessaires pour se rendre du laboratoire vers les sections de routes sélectionnées pour l'étude). Le trajet était déterminé de façon à être aussi similaire que possible au parcours effectué sur le simulateur de conduite. Seul le rythme cardiaque mesuré sur ces sections de route fut retenu pour l'étude. Le participant devait ensuite compléter les questionnaires du NASA TLX et de présence.

L'expérimentateur demandait ensuite aux participants de se remémorer la dernière fois qu'ils avaient conduit seul leur véhicule personnel et de compléter à nouveau le questionnaire de présence (condition VP).

Quelques jours après les séances de conduite, les participants étaient à nouveau sollicités pour effectuer un enregistrement au repos de leur rythme cardiaque (niveau de base: NB). Il leur était demandé de rester assis et d'effectuer une activité calme, non stressante et peu sollicitante (lecture du journal, réponse aux mails routiniers, etc...).

Les mesures recueillies étaient les suivantes :

- La charge mentale (NASA TLX)
- Le rythme cardiaque
- Les réponses au questionnaire du mal des simulateurs (SSQ)
- Les réponses à un questionnaire destiné à évaluer la validité du ressenti psychologique sur un simulateur de conduite à base fixe (QPF). Ce questionnaire comportait notamment des questions relatives au plaisir, au stress et au sentiment de maîtrise (véhicule et événements) ressentis pendant la conduite et au sentiment de présence.

Nous allons voir à présent comment ces différentes données m'ont permises de contribuer à une meilleure compréhension de la validité cognitive, émotionnelle et du sentiment de présence.

II.1. Validité cognitive

Concernant la validité cognitive, c'est-à-dire la similitude des fonctions cognitives impliquées lors de la conduite sur simulateur comparé à un véhicule réel, de nombreux auteurs se sont intéressés à la question. Par exemple, pour ce qui est de l'attention, le simulateur de conduite est souvent utilisé comme un outil de référence pour étudier l'effet d'un distracteur ou d'un déficit attentionnel sur la conduite (Muhrrer & Wollrath, 2011; Charlton, 2009; Chan, Pradhan, Pollatsek, Knodler & Fisher, 2010; Horberry, Anderson, Regan, Triggs & Brown, 2006; Jamson & Jamson, 2010). Bien que peu d'études comparent directement les résultats issus de tests réalisés sur simulateur de conduite et sur route, nous pouvons néanmoins mentionner les travaux de Santos, Merat, Mouta, Brookhuis & de Waard (2005). Ces auteurs ont montré que l'impact d'un dispositif d'information au conducteur sur l'attention visuelle peut-être mesuré aussi finement sur un simulateur de conduite à base fixe que sur route. Ce résultat tend à montrer que l'attention est impactée et donc indirectement sollicitée de la même manière sur simulateur que dans un véhicule réel.

Concernant l'intensité de l'implication des fonctions cognitives, un indicateur est communément considéré: la charge mentale. Différentes méthodes peuvent être utilisées pour la mesurer. On peut notamment utiliser des mesures physiologiques (rythme cardiaque et activité électrodermale) afin de détecter des changements précoces de charge mentale dus à

l'introduction d'une tâche secondaire (Brookhuis & de Waard, 2010; Reimer & Melher, 2011). Reimer & Melher (2011) ont notamment montré des patterns de changement similaires sur simulateur de conduite et sur route réelle concernant le rythme cardiaque et l'activité électrodermale. Il est également possible d'évaluer la charge mentale grâce à une échelle subjective multidimensionnelle, telle que la NASA TLX (Hart & Staveland, 1988; Cegarra & Morgado, 2009). Cette échelle inclue cinq sous-catégories (charge mentale, charge physique, demande temporelle, performance et frustration). Le NASA TLX a été utilisé dans de nombreuses recherches concernant la charge cognitive en voiture (Jahn, Oehme, Krems & Gelau, 2005; Matthews, Legg & Charlton, 2003 ; Otmani, Rogé, Muzet, 2005). Par exemple, Matthews, Legg & Charlton (2003) ont utilisé le NASA TLX pour comparer l'effet de différents types de téléphones portables sur la charge mentale lors de la conduite sur route. Malheureusement, à notre connaissance, cette échelle n'a pas été utilisée afin de comparer directement l'intensité et la répartition de la charge mentale sur simulateur et véhicule réel.

Afin de palier ce manque, nous avons donc réalisé l'étude présentée en début de section II (**Milleville-pennel & Charron, 2015a**). Le NASA TLX étant administré après conduite réelle et sur simulateur et le rythme cardiaque mesuré pendant chacune de ces conditions de conduite, nous pouvions évaluer directement leur impact sur la charge mentale. Les données concernant le rythme cardiaque se sont avérées difficiles à interpréter isolément, car elles pouvaient potentiellement être liées indifféremment soit aux variations de stress observées dans les différentes conditions soit aux variations de charge mentale. Cette ambiguïté fut réduite suite à l'analyse des résultats obtenus concernant la charge mentale. Le NASA-TLX indique que la charge mentale n'était pas plus élevée dans la condition VAE (figure 1.3). Par ailleurs, le stress ressenti dans la condition VAE (évalué via le QPF) était plus élevé que dans les conditions VP et S. L'élévation du rythme cardiaque semble donc davantage relever d'une augmentation du stress ressenti dans la condition VAE que d'une différence au niveau de la charge mentale.

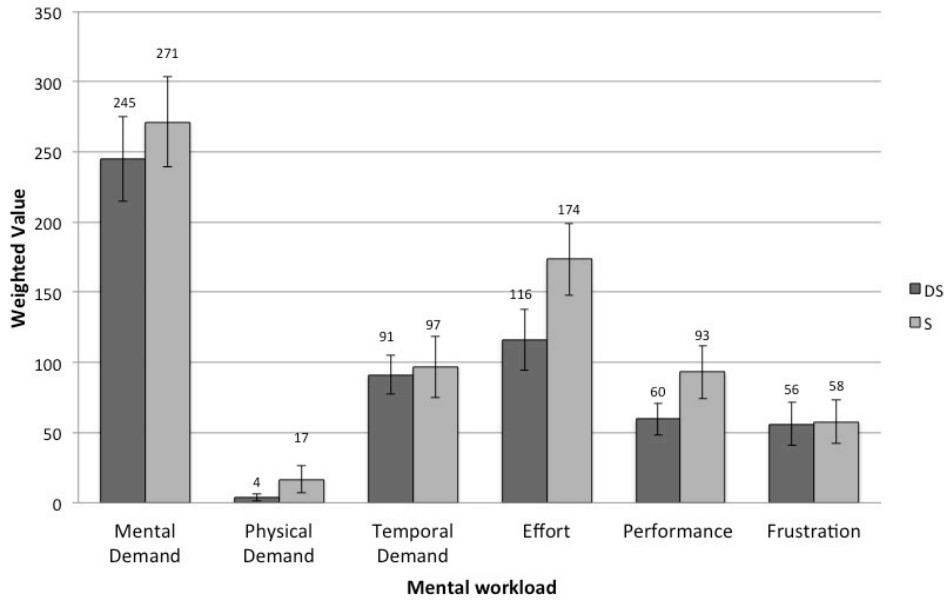


Figure 1.3 : Charge mentale.

Par ailleurs, une Analyse Multifactorielle des données a permis de montrer que la structure des réponses des participants au questionnaire NASA-TLX dans les conditions S et VAE était identique indiquant une répartition relativement similaire de la charge mentale ressentie (figure 1.4). Il semble donc qu'une tâche de conduite réalisée sur simulateur puisse solliciter avec la même intensité les fonctions cognitives du conducteur, rendant ainsi les deux situations comparables sur ce point.

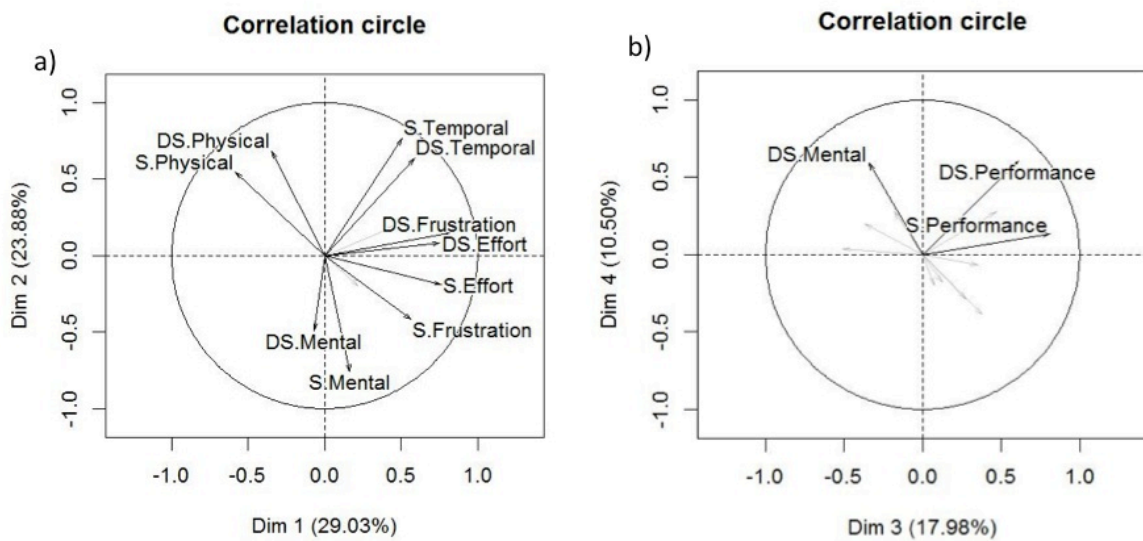


Figure 1.4 : Analyse Multifactorielle.

II.2. Validité émotionnelle

Nous aborderons dans cette section un des aspects les plus subjectifs de la validité : celui du ressenti émotionnel. Il s'agit de l'importance avec laquelle la présentation d'un stimulus induit le type de réponse physiologique et émotionnelle qui serait normalement ressenti dans la vie réelle, ce que Wilson & Sorenzo (2015) appellent la « fidélité psychologique ». La validité du ressenti psychologique lors de la conduite (stress, anxiété, plaisir, etc.) a été très peu investiguée. Il est cependant indéniable que les EV sont susceptibles de générer des réactions émotionnelles quasi-identiques à celles observées dans la réalité. En témoignent les très nombreux travaux réalisés dans le cadre du traitement des phobies (Bouchard, 2011 ; Coelho, Waters, Hine & Wallis, 2009). Les mesures physiologiques utilisées pour l'évaluation de la charge mentale sont aussi évoquées comme indicateurs du stress (Meehan, Razzaque, Insko, Whitton & Brooks, 2005). Par exemple, Johnson, Chahal, Stinchcombe, Mullen, Weaver et al. (2011), montrent une élévation statistiquement significative du rythme cardiaque moyen en réponse à des événements surprenants survenant dans un environnement routier virtuel (par exemple un véhicule surgissant soudainement au coin d'une rue). Une autre possibilité pour accéder au ressenti psychologique consiste à utiliser des mesures indirectes comme les questionnaires. Bien que critiquée pour son manque d'objectivité, cette méthode est souvent le seul moyen d'évaluer le ressenti du conducteur et de désambiguïser des mesures plus directes telles que le rythme cardiaque. Par exemple, le STAY-AB permet d'évaluer une augmentation passagère de l'anxiété liée à une situation particulière. Cependant, à notre connaissance, aucun auteur ne s'est intéressé à la mesure subjective du ressenti psychologique lors de la conduite sur simulateur comparativement à la conduite sur route réelle.

Lors de l'étude exploratoire mentionnée à la section II (**Milleville-pennel & Charron, 2015a**), nous avons utilisé un questionnaire destiné à évaluer la validité du ressenti psychologique sur un simulateur de conduite à base fixe (QPF). Celui-ci comportait notamment des questions relatives au plaisir, au stress et au sentiment de maîtrise (véhicule, événements de circulation) ressentis pendant la conduite. Les résultats obtenus montrent que la condition S est perçue comme plus plaisante que les deux autres et moins stressante que la condition VAE. Concernant le sentiment de maîtrise du véhicule, il est similaire à celui de maîtrise des événements. La seule différence observée dans la condition S par rapport aux deux autres est que le sentiment de maîtrise du véhicule est moins important et que l'effort

ressenti est quant à lui plus fort. La diminution du sentiment de maîtrise du véhicule ressenti dans cette condition est certainement due à la nouveauté introduite par le fait de conduire dans un environnement virtuel et peut, au moins en partie, expliquer l'effort plus important ressenti dans cette condition. Le système sensori-moteur doit s'adapter à la nouvelle relation entre le mouvement réellement produit et ses contreparties visuelles, vestibulaires et haptiques induites par l'EV. Ce n'est qu'une fois cette adaptation réalisée que le véhicule simulé devient facilement contrôlable. Cependant, on peut espérer que ce sentiment s'estompe assez vite dès que le participant sera suffisamment familiarisé avec cette technologie. Les nombreuses études réalisées dans le contexte de l'adaptation sensori-motrice confortent cette supposition (pour une revue cf. **Pennel, Ferrel, Coello, & Orliaguet, 2002**; Heuer & Sülzenbrück, 2013). Cela a aussi été observé dans le contexte de l'utilisation par le cerveau de nouvelles formes de feedback sensoriels pour contrôler le mouvement (c'est-à-dire le pseudo-haptic feedback, Lecuyer, 2009). Nous pouvons donc raisonnablement supposer que, si les participants suivent un entraînement afin de se familiariser avec le simulateur, la condition S devrait rapidement devenir plus facilement acceptable que la condition VAE tout particulièrement lorsqu'il s'agira d'une reprise de la conduite après une longue période d'arrêt. La condition S serait dans ce cas beaucoup moins stressante pour le participant.

II.3. Le sentiment de présence

Une dernière dimension semble essentielle à considérer. Il s'agit du sentiment de présence ressenti pendant la situation de conduite sur simulateur.

II.3.1. Définition

- **Les composants de la présence**

Tout d'abord il importe de distinguer la notion de présence de celle d'immersion. L'immersion renvoie à la description objective des aspects du système de RV (tels que la résolution d'affichage, les types de dispositifs, ...etc.). Elle correspond au degré et à la qualité avec lesquels l'interface du système contrôle les entrées sensorielles pour chaque modalité de perception et d'action (Burkhardt, 2007). Ainsi, elle concerne :

- d'une part, la contribution relative des informations délivrées par les dispositifs d'interaction et de l'information issue de l'environnement physique (i.e. le pourcentage d'un canal sensoriel occupé par les stimuli virtuels, par opposition à l'environnement physique)

- d'autre part, la suppression sensorielle de l'environnement immédiat (i.e. propriétés de l'environnement immédiat qui peuvent éliminer ou minimiser l'impact des canaux sensoriels non pris en charge (ou non « saturés ») par les interfaces).

En ce qui concerne la présence, elle est définie par Slater, Linakis, Usoh, Kooper, & Street (1996) comme étant un phénomène subjectif lié à la sensation qu'a l'utilisateur d'être là dans l'EV. La présence est donc liée à un état psychologique de l'utilisateur qui caractérise son expérience vécue dans l'EV. Selon Mestre & Fuchs (2006), la présence pourrait être considérée comme « la réponse subjective à l'immersion ». Cette réponse traduirait l'état psychologique du participant dans l'EV tant sur le plan cognitif que perceptivo-moteur. On peut ainsi considérer que l'immersion du participant associée à l'implication attentionnelle donnerait lieu à la présence, c'est-à-dire un basculement du monde réel vers le virtuel, à tel point que le monde virtuel « devienne » le réel pour le participant.

Afin de mieux comprendre l'impact que peut avoir le sentiment de présence sur l'implication de l'utilisateur dans l'EV et donc indirectement sur la validité de celui-ci, il convient de considérer les deux types de présence introduits par Slater (2009 ; Slater, Splanlang & Corominas, 2010) :

- La « Place illusion » (Pi) : il s'agit de l'illusion prégnante d'être à un endroit alors que l'on sait pertinemment que l'on n'y est pas. (Slater, 2009).

- La « Plausibility illusion » (Psi) : cela concerne la façon dont le monde est perçu. La Psi est l'illusion que ce qui se produit est réellement en train de se produire (même si l'on est sûr que ce n'est pas le cas). Cet aspect de la présence est celui qui se rapproche le plus de la notion de réalisme de l'EV. Tout particulièrement ce qui concerne le réalisme du comportement de l'EV (et des objets qui s'y trouvent) et de ses réactions en réponse aux actions du participant. Dans ce cas le réalisme peut être assimilé à une des propriétés objectives de l'EV qui participera à la définition de son degré d'immersion et la Psi sera la réponse subjective de l'individu à cette caractéristique objective.

• **Les déterminants de la présence**

Il est souvent tacitement admis qu'il existe une relation de cause à effet entre l'immersion et la présence, cette dernière étant optimale lorsque l'immersion est maximisée. Effectivement, les EV les plus immersifs sont susceptibles de générer une présence accrue car ils maximisent les chances d'obtenir une fidélité psychologique importante. Il serait cependant risqué de considérer cette relation comme un état de fait, l'immersion étant un

facteur parmi d'autres susceptible d'influer sur le sentiment de présence. Par ailleurs, un environnement très immersif peut parfois induire des effets secondaires (sur lesquels nous reviendrons à la section III) susceptibles de minimiser la présence. D'autres facteurs que les dispositifs techniques utilisés sont susceptibles d'influer sur la présence. Une étude récente de Serino, Mestre, Mallet, Pergandi, Smialek, Cipreso & Riva (2015) tend à montrer que le point de vue privilégié dans l'EV peut avoir une incidence. Ainsi, dans une tâche de navigation spatiale et de mémorisation d'un itinéraire, l'utilisation d'un point de vue allocentré de l'espace (codage centré sur les objets, cf. partie 3 section 2.4) mais dépendant du point de vue de l'utilisateur augmente le réalisme perçue de l'EV et le sentiment de présence comparé à un point de vue égocentré (centré sur l'utilisateur de l'EV, cf. partie 3 section 2.4).

Des facteurs d'ordre cognitifs sont également susceptibles d'influencer sur le sentiment de présence. Ainsi dans le modèle MEC (figure 1.5) proposé par Wirth, Hartmann, Bocking, Vorderer, Klimmt et al. (2007), la présence est référencée comme la *présence spatiale* et correspond à une expérience binaire durant laquelle la position dans l'espace et les possibilités d'action perçues sont liées à l'environnement spatial médiatisé et aux capacités mentales sollicitées par cet environnement plutôt que par la réalité. Dans ce modèle, la présence spatiale est clairement liée à la sollicitation de l'attention par l'EV, ce que des auteurs comme Regenbrecht & Schubert (2002) appellent *Involvement*.

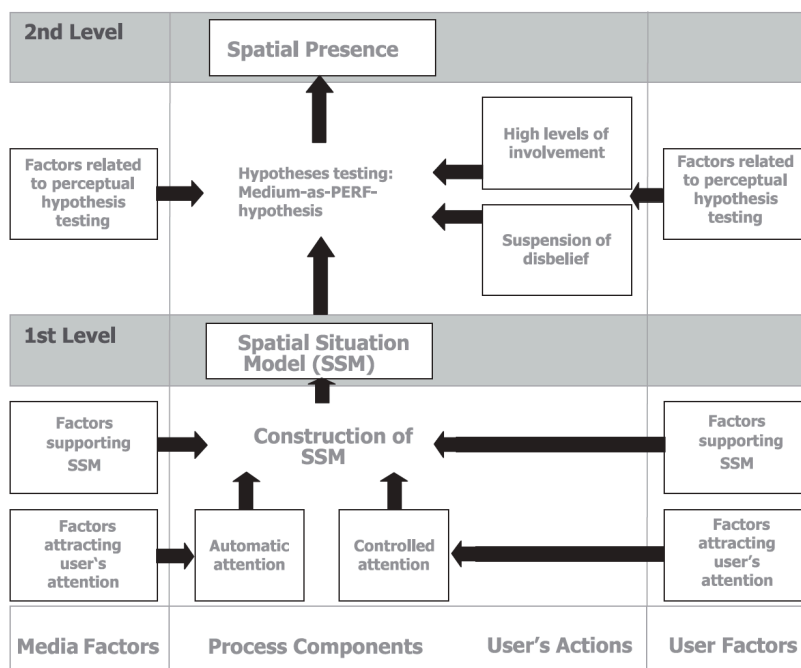


Figure 1.5 : Modèle MEC de la Présence Spatiale d'après Wirth, Hartmann, Bocking, Vorderer, Klimmt et al. (2007).

Enfin, un autre facteur pouvant influencer sur la présence est l'état émotionnel du participant. Ainsi, de nombreux auteurs (Bouchard, St-Jacques, Robillard & Renaud, 2008; Gorini, Capideville, DeLeo, Mantovani & Riva, 2011), montrent que lorsqu'une émotion est induite chez des participants immergés dans un EV, le niveau de présence estimé par ces derniers est plus élevé. Enfin, la personnalité du participant peut également être évoquée afin d'expliquer le niveau de présence ressenti (Wilson & Soranzo, 2015).

II.3.2. Evaluation de la présence

Les mesures physiologiques (rythme cardiaque, activité électrodermale) sont souvent utilisées pour estimer la présence (Slater, Khanna, Mortensen & Yu, 2009). Il est supposé que plus le sentiment de présence est important, plus ces variables vont évoluer de la même façon dans l'EV et dans la réalité. Par exemple, Meehan, Razzaque, Insko, Whitton & Brooks (2005) ont comparé les réactions physiologiques de participants dans une salle virtuelle non menaçante, à leurs réactions dans un environnement virtuel hautement stressant : les auteurs ont observé un changement dans le rythme cardiaque suffisant pour satisfaire leurs critères pour la mesure de présence.

Cependant dès que l'on considère des situations de conduite relativement complexes, les changements observables au niveau de ces indicateurs deviennent multifactoriels et sont de plus en plus complexes et difficiles à interpréter. Par exemple, selon les auteurs, le rythme cardiaque peut être considéré comme un indicateur de processus assez différents: il a été utilisé par Reimer & Melher (2011) pour mesurer la charge mentale tandis que Johnson et al. (2011) ont utilisé le rythme cardiaque comme un indicateur du stress.

Des indicateurs comportementaux peuvent également être utilisés. On pourra ainsi enregistrer les réactions réflexes qui peuvent se produire suite à l'occurrence d'évènements particuliers dans l'EV. Par exemple Kokkinara & Slater (2014) ont montré qu'on pouvait observer un mouvement réflexe au niveau des jambes d'un participant lorsqu'une chaise est soudainement retirée de dessous ses jambes vues virtuellement alors qu'elle est toujours présente dans la réalité. De même, des réactions posturales de maintien de l'équilibre peuvent être observées alors même que la personne est dans une situation parfaitement stable dans la réalité. Ainsi, dans l'expérience du précipice virtuel de Mel Slater (Sanchez-Vives & Sater, 2005), les participants marchent prudemment comme s'ils évoluaient réellement au bord d'un précipice.

Il est également possible d'observer des réactions sociales inconscientes comme par exemple le fait de restaurer spontanément l'espace péripersonnel lorsqu'il est franchi par une autre personne présente dans l'EV (Kastanis & Slater, 2012). Le niveau de présence peut être estimé via les réactions émotionnelles de l'utilisateur. Par exemple, les réactions de peur dans le cas des phobies : dans ce cas on s'intéresse aux mesures comportementales de la peur (réactions d'évitement, expression du visage etc. ...).

Enfin, une autre mesure indirecte de la présence peut être évoquée. Elle se caractérise par la capacité à faire croire à un participant que le corps visualisé dans l'EV (via une vue subjective de la caméra « à la première personne ») est le sien, alors même qu'il n'est pas de la même taille, du même sexe ou du même âge et parfois même lorsque sa position diffère par rapport à celle de l'utilisateur (Slater, Spanlang, Sanchez-Vives & Blanke, 2010).

Associés à ces différentes mesures, de nombreux auteurs utilisent également des moyens plus subjectifs, qui font directement appel au ressenti conscient des participants. Une méthode a été introduite par Slater (Slater & Steed, 2000), qui consiste à demander aux participants de signaler en simultané (verbalement ou par une pression sur un bouton, par exemple), toutes les ruptures de présence qu'ils perçoivent au cours d'une séance d'immersion dans un EV. On peut ensuite mettre en relation ces données avec celles provenant de l'EV lui-même (événements survenus, interaction avec un avatar, un objet de l'EV, etc.) ou le comportement et/ou des données physiologiques enregistrées sur le participant. Cette méthode présente l'avantage de permettre de faire le lien direct entre les propriétés du dispositif immersif et le ressenti des participants. On peut ainsi espérer à terme définir précisément les facteurs liés aux dispositifs et aux propriétés de l'EV susceptibles d'influer sur la qualité de la présence ressentie. Néanmoins, cette méthode ne permet pas d'avoir une estimation précise de la nature exacte du sentiment de présence qui est mesuré, notamment de faire la distinction entre Pi et Psi. Pour cette raison, la méthode des questionnaires est souvent utilisée pour estimer le sentiment de présence dans les EV. Nous pouvons citer par exemple, le questionnaire de l'University London College (UCL ; Slater, Usoh & Steed, 1995; Meehan, 2001). Le Igroup Presence Questionnaire (IPQ; Regenbrecht & Schubert, 2002; Schubert, Friedmann & Regenbrecht, 1999), le questionnaire de présence de Gerhard, Moore & Hobbs (2001), le MEC-SPQ (MEC Spatial Presence Questionnaire) de Vorderer, Wirth, Gouveia, Biocca, Saari et al. (2004) et le questionnaire pictural SAM (Self-Assessment-Manikins) de Weibel, Schmutz, Pahud & Wissmath (2015). Un des reproches principaux que l'on peut faire aux études utilisant les questionnaires de présence, c'est

qu'elles semblent considérer que le sens de présence doit être nécessairement comparé à une valeur de présence "absolue" qui serait 100% de présence perçue. Semble ainsi acquise l'hypothèse implicite que la présence ressentie dans la réalité est forcément égale à une présence "totale, complète". Cela serait vrai si la mesure de présence se limitait à évaluer un transfert de position entre l'EV et la réalité où on évaluerait le taux de présence dans la réalité versus l'EV : sur une échelle de 0 à 100 combien êtes-vous dans l'EV et combien êtes-vous dans la réalité ? 100% correspondrait au sentiment d'être complètement dans l'EV et plus du tout dans la réalité. Mais la mesure de la présence est bien plus complexe et va plus loin que ce simple ratio. De façon surprenante, jusqu'à récemment, cette supposition n'a jamais été testée ni remise en question. En fait, le sentiment de présence n'a quasiment jamais été mesuré dans la réalité via les questionnaires. Cependant il n'y a aucune raison de penser que ce sentiment soit nécessairement égal à la valeur "théorique" maximale. Il est même tout à fait envisageable de considérer que l'inverse puisse parfois se produire. Par exemple, quand un conducteur effectue un trajet connu, il est susceptible de penser à autre chose en même temps, au point qu'il a le sentiment d'être complètement ailleurs "en esprit". Un travail intéressant, récemment publié par Villani, Repetto, Cipresso & Riva (2012), compare le sentiment de présence perçue pour une activité identique dans un EV et dans la réalité. Il s'agissait d'un EV simulant un entretien d'embauche. Il contenait des indices et signaux sociaux et culturels disposés dans la pièce virtuelle, susceptibles de fournir une meilleure compréhension à la fois de l'activité en cours mais aussi de son contexte social. La situation réelle était identique à celle de l'EV (même interlocuteur, mêmes questions) mais dépourvue de médiation technologique ainsi que de l'enrichissement social et contextuel proposé dans l'EV. Les résultats obtenus par les auteurs indiquent que la présence était même meilleure pendant l'entretien virtuel que dans l'entretien effectué dans l'environnement réel. Selon notre connaissance c'est le seul travail comparant directement la présence ressentie dans la réalité et sa contrepartie virtuelle. Cette étude indique que le critère utilisé pour définir le niveau de présence nécessaire pour une application particulière (évaluation, entraînement, apprentissage etc...) doit inclure une mesure de la présence ressentie dans l'environnement réel.

Lors de l'étude que nous avons réalisée à titre exploratoire et décrite à la section II (**Milleville-pennel & Charron, 2015a,b**), nous avons également essayé d'apporter un nouveau regard sur la façon dont la notion de présence dans les EV nous semble devoir être considérée et estimée. Ainsi notre questionnaire QPF destiné à évaluer le ressenti des conducteurs, comportait également de nombreuses questions visant à évaluer l'immersion et

le sentiment de présence (réalisme des situations de conduite, évaluation de la Pi et de la Psi). L'analyse des réponses au questionnaire a permis de montrer que la condition VAE est perçue comme plus réaliste et induit un sentiment de Psi plus important que la condition S. A l'inverse, le sentiment de se sentir présent dans l'EV (Pi) ne diffère pas d'une condition à l'autre (figure 1.6). Concernant le réalisme et la Psi nous pouvons supposer que cela est au moins en partie dû à la réduction du sentiment de maîtrise du véhicule également observée dans cette condition. Ainsi jusqu'à ce que les participants soient plus familiers avec le simulateur, il se peut qu'ils attribuent le comportement "étrange/inhabituel" du simulateur aux propriétés de l'environnement virtuel lui-même. Ce sentiment devrait disparaître avec l'entraînement. Par ailleurs, nous avons montré qu'un stress plus important était ressenti dans la condition VAE. Selon Villani et al. (2012, p269) "(...) the connecting variable between presence and meaning is the emotional response: the content of the experience produces a higher physiological activation that strengthens the subjects' sense of presence". Ainsi, le fait que les participants se sentent plus stressés dans la condition VAE les conduit probablement à se focaliser davantage sur les situations de conduite qu'ils rencontrent et augmente probablement leur sentiment de vivre "totalement" ces situations. Elles semblent donc plus réalistes, plus plausibles.

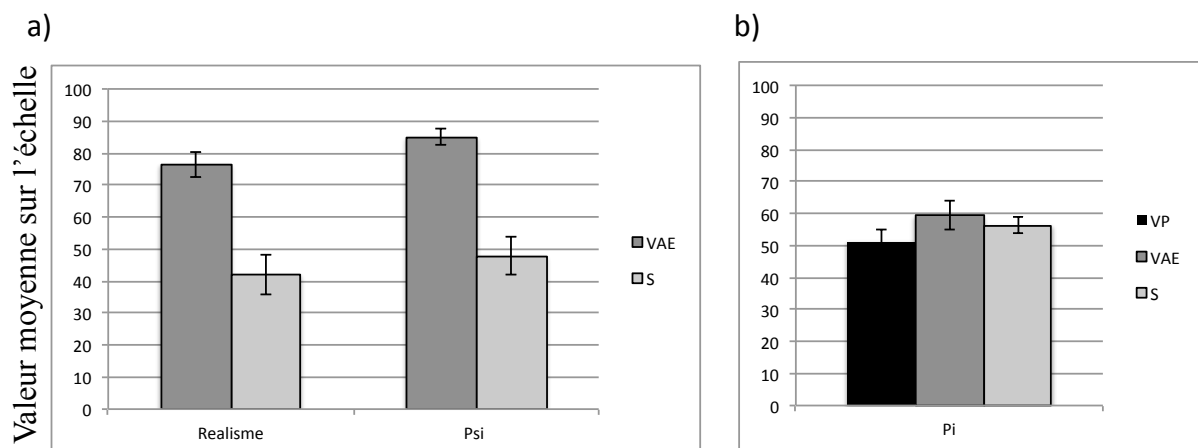


Figure 1.6 : Valeur moyenne obtenue sur les échelles de réalisme a) et présence (Pi et Psi) a) et b).

Concernant l'évaluation de la présence (Pi et Psi) en situation de conduite réelle, aucune des valeurs observées n'est proche de 100%; elles sont même parfois considérablement en dessous (par exemple 56,18% concernant la Pi observée dans la condition VAE). Ce résultat est concordant avec les données obtenues par Villani et al. (2012) qui montrent que la présence est une construction psychologique qui dépend de nombreuses contingences et est

notamment dépendante des attentes personnelles et des attributions « meaning ». Ainsi, la présence peut parfois être minimisée ou augmentée dans la réalité selon l'importance que l'on attribue à une situation que l'on est en train de vivre ou des stimulations extérieures disponibles et qui sollicitent notre attention. Il n'est pas surprenant que dans certaines situations (telles que celle testée par Villani et al. 2012) la présence soit même plus importante dans l'environnement virtuel (bien que cela ne corresponde pas nécessairement à une valeur très élevée sur l'échelle de mesure). Ainsi, lorsque l'on souhaite évaluer un EV, il ne faut pas seulement considérer la présence ressentie dans cet environnement, mais il faut également la comparer à ce qui est ressenti dans la réalité dans la même situation. Dans notre étude, la présence "absolue" dans l'EV est de seulement 56,53% et 54,67% (respectivement pour le Psi et le Pi), mais elle correspond en fait à 68,52% et 102,97% de ce qui est ressenti en réalité. Avec cet exemple, on voit clairement que ne considérer qu'une valeur absolue peut parfois conduire à une interprétation erronée d'un effet. Dans le premier cas la Pi semble très moyenne alors que dans le second cas elle est au moins égale (voire sensiblement plus élevée) à ce qui est observé dans la réalité.

Ces résultats montrent qu'il est essentiel de définir clairement ce que l'on entend par le terme « présence » et ce que l'on souhaite mesurer : le fait de se sentir pleinement impliqué dans l'activité virtuelle ? le fait d'être totalement déconnecté de la réalité ? le fait de focaliser totalement notre attention sur l'activité en cours dans l'EV ? le fait de « croire » qu'il s'agit de la seule réalité possible au moment où l'on s'y trouve même si ce n'est pas possible ? Pour chacune de ces questions, les mesures doivent être spécifiques et non ambiguës.

III. Le mal des simulateurs

III.1. Qu'est-ce que le mal des simulateurs ?

Il y a consensus pour considérer le mal des simulateurs comme un cas particulier de « mal des transports ». Il consiste en une réaction physique à l'EV qui peut comprendre : de la désorientation, des nausées, des vertiges, des suées, de la somnolence, de la fatigue oculaire, des maux de tête, la perte de la stabilité posturale et des vomissements (bien que ces derniers soient peu fréquents). La sévérité de ces effets secondaires varie selon les participants et le type d'EV. On peut les classer sur une échelle allant de « légère gêne » à « malaise incapacitant » (Drexler, 2006). Dans le cas des simulateurs de conduite, le pourcentage de participants malades, varie largement selon le type de simulateur utilisé (base fixe ou mobile, nombre d'écrans, etc.), la tâche de conduite et la façon dont le mal des simulateurs est mesuré.

Par exemple, Mullen, Weaver, Riendeau, Morrison & Bedard (2010) indiquent que sur vingt-cinq participants, treize (52%) n'ont pas pu finir leur séance de conduite sur simulateur à cause du mal des simulateurs ; Park, Lim, Lee, Lee, Choi & Chung (2008), indiquent quant à eux que, sur vingt participants, sept (35%) étaient considérés comme malades après soixante minutes passées à conduire sur le simulateur parce qu'ils obtenaient un score au dessus de la moyenne au test du SSQ (Simulator Sickness Questionnaire). En utilisant un casque de réalité virtuel (V6 helmet-mounted display ; HMD), Stanney, Hale, Nahmens & Kennedy (2003) rapportent que, sur mille cent deux participants exposés à l'EV, cent quarante-deux (12,9%) ont dû arrêter à cause du mal des simulateurs. Sur les neuf cent soixante qui ont effectué la totalité de l'étude, 81% indiquaient un niveau élevé pour les différents symptômes du mal des simulateurs.

III.2. Comment évaluer le mal des simulateurs ?

Habituellement, deux sortes de mesures peuvent être utilisées selon que l'on considère les manifestations physiologiques liées au mal des simulateurs ou leur évaluation subjective.

Si l'on considère les paramètres physiologiques, de nombreux indicateurs peuvent être utilisés comme l'activité des systèmes cardiovasculaire, respiratoire et gastro-intestinal, l'apparition de sueurs froides et l'activité électrodermale. Par exemple, Warwick-Evans Church, R.E., Hancock, C., Jochim, D., Morris et al. (1987) ont montré une corrélation positive entre la conductivité au niveau de la peau et l'auto-évaluation du mal des simulateurs. Toutefois, les auteurs notent que ces mesures sont assez sensibles aux influences psychologiques (comme l'anxiété) et physiologiques (la température ambiante, l'activité motrice, etc.). Concernant l'activation du système cardio-vasculaire, Harm (2002) indique que les études concernant le rythme cardiaque, la variabilité du rythme cardiaque et la pression sanguine, donnent des résultats variables concernant la direction des changements observés dans ces paramètres lors de la manifestation du mal des simulateurs. Cette variabilité pourrait s'expliquer grâce à différents facteurs incluant les différences individuelles, les conditions de stimulation (durée, intensité, type de conflit sensoriel) et la sévérité du mal des simulateurs ressenti au moment de la mesure.

Concernant les mesures subjectives, la plus reconnue et la plus utilisée est certainement le Simulator Sickness Questionnaire (SSQ), introduit pour la première fois par Lane & Kennedy (1988). Ce questionnaire comporte seize items répartis en trois composants: (a) les symptômes oculomoteurs (fatigue oculaire, difficulté de concentration, etc.), (b) la désorientation (c'est-à-dire les étourdissements, etc.) et (c) les nausées (nausées,

vomissements, augmentation de la salivation, etc.). Ce questionnaire a été très largement réutilisé depuis (Bouchard, Robillard, Renaud & Bernier, 2011; Brooks, Goodenough, Crisler, Klein, Alley et al., 2010; Kennedy, Lane, Berbaum & Lilienthal, 1993).

III.3. Comment expliquer ce phénomène ?

Différentes théories ont été proposées pour rendre compte du mal des simulateurs. Les trois le plus souvent évoquées sont : la théorie du conflit sensoriel, la théorie évolutionniste et la théorie de l'instabilité posturale.

La *théorie évolutionniste* de Treisman (Treisman, 1977) postule que le mal des simulateurs serait la résultante d'une interprétation erronée du Système Nerveux Central (SNC), que le décalage perçu entre les différentes sources d'informations sensorielles concernant le mouvement, serait dû à l'ingestion de toxines. Le mal des simulateurs serait donc le résultat de la stimulation de l'activation du système vestibulaire qui, normalement, facilite la réponse de vomissements à l'ingestion d'un poison. Cette théorie est soutenue par de nombreuses observations montrant, par exemple, que les personnes les plus sensibles au mal des simulateurs, le sont également aux toxines, à la chimiothérapie et aux nausées et vomissements post-opératoires (Golding, 2006; Money, Lackner & Cheung, 1996).

Selon la *théorie du conflit sensoriel* de Reason (1978), le malaise ressenti suite à une exposition à un simulateur à base fixe ou à un dispositif de réalité virtuelle résulterait du fait que la stimulation visuelle provenant du dispositif (c'est-à-dire le mouvement apparent) serait en désaccord avec les entrées sensorielles provenant du système vestibulaire et proprioceptif, ces derniers indiquant une absence de mouvement du corps.

La *théorie de l'instabilité posturale* (Ricchio & Stoffregen, 1991) est, quant à elle, une théorie écologique du mal des simulateurs. A l'opposé de la théorie du conflit sensoriel qui postule que la redondance sensorielle est un phénomène très commun et est donc attendue par le système perceptif. Ricchio & Stoffregen (1991) considèrent que la redondance du système sensoriel est relativement rare et que l'absence de redondance sensorielle est courante dans les environnements naturels et artificiels et concerne notamment de nombreuses situations non connues pour provoquer le mal des simulateurs. A l'inverse, une instabilité posturale prolongée est très souvent observée dans les situations induisant le mal des transports contrairement à celles ne l'induisant pas. Ricchio & Stoffregen (1991) supposent donc que le mal des transports serait provoqué par une instabilité posturale prolongée et proviendrait de situations où un individu doit apprendre de nouvelles stratégies de maintien postural effectives. Les études réalisées par Stoffregen & Smart (1998) et Stoffregen, Hettinger, Haas,

Roe & Smart (2000) confirment que l'instabilité posturale précède le mal des simulateurs induit visuellement dans une pièce mobile. Cela a également été observé dans la simulation virtuelle du même environnement (Villard, Flanagan, Albanese & Stoffregen, 2008).

III.4. Quels sont les facteurs susceptibles d'induire le mal des simulateurs ?

Si l'explication du mal des simulateurs est encore sujette à controverse, les facteurs susceptibles de l'induire commencent à être assez bien identifiés. Ces facteurs peuvent être regroupés en trois catégories : les facteurs techniques, les facteurs propres aux caractéristiques individuelles des utilisateurs et les facteurs psychologiques.

III.4.1. Facteurs techniques

Les facteurs techniques concernent l'ensemble des propriétés des dispositifs utilisés pour créer l'environnement virtuel et interagir avec ce dernier. Les plus souvent cités sont :

- Le contrôle de la navigation : Stanney et Hash (1998) ont montré que l'importance du mal des simulateurs ressenti par les utilisateurs pouvait être directement liée au niveau de contrôle de la navigation qui était accordé aux participants ; Le fait de donner aux participants le contrôle de leurs actions (déplacements) réduirait les effets secondaires liés à la navigation.
- Le champ visuel du dispositif : bien qu'un large champ de vision augmente les performances, cela augmente également les risques de mal des simulateurs (DiZio & Lackner, 1997; Lawson, Graeber, Mead & Muth, 2002).
- La durée de l'exposition : le mal des simulateurs est positivement corrélé à la durée d'exposition (Lawson et al., 2002).
- La fréquence des mouvements dans le cas d'un simulateur à base mobile : Les mouvements à faible fréquence (<0,2 Hz) induisent davantage le mal des simulateurs et cela augmente avec la durée de l'exposition et l'intensité de l'accélération (Drexler, 2006; Golding, 2006).

III.4.2. Facteurs individuels

De nombreuses caractéristiques propres aux individus sont également citées dans la littérature comme propices au mal des simulateurs. Par exemple, il est admis que l'âge, l'expérience et le genre jouent un rôle déterminant. Ainsi, Brooks, Goodenough, Crisler, Klein, Alley, et al. (2010), à l'aide d'un simulateur de conduite à base fixe, ont montré que les participants âgés ont plus de risques d'être malades que les plus jeunes. Habituellement, les jeunes enfants, sont insensibles au mal des simulateurs.

Le genre est également un facteur de risque important et les femmes sont plus sujettes au mal des simulateurs que les hommes. Par exemple, Dobie, May, McBride & Dobie (2001)

ont constaté que les femmes ressentent significativement plus le mal des simulateurs sur des dispositifs pour lesquels les deux groupes ont les mêmes antécédents d'exposition, et ce quel que soit l'âge et le niveau d'activité physique. Selon Golding (2006) cette plus grande sensibilité des femmes n'est pas seulement subjective car elles sont plus sujettes aux vomissements que les hommes (Lawther and Griffin, 1988; Golding, 2006). A l'inverse Stanney et al. (2003) constatent que les femmes n'ont pas plus de nausées que les hommes. Dans leur étude, les différences entre hommes et femmes sont essentiellement dues au fait que les femmes ont des niveaux significativement plus élevés concernant les symptômes oculomoteurs et de désorientation.

L'expérience individuelle peut également influencer sur le mal des simulateurs. Par exemple, Stanney et al. (2003) indiquent que les expositions préalables à des environnements « provocateurs » (simulateur d'avion, montagnes russes, tourniquet, etc.) influencent la sensibilité au mal des simulateurs. Ainsi, bien que ce dernier soit positivement corrélé à la durée d'exposition (Lawson, Graeber, Mead & Muth, 2002), il peut être réduit voire éliminé grâce à une exposition répétée au mouvement (Hill & Howarth, 2000).

Il a aussi été constaté un lien entre la performance du conducteur et le mal des simulateurs (Mullen, Weaver, Riendeau, Morrison & Bedard, 2010); les participants qui étaient incapables de terminer une session sur simulateur à cause du mal des simulateurs étaient plus performants en conduite réelle que les autres participants. Une interprétation de ce résultat pourrait être que les conducteurs les plus expérimentés ont plus d'attentes au sujet de ce qu'ils devraient ressentir dans l'environnement virtuel en comparaison à la réalité. Ces attentes pourraient influencer la façon dont le cerveau interprète les informations en provenance de l'environnement. Cela nous amène au dernier point que nous souhaitons aborder dans cette section : les facteurs psychologiques.

III.4.3. Facteurs psychologiques

Les facteurs psychologiques sont de tous, les moins étudiés, les moins connus et ceux pour lesquels il est le plus difficile d'obtenir un consensus dans la littérature. Cela est très probablement dû au fait que ces facteurs concernent un vaste domaine d'investigation et sont souvent difficiles à mesurer.

Nous pouvons considérer que les facteurs psychologiques peuvent être divisés en trois catégories de facteurs : cognitifs (par exemple, il peut être intéressant de considérer comment les ressources cognitives sont sollicitées pendant une tâche en EV), affectifs (par exemple, les

prédispositions personnelles, le stress, l'effort, le sentiment de maîtrise), et les facteurs concernant la perception « subjective » de l'EV et qui renvoient au sentiment de présence.

Concernant la façon dont la dimension affective peut influencer sur le mal des simulateurs, peu de données sont disponibles. Il est néanmoins démontré que le mal des simulateurs est sensible à l'autosuggestion. Ainsi, Young, Adelstein & Ellis (2007) ont montré que les participants qui complètent le SSQ avant (pré-test) et après (post-test) avoir été confrontés à un EV ont un score significativement plus élevé au post-test que ceux qui ne complètent le questionnaire qu'après la confrontation à l'EV. Les auteurs considèrent que les attentes jouent un rôle crucial dans les manifestations du mal des simulateurs lors des expériences utilisant la RV et que ce facteur devrait être davantage pris en compte dans la conception de ces études. D'autres auteurs ont montré une forte corrélation entre les scores obtenus au SSQ et l'anxiété (Bouchard et al., 2011). Les auteurs décrivent une étude dans laquelle quarante-trois soldats étaient exposés au *Trier Stress Social Test* (TSST; Kirschbaum et al., 1993), une tâche de performance extrêmement stressante. Après le TSST, les soldats devaient compléter la version français du SSQ et de la *State Anxiety Subscale* du *State-Trait Anxiety Inventory* (Gauthier & Bouchard, 1993; Spielberger, 1983). Seulement quatre des symptômes du SSQ n'étaient pas présents après le TSST : nausées, vertiges (yeux fermés), maux de tête et renvois. Selon les auteurs, la superposition partielle observée entre les symptômes du mal des simulateurs et ceux de l'anxiété, indique que ces derniers ne doivent pas être systématiquement attribués à des effets non voulus de la RV. Ils peuvent tout aussi bien résulter du stress induit par la tâche à réaliser dans l'EV. Cela tout particulièrement quand la tâche vise à évaluer les capacités du participant ou le confronte à une situation stressante ou anxiogène.

Finalement, il semblerait qu'il y ait un lien entre le sentiment de présence et le mal des simulateurs. Par exemple, Tanaka & Takagi (2004) ont montré que plus la vitesse angulaire et l'angle visuel augmentent (ce qui selon eux serait un facteur crucial pour induire la présence dans l'EV) et plus le mal des simulateurs augmente (mesuré à l'aide du SSK). Ainsi, selon ces auteurs, plus la priorité est donnée au sentiment de présence lors de la conception de l'EV et plus le mal des simulateurs a de chances de se manifester. A l'inverse si la priorité est donnée à la réduction du mal des simulateurs, le sens de présence risque d'en pâtir. Néanmoins, dans cette étude, le sens de présence n'était évalué qu'indirectement et était supposé être corrélé avec le sentiment de déplacement ressenti dans l'espace virtuel 3D.

Cette revue de la littérature montre que les facteurs psychologiques sont nombreux et ont été relativement peu abordés jusqu'à présent. Lors de l'étude que nous avons réalisée à titre exploratoire et décrite à la section II (**Milleville-pennel & Charron, 2015a**), nous avons essayé d'approfondir cette question. Les différentes données que nous avons recueillies via le questionnaire QPF concernant les caractéristiques psychologiques des participants (les prédispositions affectives personnelles [stress, sentiment de maîtrise et effort perçu] et la présence) et le NASA TLX, nous permettaient effectivement d'essayer d'établir un lien entre ces variables et le mal des simulateurs. Les trois conditions de conduite considérées dans l'étude ont été prises en compte: la conduite avec un simulateur de conduite (S), la conduite avec le véhicule personnel (VP) et la conduite avec un véhicule auto-école (VAE). Notre objectif est ainsi de déterminer si le mal des simulateurs serait dû à un trait de personnalité stable ou à un effet spécifique de l'EV.

Nous espérons ainsi répondre à deux questions :

- S'agit-il d'une réaction individuelle à l'environnement lui-même (c'est-à-dire provoquée par les propriétés de l'environnement) ou est-ce plutôt attribuable à une prédisposition personnelle indépendante de l'EV ?
- Est-il vrai que plus le participant ressent de présence et plus les risques d'éprouver le mal des simulateurs est important ?

Les résultats que nous avons obtenus à l'aide d'une analyse du type régression des Moindres Carrés Partiels (régression PLS), indiquent que le mal des simulateurs pourrait être lié à l'expérience de conduite des participants mais aussi à leurs prédispositions affectives et à la présence qu'ils ressentent dans l'EV. Par contre la charge cognitive n'a que très peu d'effet sur le mal des simulateurs (figure 1.7).

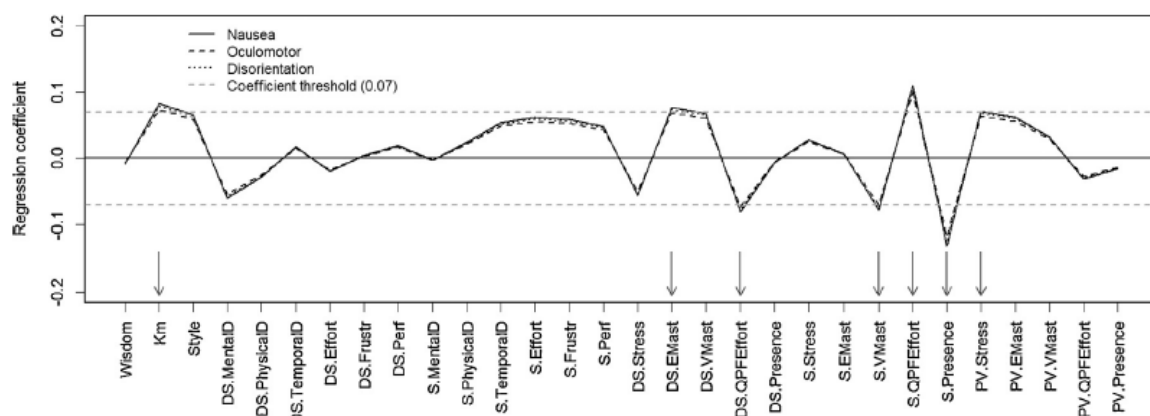


Figure 1.7: L'analyse des coefficients de régressions permet de faire ressortir les variables explicatives du mal des simulateurs (pointés par une flèche).

Sur la base de ces résultats nous avons pu proposer trois explications au mal des simulateurs :

- Les personnes sensibles ont une grande expérience de conduite et en même temps se sentent peu présentes dans l'EV et sont peu confiantes dans leur maîtrise du simulateur de conduite et conduire dans ces conditions leur demande plus d'effort ; ou bien,
- Ces personnes sont plus confiantes dans leur maîtrise des événements pouvant survenir dans le véhicule auto-école. Conduire dans cette situation est peu coûteux pour elles; ou bien,
- Ces personnes se sentent très stressées lorsqu'elles conduisent leur véhicule personnel, elles sont peu confiantes dans leur maîtrise du simulateur de conduite et se sentent peu présentes dans l'EV.

Si l'on considère la première explication, on peut supposer que les conducteurs les plus susceptibles de se sentir malades sur simulateur ont une bonne expérience de conduite mais ne se sentent pas à l'aise avec celui-ci. Ce résultat est concordant avec celui obtenu par Mullen et al. (2010) ; les conducteurs les plus expérimentés sont plus sujets au mal des simulateurs que les autres. Nous pouvons ainsi supposer que ce n'est pas l'environnement virtuel lui-même qui induit le mal des simulateurs, mais le décalage qui existe entre les attentes du système sensori-moteur du conducteur (expert) et ce qui se produit réellement dans le simulateur de conduite. Cet écart entre les deux conditions peut aussi expliquer pourquoi ces participants se sentent moins présents dans l'EV puisque celui-ci frustrer les attentes de leur système sensori-moteur. Ce résultat s'accorde bien avec une explication du mal des simulateurs en termes de conflit sensoriel (Reason, 1978). Cependant, cette explication devrait prendre en compte les caractéristiques individuelles susceptibles d'influencer les attentes individuelles sur ce que l'on peut/doit ressentir dans l'EV. Ainsi, on peut supposer qu'un conflit sensoriel se produise uniquement si le conducteur est préparé (du fait de son expérience de conduite) à percevoir des informations sensorielles particulières et si en outre, il accorde initialement suffisamment de crédit à l'EV pour s'attendre à ce que ces informations y soient présentes. Dans ce cas, un décalage entre ce que le système visuel perçoit et ce que le système vestibulaire reçoit par rapport à ce qu'il s'était préparé à recevoir (du fait de l'expérience), pourrait induire le mal des simulateurs.

Cependant, cela n'est pas le seul facteur explicatif du mal des simulateurs ; si nous considérons les deux autres explications avancées, elles indiquent que les prédispositions personnelles, telles que le sentiment de maîtrise des événements dans le véhicule auto-école ou le stress ressenti dans le véhicule personnel, peuvent aussi prédisposer les conducteurs à se sentir malade dans un simulateur de conduite. Cela répond également à la première des questions que nous avons préalablement mentionnées. Il est ainsi envisageable qu'une

variable affective puisse avoir un impact sur les réactions d'un individu dans l'EV. Cela permet d'expliquer la grande variabilité souvent observée entre les participants partageant des caractéristiques communes (comme l'âge, le genre ou l'expérience d'un EV).

Concernant la seconde question que nous nous posions au sujet de l'influence du sentiment de présence, nos résultats ont montré que le mal des simulateurs diminue lorsque la présence ressentie dans l'EV augmente. Ce résultat est en contradiction avec la conclusion de Tanaka & Takagi (2004), qui observaient que, comme la vitesse angulaire et l'angle visuel augmentaient (ce qui est selon eux un facteur critique pour la présence), le mal des simulateurs augmentait. Cette contradiction apparente vient probablement du fait d'une confusion entre les concepts de présence et d'immersion. Nous avons vu que l'immersion correspond à la description objective de l'interface de RV. Elle renvoie à la qualité et au degré avec lesquels l'interface de RV contrôle les entrées sensorielles pour chaque catégorie d'action et de perception (Burkhardt, 2007). La vitesse angulaire et l'angle visuel renvoient aux caractéristiques techniques de l'interface de RV, qui ont donc beaucoup plus à voir avec l'immersion que la présence (Slater, 2009). Comme Witmer & Singer (1998) l'ont souligné, la présence ne dépend pas seulement des propriétés immersives des dispositifs utilisés, mais aussi de l'implication du participant dans l'EV.

En conclusion, cette étude exploratoire a permis de montrer que l'expérience individuelle ainsi que les facteurs psychologiques peuvent moduler le mal des simulateurs. Cela offre de nouvelles perspectives quand à la compréhension de ce malaise et nous permet d'envisager différentes suites à ces travaux en incluant notamment davantage de participants dans les protocoles de recherche à venir.

IV. Conclusion

L'objectif de ce chapitre était d'apporter des éléments de réponse à certaines des interrogations formulées dans le préambule de ce document et motivées par les progrès fulgurants réalisés par la RV au cours des dernières décennies. Est-il vraisemblable qu'une confusion puisse se produire entre réalité et RV? La vie réelle pourrait-elle devenir juste « une fenêtre de plus » ouverte sur une réalité possible et admissible parmi d'autres? Il s'agit d'une interrogation légitime. Cependant, en sommes-nous vraiment là ?

Nous avons vu tout au long de ce chapitre que la RV peut être un outil fiable dont la validité est effective que ce soit sur le plan comportemental ou psychologique. J'ai moi-même contribué à montrer que la RV peut parfois solliciter notre cerveau de la même façon que la

réalité en induisant notamment la même charge cognitive. Il en est de même pour les réactions émotionnelles ressenties. J'ai également contribué à montrer que ces environnements sont susceptibles d'induire un véritable sentiment de présence, pouvant au moins partiellement être identique à ce qui est ressenti dans la réalité. De nombreux travaux ont ainsi démontré qu'il en devient parfois possible de tromper l'utilisateur sur son propre état physique ou sa position dans l'espace.

Il est évident que les événements qui se produisent dans les EV ne sont pas anodins pour l'utilisateur puisqu'ils permettent d'induire des modifications physiologiques identiques à celles observées dans la réalité dans des conditions similaires. Nous avons vu qu'ils peuvent même conduire à des modifications comportementales sur le long terme (notamment via les thérapies cognitivo-comportementales). Il serait donc irresponsable de nier le fait que ces environnements peuvent parfois induire une véritable confusion avec la réalité et avoir des conséquences directes et durables sur l'individu, même si certains effets indésirables sont encore pour l'instant susceptibles de se produire (notamment le mal des simulateurs) induisant ainsi des ruptures de présence ramenant soudainement le participant à la réalité et limitant ainsi l'impact de l'EV. Ces effets sont loin d'être systématiques et il ne fait aucun doute que les différents travaux réalisés dans ce domaine (et auxquels j'ai moi-même contribué), permettront à terme de les minimiser voire de les éliminer définitivement. Il est donc tout à fait raisonnable de penser que dans un avenir proche, la RV permettra de créer des EV ultra réalistes capables de déplacer totalement l'attention de l'individu au point de dépasser la réalité. Il faut voir à cela deux conséquences directes :

La première concerne la nécessité et l'urgence de mettre en place une véritable réflexion sur l'encadrement éthique et légal qui doit régir les développements réalisés dans ce domaine. Il est de la responsabilité de chacun des chercheurs impliqués dans le développement et l'utilisation de cette technologie de s'y investir.

La seconde conséquence concerne les formidables progrès offerts par cette même technologie dans les domaines de la recherche (analyse du comportement et des fonctions cognitives dans diverses situations, développement d'outils d'assistance, analyse de l'activité, ...), de la médecine (remédiation motrice et cognitive, traitement des phobies, simulateur d'interventions chirurgicales pour préparer une intervention complexe, ...) et de la formation (apprentissage de la conduite automobile ou du pilotage d'avion ou de machines complexes, apprentissage du geste chirurgical, ...). J'ai moi-même pu exploiter les opportunités fournies par la RV pour contribuer aux développements réalisés dans ces domaines. Dans la suite de ce

document je vais donc m'attacher à présenter ma contribution dans ces différents domaines tout en les resituant dans le cadre de l'état de l'art actuel.

Partie 2 : La simulation comme outil d'évaluation

Cette partie de mon activité a donné lieu aux publications et communications suivantes :

- Milleville-Pennel, I., & Charron, C.** (2013). Quelle(s) validité(s) pour un simulateur de conduite: étude exploratoire. *ÉPIQUE'2013* (pp. 381-387). ARPEGE Science Publishing, Presse Universitaires de Bruxelles asbl.
- Prévost, C., Milleville-Pennel, I., & Hoc, J.M.** (2012). Contribution à l'évaluation des aptitudes à la conduite chez les cérébrolésés. *Symposium ARPEGE 2012*. Paris, France, Oct.
- Prévost, C., Milleville-Pennel, I., Hoc, J.M., Pothier, J., & Charron, C.** (2011). Protocole d'évaluation de la conduite automobile chez les personnes cérébrolésées. *Actes ÉPIQUE'2011* (pp. 93-105). Nancy, France: Presses Universitaires de Nancy.
- Prévost, C., Milleville-Pennel, I., Hoc, J.M., Pothier, J., & Charron, C.** (2011). Évaluation de la conduite automobile chez des patients cérébrolésés. *Congrès de la SOFMER*. Nantes, France, Oct.
- Charron, C., Hoc, J.M., & Milleville-Pennel, I.** (2010). Cognitive control by brain-injured car drivers. An exploratory study, *Ergonomics*, 53(12),1434-1445.
- Milleville-Pennel, I., Pothier, J., Hoc, J.M., & Mathè, J.F.** (2010). Consequences of cognitive impairments following traumatic brain injury: pilot study on visual exploration while driving. *Brain Injury*, 24(4), 678-691
- Hoc J. M., Charron C., & Milleville-Pennel, I.** (2009). Cognitive control in car driving: the case of brain-injured drivers. *ECCE 2009 - European Conference of Cognitive Ergonomics*, Finlande.
- Milleville-Pennel, I., Pothier, J., Hoc, J.M., Charron, C., Mathè, J.F., & Michaud, A.** (2008). Traumatisme crânien et conduite automobile: complémentarité des tests neuropsychologiques statiques et des évaluations dynamiques sur simulateur de conduite [abstract]. *Actes du Congrès National de la SFP* (pp.156). Boulogne Billancourt, France : Société Nationale de Psychologie.
- Milleville-Pennel, I., Charron, C., Hoc, J.M., & Mathè, J.F.** (2007). Model of normal and impaired visual exploration while steering : a way to identify assistance needs. In D. de Waard, F.O. Flemisch, B. Lorenz, H. Oberheid, and K.A. Brookhuis (Eds.). *Human Factors for assistance and automation* (pp. 1 - 14). Maastricht, the Netherlands: Shaker Publishing.
- Milleville-Pennel, I.** (2006). Peripheral vision as a way to develop steering implicit assistance [CD-ROM]. Proceedings of the 16th World Congress of the International Ergonomics Association (IEA 2006). Amsterdam: Elsevier.

Cette partie de mon activité a permis l'encadrement d'une thèse :

- Prévost, C.** (2013). Apport de la simulation dans l'évaluation des aptitudes à la conduite : l'exemple des personnes cérébrolésées.

Introduction

Nous avons vu qu'une des applications possibles de la RV concernait le développement d'environnements conformes à la réalité dans le but d'étudier et comprendre le comportement des utilisateurs. De récents travaux ont montré les atouts que pouvait représenter la RV pour le diagnostique et la rééducation des troubles cognitifs (Klinger & Joseph, 2008). Des EV comme le VAP-S (Virtual Action Planning Supermarket) ou le VMall@ (supermarché virtuel) permettent de mettre en évidence un dysfonctionnement

cognitif (principalement des fonctions exécutives : anticipation, planification, flexibilité mentale, inhibition) et/ou fonctionnel dans les activités de la vie quotidienne suite à un AVC. C'est également le cas des simulateurs de conduite. Cette technologie permet en effet de tester les fonctions cognitives (et tout particulièrement l'attention et les fonctions exécutives) d'un individu dans des conditions dynamiques et en temps réel avec la garantie de recréer quasi-parfaitement une situation de conduite reproductible à l'identique d'un participant à l'autre. Nous allons voir dans ce chapitre les atouts considérables de la RV que ce soit au niveau du diagnostic, de la compréhension des processus cognitifs impliqués ou de l'aide potentielle pour la remédiation.

I. Exploration visuelle et processus cognitifs déficitaires chez les personnes cérébrolésées

I.1. Quel lien entre les processus cognitifs et l'exploration visuelle ?

La conduite automobile nécessite de continuellement et activement explorer l'environnement visuel afin de pouvoir à la fois détecter les informations importantes tout en restant réactif face à une situation dynamique et évolutive. En fait l'évaluation de l'exploration visuelle est critique non seulement pour estimer les capacités du conducteur à évaluer les risques (Pradhan, Hammel, DeRamus, Pollatsek, Noyce & Fisher, 2005) mais aussi pour estimer de quelle façon les difficultés cognitives peuvent influencer la recherche d'informations visuelles dans l'environnement et leur utilisation dans la mise à jour des représentations internes du conducteur concernant la situation de conduite. Cette question est particulièrement intéressante si l'on considère les personnes ayant des déficits cognitifs complexes tels que ceux observés chez les personnes cérébrolésées. En fait ces personnes sont souvent caractérisées par des troubles attentionnels (Park, Moscovitch & Robertson, 1999 ; Zoccolotti, Matano, Deloche, Cantagallo, Passadoriet et al, 2000), de la mémoire de travail, de la mémoire à long terme (Haut & Shutty, 1992, McDowell, Whyte & D'esposito, 1997), de la vitesse de traitement de l'information et les fonctions exécutives (Mattson & Levin, 1992 ; Serino, Ciaramelli, Di Santantonio, Malagu, Servadei, et al., 2006). Nous pouvons faire l'hypothèse qu'au moins deux de ces processus cognitifs peuvent avoir des répercussions sur l'exploration visuelle : les troubles des fonctions exécutives et les troubles attentionnels.

Concernant les fonctions exécutives, le parallèle peut-être fait avec les observations réalisées chez les conducteurs inexpérimentés. Il est maintenant bien connu que ces derniers, comparés aux conducteurs experts explorent moins largement la route sur des sections de

routes à quatre voies particulièrement couteuses en attention (Falkmer & Gregersen, 2005 ; Crundall & Underwood, 1998 ; Underwood, Chapman, Bowden, Crundall, 2002 ; Underwood, Chapman, Brocklehurst, Underwood, Crundall, 2003) et présentent également une moins grande anticipation visuelle (Land, 2006). A l'inverse, ils regardent davantage les objets à l'intérieur du véhicule, les indices de trafic pertinents et les objets considérés comme des dangers potentiels (Falkmer & Gregersen, 2005). Ces observations confortent l'hypothèse que l'exploration de la route par les novices est limitée, non pas à cause d'un manque de ressources attentionnelles, mais parce qu'ils ont une représentation mentale limitée de la situation de conduite et des événements susceptibles de survenir sur la route (Land, 2006, Martens & Fox, 2007 ; Underwood, Chapman, Bowden, Crundall, 2002). Cela se traduit par une faible anticipation. Ce type de comportement visuel s'apparente à ce qui peut être observé lorsqu'il existe un déficit au niveau des fonctions exécutives, comme c'est souvent le cas pour les personnes cérébrolésées. Ce type de déficit impacte les processus cérébraux responsables de la planification, de la flexibilité cognitive, de la pensée abstraite, de l'acquisition des règles, de l'initiation des actions appropriées et de l'inhibition des actions inappropriées, du changement adaptatif et de la sélection des informations sensorielles pertinentes (Damasio, 1995 ; Duncan, 1986 ; Shallice, 1982). Parmi toutes ces fonctions, la planification et l'anticipation sont particulièrement intéressantes à considérer au regard de la conduite automobile. En effet, l'anticipation est le seul moyen pour le conducteur d'être continuellement conscient de la situation et d'être capable d'adopter le bon comportement une fois confronté aux situations imprévues susceptibles de se produire sur la route. On peut ainsi envisager qu'un déficit au niveau des fonctions exécutives pourrait conduire à une exploration visuelle anticipative amoindrie et en conséquence, une représentation mentale de la situation de conduite incomplète et inappropriée. Cela est congruent avec les études montrant que le déficit de navigation dans l'espace consécutif à un traumatisme crânien peut être dû à une incapacité à se représenter et à utiliser des cartes mentales (Livingstone & Skelton, 2007).

Concernant les troubles liés à l'attention ils peuvent impliquer soit l'attention sélective, soit l'attention partagée. Concernant l'attention sélective, ils entraînent souvent de la distractibilité (Faglioni, 1998 ; Van Zomeren & Brouwer, 1994) et sont susceptibles d'induire un profil d'exploration visuelle erratique du fait des difficultés à éviter les fixations sur les événements non pertinents pendant la tâche de conduite. A l'inverse, un déficit qui renvoie à l'attention partagée pourrait se traduire par une focalisation sur la tâche centrale au détriment des tâches secondaires (Baddeley & Sala Della, 1996 ; Peterson & Peterson, 1959 ; Van Zomeren & Brouwer, 1994). Lors de la conduite, la tâche principale est de maintenir le

véhicule à l'intérieur de la voie de circulation. Cette tâche requière une exploration continue de la route. Par exemple, à l'approche d'un virage, les conducteurs passent beaucoup de temps à regarder dans la région du point tangent, qui correspond à l'endroit où la direction de la partie intérieure de la courbure s'inverse (Land & Lee, 1994 ; Land, 2006, 2001, 1998). Cette région est perçue en vision centrale et les conducteurs y accordent 80% de leurs fixations oculaires. Toutefois, le regard n'est pas continuellement fixé sur le point tangent et le conducteur réalise des va-et-vient entre ce point et d'autres objets d'attention. Ces « excursions » visuelles se font par saccades et durent typiquement entre une demi-seconde et une seconde. On voit cependant que maintenir la position du véhicule dans la voie de circulation est coûteux en attention (Yilmaz & Nakayama, 1995). Ainsi, on peut s'attendre à ce qu'un déficit au niveau de l'attention partagée induise une focalisation de l'attention disponible sur la route, associée à une diminution des regards vers les autres zones visuelles pertinentes comme l'environnement routier périphérique et les outils de conduite non directement liés au positionnement sur la voie (rétroviseurs, compteur de vitesse), bien que ceux-ci soient essentiels pour le maintien d'une bonne conscience de la situation.

De façon surprenante, excepté quelques travaux sur les conducteurs inexpérimentés, très peu d'études ont porté sur le lien entre les facteurs cognitifs et l'exploration visuelle. La plupart des travaux sont dédiés aux aspects visuo-attentionnels de l'activité de conduite et utilisent le test d'UFOV (Ball, Clay, Wadley, Roth, Edwards & Roenker, 2005 ; Novack, Banos, Alderson, Schneider, Weed, Blankenship & Salisbury, 2006 ; Rogé, Pébayle & Muzet, 2003 ; Stay, Justiss, McCarthy, Mann & Lanford, 2008). Tous ces travaux montrent que la performance des conducteurs à l'UFOV est corrélée avec la performance de conduite sur route réelle (Novack, Banos, Alderson, Schneider, Weed, Blankenship & Salisbury, 2006). Néanmoins, il est difficile de clairement définir si la conduite automobile est corrélée à l'UFOV à cause de sa dimension attentionnelle ou visuelle ou bien les deux. Aucune de ces études n'a posé directement la question de l'impact que peuvent avoir les déficits attentionnels sur la façon dont les conducteurs déficitaires explorent l'environnement visuel comparés aux conducteurs non déficitaires.

I.2. Restriction de la zone d'exploration visuelle

Afin de combler le manque de connaissance concernant le lien entre déficit cognitif et comportement d'exploration visuelle, nous nous sommes attachés, lors d'une étude exploratoire (Milleville-pennel, Pothier, Hoc & Mathé, 2010), à déterminer l'impact des troubles attentionnels et des fonctions exécutives sur la superficie de la zone routière couverte

par l'exploration visuelle. Cinq personnes Cérébrolésées (CR ; masculins et âgés de trente-cinq à cinquante ans) et six participants Contrôles sains (C ; masculins et âgés de trente-six à cinquante ans) ont participé à cette étude. Tous avaient une bonne expérience de la conduite (plus de 30 000 km) et devaient utiliser un simulateur de conduite à base fixe pour effectuer six trajets sur une route départementale. Le logiciel de simulation de conduite, Sim2 (développé par l'équipe MSIS de l'INREST) a été utilisé, couplé à une cabine de conduite à base fixe (FAROS, figure 2.1). Le simulateur était équipé d'une boîte de vitesse automatique, d'un volant avec retour d'efforts, de pédales de frein et d'accélérateur et d'un compteur de vitesse. La scène visuelle était projetée sur un écran (3.02 m de large et 2.28 m de haut). La route utilisée correspondait à une simulation de la piste de conduite du GIAT à Satory (France) et mesurait 3,5 km de long. Les fixations oculaires étaient recueillies avec un oculomètre de type casque (YviewX, SMI).

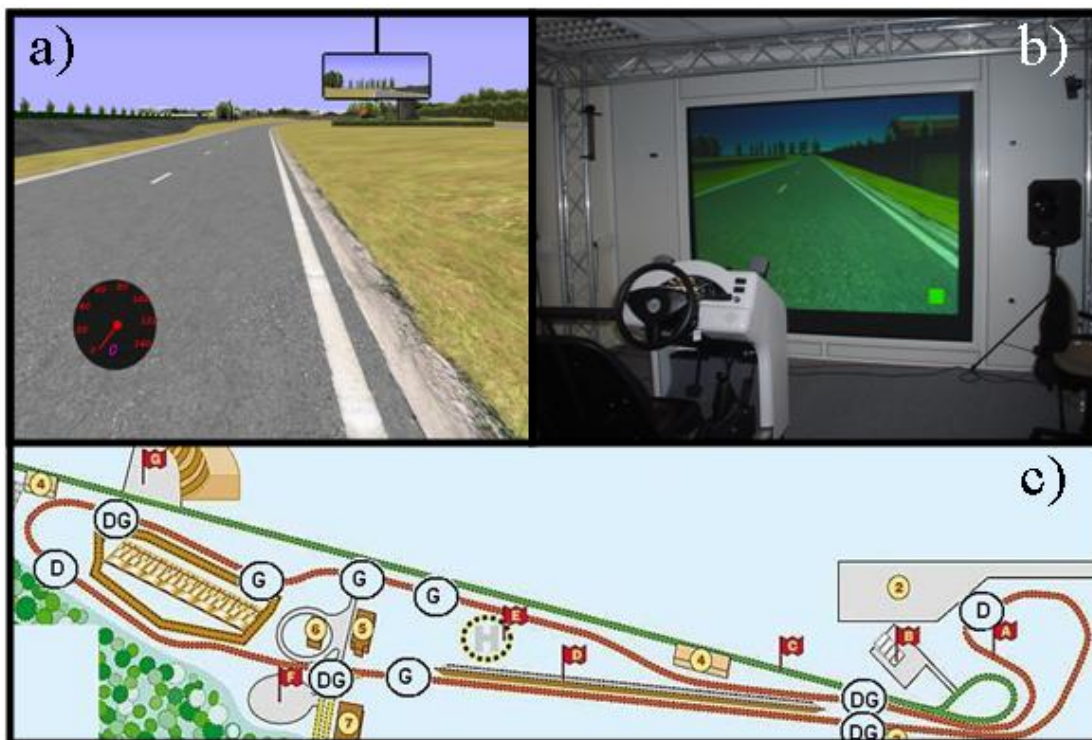


Figure 2.1 : a) Environnement virtuel de conduite b) Simulateur de conduite c) Plan de la piste de Satory reproduite dans l'EV.

Afin de faciliter les analyses, l'environnement routier a été divisé en six zones visuelles d'intérêt en ligne droite et sept en virage (figure 2.2). Pour ce qui est des sections de ligne droite, les trois premières concernaient le contexte de conduite : compteur de vitesse (contrôle de la vitesse), rétroviseurs (anticipation des autres usagers), l'environnement routier

immédiat périphérique (conscience de la situation globale de conduite). Les trois zones suivantes concernaient la distance d'exploration. Pour les définir nous nous sommes basés sur le marquage au sol disposé sur la droite de la route : vision proche (jusqu'à deux sections de ligne blanche discontinue), vision moyenne (entre deux et quatre sections de ligne blanche discontinue) et vision lointaine (plus de quatre sections de ligne blanche discontinue). Pour ce qui est des sections de virage, les trois premières zones concernaient l'exploration visuelle du contexte de conduite (compteur de vitesse, rétroviseurs, environnement routier). Les quatre dernières zones concernaient la distance d'exploration : vision proche (jusqu'à une section de ligne blanche discontinue), vision moyenne (entre une et deux sections de lignes blanches discontinues), le point tangent (large zone autour du point tangent¹) et la vision lointaine (au delà du point tangent). Nous avons considéré le pourcentage de temps passé dans chacune de ces zones pour chaque groupe de participants.

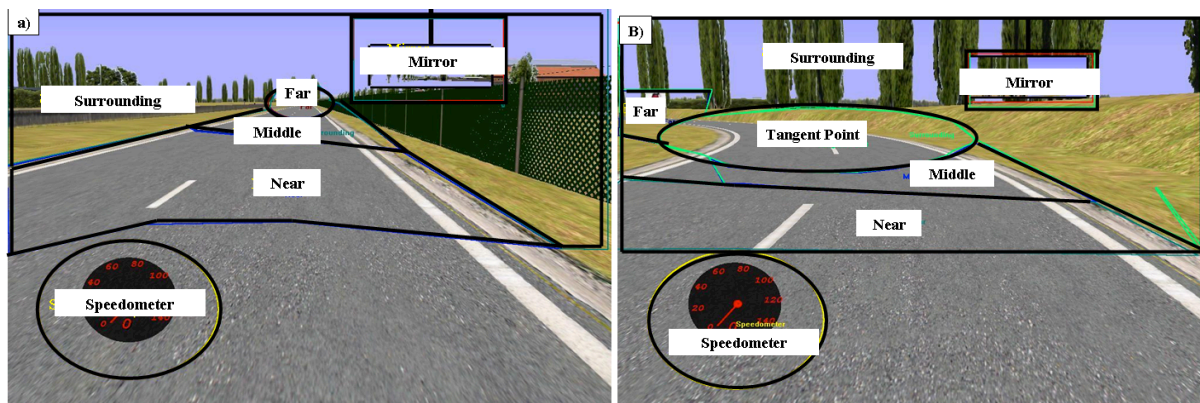


Figure 2.2 : a) zones visuelles en ligne droite b) zones visuelles en virage.

Les résultats obtenus sur simulateur de conduite indiquent que les participants CR présentent des durées de fixation plus longues en ligne droite associées à une réduction des zones visuelles explorées ainsi que de la distance d'exploration. On constate alors que les participants CR passent proportionnellement plus de temps dans la zone la plus proche de la scène visuelle (cf. figure 2.3) et moins de temps dans la zone la plus lointaine, comparé aux participants C. Ce résultat indique que les participants CR ont un comportement d'exploration visuelle moins anticipatif que les participants contrôles. La même constatation a pu être faite

¹Point Tangent : during bend taking, the driver tends to fixate a particular point in the bend, called the tangent point (cf. Figure 2b). This point corresponds to the region where the angular speed reverses and passes through null value. When the driver follows the bend curvature precisely, this point seems visually motionless in the dynamic visual field (the retinal flow) of the driver (Land & Horwood, 1995; Land & Lee, 1994). According to Land (1998, 2001), when drivers follow curved trajectories they can adjust their trajectory by fixating the tangent point.

concernant les sections de virage. Ainsi, même si globalement, les participants passent tous plus de temps à regarder la zone du point tangent (entre 75 et 87 % de leur temps), les participants cérébrolésés accordent néanmoins moins d'attention à cette zone que les participants contrôles au bénéfice des zones visuelles proches et intermédiaires (cf. figure 2.4). Ce résultat est intéressant pour deux raisons : tout d'abord parce que la zone du point tangent est primordiale pour la gestion de la trajectoire du véhicule en virage, ensuite parce que le fait d'accorder moins d'importance à cette zone au profit des zones visuelles proches dénote d'un manque d'anticipation de la part des conducteurs.

Concernant l'exploration de l'environnement de conduite et des outils de contrôle du véhicule (compteur de vitesse, rétroviseurs, etc.), les participants CR y accordent globalement moins de temps que les participants C.

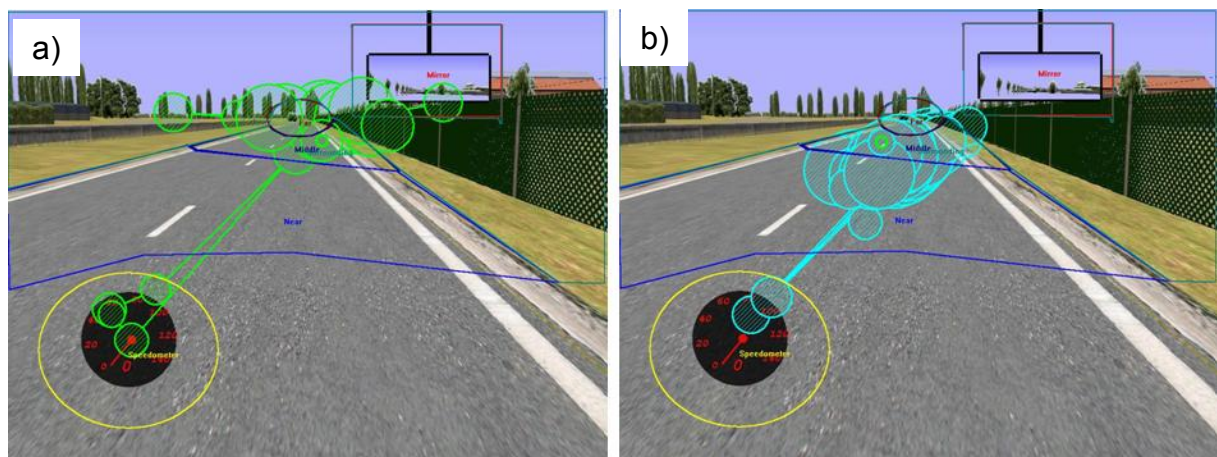


Figure 2.3 : Position du regard en ligne droite a) participants contrôles b) participants cérébrolésés.

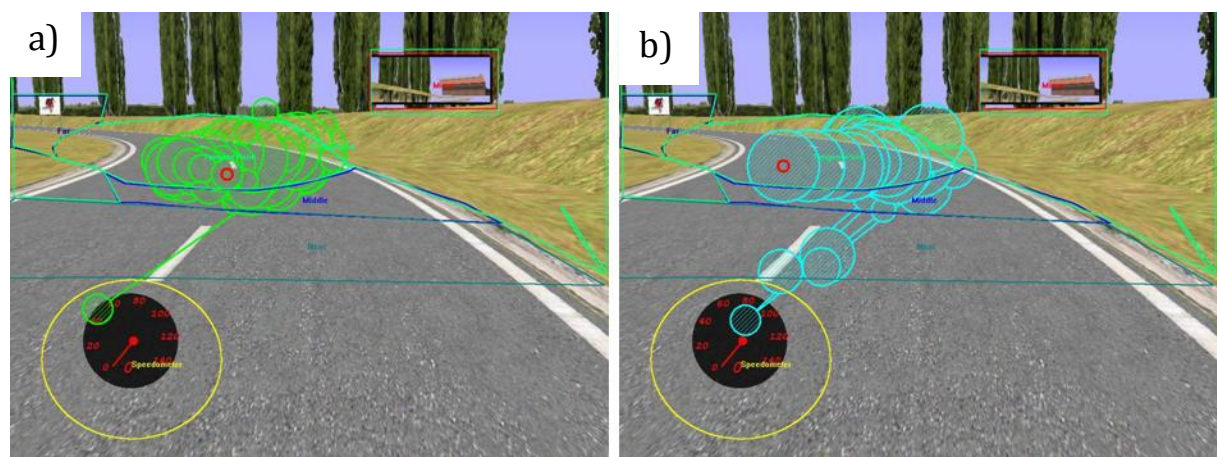


Figure 2.4 : Position du regard en virage a) participants contrôles b) participants cérébrolésés.

L'ensemble de ces résultats indique que les participants CR focalisent leur attention sur le contrôle de la position du véhicule au centre de la voie au détriment de la mise à jour d'une représentation globale de la situation de conduite. On peut donc s'attendre à ce que ces conducteurs présentent un comportement plus « réactif » qu'anticipatif sur la route et soient donc potentiellement plus accidentogènes.

Nos travaux ainsi que d'autres ont donc pu démontrer que le simulateur de conduite peut être un bon moyen de différencier entre eux des participants ayant des capacités de conduite différentes (Anderson, Rizzo, Shi, Uc & Dawson, 2005; Bella, 2008; Lewet al., 2005; Mayhew et al., 2011; **Milleville-Pennel et al., 2010** ; Patomella & Kottorp, 2005; Stern, 2004; Vuadens & Comte, 2001). Ainsi, les EV permettent aujourd'hui d'évaluer l'individu à la fois dans une situation temporelle et dynamique, tout en permettant de reproduire certaines situations jugées critiques pour l'évaluation de telle ou telle compétence requise pour la conduite d'un véhicule automobile. Ces environnements ont de plus l'avantage d'être sans conséquences dangereuses dans le cas de réponses inadaptées, du fait de perturbations attentionnelles provoquées ou liées à un des déficit(s) cognitif(s) de l'individu. Ainsi, les EV sont susceptibles d'accroître considérablement les capacités de diagnostic des aptitudes à la conduite tout en améliorant la standardisation des évaluations. L'utilisation du simulateur de conduite, en première instance, semble donc particulièrement adaptée dans le cadre de l'évaluation des aptitudes à la conduite de populations dites « à risque », comme les personnes cérébrolésées, celles souffrant d'un déficit visuel ou les personnes âgées. Ce mode d'évaluation est en effet beaucoup plus sûr, moins stressant pour l'utilisateur et moins coûteux à mettre en place que les évaluations traditionnellement effectuées sur véhicule auto-école. L'aspect plus ludique de ce mode d'évaluation offre, en outre, l'avantage de proposer aux participants un mode d'évaluation leur faisant au moins partiellement oublier le caractère clinique de la situation et augmentant ainsi leur motivation à poursuivre le protocole (Klinger & Joseph, 2008). L'intérêt de cette technologie n'a pas échappé à bon nombre de Centres hospitaliers qui, à l'instar du CHU de Clermont-Ferrand à Cébazat, s'équipent de plus en plus d'un simulateur de conduite pour évaluer les performances de leurs patients. Le simulateur reste cependant encore utilisé de façon marginale et souvent inappropriée, car peu coordonné avec les autres moyens d'évaluation proposés. Dans la section suivante je présenterai de quelle façon mes travaux ont pu contribuer à améliorer l'intégration de la RV dans les programmes d'évaluation des aptitudes à la conduite.

II. Evaluation des aptitudes à la conduite

La question de l'évaluation des aptitudes à la conduite du fait d'une lésion cérébrale (traumatisme crânien, accident cardio-vasculaire) ou d'un déficit visuel ou tout simplement du fait de l'avancée en âge concerne de nombreux professionnels (neuropsychologues, médecins de médecine physique et réadaptation, ergothérapeutes, ophtalmologues) et institutions. Il est en effet très difficile actuellement de se prononcer sur l'aptitude à la conduite sans risque d'erreur car il n'existe pas, en France, de critères officiels permettant de guider la décision. Les tests neuropsychologiques et visuels permettent de poser un premier diagnostic, cependant la question de leur validité reste posée. En effet, les tests habituellement utilisés sont souvent statiques et ne permettent pas d'appréhender tous les aspects de l'activité de conduite (exploration spontanée de la scène visuelle, intégration continue d'informations pertinentes pour la gestion de la trajectoire, gestion du risque en fonction de l'évolution de la situation de conduite,...). Quant au test de conduite sur route, il ne peut pas être parfaitement contrôlé (variabilité du trafic, des événements, etc.) et pose donc des problèmes de reproductibilité (Patomella & Kottorp, 2005). De plus, il présente un risque élevé en cas de réponses comportementales inadaptées de la part du conducteur (Fox, Bowden, & Smith, 1998). Outre les limites propres à chaque évaluation, elles ne présentent pas nécessairement de cohérence car elles sont administrées séparément sans concertation préalable quant aux mécanismes à évaluer et à la manière de le faire. Il est donc difficile, en cas d'avis divergents, de conclure sur l'aptitude à la conduite d'une personne.

Le simulateur doit donc pouvoir s'insérer dans le protocole standard d'évaluation en répondant aux manques actuels et en apportant les informations complémentaires nécessaires au diagnostic à poser. Il doit offrir un cadre d'évaluation précis, standardisé, permettant de poser le diagnostic le moins ambigu possible permettant d'offrir une méthode de diagnostic reproductible basée sur des critères objectifs et transférables d'un établissement à l'autre.

Afin de combler le manque constaté, nous avons mis en place à partir de 2009, un protocole complet d'évaluation en collaboration avec le CHU de Nantes, l'association ARTA et l'Auto-école ECF de Nantes (**Prévost, Milleville-Pennel, & Hoc, 2012 ; Prévost, Milleville-Pennel, Hoc, Pothier, & Charron, 2011**). Ce protocole permettait d'intégrer des évaluations Neuropsychologiques, sur route réelle et sur simulateur de conduite. Une étude exploratoire visant à valider le protocole a été réalisée sur un échantillon de dix personnes Cérébrolésées (CR). Cet échantillon a été comparé à un échantillon de neuf participants contrôles (C), équivalent en termes d'âge et d'expérience de conduite.

II.1. Bilan Neuropsychologique

Le bilan neuropsychologique a été réalisé en utilisant une batterie de tests jugés comme les plus pertinents pour l'évaluation des processus cognitifs principalement impliqués dans la conduite automobile (dont notamment l'attention et les fonctions exécutives ; **Milleville-Pennel et al., 2010**). Les résultats indiquent que les participants cérébrolésés présentent essentiellement des déficits en anticipation et planification, en attention sélective et partagée et en vitesse de traitement de l'information. Pour l'ensemble de ces items, plus de 50 % des participants cérébrolésés ont été notés comme déficitaires.

II.2. Evaluation sur véhicule réel

Concernant l'évaluation sur véhicule réel, nous avons utilisé un véhicule auto-école (Renault Clio III, boîte manuelle, 5 vitesses). Tous les participants passaient l'évaluation avec le même formateur d'auto-école. A l'issue de la passation, le formateur remplissait une fiche en suivant une grille d'évaluation précise. Cette grille portait, à l'origine, sur des aspects principalement sécuritaires et était assez proche de la grille utilisée lors de l'examen national du permis de conduire. Aux items existants, nous avons ajouté des items propres à l'observation de la conduite chez les personnes cérébrolésées et concernant, par exemple, leur capacité d'anticipation. La grille comportait au total vingt-et-un items. L'épreuve de conduite sur route durait environ 1h15. Le parcours était le même pour tous. Il s'agissait d'une boucle de 22,2 km comportant à la fois de la conduite en agglomération et hors agglomération, définie afin que le trajet suivi soit le plus proche possible de ceux réalisés sur le simulateur de conduite.

Si l'on considère le score global obtenu par les participants dans cette condition, on peut noter l'absence d'items notés déficitaires chez les participants C, contrairement aux CR. A l'opposé, les CR ont un grand nombre moyen de scores déficitaires (30%). Par ailleurs, les participants CR montrent un nombre moyen de scores zéro (pas de difficulté) faible comparativement aux C (respectivement 16 % et 48 %). Les processus notés comme déficitaires dans plus de 50 % des cas chez les participants CR sont l'anticipation, l'exploration visuelle, la mobilité du regard et l'observation de l'environnement ainsi que la prise en compte des angles morts.

II.3. Evaluation sur simulateur de conduite

Concernant l'évaluation sur simulateur, nous avons utilisé une cabine Faros à base fixe, équipée de trois écrans 22" (permettant une vision panoramique) ainsi que d'une boîte de

vitesse manuelle (figure 2.5a). Lors de la passation, les participants portaient un casque de vélo, peu contraignant pour les mouvements et non invasif, sur lequel était installé l'oculomètre EyeViewX (figure 2.5b). Cela nous permettait d'enregistrer la scène et les mouvements oculaires lors de la conduite afin d'étudier le pattern d'exploration visuelle.

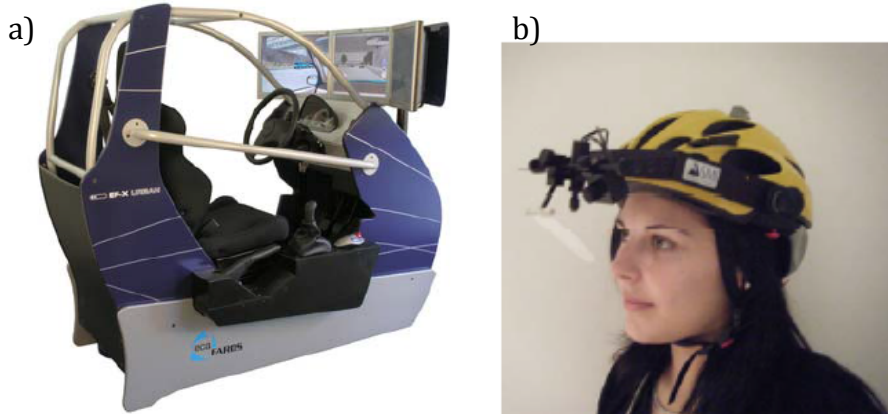
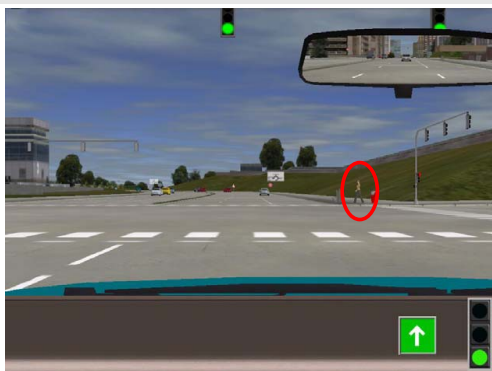


Figure 2.5 a et b : a) Cabine Faros b) Oculomètre EyeViewX.

Deux parcours d'initiation familiarisaient le participant avec le simulateur. Trois parcours comportaient des événements critiques tels qu'un piéton traversant alors que le feu piéton est rouge ou un enfant traversant avec son ballon. Il s'agissait d'événements potentiellement dangereux que le participant pouvait rencontrer en conduite réelle. Ces événements étaient facilement évitables à partir du moment où le conducteur produisait la réponse adéquate (relâcher la pédale d'accélérateur, freiner, changer de voie, etc.). Chaque événement était décomposé en processus cognitifs impliqués dans sa gestion et un score était attribué à chaque participant en fonction du nombre de processus mis en défaut ou non lors de la confrontation à l'événement (cf. figure 2.6).



| Événement | Processus | Indicateurs |
|------------|--|---|
| ville_evt1 | Anticipation visuelle | Regard sur le piéton avant qu'il s'engage |
| ville_evt1 | Anticipation motrice | Relâchement de l'accélérateur |
| ville_evt1 | Prise de décision | Adaptée (freiner) ou non |
| ville_evt1 | Prise d'information sur l'objet critique | Regard sur le piéton après qu'il se soit engagé (oui/non) |
| ville_evt1 | Temporalité de la prise d'information sur l'objet critique | TTC 1er regard |
| ville_evt1 | Temporalité de l'action | TTC pour freiner |

Figure 2.6 : Exemple d'événement critique (image de gauche) : le piéton (entouré en rouge) traverse alors que le feu est vert. La table (à droite) représente les processus évalués dans cet événement ainsi que les indicateurs utilisés dans l'analyse.

- ***Discrimination entre les participants C et CR***

Les résultats obtenus indiquent que les scénarios développés sur simulateur de conduite sont effectivement discriminants entre les populations testées. Si l'on considère le score global obtenu par les participants lors de l'épreuve de conduite, il apparaît que les participants CR ont un score plus faible que celui des participants C, ces derniers n'ayant obtenu que 6 % de scores considérés comme déficitaires lors de l'évaluation alors que les participants CR en ont obtenu plus de 25 %. A l'inverse, les participants C ont obtenu 89 % de scores non déficitaires pour seulement 69 % chez les participants CR.

Par ailleurs, 67 % des CR ont été impliqués dans un ou plusieurs accidents, contre seulement 11 % des C. Les processus mis en défaut lors de ces accidents concernent majoritairement l'anticipation (le participant n'anticipe pas la prise d'information vers les zones de l'environnement routier où des événements accidentogènes sont susceptibles de se produire) et la sélection des informations pertinentes (focalisation de l'attention sur un élément pertinent du scénario accidentogène mais non prise en compte des autres éléments contextuels).

Il est également à noter que le parcours en ville est celui dans lequel se sont produit le plus grand nombre d'accidents. Ce résultat est intéressant car les scénarios étaient conçus de manière à ce que certains événements critiques en ville ou de nuit impliquent les mêmes processus qu'en campagne. L'environnement de conduite, et notamment la densité d'informations visuelles contenues dans cet environnement, semblent donc jouer un rôle important dans la gestion des événements critiques chez les personnes en difficulté.

- ***Déficit attentionnel et conduite***

Quatre autres scénarios se déroulaient en ville et comportaient des distracteurs visuels afin d'étudier de manière plus approfondie les processus attentionnels (attention sélective et partagée). Il apparaît que, comparativement aux participants C, les CR regardaient moins souvent les panneaux publicitaires (ils regardaient moins de panneaux et effectuaient moins de regards multiples sur un même panneau). Cependant, il n'y a pas de différence statistiquement significative quant au temps accordé à un panneau. De ce fait, les CR passaient globalement moins de temps à regarder les panneaux publicitaires que les participants C. Si l'on considère l'excentricité des panneaux par rapport à la route (proche : sur le bord de la route ou éloigné : à trois mètres de la chaussée), nous voyons que les CR accordaient moins d'attention aux panneaux proches que les participants C. Cela implique tout d'abord que les participants CR ne présentaient pas de déficit d'attention sélective

susceptible d'induire des regards trop nombreux et inadaptés vers les panneaux publicitaires non pertinents pour la conduite. En ce sens, ce résultat est favorable à une reprise éventuelle de la conduite. Néanmoins, le fait que les panneaux proches soient moins regardés peut également être l'indicateur d'un déficit en attention partagée. Les conducteurs CR « économiseraient » ainsi leurs ressources attentionnelles en se focalisant sur la route et la gestion de la trajectoire. Nous retrouvons ici les résultats observés lors de notre étude exploratoire (Milleville-Pennel et al. 2010). Bien que ce comportement soit à priori non dangereux en soi et montre une bonne adaptation du comportement aux ressources disponibles, cela peut en partie expliquer le résultat observé précédemment concernant l'augmentation du nombre d'accidents en ville. En effet, à situation comparable, un même événement sera moins bien géré si l'effort à produire pour inhiber et trier les informations non pertinentes est plus important et cela d'autant plus si les ressources attentionnelles disponibles sont amoindries. Dans ce cas, le partage des ressources est limité et le tri à produire plus drastique et donc plus coûteux.

- *Temps de réaction*

Enfin, un scénario permettait d'évaluer le temps de réaction. Un ralentissement de la vitesse de traitement des informations est souvent observé chez les personnes CR. Pour évaluer cela dans une situation écologique, nous avons mis au point un exercice simple qui consistait à demander au conducteur de freiner le plus rapidement possible lorsqu'un signal stop apparaissait sur l'écran. Les participants ne réalisaient qu'un seul essai. Contrairement à ce qu'indiquait le résultat aux tests neuropsychologiques (50 % des CR étaient notés déficitaires au D2 en ce qui concerne la vitesse de traitement), la majorité de nos participants CR ne présentaient pas de ralentissement de la vitesse de traitement évaluée dans une tâche écologique.

En conclusion, nous pouvons remarquer qu'aucunes des évaluations sur route réelle ou sur simulateur n'a mis en échec plus de la moitié des participants, contrairement à ce que nous avons noté avec les tests neuropsychologiques. La notation peut donc sembler moins sévère lors de ces évaluations. En réalité, rappelons qu'il est possible de mettre en place une compensation des processus déficitaires lors de leur mise en œuvre dans la réalité, alors que ce n'est pas le cas lors des tests neuropsychologiques. Ce résultat indique donc simplement qu'un déficit identifié comme important à l'aide d'un test neuropsychologique, n'aura pas systématiquement de conséquences désastreuses en conduite réelle.

Par ailleurs, les évaluations sur route et sur simulateur sont cohérentes quand aux processus identifiés comme déficitaires. De même, les participants considérés comme les plus déficitaires sur route l'on également été sur simulateur. Au delà de la cohérence entre les évaluations, il apparaît que le simulateur a permis d'approfondir de nombreuses observations réalisées sur route et d'affiner le diagnostic posé. La mise en œuvre d'événements accidentogènes a notamment permis de valider ou non les inquiétudes concernant les capacités de certains conducteurs à gérer certains types d'évènements compte tenu de leurs performances en conduite standard sur route réelle (c'est-à-dire en l'absence de la survenue d'évènements critiques). Le simulateur de conduite semble donc être un outil utile voire indispensable lors d'une première confrontation à la reprise de la conduite, mais il doit pour cela être intégré à un protocole complet et cohérent d'évaluation des aptitudes à la conduite. Les efforts doivent se concentrer sur une homogénéisation des évaluations avec de véritables tests standardisés reconnus comme des références fiables et officielles. Ces références seraient utilisables pour poser des diagnostics plus sûrs de reprise (ou non reprise) de la conduite afin de les rendre exploitables, non seulement par tous les praticiens, mais aussi auprès des commissions de conduite des préfectures et des assurances.

III. Conclusion

Les différents travaux présentés dans cette section ont permis de montrer que les EV utilisés en simulation de conduite peuvent être des outils pertinents pour l'analyse des fonctions cognitives en temps réel et dans une situation dynamique.

Nous voyons que leur utilité va même bien au-delà de la simple compréhension des mécanismes cognitifs car ils permettent d'évaluer les capacités d'un individu de façon parfois plus complète que les évaluations écologiques habituellement envisagées. De ce point de vue, la RV apparaît comme un outil favorisant pour certains le retour à une forme d'autonomie en permettant de poser un diagnostic plus sûr quand à leur capacité à conduire. Dans une société, procédurière où la prudence est de mise dès qu'un praticien émet un diagnostic engageant sa responsabilité, ces derniers ont bien évidemment tendance, dans de nombreux cas, à déconseiller purement et simplement la conduite. Des patients se retrouvent ainsi privés d'un moyen de transport parfois essentiel au maintien d'une vie sociale et professionnelle. Nos résultats ont pu contribuer à montrer que développer des outils de RV permettant d'augmenter les possibilités de diagnostic ne peut qu'inciter les praticiens à revoir leur position jusqu'ici ultra sécuritaire (qu'il s'agisse de leur propre sécurité ou de celle du patient). Plus les outils de

diagnostiques gagneront en précision et plus il deviendra possible d'autoriser davantage de patients à reprendre la conduite dans des conditions clairement définies afin qu'ils n'engagent pas leur sécurité ou celle des autres usagers.

La RV peut en outre devenir un outil de formation permettant de mettre en place des protocoles d'apprentissage et de remédiation de la conduite (Casutt, Theill, Martin, Keller & Jäncke, 2014). Ces derniers pourront même être individualisés à partir de l'identification des déficits propres à chaque individu (Gamache, Lavallière, Tremblay, Simoneau & Teasdale, 2011). Il conviendra alors d'entraîner ces personnes à réutiliser correctement les processus en cause, ou à mettre en place des stratégies de compensation permettant de pallier leur dysfonctionnement. Ces dernières pouvant être définies via l'analyse des comportements de conducteurs experts ayant appris à conduire avec ces mêmes déficits (Bowers, Mandel, Goldstein & Peli, 2009).

Partie 3 : Les EVC seuls ou à plusieurs : la collaboration dans les environnements virtuels

Cette partie de mon activité a donné lieu aux publications et communications suivantes :

- Pouliquen-Lardy, L., Milleville-Pennel, I.,** Guillaume, F., & Mars, F.(in press). Remote collaboration in virtual reality: asymmetrical effects of task distribution on spatial processing and mental workload
- Pouliquen-Lardy, L., Mars, F., Guillaume, F., & Milleville-Pennel, I.** (2015). Virtual collaboration: effect of spatial configuration on spatial statements production. *Cognitive Processing*, 16, S337-S342.
- Pouliquen-Lardy, L., Milleville-Pennel, I., & Mars, F.** (2014). Remote collaboration: spatial communication in immersive virtual environments. *28th International Congress of Applied Psychology ICAP 2014*. Paris (France)
- Pouliquen-Lardy, L., Milleville-Pennel, I., Guillaume, F., & Mars, F.** (2014). How Role Distribution Influences Choice of Spatial Reference Frames in a Virtual Collaborative Task. *Spatial Cognition*. Bremen, Germany.
- Chellali, A., Milleville-Pennel, I., & Dumas, C.** (2013). Influence of Contextual Objects on Spatial Interactions and viewpoints sharing in Virtual Environments. *Virtual Reality Journal*, 17(1),1-15.
- Pouliquen-Lardy, L., Mars, F., & Milleville-Pennel, I.** (2013). Collaboration à distance: méthode d'analyse des environnements virtuels collaboratifs immersifs. In M. Hachet, N. Roussel, S. Huot & B. Renaud. *Annexes des Actes de la 25ème conférence francophone sur l'Interaction Homme-Machine*, (IHM 2013, pp.15-16). ACM International Conference Proceedings Series.
- Chellali, A., Dumas, C., & Milleville, I.** (2010). Haptic communication to enhance collaboration in virtual environments. In Proceedings of the [the European Conference on Cognitive Ergonomics ECCE2010](#), Delft, The Netherlands. pp. 83-90.
- Chellali, A., Dumas, C., & Milleville, I.** (2010). WYFIWIF: A haptic communication paradigm for collaborative motor skills learning. In Proceedings of the [International Conference on Web Virtual Reality and Three-Dimensional Worlds \(WEB3DW 2010\)](#). Freiburg, Germany. pp. 301-308.
- Chellali, A., Milleville-Pennel, I., & Dumas, C.** (2008). Elaboration of a common frame of reference in Collaborative Virtual Environments. In J. Abascal, I. Fajardo & I. Oakley (Eds). Processing of the European Conference ECCE (pp. 83-90). EACE, Roquencourt.
- Chellali, A., Milleville-Pennel, I., & Dumas, C.** (2008). Influence des systèmes de référence sur les profils de collaboration dans un environnement virtuel. In E. Brangier, G. Michel, J.M. Christian Bastien & N. Carbonell. Actes de la 20ème conférence francophone sur l'Interaction Homme-Machine, (IHM 2008). ACM International Conference Proceedings Series.
- Chellali, A., Dumas, C., Milleville-Pennel, I., & Nouri-Esfandiari, E.** (2007). Common Frame of reference in collaborative virtual environments and their impact on presence. *International Society for Presence Research* (371-372), Barcelona, Spain.

Cette partie de mon activité a permis l'encadrement de deux thèses :

- Chellali, A.** (2009). Etude des interactions homme-homme pour l'élaboration du référentiel commun dans les environnements virtuels collaboratifs.
- Pouliquen-Lardy, L.** (2016). Collaboration à distance : étude de la compréhension mutuelle dans les environnements virtuels collaboratifs immersifs. Le cas de la communication spatiale.

Introduction

Dans les chapitres précédents nous avons vu que la RV pouvait induire chez l'utilisateur des comportements réalistes sollicitant les fonctions cognitives d'une façon proche de la réalité et générant des réactions émotionnelles adaptées à la situation simulée. Il est ainsi possible d'envisager son utilisation dans des contextes d'évaluation ou même de formation.

Dans les différentes situations que nous avons abordées jusqu'à présent, l'individu était seul face à un environnement artificiel réactif. Les réactions et les interactions observées ne concernaient jamais un autre interlocuteur réel. Est-il envisageable que la RV puisse permettre de créer de véritables interactions entre plusieurs individus immergés dans le même environnement ? Le nombre croissant d'environnements pluri-utilisateurs élaborés dans ce sens (Métavers, Environnements Virtuels Collaboratifs Immersifs [EVCI] développés par les industriels comme Airbus ou les constructeurs automobile), tend à laisser penser que oui. On est alors en droit de se demander quelle est la nature exacte des interactions créées entre les utilisateurs. Comment parviennent-ils à se comprendre ? Quelles sont les répercussions sur les modes de communication et les représentations sous-tendant l'interaction ? Quelles formes de relation(s) sociale(s) peut-on attendre de ces échanges ? Est-il possible d'envisager des interactions complexes impliquant par exemple de collaborer pour réaliser une tâche commune dans l'EV ? Autant de questions auxquelles ce chapitre va essayer d'apporter des réponses à travers divers cas d'application impliquant une collaboration entre plusieurs utilisateurs via un EVC :

- Tout d'abord en proposant une définition de la collaboration via une réflexion sur la façon dont elle peut être envisagée dans ces EVC.
- Ensuite à partir d'exemples concrets d'EVC ayant servi à mener mes travaux de recherche.

I-Quelle définition de la collaboration ?

Avant de discuter les conséquences d'un média tel que la RV sur la collaboration, il importe de (re)préciser clairement la terminologie employée, notamment parce qu'il y a souvent ambiguïté sur le sens exacte de ce terme. Le caractère pluridisciplinaire des travaux nourrissant l'étude de la collaboration en RV rend cette ambiguïté encore plus flagrante du fait que chaque discipline y va de sa définition et appropriation du concept.

Avant toute chose, il faut rappeler que la collaboration est une forme d'activité collective, parmi d'autres. Selon Rogalski (1994), on peut distinguer deux dimensions dans le

travail collectif : une dimension verticale et une dimension horizontale. La dimension verticale correspond à la situation où un opérateur responsable d'une mission délègue une partie des tâches à un ou des autres opérateurs. La dimension horizontale concerne les activités collectives qui se situent au même niveau d'analyse hiérarchique des tâches. En parallèle de ces deux dimensions, elle oppose deux types de structures du travail collectif : la collaboration (où les acteurs partagent la même tâche prescrite) et la coaction (où les buts immédiats et à moyen terme des acteurs, sont différents). A l'intermédiaire se situerait la coopération où les opérateurs n'ont pas les mêmes buts immédiats mais une même tâche commune.

La notion de partage de l'activité ou de ses composants semble donc être essentielle dans la distinction qui peut être faite entre les concepts de coopération et collaboration.

Considérons dans un premier temps ce qui caractérise plus précisément la collaboration. Selon Dillenbourg (1999), une situation de collaboration est une situation dans laquelle il existe une symétrie dans les interactions entre les partenaires (symétrie d'actions, de connaissances et de compétences), qui ont un but commun et qui travaillent ensemble. Elle implique une interactivité entre les participants, une communication synchrone et de la négociation. En ce sens cette définition rejoint celle de Roschelle and Teasley (1995) pour qui « La collaboration est une activité synchrone et coordonnée qui est le résultat de la construction et du maintien d'une conception partagée d'un problème ». De ce point de vue, la collaboration n'est pas simplement un partage de tâches pour la résolution d'un problème mais aussi une interaction continue entre les participants qui unissent leurs efforts pour maintenir une compréhension partagée de la situation en prenant en compte les attentes et les considérations de chacun (Nova, Girardin, & Dillenbourg, 2005). Selon Puntambekar (2006), le processus d'interaction collaborative serait basé sur trois dimensions : la divergence d'idées, l'émergence d'une connaissance collaborative et la construction d'une nouvelle compréhension basée sur les discussions partagées. On peut ainsi considérer qu'en situation de collaboration, les individus se subsument progressivement en un groupe qui devient une entité à part entière. La structure de gouvernance du groupe est progressivement moins visible et le groupe est davantage autonome. Arrivé à ce niveau d'interaction, un certain niveau de confiance a été atteint et l'activité est davantage focalisée sur la mise en œuvre plutôt que sur le développement de nouveaux protocoles pour résoudre le problème (Kuziemsky & O'Sullivan, 2015). Ainsi, la responsabilité est globale et collective. Tous les partenaires participent ensemble à la réalisation de l'objectif final.

Concernant la coopération, elle implique selon Dillenbourg (1999), de subdiviser la tâche en sous-tâches chacune dévolues à un partenaire particulier. Le résultat final n'est qu'un assemblage du résultat des différentes activités individuelles. La coopération n'implique pas le même niveau d'interaction que la collaboration, ou plutôt l'interaction n'aura pas pour résultat de modifier (influencer) les processus cognitifs en cours chez chacun des opérateurs pendant la réalisation de la tâche. Ce point de vue est partagé par Bénech (2005) pour qui en situation de coopération il y a division négociée d'une tâche en sous tâches réparties entre des individus qui vont agir de façon autonome. Les interactions entre les participants se limitent à l'organisation, la coordination et le suivi de l'avancement. Le but final est atteint par la concaténation des résultats individuels. De ce point de vue la coopération impliquerait davantage un mode de communication asynchrone.

Un point de vue relativement différent est apporté par Loiselet & Hoc (2001). Selon eux la coopération entre deux agents implique d'une part que leurs activités interfèrent (que ce soit au niveau des buts, des ressources ou des procédures) et d'autre part que chaque agent tente de gérer ces interférences afin de faciliter l'activité (la sienne, celle de l'autre agent ou une tâche commune). On parlera d'interférence lorsque l'action d'un agent peut avoir des effets positifs (interférence positive) ou négatifs (interférence négative) concernant la réalisation des buts de l'autre agent. De ce point de vue une situation de coopération favorable ne cherchera pas à éviter les interférences mais favorisera un contexte où chacun des opérateurs peut gérer les interférences. La gestion des interférences peut se faire à trois niveaux : celui de l'action (c'est-à-dire localement avec une gestion dans l'instant de l'interférence), celui de la planification (les opérateurs vont se baser sur une représentation commune de la situation pour anticiper la gestion des interférences) et celui de la méta-coopération (cela concerne le très long terme et s'établit sur la base d'une très longue expérience du travail en commun dans un même contexte). Cette conception se rapproche, selon nous, davantage de celle de la collaboration (telle que nous avons pu la dresser précédemment au vu de la littérature) que de celle couramment admise de la coopération.

Ce « tour d'horizon » des deux concepts montre que la collaboration se distingue de la coopération sur un certain nombre de points clefs :

- En coopération les partenaires partagent le travail en sous tâches individuelles et rassemblent les résultats partiels ainsi obtenus pour ensuite construire un « tout » qui sera le résultat final de l'activité. A l'opposé, en collaboration les partenaires effectuent le travail « ensemble » en gérant, en temps réel, les différentes interférences qui peuvent se produire entre les activités de chacun.

- En collaboration les rôles de chaque participant peuvent changer à tout moment alors que dans une situation de coopération les rôles de chaque participant sont plus explicites, peu flexibles et le poids du statut hiérarchique plus marqué.
- Une autre divergence entre ces deux types d'activité est la synchronisation des communications. La coopération est souvent liée à une communication asynchrone alors que la collaboration implique par nécessité une communication synchrone.

Comme le souligne Hoc (2003), proposer une définition de la coopération ne peut pas se résumer à la combinaison des nombreuses définitions issues de différentes disciplines mais doit dépendre de son domaine d'application et du contexte expérimental. Il en est de même pour la collaboration. Ainsi ma définition de la collaboration, tout en intégrant une base commune à celle couramment utilisée dans la littérature, sera inspirée de celle proposée par Chellali (2009) dans sa thèse. Cette définition était la plus à même de qualifier les activités collectives qui nous intéressaient à l'époque et celles qui m'intéressent encore à présent. Je considérerais donc que la collaboration consiste en un travail commun et synchrone dans lequel des partenaires partagent les moyens et les problèmes pour atteindre un même but : accomplir une tâche commune (mais ils peuvent avoir également des buts personnels). Ils ont des activités synchrones qui interfèrent en générant une réflexion commune qui permet de résoudre les problèmes, le cas échéant. A la fin, il peut être difficile de distinguer l'apport de chacun des partenaires dans la solution finale. Les interactions répétées influencent constamment le déroulement du processus, ce qui peut dans certains cas entraîner un changement des rôles des participants. Cela peut se produire notamment lorsqu'il existe une symétrie dans les interactions entre les partenaires, c'est-à-dire qu'ils ont les mêmes statuts et les mêmes possibilités d'action. Ainsi, les rôles ne sont plus définis à l'avance et sont souvent interchangeables. Les participants doivent adapter leurs activités en fonction de ces interactions.

II- Le référentiel commun

II.1. Définition

Nous avons vu que les activités collectives, basées sur la collaboration reposent sur un processus constant d'échange et d'interaction entre les partenaires afin d'aboutir à un objectif commun. Pour que cet objectif soit mené à bien cela implique que chacun des opérateurs ait un minimum de connaissances à la fois sur le contexte, l'objectif final, les moyens d'y

parvenir et sur l'aide que peuvent lui apporter ses partenaires. Ces connaissances sont propres à l'opérateur et vont dans une certaine mesure être au moins partiellement identiques à celles des autres opérateurs. Ainsi, pour que les actions des uns et des autres soient efficaces, il faut que chacun puisse avoir un minimum d'information sur ce que les uns et les autres connaissent de l'activité commune et sont capables de faire (à la fois de part leurs compétences mais aussi par rapport à leur localisation dans la zone d'action). Ceci ayant pour but d'éviter, par exemple, des erreurs dues à une surestimation des compétences des autres opérateurs ou une mauvaise compréhension de la partie de l'activité qui leur était dévolue. Cela nécessite donc non seulement que les opérateurs puissent mettre en commun au moins une partie de leurs connaissances de la situation mais également qu'ils puissent régulièrement l'actualiser au cours de l'activité.

Le contenu commun servant de support à la collaboration porte différents noms selon le domaine d'étude qui s'y intéresse. En ergonomie cognitive, Loiselet et Hoc (2001) parlent de *Référentiel Commun* (RC) qu'ils définissent comme un ensemble de représentations compatibles (différentes mais non contradictoires) que les agents construisent et qui facilitent les communications et la collaboration. Nova et al. (2005) parlent, quant à eux de "modélisation mutuelle" (*mutual modeling*) qu'ils définissent par l'effort produit par chaque participant pour se construire une représentation des connaissances, des buts, des stratégies, des compréhensions de la situation, des croyances et des plans de son partenaire.

D'autres auteurs, comme Roschelle and Teasley (1995) parlent de l'espace commun d'un problème (joint problem space), c'est-à-dire une structure de connaissance partagée qui supporte l'activité de résolution de problème en intégrant les buts, la description de la structure courante du problème, la conscience des actions disponibles pour résoudre le problème et une association qui relie les buts, les caractéristiques de l'état actuel du problème et des actions disponibles.

Une autre appellation souvent rencontrée et celle utilisée par les psychosociologues : le *common ground*. Ainsi Clark & Brennan (1991) définissent la notion de *common ground* comme étant la somme des informations (compréhensions, connaissances, croyances et suppositions) partagées entre des participants à une activité collaborative.

Ce contenu commun, est souvent dissocié de la *Situation Awareness* (SA) qui sert notamment pour décrire l'aspect dynamique et continuellement actualisé du contenu commun, au sein des activités d'équipes. Ainsi, selon Bourbousson et al. (2011) il est important de distinguer la SA de la *Shared Knowledge* (SK, qui est simplement une autre appellation du contenu commun). Selon eux la première concernerait la perception et la compréhension qu'a

un individu de son environnement à un instant donné, ainsi que ses attentes concernant le déroulement futur des événements. La SA est transitoire dans le sens où elle évolue constamment avec l'activité en cours et la perception des éléments nouveaux dans la situation qui modifient les attentes de l'individu (Gorman, cooke & Winner, 2006). A l'inverse, la SK concernerait les connaissances partagées relativement stables, acquises par les membres de l'équipe au cours de leurs expériences d'interaction antérieures.

Face à la diversité des termes employés pour qualifier le contenu commun et afin de faciliter la lecture de ce document, j'ai choisi d'employer par la suite le terme français de *Référentiel Commun* (RC ; Loiselet & Hoc, 2001) pour désigner ce dernier. A travers cette revue les différentes définitions proposées du RC, trois questions essentielles émergent :

- De quelle façon ce RC est-il construit et alimenté par les membres de l'équipe ?
- De quelle façon se répartit ce RC au sein de l'équipe ? y a-t-il systématiquement un recouvrement des contenus ou peut-on envisager une simple répartition de ces contenus de façon à ce qu'ils soient complémentaires au sein de l'équipe?
- Si l'on suppose qu'il faille un recouvrement des contenus, celui-ci doit-il être total ou partiel? Les contenus doivent-ils avoir des formats identiques ou simplement compatibles.

Nous répondrons à la première question dans la section II.2.1. Les deux autres questions seront abordées dans la section suivante (II.2.2).

II.2. Elaboration et mise à jour du RC

II.2.1. Elaboration du RC au sein de l'équipe

Nous avons vu que l'efficacité du RC repose sur une mise à jour fréquente des informations qu'il contient. Clark (1996) appelle *grounding* le processus actif de communication qui permet d'élaborer et de maintenir le RC dans une activité collaborative. Le *grounding* permet aux opérateurs de mettre à jour continuellement leurs représentations personnelles de la situation tout au long de l'activité collaborative et d'acquérir ainsi de nouvelles connaissances autour de cette situation. Ils passent alors par un processus d'ajustement du RC (Giboin, 2004) qui consiste à réduire les écarts entre leurs représentations individuelles respectives. Pour cela, il va falloir rechercher des indices de compréhension chez l'autre et lui fournir ses propres indices de compréhension (Brennan, 1998).

Afin de rendre compte de l'effort admis par les opérateurs lors de ce processus, le principe du *moindre effort collaboratif* a été proposé par Clark & Wilkes (1986, cité par Clark

& Brennan, 1991). Ce principe postule que dans une conversation, les deux participants tentent de minimiser l'effort collaboratif, c'est-à-dire le travail que fournissent deux interlocuteurs entre le début de chaque contribution et son acceptation mutuelle, et donc l'énergie dépensée par les interlocuteurs pour effectuer un *grounding*. Il ne s'agit pas de réduire l'effort individuel, mais bien plus de tendre vers un déroulement de la contribution qui demande un minimum d'effort collaboratif.

Kuziemsky & O'Sullivan (2015) se sont attachés à l'analyse des différentes étapes du processus de *grounding* (figure 3.1). Ils ont constaté que le *grounding* se traduisait par trois étapes clés de construction du RC. Ainsi les participants commençaient par un RC de coordination (*coordinative common ground*), ils transitaient ensuite par un RC de coopération (*cooperative common ground*) pour finalement arriver à un RC de collaboration (*collaborative common ground*). Selon ces auteurs, le développement du RC peut se faire au niveau micro (individuel) ou macro (groupe). Les deux niveaux ne sont pas mutuellement exclusifs et entretiennent au contraire des relations « symbiotiques ». Le développement du RC individuel contribue à la performance et au rendement de la communauté avec laquelle l'individu interagit alors que le développement du RC de groupe aide au développement individuel. Les individus ont besoin d'obtenir des connaissances concernant les services et les ressources disponibles dans leur communauté afin de soutenir leurs propres besoins.

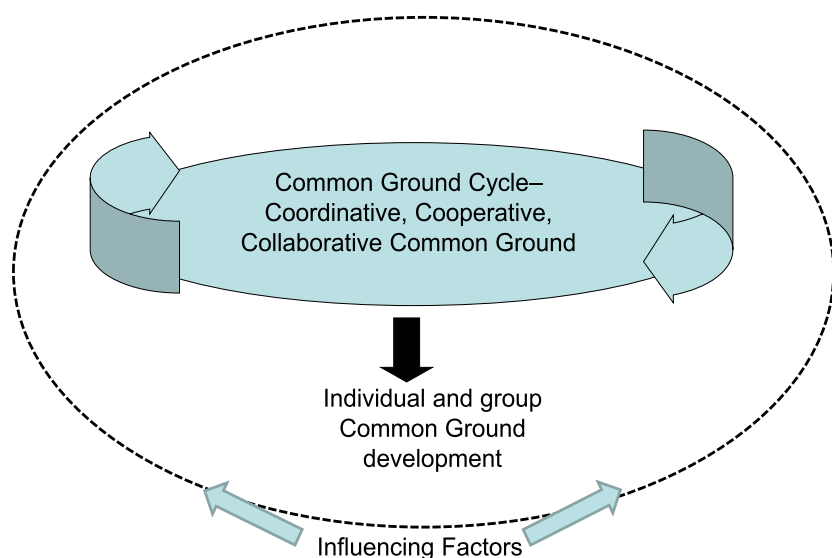


Figure 3.1: Modèle de développement du *Common Ground* selon Kuziemsky & O'Sullivan (2015).

Boubousson et al. (2011) ont, quant à eux, essayé de définir plus précisément la façon dont le contenu partagé évolue au cours du temps. Ils ont étudié la dynamique d'une équipe

de basket ball. L'analyse de l'évolution de la connaissance partagée a révélé quatre formes d'évolution possible (figure 3.2) : (a) le renforcement d'éléments de connaissance partagée préexistants ; (b) l'invalidation d'éléments de connaissance partagée préexistants ; (c) la fragmentation d'éléments de connaissance partagée préexistants ; (d) la création de nouveaux éléments de connaissance partagée.

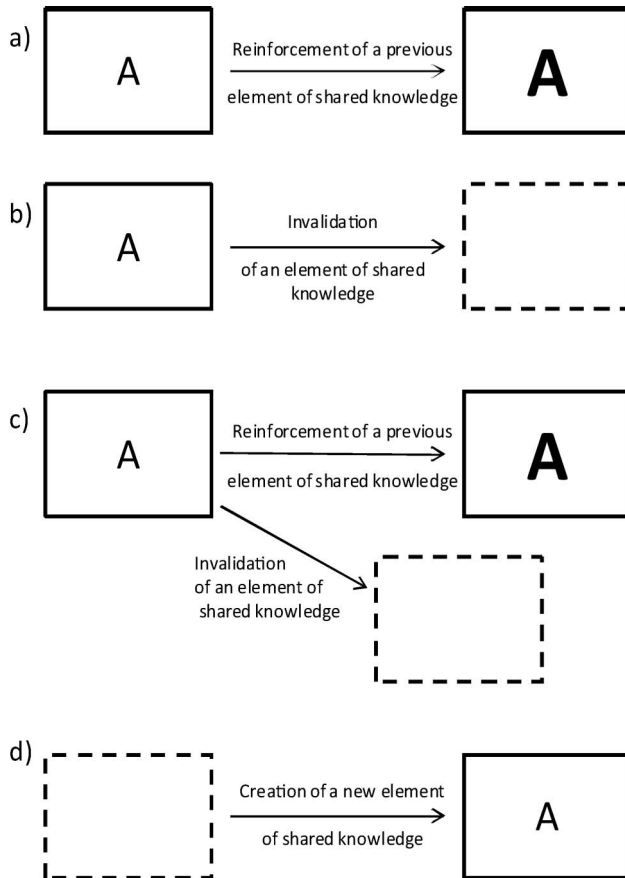


Figure 3.2: Diagramme représentant les quatre formes d'évolution possible de la connaissance partagée (chaque boîte représentant un élément de cette connaissance). (a) le renforcement d'éléments de connaissance partagée préexistants ; (b) l'invalidation d'éléments de connaissance partagée préexistants ; (c) la fragmentation d'éléments de connaissance partagée préexistants ; (d) la création de nouveaux éléments de connaissance partagée (d'après Boubousson et al., 2011).

II.2.2. Répartition du RC au sein de l'équipe

Concernant la façon dont les opérateurs partagent leurs connaissances lors du *grounding*, Selon Boubousson, Poizat, Saury & Seve (2011), au moins deux façons de concevoir cette mise en commun peuvent être envisagées : du point de vue du contenu ou du point de vue de la compréhension de l'activité et du partage des ressources. Si l'on considère le contenu commun, dans ce cas le partage est conçue comme une zone tampon contenant la

part de connaissance commune aux différents membres de l'équipe, (figure 3.3a). On voit bien ici qu'il n'est pas nécessaire d'envisager un partage totale du contenu, et seule une petite partie des connaissances (zone G, figure 3.3a) est partagée par l'ensemble des partenaires. Le partage peut également être conçu comme la répartition des ressources collectives de sorte que les membres de l'équipe puissent partager les rôles (figure 3.3b). Dans ce sens du terme, la compréhension de l'activité est distribuée entre les différents membres de la collectivité (Bourbousson et al., 2011), avec l'hypothèse sous-jacente que les compatibilités (plutôt que les similarités) dans cette compréhension faciliteront le fonctionnement effectif de l'équipe.

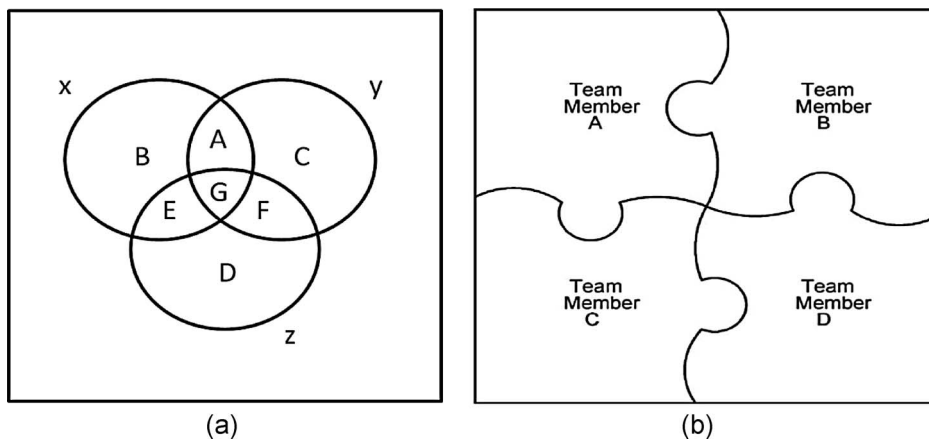


Figure 3.3 : Représentation des formes de connaissances partagées (d'après Bourbousson et al., 2011). (a) Représentations communes aux équipes. Chaque cercle représente la compréhension d'un individu ; (b) Représentation compatibles entre les équipes. Chaque pièce du puzzle représente la compréhension d'un individu.

II.2.3. Pour résumer...

Le RC correspond à l'ensemble des contenus partagés par les opérateurs. Ces contenus ne sont pas nécessairement identiques et peuvent parfois être simplement compatibles entre eux. Il s'agit notamment de la connaissance du but commun, de la structure courante du problème, des actions disponibles pour le résoudre et de la liaison entre ces trois notions. Les opérateurs doivent aussi avoir une bonne perception des compétences des autres participants et de leurs possibilités d'action (rôle, disponibilité). Ces contenus partagés correspondent à l'intersection des différentes connaissances individuelles et ne doivent pas nécessairement impliquer un recouvrement total. Ce partage doit cependant être suffisant pour favoriser chez les opérateurs des compréhensions compatibles et/ou complémentaires de l'activité.

Nous avons vu que le contenu du RC évolue continuellement au cours de l'activité. Cette évolution est favorisée par un échange constant entre les opérateurs. Nous allons voir dans la section suivante, de quelle façon cet échange peut se faire.

II.3. Le rôle de la communication

Dans le partage des connaissances, la communication joue bien évidemment un rôle essentiel et incontournable. La nature de la communication (forme, contenu) change en fonction de la nature de l'objet de la conversation, on parle alors de communication référentielle (Ott, 1999). Les partenaires devront d'abord s'assurer qu'ils se réfèrent bien au même objet. Krauss & Fussell (1991) montrent que la formulation d'un message référentiel est influencée par les assomptions de l'émetteur à propos des connaissances de l'audience à qui le message est destiné. Les émetteurs s'appuient donc sur la base qu'ils supposent commune avec l'audience pour formuler leurs messages.

Les informations transmises peuvent être des pensées, des idées ou encore des sentiments. La communication humaine utilise différents canaux sensoriels. Plusieurs de ces canaux peuvent être combinés au sein d'un même système de communication. Différentes formes de communication peuvent ainsi être utilisées au cours de l'activité. Elles peuvent notamment être de nature verbale ou non verbale.

- Communication verbale

La communication verbale est considérée comme une forme explicite (ou formelle) de communication. C'est le type de communication le plus étudié. Elle peut avoir plusieurs formes : orale, écrite, gestuelle (langage des signes), tactile (le braille) ou encore graphique. L'audition et la vision sont des exemples de canaux sensoriels possibles pour ce type de communication.

- Communication non verbale

La communication non verbale est considérée comme une forme implicite ou informelle de communication. Elle utilise alors tous les signes qui ne font pas appel à un langage verbal. Ces signes peuvent être communiqués à travers les gestes, l'haptique, les postures du corps (le langage du corps), les expressions faciales, l'intonation vocale, la prosodie ou encore les regards. La communication non verbale inclut aussi la communication à travers les objets tels que l'habillement ou encore l'architecture. On parle alors de paralangage. Les marqueurs émotionnels (tels que les signes du stress ou de tristesse) peuvent aussi être une forme de communication non verbale. De même, l'utilisation des symboles (tels que les émoticônes) dans les messages électroniques pour exprimer des émotions est considérée aussi comme une forme de communication non verbale.

Ces deux formes de communication sont sollicitées lors de la création du RC, même si la communication verbale reste la forme de communication privilégiée. Il serait erroné de sous-estimer le rôle de la communication non verbale. Cette dernière permet notamment de transmettre tous les « non-dits » qui vont contribuer à la mise en place d'un RC efficient. Par exemple, tous les membres d'une équipe ont perçu que le responsable répondait sur un ton agacé lorsqu'ils le sollicitaient à un moment précis de l'activité alors que rien dans ses paroles ne laisse penser qu'il n'est pas disponible à ce moment-là. Ce moment sera donc « tacitement » considéré comme « à éviter ». D'autres formes de communication non verbale peuvent être essentielles, comme les déictiques, qui permettent de montrer un objet à saisir, une personne ou une localisation dans l'espace d'action de façon très « économique » en temps et en coût cognitif. Ce type de communication est tout particulièrement utile pour construire une partie bien spécifique du RC: le *Référentiel Spatial Commun* (RSC).

II.4. Le référentiel spatial commun

Le RSC est la partie du RC qui renvoie à la cognition spatiale et concerne la perception et la compréhension de l'espace d'action (position, distance, profondeur, etc.). Il comporte toutes les informations utiles à la localisation des objets et des autres partenaires dans l'espace. Il doit aussi permettre d'indiquer rapidement une intention d'action ou de déplacement dans une zone donnée de l'espace.

Habituellement le codage de l'espace peut se faire de deux façons (Blouin, Bar, Teasdale, Paillard, Fleury, Forget & Lamarre, 1993 ; Burgess, 2008 ; Galati, Pelle, Berthoz & Committeri, 2010 ; Land, 2016 ; Paillard, 1991 ; Verjat, 1994 ; Wang, 2012) (figure 3.3).

Une première possibilité consiste à prendre son propre corps comme point de repère (codage égocentré). Dans ce cas le corps est le point d'origine à partir duquel les positions des objets seront définies dans l'espace, de même, les différentes zones de l'espace sont définies uniquement par rapport à la position de l'individu dans l'environnement. Il s'agit donc d'un codage subjectif et personnel puisque totalement dépendant du point de vue de l'observateur.

Une seconde possibilité consiste à se baser sur des points de repères fixes dans l'environnement, on parle alors de codage exocentré ou allocentré. Dans ce dernier cas, deux solutions sont encore envisageables :

- les points de repères sont latéralisés (ils possèdent un devant/derrière et une droite/gauche qui leur sont propres et sont donc indépendants de la position de l'observateur) et offrent un codage absolu de l'espace.

- les points de repères ne sont pas latéralisés et offrent un codage relatif par rapport à la position de l'observateur.

L'utilisation des différents types de codage dépend de plusieurs facteurs :

- La position respective des différents opérateurs (peut-on voir les autres et peuvent-ils nous voir ?).
- La présence d'éléments contextuels dans l'environnement (s'agit-il d'un environnement très riche en indices contextuels, sont-ils visibles et connus par tous les opérateurs ? sont-ils latéralisés ?).

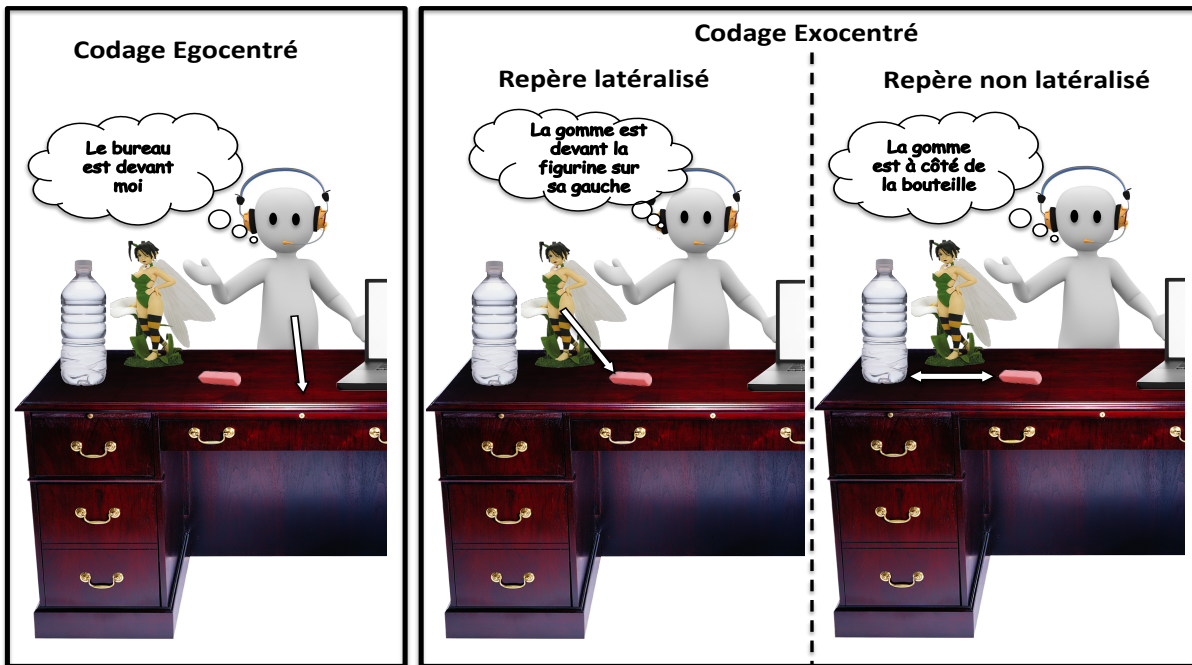


Figure 3.3 : Représentation des différentes formes de codage de l'espace.

- *Localisation des objets dans l'espace et déplacement*

De nombreux travaux attestent que la référence exocentrée serait spontanément utilisée pour faire une description spatiale d'une pièce ou lors de la lecture d'une carte (Erickson 1993; Kimura 2001). Il serait néanmoins trivial de considérer que l'un ou l'autre des cadres de référence soit exclusivement utilisé indépendamment de l'autre. Il faut plutôt envisager une contribution majorée de l'un ou l'autre des cadres de référence en fonction du contexte. Les travaux récents sur la représentation de l'espace en mémoire apportent des informations précieuses sur la façon dont les systèmes de référence égocentrés et exocentrés interagissent lors du codage de l'espace. Ainsi, le modèle de McNamara (Mou, McNamara, Rump & Xiao, 2006 ; Xiao, Mou & McNamara, 2009 ; Mou, McNamara, Valiquette & Rump, 2004) et celui de Sholl (2001) ont en commun l'existence d'un système de référence

égocentré qui code et représente la position des objets dans un repère centré sur soi afin de permettre l'évolution dans l'environnement proche. Les relations spatiales entre soi et les objets sont continuellement mises à jour dans le système égocentré dès lors que l'individu se déplace dans l'espace. Cette mise à jour permet ainsi le déplacement entre les objets de l'environnement et le passage à travers les ouvertures (portes, couloir etc...). Ces modèles proposent également un système de référence exocentré qui représente la localisation des objets et leur agencement dans l'environnement de façon pérenne. Ce système permet de retrouver son chemin dans l'environnement et favorise l'utilisation de représentations mentales de ce dernier. Il permet notamment de visualiser mentalement les objets de l'environnement afin d'en localiser des zones ou points clefs non directement observables et de s'orienter vers eux.

Selon d'autres auteurs comme Wang and Spelke (2002), les relations spatiales entre les objets ne seraient pas représentées dans le système de référence exocentré qui ne contiendrait que la « forme » de l'environnement. Quoi qu'il en soit (et même si cette nuance peut dans certains cas avoir des conséquences fortes au niveau de la localisation précise des objets dans l'environnement), ces modèles ont tous comme point commun l'idée qu'il existerait un codage exocentré pérenne de l'espace qui « cohabiterait » avec un codage égocentré mis à jour continuellement en fonction de la position et du déplacement de l'individu dans l'espace.

- *Quelle implication pour les actions dirigées vers les objets ?*

L'idée d'une sollicitation conjointe des deux formes de codage de l'espace se retrouve lors des actions dirigées vers les objets (préhension). De nombreux travaux ont montré qu'un codage égocentré ou exocentré de l'information spatiale pouvait coexister à l'intérieur d'une même tâche. Lors d'un déplacement radial de la main sous contrôle visuel, il a en effet été suggéré que postérieurement à l'ancrage fovéal de la cible à atteindre, la partie initiale de la trajectoire perçue en vision périphérique (> 40deg d'excentricité) serait contrôlée dans un référentiel égocentré. A l'inverse, la partie terminale du mouvement perçue en vision centrale permettrait, en présence d'un environnement structuré, un codage exocentré de l'erreur motrice (Paillard, Jordan & Brouchon, 1981; Paillard, 1991). D'autres données indiquent que les systèmes de référence égocentré et exocentré pourraient également être sollicités non plus successivement mais simultanément lors d'une même tâche (Lemay & Proteau, 2003).

La coexistence de différents systèmes de codage de l'espace et la pluralité des facteurs susceptibles d'induire ou non leur utilisation montre pourquoi il est important, lors de la

construction du RSC, d'éviter toute ambiguïté quant à la configuration spatiale des lieux, les objets concernés par l'activité commune et leur position dans l'espace. Le cadre de référence utilisé par les différents opérateurs pour coder ces informations doit donc être clairement identifiable par tous afin de permettre la création et la mise à jour continue d'une carte spatiale commune non équivoque.

III- Comment se construit le référentiel spatial commun en RV?

Comment créer et alimenter un référentiel spatial commun non ambigu? Comme pour le RC la construction du RSC passera par diverses formes de communication verbale et non verbale.

III.1. EVC et représentation commune de l'espace

De part leur configuration les EVC vont imposer un certain nombre de contraintes sur les moyens de communication habituellement utilisés par les opérateurs pour établir et mettre à jour leur RSC. On observe notamment la perte de la communication non verbale. En particulier la direction du regard : à partir du moment où une personne regarde un objet, une direction ou une zone dans l'espace il est facile d'identifier ce à quoi elle se réfère lorsqu'elle parle. Il en est de même concernant les références déictiques (comme lorsque l'on dit « c'est par là » en montrant une direction du doigt) qui permettent d'indiquer clairement un objet ou une direction sans avoir besoin de décrire précisément une localisation dans l'espace. Ce genre de communication devient quasiment inexploitable dans les EVC du fait des capacités encore relativement limitées de représentation des utilisateurs.

Une autre limitation majeure vient de la grande difficulté à se représenter visuellement le point de vue de l'autre opérateur dans l'EV. Cette difficulté est souvent amplifiée par une perte de la localisation spatiale sonore habituellement utilisée pour situer où se trouve l'autre par rapport à soi. Associé à cela, on observe aussi très fréquemment une désorientation spatiale dans l'EV, en grande partie due à l'absence de correspondance stricte entre les déplacements réellement produits par l'utilisateur dans le monde physique et ses déplacements perçus dans l'EV.

III.2. Quels sont les moyens disponibles pour solutionner le problème ?

Selon Axelsson, Abelin & Shroeder (2003), quatre solutions techniques sont à privilégier afin de favoriser le processus de grounding dans les EVC :

- Donner le moyen d'entendre le partenaire avec une localisation spatiale réaliste.

- Donner le moyen de voir le partenaire et les objets qu'il manipule.
- Permettre de comprendre comment (avec quels outils) le partenaire interagit avec l'EV.
- Renseigner sur le point de vue du partenaire sur l'EV.

La visualisation du partenaire est souvent permise par la matérialisation d'un objet représentant sa position dans l'EV. Idéalement cet objet est latéralisé afin de matérialiser la direction de son point de vue dans l'EV (Avatar sous la forme d'un personnage 3D, cube avec rose des vents, ...). Cette solution manque néanmoins de précision et ne donne qu'une idée assez « grossière » du point de vue du partenaire.

Les actions du partenaire sont souvent représentées par des changements de couleur correspondants aux objets manipulés. Il en est de même pour les outils manipulés, la plupart du temps ils ne sont identifiables qu'à travers un changement d'état de l'EVC ou de certains objets qui y sont présents (changement de couleur, de position, matérialisation de marquage au sol...)

Concernant les solutions techniques mises en place pour la gestion du point de vue des opérateurs, nous pouvons les regrouper en deux grandes catégories :

- *Le partage du même point de vue (WYSIWIS)* avec des variantes plus ou moins rigides sur les contraintes du partage (partage total ou partiel, volontaire ou subi). Cette solution présente l'avantage de réduire les risques d'incompréhension en favorisant le maintien du référentiel égocentré. Cependant, cette solution n'est envisageable que dans un nombre très limité d'activités partagées (Stefik, Bobrow, Lanning & Tatar, 1987). Elle devient impossible à utiliser dès que la tâche implique de travailler dans des zones différentes de l'espace ou qu'elle impose des points de vues différents sur les objets à manipuler (encastrer deux objets ensemble, guider un déplacement etc...). Cette situation devient vite ingérable lorsque l'un des opérateurs change le point de vue sans en informer l'autre (Park, Kapoor, Scharver & Leigh, 2000).

- *Le retour sur le point de vue de l'autre opérateur dans l'EV* (visualisation sous la forme d'une fenêtre juxtaposée) qui permet de fournir à chaque opérateur un feedback sur la perspective et les actions dans l'EV de son partenaire ainsi que sur les objets présents dans son champ visuel. Cette visualisation facilite la communication spatiale en permettant à chaque opérateur de décrire l'EV spatialement de son propre point de vue (Hindmarsh, Fraser, Heath, Benford, & Greenhalgh, 1998; Spante, Schroeder & Axelsson, 2004). Bien qu'utile, cette solution n'est pas forcément idéale. La fragmentation des images du partenaire et des objets auxquels il fait référence peut empêcher les participants de construire correctement une représentation mutuelle de l'espace convenablement orientée. Ce qui peut induire des erreurs

de compréhension et compliquer l'élaboration du référentiel spatial commun (Gaver, Sellen, Heath, & Luff, 1993). Par ailleurs, la multiplication des fenêtres juxtaposées dans le cas où les partenaires sont à plus de deux, entraîne rapidement une saturation à la fois de l'espace « visuel » de l'opérateur mais aussi de ses ressources cognitives disponibles au détriment de l'activité partagée (Gaver et al. 1993).

Ces solutions parfois très efficaces ont leurs limites et ne peuvent concerner qu'une partie restreinte des activités collaboratives que l'on peut rencontrer dans les EV, d'où l'intérêt de trouver un autre moyen de favoriser le partage de l'espace en contrant les limites imposées par les EVC. Une solution consiste à travailler directement sur le contenu des EVC de sorte qu'ils puissent fournir implicitement le moyen de se représenter l'espace de façon commune et avec un minimum d'efforts. C'est sur cette problématique que s'est centrée une partie de mon activité de recherche que je vais présenter dans les sections suivantes.

III.3. Contenu de l'EV et choix du système de référence pour la communication.

III.3.1. Référence spatiale fixe latéralisée

Un des reproches que l'on peut faire aux solutions proposées pour aider au développement du RSC est de chercher à renforcer l'utilisation du référentiel égocentré par l'opérateur. Les contraintes imposées par les EVC supposent au contraire de privilégier un autre cadre de référence spatial qui permettrait à l'opérateur de s'extraire de la représentation égocentrée pour utiliser d'emblée un cadre de référence commun et indépendant du point de vue dans l'EV.

Selon la théorie de l'« affordance of space » (Gibson 1979), l'espace structure les actions et les interactions. Ainsi, les objets, en tant que point d'intérêt commun entre les opérateurs sont des vecteurs potentiels d'informations pertinentes pour la représentation commune de l'espace. Les EVC ont en effet cet avantage indéniable sur la réalité qu'ils permettent d'introduire à volonté de nouveaux contenus dans l'espace de travail. Ainsi, afin de solutionner les problèmes de RSC, nous avons proposé un nouveau paradigme d'interaction basé sur l'introduction d'une *Référence Spatiale Fixe* spatialisée dans l'EVC (Chellali, Milleville-Pennel & Dumas, 2013). Cette solution suppose de focaliser le design de l'interface sur l'objet d'interaction plutôt que sur le point de vue de l'utilisateur. Notre objectif était d'inclure des indices contextuels dans l'EV (i.e., repères visuels) de façon à encourager implicitement les opérateurs à utiliser un système de référence exocentré

lorsqu'ils produisent des descriptions spatiales plutôt que d'utiliser un système de référence égocentré (figure 3.4). Un codage exocentrique de l'espace peut être particulièrement utile dans les situations complexes nécessitant différents points de vue et/ou plusieurs manipulations d'objets. Les objets et les actions sont alors situés spatialement selon des repères dans l'environnement plutôt que selon le point de vue de l'opérateur. Des repères visuels fixes permettraient donc aux opérateurs de décrire l'espace dans un cadre de référence exocentré complètement indépendant de leur point de vue dans l'EV. Cela faciliterait la communication spatiale en réduisant les ambiguïtés et le nombre de rotations mentales nécessaires à la représentation et la description de l'espace. En effet, une seule rotation mentale devient nécessaire pour localiser l'objet ou la zone de l'espace par rapport au repère indépendamment des points de vue des différents opérateurs présents. Et surtout le nombre d'opérateurs n'influe plus sur le coût cognitif de la description spatiale puisqu'il n'y a plus la multiplicité de points de vue à gérer ainsi que le coût de mise à jour du RSC sur ces multiples points de vue. Les partenaires peuvent donc plus facilement construire un RSC efficient et mieux coordonner leurs actions respectives dans l'espace. Ainsi les opérateurs seront davantage centrés sur leur tâche en étant moins distraits par des problèmes de coordination spatiale et de coordination de point de vue.

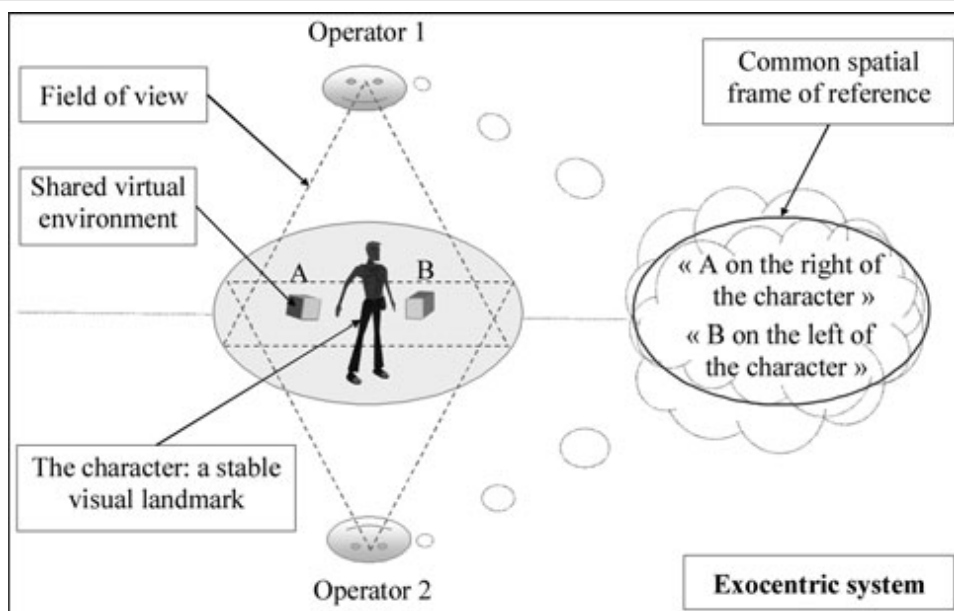


Figure 3.4: Les descriptions spatiales dans un cadre de référence exocentré sont indépendantes du point de vue des utilisateurs.

Nous avons donc réalisé une étude (Chellali et al., 2013) où 44 quarante-quatre participants (vingt-quatre hommes et vingt femmes, âgés de vingt à vingt-sept ans) étaient

répartis en vingt-deux groupes (douze binômes masculins et dix binômes féminins). Le dispositif expérimental consistait en deux écrans LCD 17 pouces identiques et deux PC reliés par un réseau Ethernet. L'EV créé était composé d'une figure constituée d'un assemblage de vingt-quatre cubes (le modèle 3D à reproduire) et de six pièces blanches différentes (tétraminos). Le modèle ainsi que les tétraminos étaient posés sur une table virtuelle (figure 3.5a). Pour la moitié des binômes, un personnage virtuel était placé au centre de la scène (figure 3.5b). Ce personnage étant spatialisé il fournissait une *Référence Spatiale Fixe* (RSF) latéralisée et directement utilisable par tous les opérateurs dans le cas d'un codage de l'espace dans un cadre de référence exocentré. L'autre moitié des binômes n'avait pas de RSF. Il était impossible de manipuler une pièce en cours d'utilisation par le partenaire mais deux tétraminos différents pouvaient être manipulés au même moment. Toutes les actions d'un utilisateur sur un tétramino étaient matérialisées par un changement de la couleur de celui-ci (une couleur par participant). Chaque participant d'un binôme était installé face à l'un des deux écrans. Ils étaient séparés par un rideau les empêchant de voir leur partenaire ainsi que son écran. Ils étaient cependant encouragés à communiquer verbalement.

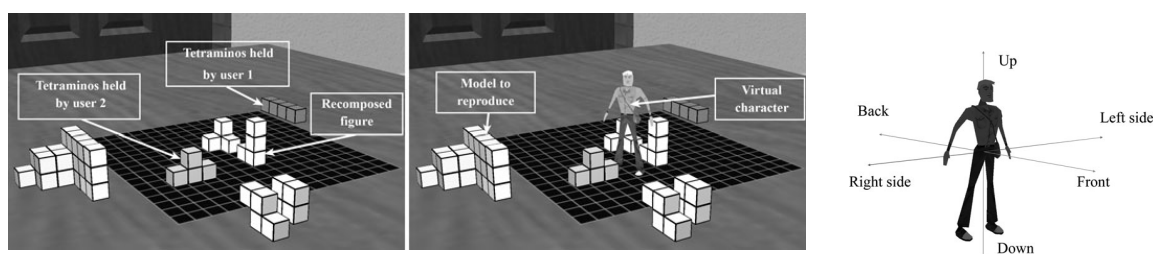


Figure 3.5 : a) Environnement virtuel en présence ou non de la RSF b) Référence Spatiale Fixe Latéralisée (RSF).

Les participants de chaque binôme devaient reconstruire ensemble cinq figures géométriques différentes en utilisant les six Tétraminos posés sur la table virtuelle. Pour chaque modèle, le point de vue de départ des opérateurs sur la scène était différent mais ils pouvaient le modifier comme ils le désiraient en cours de tâche. Cependant, aucune information n'était donnée aux opérateurs quant aux changements de points de vue opérés par leur partenaire.

La présence de la RSF n'a pas eu d'incidence sur la performance ou le temps de réalisation de la tâche. Cependant, les résultats montrent que les binômes masculins sont influencés par la présence de la RSF. Ils utilisent davantage un cadre de référence exocentré en sa présence alors qu'ils privilégient la référence égocentrée en son absence (figure 3.6). A l'inverse, les binômes féminins ne sont pas influencés par la RSF et n'y font pas référence

dans leurs échanges. Ce résultat met en avant une différence de genre quant à l'utilisation des cadres de référence. Cette différence peut au moins partiellement s'expliquer par le fait que le cadre de référence exocentré nécessite de faire des rotations mentales afin de localiser en continu les objets par rapport à la RSF. Cela peut s'interpréter à la lumière des travaux portant sur les différences de genre quant aux habilités spatiales. Les femmes seraient moins performantes dans les activités d'imagerie mentales impliquant des rotations mentales (Kimura, 2001 ; Kolb & Whishaw, 2002). Selon certains auteurs (Koscik, O'Leary, Moser, Andreasen & Nopoulos, 2009), cette différence serait due à des différences structurelles au niveau du cerveau (notamment concernant le lobe pariétal). Pour d'autres, cette interprétation pourrait au moins partiellement être remise en question et les différences de performance pourraient résulter d'une simple construction sociale (Levine, Vasilyeva, Lourenco, Newcombe & Huttenlocher, 2005). Quoi qu'il en soit, ces études laissent supposer que les femmes seraient plus enclines à privilégier un codage de type égocentré lors d'échanges concernant des localisations spatiales. Cela pourrait être une des raisons pour lesquelles les femmes continuent à utiliser préférentiellement un cadre de référence égocentré même en présence de la RSF. Elles éviteraient d'effectuer des rotations mentales en privilégiant leur propre point de vue. Cela devrait avoir pour conséquence une moins bonne compréhension de l'espace et une moins bonne collaboration pour les binômes féminins.

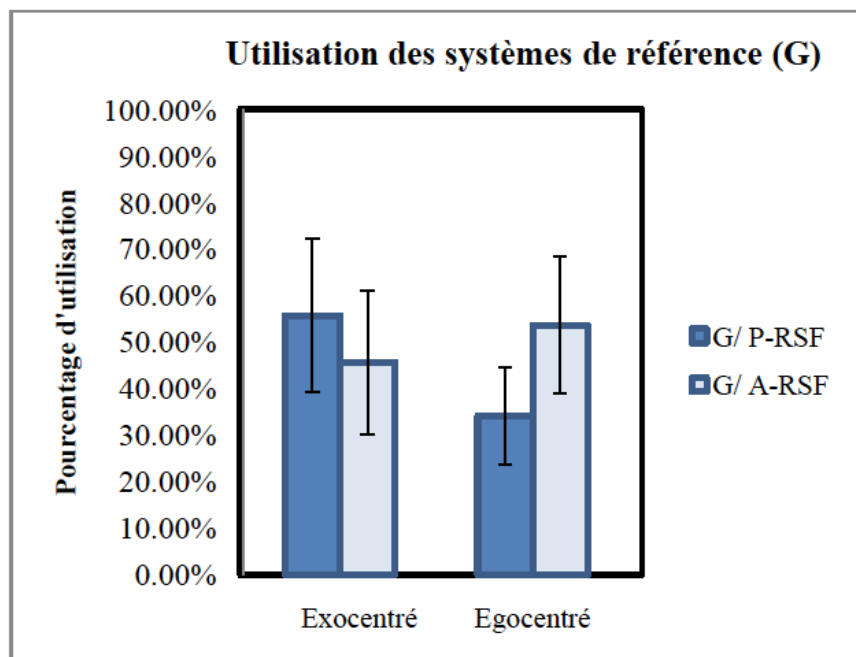


Figure 3.6: Choix du cadre de référence des binômes masculins selon la condition expérimentale : présence de la RSF (*G/P-RSF*) et en l'absence de la RSF (*G/A-RSF*).

Les résultats semblent confirmer cette hypothèse. En particulier, on constate que la présence et l'utilisation de la RSF influence la façon dont les participants masculins communiquent et collaborent. Par exemple, ils utilisent davantage les pronoms personnels en l'absence de la SLV alors qu'ils utilisent davantage de pronoms impersonnels en sa présence, contrairement aux binômes féminins. Cela indique que dans cette condition les binômes masculins se considèrent comme membres d'une «équipe» plutôt que comme des utilisateurs isolés de l'EV. Cela est cohérent avec notre définition de la collaboration qui implique qu'un RC efficace amplifie le sentiment de travail en équipe. Nous pouvons donc conclure que la présence d'une RSF a un effet positif en collaboration, notamment en augmentant la compréhension mutuelle entre les partenaires.

Nous voyons donc que le choix d'un cadre de référence plutôt qu'un autre serait directement dépendant du contenu de l'espace d'action. Nos résultats corroborent ceux obtenus par Mou et al. (2006) qui avaient montré que les individus s'appuieraient davantage sur un système de référence égocentré plutôt qu'exocentré lorsque les représentations spatiales disponibles via le codage exocentré sont inexactes, imprécises ou peu fiables. Par exemple, dans une tâche impliquant des gestes de pointage en direction de différents objets (dont l'emplacement dans l'espace a été préalablement mémorisé) dans différentes conditions (induisant une désorientation ou non dans l'espace), il a été montré que les participants codent à la fois les relations spatiales entre les objets (codage exocentré) et la position des objets par rapport à eux (codage égocentré). Ils privilégient néanmoins le codage exocentré lorsque les objets sont positionnés dans l'espace de façon régulière et facile à coder spatialement. A l'inverse, dans le cas d'un positionnement plus ambigu des objets, ils privilégient un codage égocentré de l'espace (cf. figure 3.7). Ainsi, au-delà du simple fait de limiter les rotations mentales, notre RSF pourrait ainsi permettre de désambiguïser les positions spatiales des objets entre eux et ainsi encourager l'utilisation d'un cadre de référence exocentré pour coder les configurations spatiales.

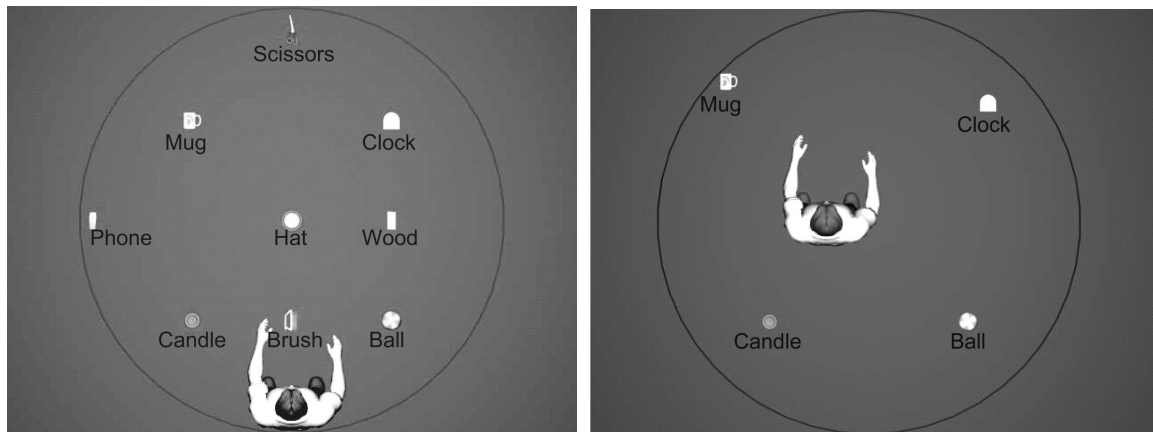


Figure 3.7: Configurations spatiales induisant différents types de codage de l'espace. A) Codage exocentré. B) Codage égocentré de l'espace (d'après Mou et al., 2006).

III.3.2. Influence du contenu de l'EVC en l'absence d'une RSF

Nous avons montré qu'une RSF pouvait favoriser l'élaboration d'un RSC efficient, notamment en désambiguïsant la configuration spatiale du contenu de l'EV. Néanmoins introduire ce genre d'indice au centre de la scène visuelle n'est pas toujours chose aisée, notamment lorsque le contenu de l'EV est déjà dense ou lorsque les Avatars des utilisateurs doivent eux-mêmes occuper cette place. On peut donc se demander si en l'absence de cette RSF d'autres indices dans l'EV ne peuvent pas être utilisés afin de faciliter les échanges entre les opérateurs. Dans ce cas, d'autres indices peuvent-ils aider à désambiguïser la disposition spatiale du contenu de l'EV et limiter l'utilisation du cadre de référence égocentré tout en minimisant l'impact sur la charge mentale ?

Avant de répondre à cette question il importe de déterminer s'il existe des situations plus complexes que d'autres pour la production d'énoncés spatiaux visant à indiquer la position d'un objet dans l'espace. Quelle influence ces situations pourraient avoir sur le choix du cadre de référence pour la communication spatiale ? Michelon & Zacks (2006) ont montré que plus la perspective de l'interlocuteur s'éloigne de celle du locuteur, plus la difficulté croît. A l'inverse, l'étude de Roberts et Aman (1993) suggère que les gens ne feraient des rotations mentales qu'à partir du moment où cela s'avèrerait nécessaire, c'est-à-dire quand la droite et la gauche sont inversées (modèle d'inversion du monde).

Un autre paramètre important à considérer pour évaluer la difficulté est la position relative de la cible par rapport aux directions intrinsèques du partenaire (McNamara, 2003). Les caractéristiques intrinsèques du corps humain définissent les plans frontal (avant/arrière), sagittal (droite/gauche) et transversal (haut/bas). Plusieurs études ont montré que les situations sont plus ou moins faciles à appréhender selon le plan sur lequel se situe la cible : ainsi, si la

gravité est respectée, le plan transversal est préféré au plan frontal qui est lui-même préféré au plan sagittal (Bryant & Wright, 1999; Bryant & Tversky, 1999). La localisation de la cible dans une position non orthogonale à l'un de ces plans (oblique) augmente le niveau de difficulté (McNamara, 2003).

Plus récemment, Galati et Avraamides (2014) ont montré que la structure intrinsèque de la scène spatiale (axe de symétrie) pouvait également être prise en compte pour le choix de la prise de perspective. Il semblerait que plus il y a d'indices alignés plus cette perspective sera privilégiée et facilitée.

Afin d'évaluer l'impact de la configuration spatiale entre les opérateurs et la cible à atteindre sur la communication spatiale, nous avons mis en place une série de deux études. Nous nous sommes intéressés successivement à la production d'énoncés spatiaux destinés à localiser un objet dans l'espace dans un cadre non contextualisé puis dans un cadre contextualisé. Nos objectifs étaient :

- d'identifier les situations/configurations les plus difficiles pour la production d'énoncés spatialisés et l'implication en termes de cadre de référence pour la communication.
- d'identifier l'influence de la présence et la localisation d'indices visuels (utiles à la production d'énoncés spatialisés) et l'implication en termes de cadre de référence pour la communication;

Afin de répondre à la première question, nous avons développé un EV (**Pouliquen-Lardy, Mars, Guillaume & Milleville-Pennel, 2015**) de telle façon qu'il puisse être visualisé intégralement sans avoir besoin de naviguer dans l'espace tout en étant assez grand pour que l'interlocuteur soit au milieu des éléments à localiser. Ainsi, nous avons choisi une pièce carrée, dans laquelle huit tables entouraient l'avatar de l'interlocuteur (Figure 3.8). Trente-deux personnes ont participé à cette étude (cinq femmes et dix-sept hommes de vingt à quarante-deux ans). La consigne donnée au participant était qu'il devait, en collaboration avec un collaborateur distant (l'interlocuteur, qui n'était en fait qu'un avatar fixe et ne correspondait pas à un participant réel), éliminer un maximum de bouteilles piégées. Pour cela ils étaient tous deux immergés dans le même environnement virtuel, dans lequel ils étaient représentés par des avatars. Les rôles étaient répartis de la manière suivante : seul le participant recevait l'information sur la position de la bouteille à détruire et il devait donner l'information à son partenaire qui était supposé la détruire ensuite (aucun retour n'était donné au participant sur cette action). Le participant devait donner les instructions oralement sans que le partenaire puisse lui répondre : il fallait donc que les instructions soient les plus

précises possibles. Une contrainte de temps était imposée : le participant devait aller le plus vite possible pour donner l'information.



Figure 3.8: a) Vue du participant sur l'environnement virtuel. La bouteille à décrire était celle posée sur la table verte. b) Vue du dessus de l'environnement virtuel.

Le cadre de référence utilisé lors des instructions était codé selon la perspective choisie (égocentrée ou exocentrée centrée sur l'avatar représentant l'interlocuteur) et le système de coordonnées choisi pour coder l'espace : intrinsèque (droite ou gauche) ou extrinsèque (Nord, Sud ; degrés). Il pouvait également être un mixte des deux. Nous avons pu constater que les participants n'utilisent que très peu la seule référence égocentrée (7%) lors de leurs descriptions (figure 3.9, Egocentré). Ils privilégient principalement un cadre de référence exocentrée centrée sur l'avatar représentant l'interlocuteur (80% ; figure 3.9, Centré sur le destinataire). Le reste de leurs productions concerne pour 11% un mixte des cadres de référence ego et exocentré (figure 3.9, Multiple) et pour 2% repose sur d'autres stratégies (par exemple renvoyer à l'essai précédent ; figure 3.9, Autre).

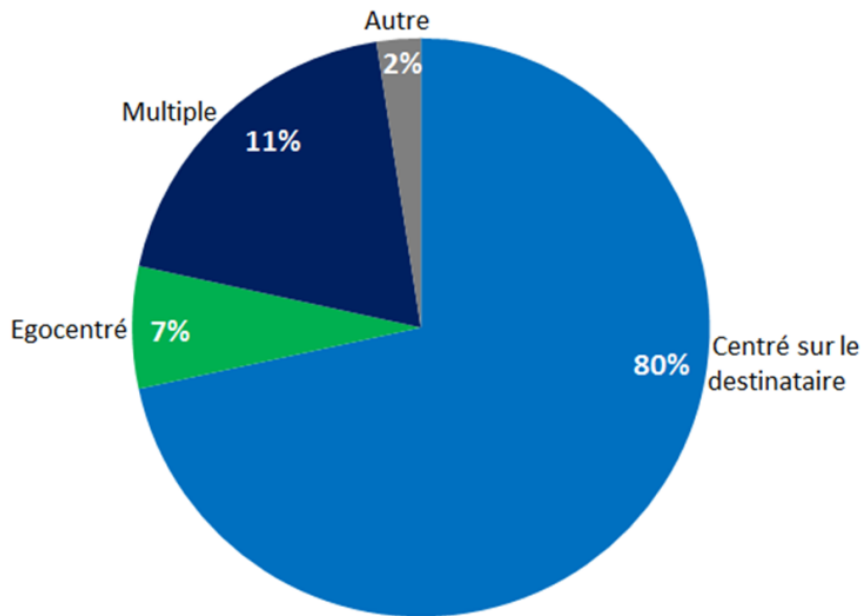


Figure 3.9: Cadres de référence utilisés selon la localisation de la cible par rapport à l'interlocuteur.

Un second constat, cohérent avec les résultats exposés dans la littérature, est que l'alignement de la cible avec le plan sagittal de l'avatar est un facteur facilitateur (Bryant & Wright, 1999; Bryant & Tversky, 1999). En effet, nous avons pu constater une exigence mentale moindre (figure 3.10) et des temps de préparation et de production d'énoncés plus courts (figure 3.11) lorsque la cible est devant ou derrière l'avatar, par rapport aux autres configurations. Le second constat, est que la situation la plus complexe pour les locuteurs est lorsque la cible se trouve en diagonale derrière leur collaborateur. Nous retrouvons ainsi des résultats conformes à ceux de McNamara, (2003).

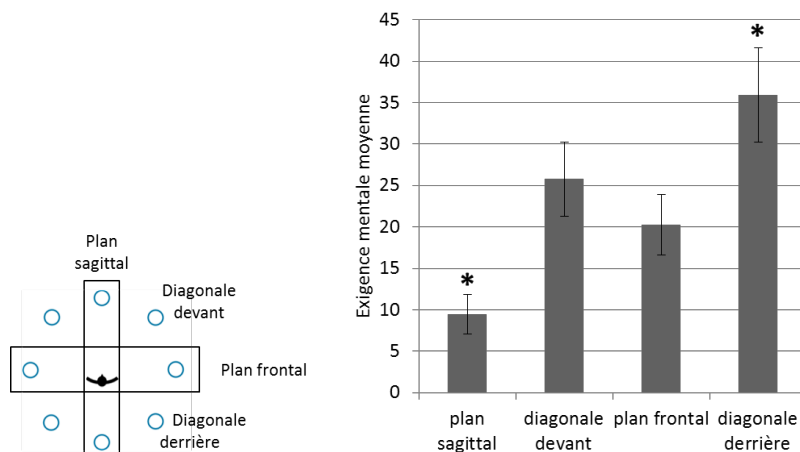


Figure 3.10: Exigence mentale moyenne, mesurée via le NASA TLX [Hart & Staveland, 1988; Cegarra & Morgado, 2009], en fonction de la position de la cible, codée par rapport à l'avatar. * $p < 0,05$

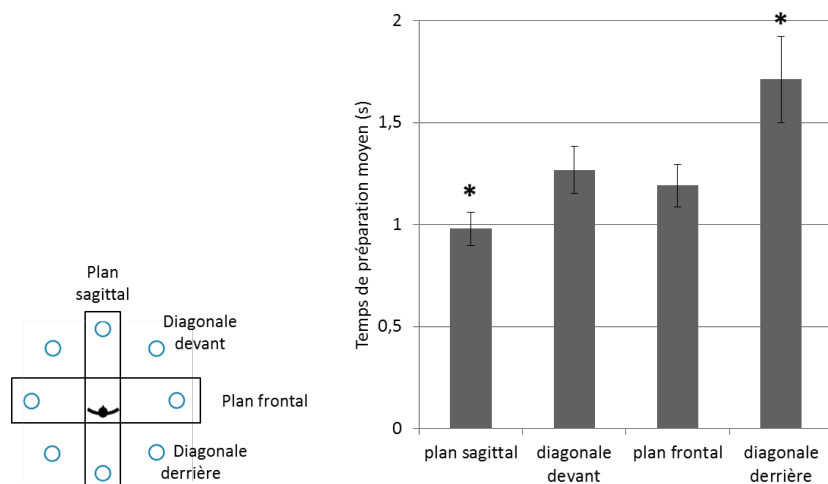


Figure 3.11: Temps de préparation moyen en fonction de la position de la cible, codée par rapport à l'avatar. * $p < 0,05$

Tout se passe comme si les participants utilisaient spontanément l'avatar de l'autre participant comme une RS afin de désambiguïser le contenu de l'EV. Il est ainsi intéressant de constater que les participants se positionnent spontanément dans une configuration proche de celle que nous avons créée dans l'étude de **Chellali et al., (2013)** en introduisant un avatar latéralisé et fixe dans la scène visuelle. La difficulté principale réside alors dans le fait que, dans la présente étude, la position de l'avatar de l'autre participant n'est pas fixe dans l'espace (elle change à chaque essai). Les participants se retrouvent donc dans la situation où ils doivent gérer des changements multiples de points de vue, lorsqu'ils passent d'un essai à l'autre. Or une RS n'a d'intérêt véritable que lorsqu'elle constitue un point de repère fixe dans l'EV totalement indépendant des positions respectives des opérateurs. Dans le cas contraire il est nécessaire de se focaliser, non pas sur la position dans l'espace de la RS mais sur ses propriétés intrinsèques : devant/derrière et droite/gauche).

Une fois ces constats faits, nous avons pu revenir à notre objectif principal : proposer des outils pour faciliter la tâche, notamment en donnant des aides pour les situations les plus complexes, le but étant de faciliter le codage de l'espace dans les situations les plus complexes. Nous avons testé deux types d'indices :

- une accentuation de la référence égocentrée de l'avatar de l'interlocuteur (figure 3.12, gauche), dont la droite et la gauche étaient différenciées par des manches de couleur. De cette façon l'avatar pouvait devenir une RSF utilisée quasiment de la même façon que celle utilisée dans l'étude décrite dans la section précédente (Chellali et al. 2013).
- quatre panneaux de couleurs différentes (figure 3.12, droite) positionnés en périphérie de la zone de travail. Le fait d'ajouter des indices distaux fixes donnait de nouvelles références potentielles qui pouvaient faciliter un codage exocentré indépendant de l'avatar de l'autre opérateur. Ces indices étaient plus fiables car indépendants de l'orientation de l'avatar et ne nécessitaient pas de prise de perspective. Leur utilisation limitait ainsi les ambiguïtés liées aux situations complexes (notamment lorsque la cible est située en diagonale derrière l'avatar).

Afin d'apprécier l'effet des indices, quatre environnements ont été utilisés et testés :

- un environnement virtuel simple (comme l'expérience précédente, c'est-à-dire Sans Indice).
- le même environnement avec l'avatar latéralisé (Avatar Latéralisé, figure 3.12 gauche)
- le même environnement avec quatre panneaux de couleurs (Panneaux, figure 3.12 droite) ;
- avec l'avatar latéralisé et les panneaux de couleurs (Panneaux + Avatar Latéralisé).

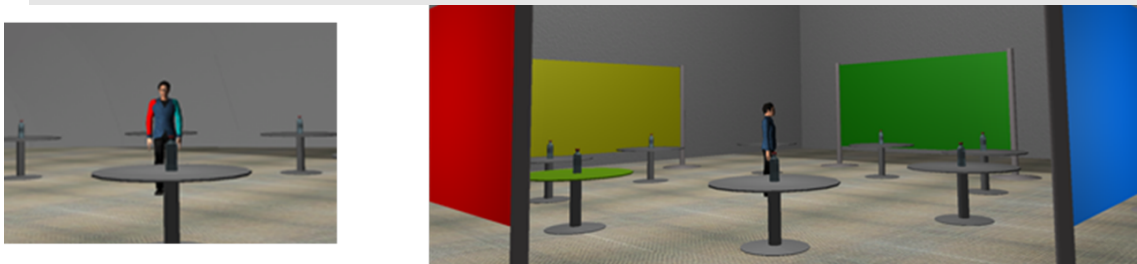


Figure 3.12 : indices visuels proposés. A gauche : l'avatar latéralisé, A droite : les panneaux de couleurs.

Comme pour l'expérience précédente, le participant était placé devant un mur immersif. L'environnement virtuel était identique : une pièce carrée avec huit tables. L'avatar du collaborateur était placé au centre de ces tables. La tâche était la même : indiquer les bouteilles à détruire. Vingt-deux participants ont été sollicités pour cette étude, dix-sept hommes, cinq femmes, âgés de dix-neuf à soixante-sept ans.

Les résultats obtenus ont permis de classer les énoncés en cinq catégories, selon la référence utilisée. Nous avons donc distingué les énoncés :

- utilisant l'avatar comme référence (Centrés sur l'interlocuteur) ;

- utilisant le participant comme référence (Egocentrés) ;
- faisant référence aux panneaux uniquement (Panneaux) ;
- faisant appel à plusieurs références (l'avatar et/ou le participant et/ou les panneaux) (Multiple),
- autres types d'énoncés (Autre).

Une observation détaillée des énoncés a permis d'identifier deux groupes de participants : ceux qui n'ont jamais utilisé les panneaux (sept participants) – Groupe 1 – et ceux qui, lorsque les panneaux étaient présents, les ont utilisés au moins une fois (quinze participants) – Groupe 2. Après avoir regardé l'ordre d'apparition des environnements, il s'avère que six des sept participants n'ayant pas utilisé les panneaux ont commencé par un environnement sans panneau (Sans indice ou Avatar latéralisé). Il est donc possible que ces personnes aient préféré conserver la stratégie mise en place dans les premiers essais.

Concernant le groupe 2 : Pour les environnements Sans indice et Avatar latéralisé, les participants ont produit 99 % d'énoncés centrés sur leur interlocuteur, c'est-à-dire centrés sur l'avatar (figure 3.13). Les rares énoncés non centrés sur l'interlocuteur étaient soit égocentrés (« en face de moi »), soit faisaient référence à l'essai précédent (« même table »).

En présence des panneaux (Panneaux et Panneaux + Avatar latéralisé), respectivement 45,8 % et 50,6 % des énoncés étaient uniquement centrés sur l'interlocuteur, 27 % et 22,3 % ont fait référence uniquement aux panneaux et 26 % et 25 % comprenaient des informations utilisant plusieurs références (Multiple).

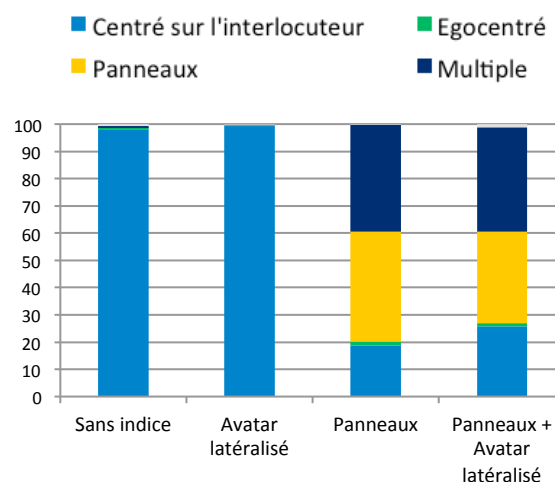


Figure 3.13: Pourcentage de cadres de références utilisés pour chaque condition d'indication spatiale, pour les participants ayant utilisé les panneaux.

L'analyse des cadres de référence montre des effets de l'alignement de la cible avec les plans intrinsèques de l'avatar (figure 3.14). Les énoncés utilisant les panneaux sont majoritaires lorsque la cible est en diagonale devant ou derrière c'est-à-dire lors des situations identifiées comme plus complexes lors de l'étude précédente. Ainsi, les participants renoncent à utiliser l'avatar de leur partenaire comme une RS au profit d'un codage purement exocentré tout particulièrement dans les situations les plus complexes.

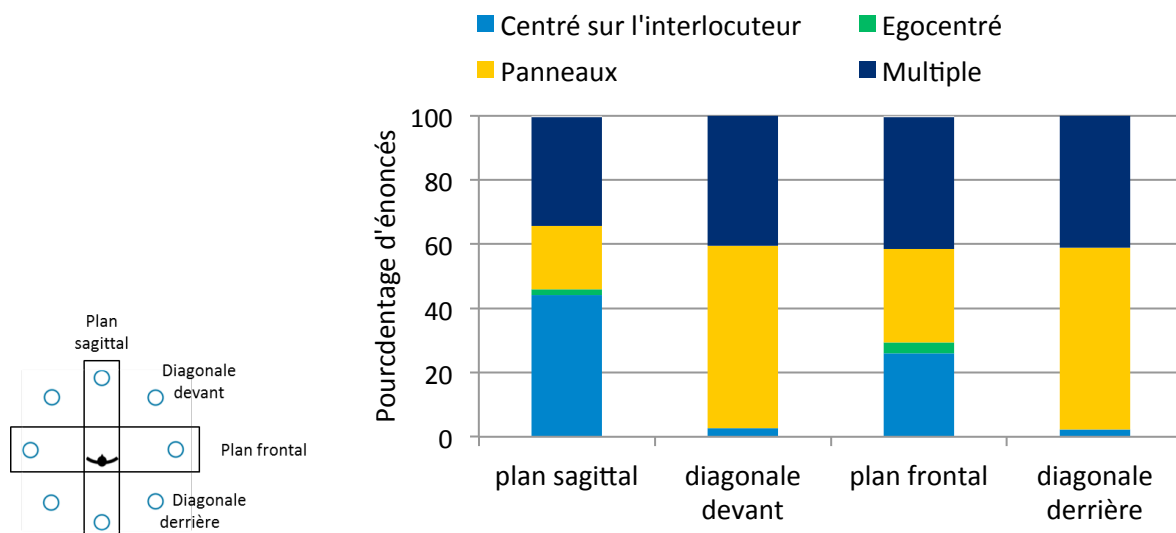


Figure 3.14: Pourcentage de cadres de référence utilisés en fonction de la position de la cible par rapport à l'avatar pour les participants ayant utilisé les panneaux dans les conditions expérimentales avec Panneaux.

La présence de panneaux a également tendance à diminuer l'exigence mentale, cette différence étant statistiquement significative comparée à la condition où les deux types d'indices sont cumulés (figure 3.15). Cela laisse penser qu'il y a dans ce cas une concurrence entre les indices, potentiellement néfastes pour l'opérateur, qui doit alors choisir d'inhiber un codage au profit de l'autre.

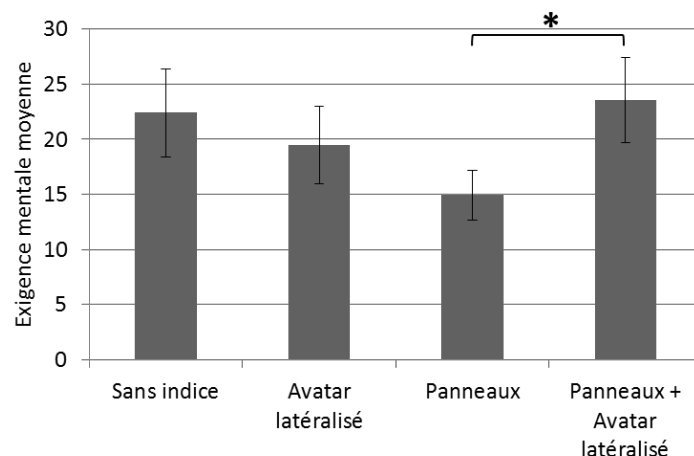


Figure 3.15: Exigence mentale moyenne pour chacun des environnements pour les participants ayant utilisé les panneaux. Les barres d'erreurs correspondent aux erreurs types. * $p < 0,05$

Cette étude nous permet de conclure qu'en l'absence d'une RSF, les participants vont chercher à utiliser l'avatar de leur partenaire afin de combler ce manque. Néanmoins, dans les situations les plus complexes, ils privilégieront l'utilisation d'indices exocentrés externes à l'avatar.

III.4. Influence de la fonction de l'opérateur sur la communication spatiale et le RSC

Le contenu de l'EV n'est pas le seul facteur susceptible d'influer sur la communication spatiale. Nous avons vu précédemment que chaque opérateur possède sa propre représentation de l'activité qu'Endsley (1995) appelle la *Situation Awareness* (SA). Lors des activités spatiales comme la navigation, la représentation spatiale de l'environnement est une composante importante de cette SA. Au cours d'une activité collaborative, les opérateurs vont devoir alimenter leur RC en y intégrant leur SA spatiale afin d'effectuer cette mise en commun et définir les informations utiles à mettre à jour dans le RC. Les opérateurs vont devoir faire des hypothèses afin d'inférer les connaissances de leur partenaire ; ils doivent prendre en compte sa représentation mentale concernant l'espace d'action. Que se passe-t-il lorsque les opérateurs n'ont pas la même connaissance préalable de l'EV et que leurs rôles diffèrent? Roger, Knutsen, Bonnardel & Le Bigot (2013) ont montré que lors d'une tâche de navigation à distance, les rôles des participants (selon qu'ils guident ou sont guidés) influencent la communication spatiale. Les guides produisent plus d'indices que les personnes guidées et sont plus enclins à changer de perspective. Dans cette étude, seul le participant guide était immergé dans l'EV. Les participants ne partageaient donc pas le même espace, ni la même réalité. Ce point pourrait à lui seul expliquer l'asymétrie observée

concernant la communication entre les participants. Il serait intéressant de se pencher plus avant sur le cas où le guide et le participant guidé partagent le même environnement. Nous pourrions alors définir quel impact cela peut avoir sur la façon dont les opérateurs échangent verbalement au sujet de l'espace et définir quel est le cadre de référence spatiale associé à ces échanges. Notre étude présentée dans la section précédente (**Pouliquen-Lardy et al. 2015**) indique que les opérateurs privilégient un cadre de référence exocentré centré sur leur partenaire lors de descriptions spatiales. On peut donc supposer qu'il en serait de même pour guider les déplacements du partenaire dans l'EV. Il reste cependant à définir si l'autre opérateur adoptera le même cadre de référence. Dans ce cas, quel impact cela peut-il avoir sur la charge cognitive de chaque opérateur? Si l'on se réfère au principe du moindre effort collaboratif introduit par Schober (1995), dans certaines situations les participants peuvent assumer des coûts cognitifs différents afin d'assurer un moindre coût collaboratif pour l'ensemble de l'équipe. Il reste à définir comment mesurer ce coût cognitif. Une possibilité consiste à l'estimer à partir de la nature des transformations mentales nécessaires pour comprendre l'énoncé spatial. On peut ainsi distinguer deux types de transformations mentales: 1- les rotations mentales qui nécessitent un changement de perspective et 2- les transformations mentales basées sur l'imagerie mentale, sans perspective particulière. Par exemple si le guide parle d'une table située près de lui alors que l'autre opérateur est loin de lui et ne peut pas la voir, un énoncé du type "c'est près de la table" ne nécessite pas de transformation mentale pour le guide et implique juste pour l'interlocuteur d'imaginer la table sans avoir à prendre une perspective particulière par rapport à cette table. On sait, par ailleurs, que les nombreux changements de perspective induisent un coût cognitif important. On observe notamment une augmentation du temps de réaction avec l'augmentation des rotations mentales nécessaires pour changer de perspective (Schober, 1995 ; Michelon & Zacks, 2006 ; Roberts & Aman, 1993 ; Hintzman, O'Dell & Arndt, 1981 ; Boer, 1991). Ainsi, le coût cognitif n'est pas le même selon le type de transformation mentale nécessaire pour produire et comprendre l'énoncé. Cependant, si la nature des transformations mentales peut renseigner sur la présence d'un coût cognitif, elle ne permet pas cependant d'en mesurer l'intensité précise pour chaque opérateur. Une autre mesure du coût cognitif est alors nécessaire telle que celle fournie par le NASA-TLX (Cegarra & Morgado, 2009).

Afin d'apporter des réponses à ces questions nous avons réalisé une étude portant sur la communication spatiale lors d'une tâche de navigation dans un EVC (**Pouliquen-Lardy, Milleville-Pennel, Guillaume & Mars, 2016**). Quatorze paires de participants ont contribué à cette étude (six femmes et vingt-deux hommes de vingt à cinquante-quatre ans). Les

collaborateurs étaient séparés physiquement mais immergés dans le même EV représentant un site de construction d'avion. Ils étaient représentés par des avatars, et interagissaient verbalement via un casque téléphonique. L'EV était projeté sur 2 murs immersifs (3.5 x 2.2 m et 2 x 3 m) avec une double projection arrière permettant la stéréoscopie (figure 3.16). Un système de tracking était utilisé à la fois sur les lunettes 3D et le joystick utilisé par les participants pour gérer leurs déplacements dans l'EV et sélectionner les différents menus.

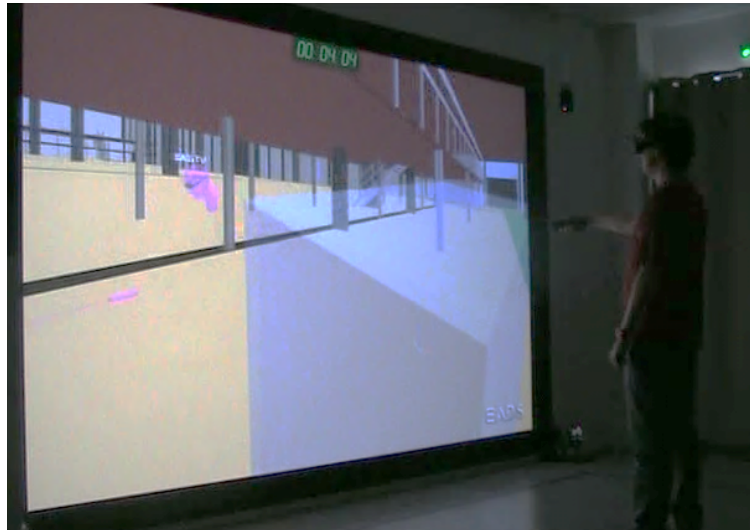


Figure 3.16: Participant face au mur immersif.

Les participants étaient engagés dans une tâche de collaboration spatiale impliquant de déplacer un objet (un cube) jusqu'à un lieu précis dans l'EV (figure 3.17). Un des participants (le manipulateur) devait déplacer l'objet pendant que l'autre (le guide) lui donnait des instructions pour effectuer ce déplacement. Avant le début de la session, le guide et le participant suivaient une phase d'entraînement. Le guide était familiarisé avec la configuration spatiale de l'EV (il possédait une carte précise des lieux) et était invité à l'explorer activement. Le manipulateur était quant à lui familiarisé avec la manipulation de l'objet mais n'avait pas d'informations sur la configuration spatiale précise de l'EV (il recevait une carte globale des lieux).

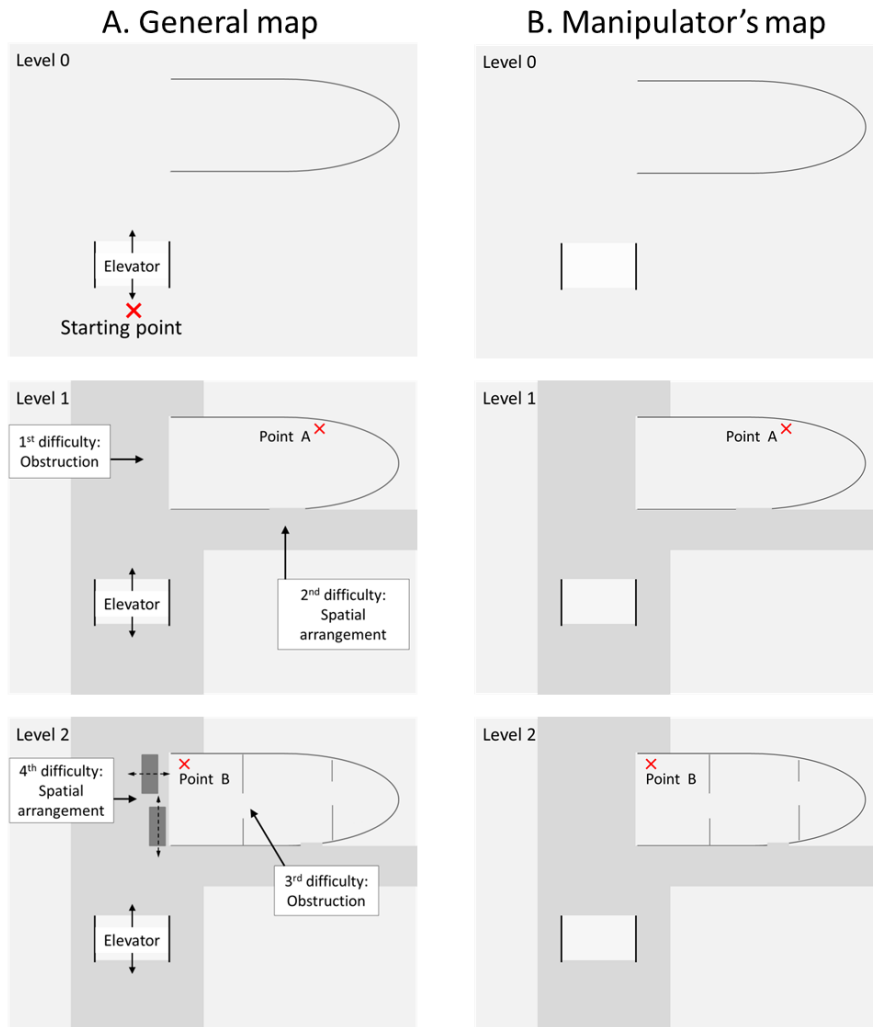


Figure 3.17: Carte de l'EV. A) Les participants devaient se déplacer du point de départ (niveau 0) au point A (niveau 1) et devaient ensuite aller jusqu'au point B (niveau 2), en gérant 4 difficultés réparties sur leur trajet. B) carte de l'EV reçue par le manipulateur.

A la fin de la session, les participants devaient évaluer leur charge cognitive à l'aide du NASA-TLX. L'ensemble des dialogues était enregistré, transcrit et analysé afin de renseigner sur le cadre de référence et les transformations spatiales utilisées lors des indications spatiales. Les verbalisations étaient classées selon 5 cadres de référence:

- *Neutre*: ne nécessitant pas de transformations spatiales ("va au niveau 1").
- *Egocentré*: centré sur le point de vue de l'orateur ("à ma droite")
- *Centré sur l'interlocuteur*: lorsque l'orateur utilise la perspective de l'autre participant ("devant toi").
- *Centré sur les objets*: quand la référence est un objet mais n'induit pas de changement de perspective ("à l'avant de l'avion").
- *Centré sur une autre perspective*: quand une autre perspective est nécessaire ("quand tu entres dans l'avion, en face du poste de pilotage").

Les besoins en transformations spatiales étaient évalués pour chaque participant (pour la production et pour la compréhension) à partir des positions respectives des opérateurs à chaque énoncé.

Les données obtenues indiquent que le rôle des opérateurs influence le choix du cadre de référence pour la communication. Les manipulateurs privilégient un cadre de référence égocentré alors que les guides privilégient un cadre de référence centré sur l'interlocuteur (figure 3.18).

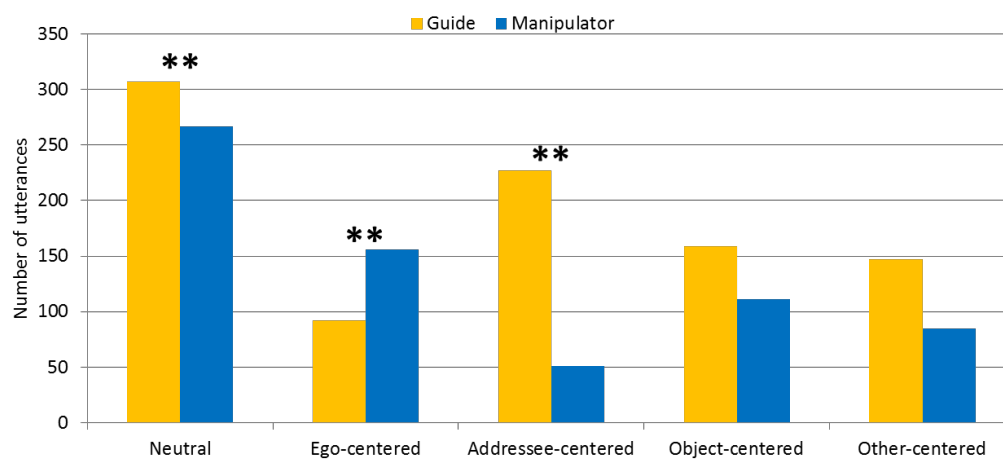


Figure 3.18: Nombre total de propositions spatiales (*utterances*) produites par les guides et les manipulateurs. Les propositions spatiales étaient classées selon 5 cadres de référence : Neutre, Egocentré, Centré sur l'interlocuteur, Centré sur les objets, Centré sur une autre perspective, ** $p < .01$.

Il est intéressant de noter que l'écart entre les guides et les manipulateurs concernant l'utilisation des références *égocentrée* et *centrée sur l'interlocuteur* augmente au fur et à mesure du temps (figure 3.19). On voit ainsi un ajustement mutuel entre les opérateurs au cours du temps visant à renforcer la stratégie initialement suivie.

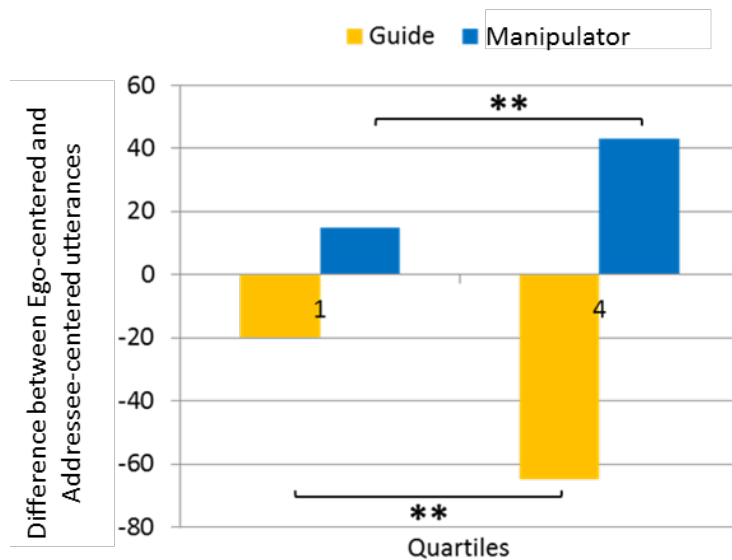


Figure 3.19 : Différence entre les propositions *Egocentrées* et *Centrées sur l'interlocuteur* produites par les guides et les manipulateurs lors du premier quartile (1) et du dernier quartile (4) temporel d'une séance, ** $p < .01$.

On pourrait s'attendre à une charge mentale plus élevée pour le guide que pour le manipulateur étant donné que le cadre de référence qu'il privilégie, implique habituellement de nombreux changements de perspective mais ce n'est pas le cas. Le manipulateur indique même une charge mentale plus élevée que le guide (figure 3.20).

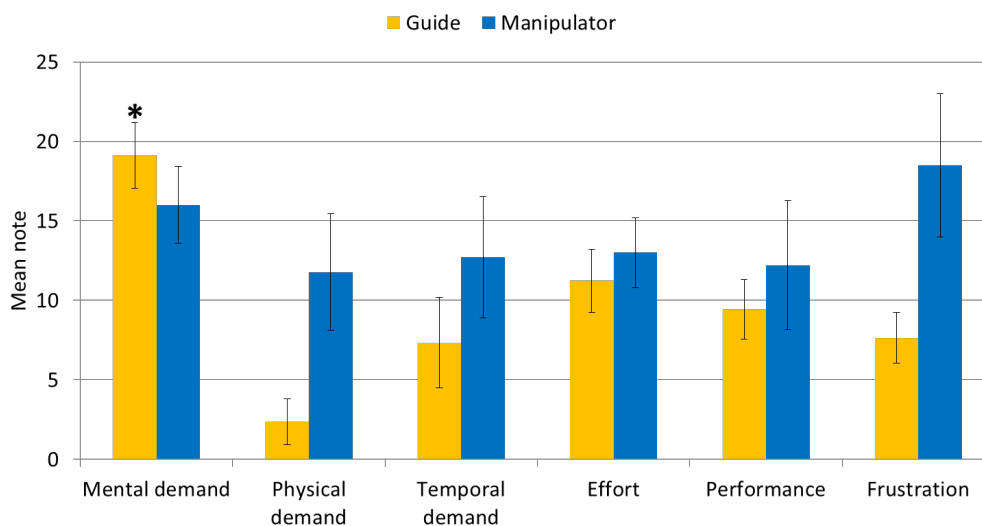


Figure 3.20: Notes moyennes pour les six composantes du NASA TLX, pour les guides et les manipulateurs. Le score de la *demande mentale* était significativement différent des autres composantes pour les guides uniquement (* $p < .05$).

L'analyse des transformations mentales a permis d'expliquer cette apparente contradiction en montrant qu'une large part des énoncés spatiaux ne nécessitait pas de transformation mentale pour être produits par le guide (figure 3.21 et 3.22). Les guides semblent ainsi avoir

suivi différentes stratégies afin de prendre le point de vue du manipulateur tout en minimisant leur propre coût de production (déplacement pour adapter leur point de vue à celui du manipulateur, choix d'une référence compatible avec leur propre perspective dans le cas d'un cadre de référence centré sur une autre perspective).

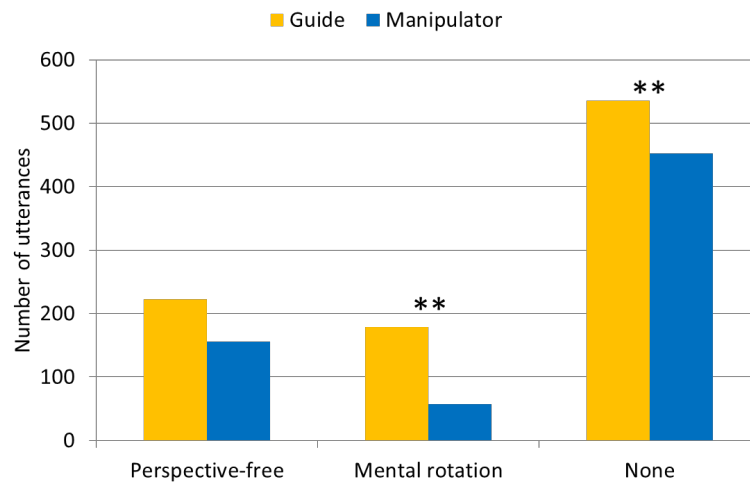


Figure 3.21 : Nombre de propositions spatiales (*utterances*) produites par les guides et les manipulateurs en fonction de la transformation spatiale requise pour la production de la part du participant les ayant émises. ** $p < .01$

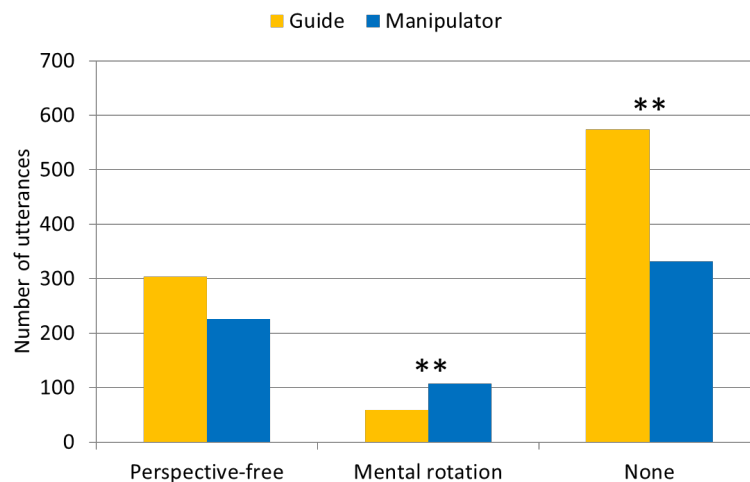


Figure 3.22: Nombre de propositions spatiales (*utterances*) produites par les guides et les manipulateurs en fonction de la transformation spatiale requise pour la compréhension de la part du participant les écoutant. ** $p < .01$

Nous observons ici une démonstration du principe du moindre effort collaboratif (Schober, 1995). Pour réduire le coût cognitif de leur collaborateur, les guides effectuent des prises de perspectives différentes, tout en minimisant leur propre coût cognitif. Ce genre de comportement est révélateur d'un bon référentiel commun entre les participants. Chacun a pu inférer les connaissances de l'autre sur l'EV et en déduire les difficultés résultantes étant

donné la nature de leurs activités respectives. L'un choisi donc de prendre la charge de la communication spatiale à son compte alors que l'autre accepte implicitement d'être déchargé de cette difficulté. Chacun a pu se représenter le rapport *coût d'adaptation du point de vue/déplacement de l'objet* et adapter son comportement en conséquence.

IV- Conclusion

Dans l'introduction de ce chapitre nous nous demandions quelle était la nature exacte des interactions émergeant entre les utilisateurs d'EVC. Comment parviennent-ils à se comprendre ? Et quelles sont les répercussions sur les modes de communication et les représentations sous-tendant l'interaction ? J'ai pu contribuer à montrer que dans tous les cas il est possible de parvenir à se créer un RSC efficace permettant une représentation commune de l'espace d'action. Les différents travaux présentés dans ce chapitre ont permis de montrer que plusieurs facteurs sont susceptibles d'influencer le choix des systèmes de référence utilisés pour la communication dans les EVC:

- Le contenu de l'EV, selon qu'il favorise ou non l'utilisation de repères exocentrés pour coder la position des objets dans l'espace.
- Les positions respectives des opérateurs dans l'espace ainsi que celles des objets mentionnés dans les échanges verbaux.
- Le rôle des participants dans l'EV. De fait, dans certains cas, les systèmes de référence utilisés peuvent être différents d'un opérateur à l'autre sans pour autant nuire à la construction d'un RSC efficace, bien au contraire.

Il est ainsi possible d'envisager les interactions complexes requises afin de collaborer à la réalisation d'une tâche commune dans un EVC. Nous avons notamment observé la mise en place de stratégies destinées à minimiser l'effort produit lors des échanges d'informations spatiales. Ces stratégies démontrent l'existence d'une véritable synergie entre les opérateurs. Par ailleurs, l'aspect dynamique de la collaboration est préservé et nous avons pu observer une évolution au cours du temps quant au choix des systèmes de référence utilisés lors des échanges. Le caractère *tacite* de cette adaptation (à aucun moment les opérateurs ne se mettent d'accord explicitement sur la forme à donner à leurs échanges spatiaux) montre qu'elle repose sur un véritable RC, c'est-à-dire une connaissance partagée de l'espace mais aussi des contraintes respectives des opérateurs ainsi que de leurs possibilités d'action et de représentation de l'espace. Il est cependant important de noter qu'initialement les opérateurs

possédaient des connaissances très différentes de l'EV et que chacun avait sa propre représentation et définition de la tâche à effectuer. A aucun moment les opérateurs ont partagé l'intégralité de leurs connaissances respectives. Le RC qui s'est développé ne concernait que des aspects partiels du référentiel de chacun des opérateurs, et qui étaient essentiels à la réalisation de la tâche. Cette observation conforte la définition du RC que nous proposons à la fin de la section II.2.3 de la partie 3.

Partie 4 : Communication haptique en RV

Cette partie de mon activité a donné lieu aux publications et communications suivantes :

- Xiong, M., Milleville-Pennel, I., Dumas, C., & Palluel-Germain, R.** (2013). Comparing haptic and visual training method of learning chinese handwriting with a haptic guidance. *Journal of Computers, 8(7)*, 1815-1820.
- Chellali, A., Dumas, C., & Milleville-Pennel, I.** (2012). Haptic communication to support biopsy procedures learning in virtual environments. *PRESENCE: Teleoperators and Virtual Environments, 21(4)*, 470-489.
- Chellali, A., Dumas, C., & Milleville-Pennel, I.** (2011). Influence of haptic communication on a shared manual task. *Interacting with Computers, 23(4)*, 317-328.
- Takac, B., **Chellali, A., Dumas, C., Milleville-Pennel, I., Grosdemouge, C., & Cao, C.G.L.** (2011). Haptic Communication for a 2-D Pointing Task in a Virtual Environment. In the Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting. Las Vegas, USA. pp 2168-2172.
- Chellali, A., Dumas, C., & Milleville, I.** (2010). Haptic communication to enhance collaboration in virtual environments. In Proceedings of the the European Conference on Cognitive Ergonomics ECCE2010, Delft, The Netherlands. pp. 83-90.
- Chellali, A., Dumas, C., & Milleville, I.** (2010). WYFIWIF: A haptic communication paradigm for collaborative motor skills learning. In Proceedings of the International Conference on Web Virtual Reality and Three-Dimensional Worlds (WEB3DW 2010). Freiburg, Germany. pp. 301-308.
- Xiong, M., Milleville-Pennel, I., Dumas, C., & Palluel-Germain, R.** (2010). Learning Chinese Handwriting with a Haptic Interface in different velocity mode. Proceedings of the 2nd International Conference on Computer Supported Education SCEDU2010, Valencia, Spain.
- Xiong, M., Milleville-Pennel, I., Dumas, C., & Palluel-Germain, R.** (2010). Experimental Evaluation of a Haptic and Visual Training Method for learning Chinese handwriting, VRIC2010, Laval.

Cette partie de mon activité a permis l'encadrement de deux thèses :

- Chellali, A.** (2009). Etude des interactions homme-homme pour l'élaboration du référentiel commun dans les environnements virtuels collaboratifs.
- Xiong, M.** (2011). How to improve chinese handwriting with haptic guidance.

Introduction

Nous avons vu que les situations de RV peuvent être propices au travail collaboratif. Les EV offrent des possibilités de création et de manipulation de leur contenu selon les besoins de l'activité permettant de favoriser la compréhension mutuelle entre les opérateurs et la création d'un RC efficace.

Un dernier aspect de la RV que nous souhaitons aborder concerne son formidable potentiel en termes de création de nouvelles modalités d'interaction entre les utilisateurs. L'utilisation de la modalité haptique comme *nouvelle forme de communication* en est un parfait exemple. Nous verrons dans ce chapitre comment l'haptique a pu être utilisé à la fois pour favoriser l'échange entre opérateurs lors du transfert de compétences mais aussi de

quelle façon ce type de communication peut influencer la nature du RC qui s'établit entre les opérateurs.

I. Utilisation de l'haptique pour le transfert de compétences en RV

L'apprentissage de nouvelles compétences repose en grande partie sur le transfert de connaissances d'un expert vers des novices. L'apprentissage peut être considéré comme un processus collaboratif dans lequel experts et novices travaillent ensemble vers un objectif commun : le transfert d'apprentissage. Pour cela, ils doivent se construire un RC efficient. En fait, tout au long de l'apprentissage, l'expert doit compléter et enrichir la représentation incomplète que se crée le novice concernant la compétence à acquérir. Lorsqu'il s'agit d'une compétence motrice, il est essentiel de permettre à l'expert de communiquer efficacement ses connaissances. Pour cela différents canaux de communication sont à sa disposition (Gillespie, O'Modhain, Tang, Zaretsky, & Pham, 1998): la vision, l'audition (communication verbale) et le canal haptique. La communication verbale est le moyen le plus utilisé pour partager et transférer les connaissances concernant les règles d'exécution d'une compétence motrice (il s'agit des connaissances déclaratives, [Rasmussen,1983]). Toutefois, utilisé seul, ce canal de communication ne permet pas de transmettre aisément l'ensemble des caractéristiques motrices telles que les sensations tactiles et haptiques (qui font partie des connaissances procédurales [Rasmussen,1983]), difficiles, voire impossible à décrire verbalement. Cela peut-être contourné en effectuant une démonstration du geste à produire. Dans ce cas l'expert fournit un modèle visuel du geste, observé par les apprenants qui essaient en retour de le reproduire. Cependant, cela ne fournit qu'un modèle incomplet du geste car seules les postures et les caractéristiques cinématiques du mouvement sont montrées. S'il a été largement démontré que le système visuel est effectivement capable d'accéder aux informations cinématiques du geste (Loula, Prasad, Harber & Shiffrar, 2005 ; Stevens, Fonlupt, Shiffrar & Decety, 2000), il n'en est pas de même concernant les informations haptiques. En fait cela semble quasiment impossible pour des tâches complexes où les gestes à produire demandent une grande précision et sont basés sur la gestion des forces exercées sur les outils (chirurgie, écriture,...). Ce genre d'activité nécessite de maîtriser un certain nombre d'informations (haptiques, tactiles, cinématiques) essentiellement transmissibles via le canal haptique. Ce genre d'apprentissage favorise donc l'imitation au détriment d'un véritable apprentissage du geste. Lorsque l'activité le permet une solution consiste pour l'expert à guider la main du novice afin de lui montrer le bon mouvement à produire (*guidage de la*

main). Dans ce cas, les échanges haptiques concernant les forces et la dynamique du mouvement sont possibles. Cela permet d'enrichir le RC entre l'expert et le novice en créant une base de compréhension commune potentiellement enrichie par les interactions ultérieures.

Toutefois, ce genre de protocole présente certaines limites. Un expert ne peut tenir la main que d'un apprenant à la fois. En outre, le contact entre la main de l'expert et celle du novice peut modifier leur perception du mouvement et des feedbacks associés (en général le novice se laisse guider, limitant ainsi grandement les feedbacks de type boucles de rétroaction perceptivo-motrice). Enfin, cela peut modifier la façon dont l'expert réalise son geste, fournissant ainsi au novice une représentation erronée de celui-ci. Une alternative peut résider dans l'utilisation d'applications dédiées à l'auto-apprentissage d'habiletés motrices et permettant un retour d'informations haptiques via l'utilisation d'un bras à retour d'effort de type PHANTOM Omni de Sensable ou encore le Virtuoso 6D commercialisé par la société Haption (figure 4.1). Nous allons dans la suite de ce chapitre nous focaliser sur le type de communication haptique fourni par ces systèmes. De nombreux systèmes existant permettent en effet de reproduire le paradigme de *guidage de la main* (Feygin, Keehner, & Tendick, 2002) et sont basés sur la métaphore de *l'enregistrement et du rejou du mouvement*. L'implémentation de ce paradigme dans un système d'apprentissage automatique nécessite l'enregistrement et la modélisation d'un geste d'expert servant de référence au système. Cette méthode est utilisée dans de nombreuses applications telles que les systèmes d'apprentissage de la calligraphie (Yoshikawa & Henmi, 2000), de déplacement d'un objet à résistance variable (Gilespe et al., 1998) ainsi que pour la mémorisation de séquences de force (Morris, Tan, Barbagli, Chang, & Salisbury, 2007). Ces études montrent que le guidage haptique combiné avec un retour visuel permet aux novices d'apprendre certaines caractéristiques motrices plus efficacement qu'un simple apprentissage visuel comme par exemple lors de l'apprentissage de l'écriture (Bluteau, Coquillart, Payan, & Gentaz, 2008; Solis, Avizzano, & Bergamasco, 2003). Lathan, Cleary & Traynor (2000) ont développé un simulateur virtuel de biopsie de la moelle épinière couplé avec un bras à retour d'effort. L'évaluation du système a démontré l'importance des retours haptiques pour l'apprentissage de la procédure de biopsie particulièrement quand les retours visuels sont limités. Cela confirme que les informations haptiques sont des composantes clés dans l'apprentissage et qu'elles nécessitent d'être correctement transmises lors de cet apprentissage.

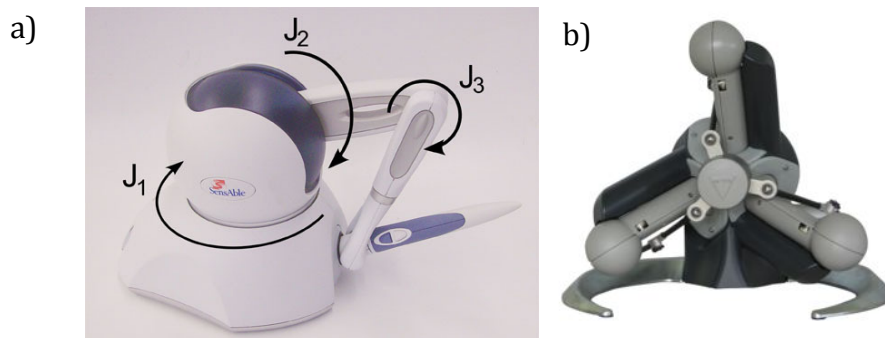


Figure 4.1 : a) Bras à retour d'effort PHANToM Omni (Sensable) b) Bras à retour d'effort Virtuouse 6D (Haption).

Dans une étude que nous avons réalisée (Xiong, Milleville-Pennel, Dumas, & Palluel-Germain, 2013) dans le cadre de l'apprentissage de caractères chinois (figure 4.2,a) via un bras à retour d'efforts (phantom omni® à six degrés de liberté), nous avons comparé trois conditions d'apprentissage (haptique, visuelle et visuo-haptique, figure 4.2,b,c,d). Dans chaque condition, l'apprentissage du caractère était vérifié via une comparaison des performances des participants pré et post-apprentissage mesurée sur une tablette graphique (vitesse moyenne du tracé, taille du caractère, ordre de production des traits, forme et temps passé *en l'air* entre deux traits). Nous considérons également le transfert de cet apprentissage à de nouveaux caractères partageant des traits communs avec celui appris (figure 4.2, a). Nous avons constaté que les deux modalités, haptique et visuelle, ne contribuaient pas de la même façon à l'apprentissage. Les informations visuelles valorisaient l'apprentissage de la forme des caractères, alors que les informations haptiques permettaient un meilleur transfert d'apprentissage aux autres caractères partageant des traits communs. Ces résultats laissent penser que les systèmes perceptifs ne seraient pas égaux quant à la façon dont ils traitent l'information perçue. Les informations visuelles renseigneraient davantage sur la forme globale du caractère à apprendre alors que les informations haptiques focaliseraient davantage l'attention sur les différents composants de ce caractère, favorisant ainsi la création d'un modèle interne de la façon de produire chaque trait isolément et favorisant ainsi le transfert d'apprentissage d'un caractère à l'autre.

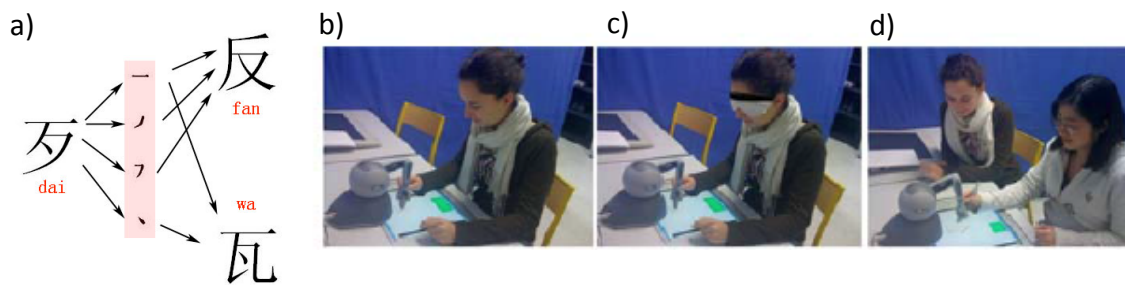


Figure 4.2 : a) exemple de caractère chinois utilisé pour l'apprentissage (caractère de gauche) et pour le transfert d'apprentissage (caractères de droite). Les deux caractères utilisés pour le transfert d'apprentissage possèdent des traits communs avec celui utilisé pour l'apprentissage. b) condition apprentissage haptique et visuel, c) condition apprentissage haptique seul d) condition démonstration visuelle.

Toutefois l'utilisation d'un système automatique pour l'enseignement présente quelques restrictions. Premièrement, comme nous l'avons souligné auparavant, le guidage "passif" de la main empêche un apprentissage basé sur les erreurs de mouvement et les boucles de rétroaction sensori-motrices. Par ailleurs, un système de guidage haptique peut fournir des informations concernant les forces ou les positions, mais pas les deux en même temps. Il ne supporte pas non plus l'interaction directe avec un expert humain. Il est de ce fait impossible pour le novice de demander des explications complémentaires à l'expert, cela limitant ainsi ses possibilités de développer une représentation personnelle de l'activité.

Dans ce contexte, la RV offre un outil prometteur en permettant de coupler différents dispositifs haptiques à un environnement d'apprentissage à la fois sécurisé et polyvalent. Ce type d'environnement présente en outre l'avantage de pouvoir être multi-utilisateurs. Bien que peu de recherches se soient penchées sur l'utilité de la communication haptique dans les EV, quelques études (Basdogan, Ho, Srinivasan, & Slater, 2000; Sallnäs, Rasmus-Gröhn, & Sjöström, 2000) suggèrent que ce moyen de communication améliore les performances des utilisateurs dans les tâches de collaboration manuelle.

Dans une étude que nous avons réalisée (Chellali, Dumas, Milleville-Pennel, 2012), nous nous sommes justement intéressés au rôle de l'interaction multimodale entre deux utilisateurs pour améliorer la communication pendant le transfert d'apprentissage. Dans ce cadre, nous avons proposé un nouveau paradigme de collaboration inspiré de la métaphore du *guidage de la main* mais basé sur une interaction directe entre le novice et l'expert. Notre approche reposait sur la théorie du RC (*common-ground* selon Clark & Brennan, 1991) impliquant qu'une communication efficace améliorerait la compréhension mutuelle entre l'expert et le novice. Ainsi, nous supposons que, comparé à un système du type *enregistrement et rejeu*, un dispositif d'apprentissage qui permettrait une interaction directe

entre un expert et un novice, lors des toutes premières étapes de l'apprentissage, pourrait leur permettre de développer un RC plus performant et d'échanger de façon plus précise sur les caractéristiques cognitives et perceptivo-motrice de l'activité. Par ailleurs, coupler cette technique avec la RV, devrait permettre de créer un EV destiné à supporter ces interactions et à améliorer la communication en fournissant un espace de travail visuel commun. Ainsi l'EV supportait trois canaux de communication : verbal, haptique et visuel, permettant une interaction multimodale en temps réel entre le novice et l'expert (figure 4.3). Nous avons appelé ce paradigme d'apprentissage WYFIWIF (What You Feel Is What I Feel).

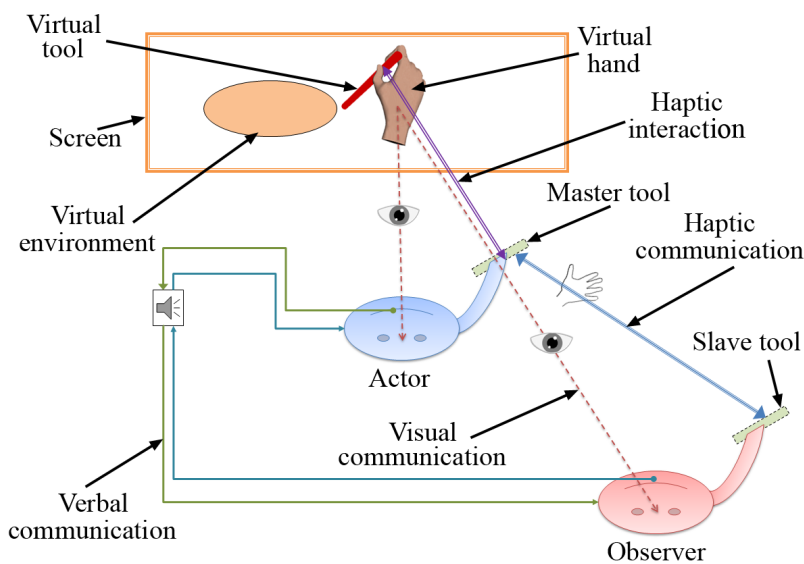


Figure 4.3: Paradigme de collaborations haptiques WYFIWIF: l'acteur (l'expert dans le cas d'un apprentissage) interagit directement avec l'environnement virtuel en utilisant un bras haptique (lui permettant de déplacer les objets virtuels et de ressentir en même temps un feedback haptique). Au même moment il peut guider la main de l'observateur (le novice dans le cas d'un apprentissage) et interagir avec lui via trois canaux de communication (visuel, haptique et verbal). Le guidage haptique peut-être à sens unique ou à double sens.

Lors de l'étude, deux bras haptiques identiques étaient utilisés (Virtuose 6D desktop de la société Haption) et reliés entre eux via un dispositif d'asservissement du type maître/esclave. La position du bras esclave était contrôlée par le bras maître. Chaque bras pouvait avoir le rôle de maître selon les besoins des conditions expérimentales. L'acteur (l'expert dans le cas d'un apprentissage) fournissait à l'observateur (le novice dans le cas d'un apprentissage) les informations nécessaires pour apprendre les caractéristiques techniques et cognitives liées à l'activité via le (les) canal (canaux) approprié(s) et disponible(s). Un seul écran permettait aux utilisateurs de partager le même point de vue sur l'espace de travail fourni par l'EV. Ce dernier (développé à partir d'une analyse de l'activité) était une reproduction d'un environnement réel de radiologie interventionnelle, dans lequel les participants devaient

effectuer différents exercices de ponction (figure 4.4). Soixante volontaires, tous étudiants en médecine, ont participé à cette étude. Le but était d'évaluer l'utilité d'une méthode d'apprentissage basée sur le paradigme WIFIWIF sur la performance lors d'un exercice de biopsie. Après une période de familiarisation avec le dispositif, l'*expert* (un des expérimentateurs) effectuait une séance de formation avec le *novice* afin d'apprendre à ce dernier comment effectuer une biopsie correctement (via quatre exercices différents). L'apprentissage se déroulait en deux étapes:

- La phase de planification: la première sous-tâche de cette étape était de choisir le point d'entrée à la surface de la peau. La seconde sous-tâche était de positionner les points de repère afin de définir le trajet suivi par l'aiguille dans le corps du patient virtuel. Ce trajet devait respecter un certain nombre de règles de sécurité prédéfinies.
- La phase d'insertion de l'aiguille: l'objectif de cette étape était d'insérer l'aiguille dans le corps du patient pour effectuer la biopsie. L'utilisateur devait ensuite déplacer l'aiguille de façon à atteindre l'objectif en respectant le trajet préalablement défini.

Les participants étaient répartis dans trois groupes d'entraînement, variant selon la modalité de communication utilisée lors de l'apprentissage; le discours de l'expert était uniformisé dans les trois conditions:

- *Instructions Papier (PI)*, sans les modalités haptique et visuelle): l'expert apprenait les règles et les habiletés motrices au novice via des explications verbales utilisant comme support des images statiques de l'EV et de la position du bras haptique lors des différentes étapes de l'exercice.
- *Instructions Visuelles (VI)*: l'expert apprenait les règles et les habiletés motrices au novice via une démonstration visuelle accompagnée des mêmes explications verbales que dans la condition *PI*. Le novice observait directement la main de l'expert manipulant le bras haptique et pouvait en voir les conséquences dans l'EV, via l'écran.
- *Instructions Visuo-haptiques (VHI)*: En plus de la démonstration visuelle et des explications verbales, l'expert utilisait la communication haptique (WIFIWIF) pour que le novice puisse suivre passivement sa main via le second bras haptique lors des différentes manipulations de l'aiguille.

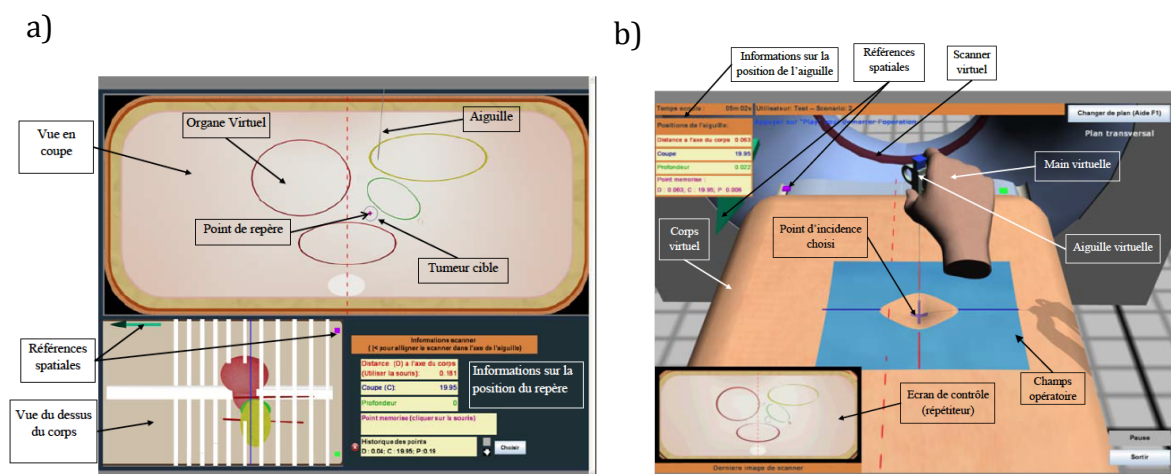


Figure 4.4: a) Interface graphique de planification de la ponction. b) Interface graphique de ponction.

Enfin, les participants devaient effectuer seuls trois exercices de ponction, destinés à évaluer la qualité de leur apprentissage. Les résultats indiquent que pour transmettre les habiletés motrices, la combinaison des communications haptique, visuelle et verbale améliore la performance des novices comparée aux conditions *PI* et *VI* (figure 4.5).

| *=p<0.05 | PI : mean (SD) | VI: mean (SD) | VHI: mean (SD) | F-values (2,57) |
|---------------------------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|--|
| Planning landmarks (landmarks) | 12.1 (6.3) | 15.3 (10.4) | 8.5 (4.3) | 4.054* |
| Organ contacts (contacts) | 32.9 (29.0) | 31.9 (28.8) | 15.7 (15.2) | 2.799* |
| Organ penetrations | 3.3 (0.9) | 3.5 (0.8) | 2.1 (0.7) | 16.7* |
| Length of the real path (cm) | 54.6 (20.3) | 64.2 (23.7) | 39.7 (22.7) | 5.89* |
| Target missing (%) | 80% | 60% | 30% | $\chi^2_{obs}=6.17 > \chi^2_{(0.05;2)}=10.3$ |
| Distance to the target (cm) | 0.68 (0.18) | 0.71 (0.18) | 0.63 (0.13) | 0.98 |

Figure 4.5: Marqueurs de performance mesurés durant l'étude pour chaque condition d'apprentissage.

Par ailleurs, les résultats montrent également, que selon la méthode d'apprentissage, les participants présentaient différents profils d'insertion de l'aiguille. Une illustration de cela est clairement visible lors du dernier exercice. Différentes stratégies d'insertion de l'aiguille étaient possibles (figure 4.6) : la première nécessitait d'introduire l'aiguille sur la gauche du corps afin d'avoir une distance importante vis à vis des organes sensibles

(pour lesquels une pénétration de l'aiguille aurait pu être très dommageable). Cette stratégie avait cependant le désavantage d'impliquer une position de la main et du poignet incompatibles avec une bonne manipulation de l'aiguille. La seconde stratégie impliquait d'insérer l'aiguille sur la droite du corps, permettant ainsi une plus grande maniabilité mais impliquant de passer beaucoup plus près des organes sensibles. Les résultats ont montré que 44,83 % des participants loupaient la cible lorsqu'ils choisissaient la première stratégie alors que seulement 16,13% échouaient lorsqu'ils choisissaient la seconde stratégie. Par ailleurs, le choix de cette stratégie n'augmentait pas le nombre de contact avec l'organe sensible. Plus intéressant encore, l'analyse des stratégies choisies par les opérateurs a montré que le choix d'une stratégie dépend de la méthode d'apprentissage suivie. La majorité des participants du groupe *PI* a choisi la première méthode alors que la majorité des participants du groupe *VHI* choisissait la seconde stratégie. Le mode d'apprentissage a donc une incidence directe sur la stratégie d'insertion choisie spontanément. Dans le cas présent l'apprentissage valorisant la manipulation directe et les retours haptiques a permis aux participants d'identifier spontanément les contraintes motrices liées à la première méthode. On peut également supposer que ces participants ressentaient une plus grande assurance au niveau de leur capacité à effectuer une manœuvre plus délicate avec l'aiguille, ce qui semble confirmé par les marqueurs de performance mesurés pendant la tâche.

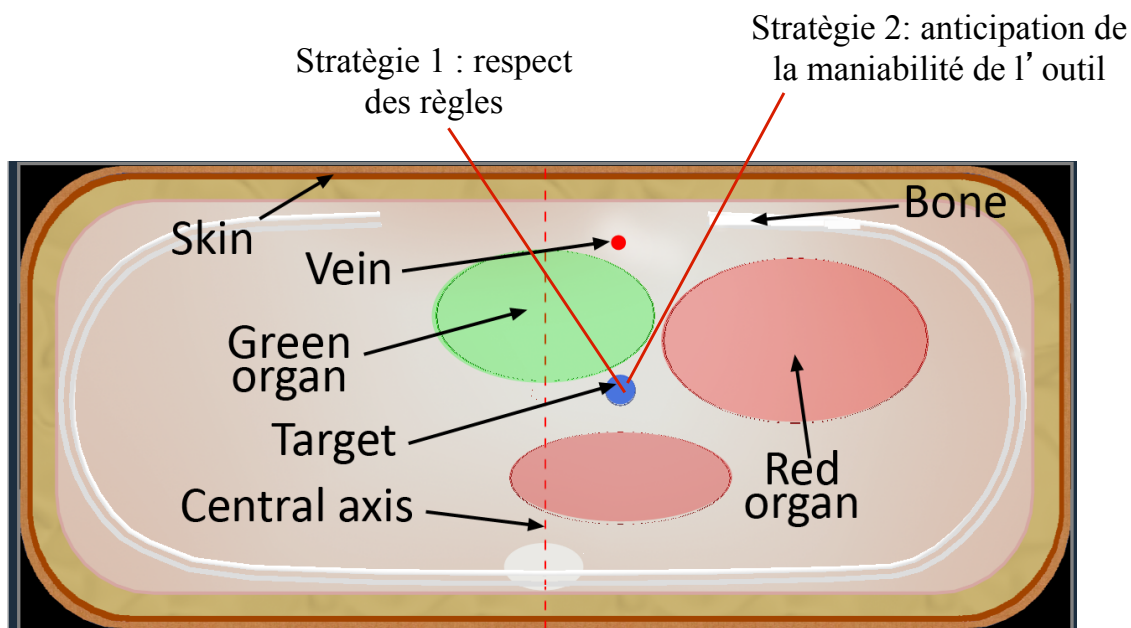


Figure 4.6: Les différentes stratégies d'insertion (traits rouge).

Nous avons ainsi pu conclure que notre paradigme WIFIWIF améliorerait le transfert de compétences. Ces résultats montrent que les méthodes d'apprentissages traditionnellement utilisées en chirurgie gagneraient à évoluer pour tirer pleinement bénéfice des nouvelles possibilités offertes par les EVC. Il y a tout intérêt à favoriser un premier apprentissage sur des patients virtuels en privilégiant la communication haptique lors des échanges avec les élèves, afin d'aboutir à une meilleure représentation de la totalité de l'activité. Actuellement de plus en plus de CHU privilégient ces nouvelles techniques d'apprentissages en les intégrant dans des centres de simulation haute fidélité comme c'est le cas, par exemple, au NORSIMS du CHU de Caen. Dans ce cadre les techniques novatrices d'intervention sur mannequins haute fidélité sont couplées avec les techniques de simulation en RV.

II. Implications de la modalité d'apprentissage sur la collaboration et le RC

Nous avons pu démontrer que la communication haptique pouvait améliorer l'apprentissage mais qu'en est-il exactement de son implication sur le référentiel commun ? En quoi l'introduction de la dimension haptique lors de l'apprentissage peut influencer sur la façon de communiquer entre deux opérateurs et donc indirectement leur mode de collaboration ?

Pour répondre à ces questions, on peut se référer à la dimension fonctionnelle des interactions haptiques pour communiquer des comportements moteurs complexes. Ainsi, Rasmussen (1983) distinguait trois catégories de connaissances régissant les comportements humains : les habiletés, les comportements régis par les règles et ceux régis par les connaissances. Les compétences sensori-motrices se situent au niveau des habiletés. Ce niveau de connaissance est considéré comme inexprimable : *“We can show the ability, but cannot explain the way to achieve it”* (Rasmussen, 1983). Effectivement, les verbalisations peuvent permettre de communiquer les règles correctes pour accomplir une tâche manuelle (connaissances déclaratives). Toutefois, elles peuvent rarement être utilisées pour communiquer efficacement les sensations de force et la cinématique des mouvements liées à la réalisation de cette tâche (connaissances procédurales). Les opérateurs utilisent donc souvent la modalité haptique pour communiquer de telles informations de façon fonctionnelle. Cela peut être observé dans de nombreuses tâches manuelles telles que déplacer une table à plusieurs ou guider la main du partenaire pour lui montrer le geste à produire. Ainsi ce canal

de communication peut aisément permettre de compenser la perte des autres formes de communication non verbale.

Au cours de nos travaux sur la communication haptique nous avons fait l'hypothèse que la combinaison des canaux de communication classique avec la communication haptique devrait permettre non seulement d'augmenter le nombre d'informations partagées sur la tâche en cours mais aussi permettre la création d'un RC plus efficient, permettant notamment d'inclure la dimension fonctionnelle de l'haptique. Nous avons pu tester cette hypothèse dans une condition supplémentaire de l'étude présentée dans la section précédente (**Chellali et al. 2012**) les participants ont été regroupés en trente paires. Chaque paire était constituée de participants ayant suivi la même condition d'apprentissage (*PI*, *VI* ou *VHI*). Les participants devaient effectuer ensemble quatre nouveaux exercices de ponction. Pour chaque exercice ils devaient effectuer la phase de planification ensemble. Pendant la phase de manipulation, un des participants (*l'acteur*) devait manipuler l'aiguille à l'aide d'un bras haptique pendant que l'autre (*le superviseur*) suivait passivement le mouvement de l'aiguille à l'aide du second bras haptique. Il pouvait cependant décider de suspendre le geste d'insertion s'il le jugeait nécessaire en appuyant sur un bouton d'urgence. Le rôle des partenaires était alterné d'un exercice à l'autre (**Chellali, Dumas & Milleville-Pennel, 2011**).

II.1. Performance lors de la collaboration

Concernant la phase de planification, les résultats obtenus indiquent que les partenaires issus de la condition *PI* ont de meilleures performances que les autres. Ils réduisent le nombre de pénétrations d'organe prévu, le nombre d'images scanner utilisé pour réaliser l'intervention et le nombre de points de repère nécessaire pour planifier le trajet de l'aiguille. Cela signifie que dans cette condition les participants suivent de façon plus rigoureuse les règles théoriques : ils privilégient la sécurité du patient en réduisant les risques de lésion dans les organes et minimisent l'exposition aux rayons X du CT-scan. A l'inverse les participants des deux autres conditions respectent de façon moins rigoureuse les règles théoriques de sécurité.

Concernant la phase de manipulation de l'aiguille, les partenaires de la condition *VHI* avaient une meilleure performance que les partenaires des deux autres groupes. Ils loupaient moins souvent la cible, ce qui indique que la communication haptique durant l'entraînement leur a permis d'apprendre à mieux manipuler l'aiguille. Ils réduisaient également le nombre de contact avec les organes sensibles et finalement inséraient moins souvent l'aiguille à l'intérieur des autres organes. Enfin, ils réduisaient la taille du trajet parcouru à l'intérieur du

corps du patient virtuel. A l'inverse, les participants de la condition *PI* minimisaient la distance finale entre la pointe de l'aiguille et le centre de la cible mais au prix d'un plus grand nombre d'essais pour atteindre la cible que les participants de la condition *VHI*.

II.2. Impact sur le RC

Concernant le contenu du RC, les résultats montrent que le type de session d'entraînement influence le contenu des conversations. Dans la condition *VHI* les partenaires font plus de références aux informations haptiques. Cela indique que l'utilisation de l'haptique lors de l'apprentissage a incité les partenaires à utiliser davantage les références à cette modalité lors des échanges verbaux durant les tâches collaboratives. Ce résultat est concordant avec la théorie du *Grounding*. En effet, le processus de *Grounding* consiste en un échange d'informations et de signes de compréhension favorisant l'émergence du RC. La communication haptique pendant l'entraînement a aidé les partenaires à mieux comprendre comment utiliser cette modalité pour communiquer et a ainsi permis aux partenaires de développer une représentation partagée de la façon dont ces informations peuvent être utilisées pour aider à réaliser le geste de ponction dans de bonnes conditions. Ainsi pendant la session collaborative ils parviennent plus facilement à utiliser la communication verbale pour échanger sur leur représentation mutuelle des retours haptiques liés au geste de ponction. Cela inclut principalement la description des actions lors de la manipulation de l'aiguille.

Cette meilleure communication est confirmée par le ressenti exprimé par les participants dans un questionnaire post-expérimental où le groupe *VHI* exprime un plus grand sentiment de compréhension mutuelle avec leur partenaire comparé aux groupes *PI* et *VI* (figure 4.7). Elle s'accompagne d'une augmentation du sentiment de coprésence avec le partenaire dans la condition *VH* comparée à la condition *PI*.

| Conditions | PI : moyenne (écart type) | VI : moyenne (écart type) | VHI : moyenne (écart type) |
|---|---------------------------|---------------------------|----------------------------|
| <u>Compréhension mutuelle*</u> | 3.99 (0.48) | ↘ 4.05 (0.54) * | ↗ 4.21 (0.65) * |
| Sentiment de réalisation commune de la tâche | 3.60 (0.67) | 3.84 (0.63) | 3.68 (0.71) |
| Sentiment d'entraide | 3.98 (0.67) | 4.07 (0.53) | 4.00 (0.59) |
| Le sentiment de plaisir de travailler en Collaboration | 4.19 (0.89) | 4.14 (0.75) | 4.30 (0.79) |
| <u>Coprésence*</u> | ↘ 3.59 (1.01)* | 3.70 (1.17) | ↗ 3.97 (0.85)* |

Figure 4.7: Résultat du questionnaire (les * indiquent un effet statistiquement significatif).

III- Conclusion

Ce dernier chapitre avait pour objectif de montrer l'importance de la communication haptique pour accomplir des tâches manuelles dans les EV. Nous avons présenté une approche centrée sur l'utilisateur pour la conception d'EV qui supportent les interactions haptiques entre deux utilisateurs. Ce principe de conception est basé sur le paradigme WIFIWIF de communication. Les résultats de nos travaux ont confirmé les observations déjà rapportées dans la littérature, montrant que la communication haptique améliore la performance lors de tâches manuelles partagées (Basdogan et al. 2000 ; Sallnäs et al., 2000). Nous avons en outre pu montrer que les partenaires développent des profils de manipulation de l'outil différents en fonction du type d'apprentissage qu'ils ont suivi. La communication haptique permet aux opérateurs de choisir la stratégie optimisant les contraintes musculaires et articulaires liées à la manipulation de l'outil.

En outre, la compréhension partagée des retours haptiques favorise leur utilisation lors de la communication durant la réalisation d'une tâche manuelle commune tout en maximisant le sentiment de compréhension mutuelle et de facilité d'utilisation du dispositif.

Peut-on pour autant réellement envisager de remplacer dans certains cas les modalités de communication visuelle et verbale par l'haptique ? C'est-à-dire concevoir cette dernière comme une nouvelle modalité de communication à part entière ? Même si certains travaux tendent à démontrer que l'haptique peut être un moyen de communication suffisant pour

permettre un guidage lors d'une tâche de pointage collaboratif dans un EV simplifié (Takac, Chellali, Dumas, Milleville-Pennel, Grosdemouge, & Cao, 2011), il semble que son utilisation de façon isolée (et non comme un complément à la communication verbale) reste néanmoins limitée. Wang, Chellali & Cao (2015) ont montré que, bien que le feedback haptique puisse effectivement être utilisé isolément pour réaliser une tâche de pointage collaboratif dans un EV, cette modalité reste moins efficace que le feedback verbal seul ou que la combinaison feedback verbal et haptique. Elle est cependant véritablement utilisée par les participants, même lorsque la présence de la modalité verbale ne les y oblige pas. Dans ce cas les participants utilisent les deux modalités pour donner leurs instructions. On voit donc bien que l'utilisation de l'haptique répond à un besoin et représente une aide à la communication pour les partenaires. En fait utilisées seules, les informations données via le canal haptique étaient exagérées comme si les utilisateurs sous-estimaient leur pouvoir informatif pour leur partenaire. On peut donc supposer que ce résultat est en parti lié à la rareté des situations dans lesquelles nous utilisons ce canal de communication isolément. Ce qui est corroboré par le fait que, dans l'étude de Wang et al. (2015), l'efficacité de la communication haptique était améliorée après une période d'apprentissage, particulièrement si cette période se faisait avec le soutien de la modalité verbale.

Ainsi, la communication haptique doit dans un premier temps être considérée comme un moyen d'attirer l'attention du novice sur les points clefs du geste à produire en posant les bases structurelles d'un référentiel commun alimenté ensuite au fur et à mesure de la pratique commune et de l'apprentissage. On peut cependant envisager que son utilisation répétée puisse permettre de l'utiliser dans certains cas comme un bon complément aux autres modes de communication et/ou comme moyen de communication à part entière lorsqu'il est le seul disponible.

Outre les questions théoriques soulevées et discutées, l'intérêt de ce chapitre est également de montrer à quel point la RV peut permettre d'innover en matière de formation. Elle permet de varier les outils disponibles mais aussi de focaliser l'attention sur tel ou tel canal sensoriel selon les besoins du type de connaissance à transmettre, tout en favorisant la création de nouveaux modes/outils de communication adaptés et efficaces.

Partie 5 : Synthèse et perspectives

I- Contributions principales

En commençant la rédaction de mon HDR j'ai essayé de prendre un peu de recul sur l'ensemble de mes travaux et leurs apports dans le domaine scientifique. Cette réflexion s'est produite en parallèle de nombreuses discussions que j'ai pu avoir avec des collègues de divers horizons scientifiques (STIC, SHS, ...) mais aussi des amis et des membres de ma famille. La richesse de ces échanges et les réflexions parfois naïves (souvent en apparence seulement) que pouvaient susciter mes travaux, m'ont conduite à m'interroger sur l'utilité de ces derniers et surtout sur leur intérêt véritable pour les utilisateurs directement concernés par les développements technologiques auxquels j'ai pu contribuer.

Pour ces raisons j'ai voulu que mon HDR soit, très modestement, un peu plus qu'une simple synthèse de mon activité de recherche et puisse fournir une base de réflexion sur l'état actuel de la RV et ses implications pour les utilisateurs. Mon but à travers la présentation des travaux que j'ai pu réaliser via l'utilisation de la RV était de montrer les limites et les atouts de cette technologie et les divers domaines dans lesquels son utilisation présente un véritable intérêt pour l'individu.

Dans cette partie, je résumerai les principaux apports que mon travail a pu fournir sur les plans théoriques puis applicatifs. Je conclurai enfin en discutant des réflexions qu'ils suscitent sur la façon d'envisager l'évolution de la RV dans les années à venir.

I.1. Impact de la RV sur les processus psychologiques et cognitifs

Au cours de la *partie I* nous avons vu que la RV est un outil fiable dont la validité est effective sur les plans comportementaux et psychologiques. Il est donc possible de plonger l'utilisateur dans une autre réalité capable de modifier son comportement. Les différents travaux réalisés sur la validité comportementale dans un simulateur de conduite ont ainsi montré que le conducteur adapte son comportement de conduite en fonction de la situation simulée (courbure des virages, comportement des autres usagers).

Cette similitude comportementale est en grande partie rendue possible par le fort sentiment de présence qui peut être généré par les EV. J'ai ainsi, moi-même contribué à montrer que ces environnements sont susceptibles d'induire un sentiment de présence (au sens de la *Place Illusion* introduite par Slater, 2009), pouvant être identique à ce qui est ressenti dans la réalité (*Partie I section II.3.*). Cela même si le comportement de l'EV reste parfois

insuffisamment réaliste ou nécessite un apprentissage qui limite initialement l'ampleur de la *Plausibility Illusion* (Slater, 2009).

Le sentiment de présence est parfois si marqué que des phénomènes de capture sensorielle peuvent se produire. De nombreux travaux ont ainsi démontré qu'il devient parfois possible de tromper l'utilisateur sur son propre ressenti physique. Par exemple, Banakou, Groten & Slater (2013) ont montré que le schéma corporel perçu par un participant pouvait être influencé par la nature de l'avatar qui le représente dans l'EV. De même, il est possible de tromper l'utilisateur sur sa position dans l'espace. En témoignent, par exemple les études de Kokkinarra & Slater (2014) sur les ruptures de présence dans les EV. Ils montrent notamment qu'il est possible d'observer des mouvements réflexes au niveau des jambes d'un participant lorsqu'une table est enlevée soudainement de dessous ses jambes dans l'EV alors qu'elle n'a pas bougé dans la réalité. Cela s'accompagnant ensuite de la certitude que les jambes ne sont plus allongées sur la table dans la réalité alors que cela est toujours le cas.

L'impact de la présence dans les EV va même bien au-delà des simples réactions comportementales. Nous avons pu voir dans la *Partie I section II.1* que ces dernières s'accompagnent d'une sollicitation sur les plans cognitif et attentionnel assez similaire à ce qui peut être observé dans la réalité. De même, les EV peuvent parfois induire des réactions émotionnelles très fortes, telles que la surprise ou la peur. A tel point que ces environnements sont même utilisés depuis une dizaine d'années pour aider à lutter contre les phobies dans le cadre de thérapies cognitivo-comportementales (Bouchard, 2011). On observe également un fort impact sur les réactions sociales. Par exemple, Kastanis & Slater (2012) ont pu observer un comportement spontané de restauration de l'espace personnel lors d'une interaction avec un avatar simulant un comportement « intrusif », le conduisant à empiéter sur l'espace personnel de l'utilisateur de l'EV. Ce comportement inconscient, naturellement observé dans la réalité lors des interactions sociales (Smith & Faig, 2014), est un indicateur du fort sentiment de présence qu'un EV est capable de générer. Les auteurs nomment « présence inversée » cette faculté que peuvent avoir les EV à conduire l'individu à adopter inconsciemment un comportement donné; ce n'est plus l'EV qui réagit aux actions de l'utilisateur, mais l'utilisateur qui produit un comportement induit par l'EV.

Nous voyons que la revue du domaine de recherche dans lequel s'inscrivent mes travaux a permis de montrer que la RV peut avoir un impact fort sur l'individu, dans le sens où ce qui se passe dans l'EV peut être perçu à bien des égards comme « une » réalité à part entière. De ce point de vue les EV ne sont pas anodins et ne peuvent pas être considérés

comme de simples outils d'observation, même si, comme nous avons pu le voir, les possibilités sont multiples. L'utilisation d'un EV implique de contrôler à priori et à postériori les conséquences potentielles sur l'individu des événements qui s'y produisent, tant sur le plan comportemental que psychologique.

I.2. Collaboration dans les EVC

Dans les *parties 3 et 4* nous avons vu que les EVC étaient capables de favoriser de véritables échanges entre les utilisateurs, basés sur un RC efficace et permettant une réelle synergie entre eux. Nous avons notamment pu montrer que le RC qui s'y développe évolue au cours du temps permettant ainsi la mise en place de stratégies de gestion des coûts cognitifs liés à l'activité, comme par exemple, la stratégie du moindre effort collaboratif initialement démontrée par Schober (1995). Ce RC se caractérise, comme dans la réalité, par le partage des informations utiles à la réalisation commune de l'activité. Les contenus partagés correspondent à l'intersection des différentes connaissances individuelles et ne doivent pas nécessairement impliquer un recouvrement total. Ce partage doit cependant être suffisant pour favoriser chez les opérateurs des compréhensions compatibles et/ou complémentaires de l'activité.

Nous avons également pu montrer que les EVC induisent parfois l'utilisation de nouvelles formes de communication en favorisant l'exploitation de canaux sensoriels jusque là peu utilisés. Les EVC offrent ainsi de nouvelles possibilités de collaboration. Il est alors possible de se retrouver et partager une véritable activité commune au sein d'un EVC. De ce point de vue on peut considérer que la RV est susceptible d'accroître les échanges entre les individus, tout au moins entre ceux qui initialement ne pouvaient avoir que des échanges limités voir absents ; soit parce qu'ils étaient trop éloignés géographiquement ou qu'ils ne côtoyaient pas les mêmes lieux ou encore qu'ils ne pouvaient utiliser les moyens de communication adéquats.

I.3. Implications pour l'intervention en Ergonomie Cognitive

I.3.1. Développement d'outils d'évaluation et de formation.

Nous avons vu *Partie 2*, que la RV peut permettre de créer des situations expérimentales capables d'informer sur les mécanismes en jeu dans diverses activités comme la conduite automobile. Cela présente un intérêt immédiat pour les utilisateurs tant en termes de diagnostic que de formation ou de remédiation. Nous avons ainsi pu mettre en place

divers protocoles destinés à l'évaluation des aptitudes à la conduite, adaptés à différentes pathologies (déficit cognitifs, déficit visuels). Ces protocoles se sont avérés pertinents et susceptibles d'apporter des éléments de diagnostic utiles à la prise de décision quant à la capacité à conduire. Il devient alors également possible, en se basant sur le diagnostic posé, de proposer des protocoles de remédiation permettant d'aider à la reprise de la conduite. Dans ce cas la simulation n'est plus uniquement un outil de diagnostic mais aussi un dispositif de formation.

Les possibilités en terme de formation qu'offrent la RV ont également été montrées dans la *Partie 4* de ce document. Nous avons vu que les EVC peuvent favoriser le transfert de connaissances en permettant notamment de focaliser l'attention de l'apprenant sur des aspects de l'activité habituellement inaccessibles ou peu exploités.

1.3.2. Développement d'outil d'aide à la communication et à la compréhension de l'espace dans les EVC.

Dans la *Partie 3* de ce document, nous avons vu que les EVC peuvent très rapidement induire des difficultés de localisation spatiale des objets mais aussi des individus entre eux et dans l'espace simulé. Nos travaux ont contribué à apporter des solutions concrètes à ces problèmes. Nous avons notamment montré que la présence d'une RSF peut aider les opérateurs à adopter une représentation exocentrée commune de l'espace, facilitant ainsi la réalisation d'un RC efficace. En l'absence d'une RSF, les participants vont chercher à utiliser l'avatar de leur partenaire afin de combler ce manque. Néanmoins, dans les situations les plus complexes, ils privilégieront l'utilisation d'indices exocentrés externes à l'avatar. Le contenu de l'EVC doit donc être conçu de façon à faciliter au maximum l'utilisation d'un référentiel exocentré commun afin de réduire le coût cognitif des opérateurs tout en facilitant une représentation mutuelle de l'espace.

I.4. Conclusion

La première conclusion que l'on peut tirer de l'ensemble des travaux présentés ici est que la RV est un outil très prometteur offrant de multiples possibilités de recherche mais aussi d'aide à l'humain. La seconde conclusion que l'on peut en tirer est que l'utilisation de la RV nécessite un cadrage légal basé sur une réflexion éthique poussée permettant d'éviter les effets négatifs que son utilisation pourrait avoir sur l'individu (mal des simulateurs, difficultés à dissocier le réel de la simulation, induction de comportements, etc.) dans une vision

microscopique et sur la société d'un point de vue plus macroscopique. Néanmoins, il serait dommageable de ne pas utiliser cette technologie et de ne pas contribuer à son développement quand on voit les contributions notables qu'elle peut apporter sur les plans scientifiques et humains. Cela rend d'autant plus nécessaire de favoriser le développement d'une réflexion pertinente sur la façon dont les progrès en RV doivent être cadrés. Puisqu'il serait regrettable de se passer des avantages offerts par cette technologie, il faut donc se donner les moyens de le faire dans de bonnes conditions et de façon responsable. Ainsi, il semble irresponsable de projeter de diffuser sur le marché grand public des dispositifs de RV susceptibles de déconnecter totalement l'individu de la réalité sans penser aux conséquences sociales et psychiques que cela pourrait avoir sur lui.

Les risques sont encore probablement accentués par « l'embodiment » de tous ces artefacts technologiques. Ainsi, le parallèle peut-être fait avec les relations qui peuvent se développer via d'autres formes de technologies susceptibles de générer des comportements empathiques factices, comme les robots sociaux. A ce sujet, S. Turkle (2011) s'interroge sur la nature paradoxale d'une relation qu'établit une vieille dame en maison de retraite avec le robot phoque Paro « *in attempting to provide the comfort she believes it needs, she comforts herself. I do know that in the moment of apparent connection between Miriam and her Paro, a moment that comforted her, the robot understood nothing. Miriam experienced an intimacy with another, but she was in fact alone. Her son has left her, and as she looked to the robot, I felt that we had abandoned her as well.* ». Quel impact peut en effet avoir cette illusion de relation intime sur notre vie sociale ? A l'instar de la RV, on nous présente souvent ces évolutions technologiques comme dangereuses et susceptibles de nous isoler socialement. Pourtant de nombreux travaux montrent que ces émotions « synthétiques », de part leur caractère simplifié et contrôlable, peuvent aider à améliorer les capacités à développer des relations sociales de certaines personnes. Cela a pour l'instant été observé dans le cadre plus restreint, qu'est celui du handicap mais avec des résultats néanmoins très prometteurs. Comme le montrent, par exemple, les nombreux travaux réalisés avec les enfants ou adolescents souffrant de diverses formes d'autisme et interagissant avec de petits robots humanoïdes (Pennisi, Tonacci, Tartarisco, Billeci, Ruta, et al. 2015).

Ainsi, nous pouvons créer des liens très forts avec les objets virtuels ou réels associés aux nouvelles technologies, des liens de dépendances et aussi des liens affectifs. Comment envisageons-nous de gérer ces nouvelles formes de relations aux objets, qu'ils soient virtuels ou réels ? Risquent-elles de tromper nos attentes ou au contraire pourront-elles y répondre totalement ? En parlant des robots sociaux, Tisseron (2015) s'inquiète : « Leur introduction ne

va-t-elle pas provoquer un gigantesque quiproquo entre ce que ces robots nous proposeront et la place que nous serons prêts à leur donner dans nos vies ? ». Cependant, à l'instar du personnage de Butler (1920) qui s'inquiète face à l'incapacité de maîtriser les évolutions de nouvelles machines qui sont « (...) *en train de devenir quelque chose de différent que ce qu'elles sont à présent.* » on peut se voir objecter qu'« (...) *en réalité, il faut considérer les machines comme le mode de développement par lequel l'être humain est en train de se perfectionner* ». On peut ainsi voir l'insertion de la technologie dans nos vies comme une nouvelle forme d'évolution. Celle-ci peut-être très positive, à nous de nous responsabiliser et d'en cadrer intelligemment les contours dans le respect des règles d'éthiques.

La suite de mon activité de recherche s'inscrira dans cette optique et est détaillée dans la section suivante.

II. Perspectives de recherche

Les travaux de recherches que j'envisage de poursuivre sont en lien direct avec ceux présentés dans ce document. Comme je l'ai souligné précédemment, ils sont également le fruit de mes évolutions théoriques et conceptuelles à la faveur des échanges avec les différents collaborateurs avec qui j'ai eu le plaisir de travailler. Il m'apparaît essentiel aujourd'hui de poursuivre ces recherches dans le respect des règles éthiques et dans le souci de préserver les futurs utilisateurs des outils technologiques que j'aurai directement ou indirectement contribué à concevoir et développer. Il me semble être de mon devoir de chercheur de placer mes travaux dans le cadre d'une véritable réflexion sur leur impact potentiel (positif et négatif) ainsi que sur les solutions à proposer. Cette réflexion doit à mon sens être menée de façon multidisciplinaire et concerne aussi bien l'ergonomie cognitive, la sociologie, la philosophie des sciences que l'informatique ou la robotique.

Mes travaux de recherche continueront à porter sur l'opérateur humain au sein des systèmes homme-machine. Un poids fort sera accordé à l'interdisciplinarité notamment avec les Sciences pour l'ingénieur (informatique, robotique) et les SHS (en particulier les sciences sociales, le Design et la philosophie des sciences). Dans ce cadre mes travaux se poursuivent autour des thématiques suivantes :

- Evaluation des processus cognitifs et perceptifs en conduite automobile.
- Collaboration dans les EVC.
- Interaction sociale en robotique humanoïde.

II.1. Evaluation des processus cognitifs et perceptifs en conduite automobile

II.1.1. Processus d'adaptation des stratégies d'exploration visuelle

Mes travaux porteront notamment sur l'identification des processus d'adaptation via l'analyse de l'exploration visuelle chez les personnes souffrant d'une atteinte du champ visuel à travers les projets *Visio* et *Glaucome*.

L'enjeu principal pour les patients atteints de neuropathie optique est de savoir s'ils vont pouvoir continuer à réaliser leurs tâches quotidiennes. Parmi celles-ci, la conduite automobile, synonyme d'autonomie dans ses déplacements, est particulièrement cruciale. Les tests ophtalmologiques standards ne permettent pas toujours d'apporter une réponse au patient car, de nature statique et hors contexte de conduite, ils ne permettent pas de tenir compte de la mise en place de stratégies de compensation qui s'avèrent parfois très efficaces. Le recours à des tests de performance au travers de la mise en situation réelle ou à minima « écologiques » s'impose donc. Le simulateur de conduite peut s'avérer très utile dans ce cas en permettant de plonger le patient dans une situation à la fois écologique, contrôlée expérimentalement et sans danger réel même en situation critique.

Plusieurs études ont déjà cherché à évaluer en simulateur, les conséquences d'une pathologie neurovisuelle sur la conduite. Il a été montré par exemple que des patients dont le champ visuel périphérique est atteint, empiètent plus souvent sur les bords de voie que lorsque le trouble concerne la vision centrale. D'autres travaux montrent que les conducteurs avec une atteinte du champ visuel central conduisent significativement moins vite et ont un temps avant collision minimum (TCmin) plus court que les patients avec atteinte du champ visuel moyen (Coeckelbergh, Cornelissen, Brouwer, Wolffelaar & Kooijman, 2002). Cela laisse supposer que les conducteurs avec atteinte du champ visuel central ont un temps de réaction plus long aux changements de vitesse du véhicule les précédant, ce qui se traduit par une réduction des distances de sécurité et les incite à ralentir.

La plupart des travaux existants montrent que certains patients sont capables de mettre en place des stratégies de compensation à la fois comportementales et perceptives (adaptation de l'exploration visuelle). Une étude récente appuie cette hypothèse (Crabb, Smith, Rauscher, Chisholm, Barbur, et al., 2010). Elle a comparé le visionnage de scènes routières chez les patients glaucomateux et leurs contrôles. Les résultats montrent un nombre de saccades et de fixations plus importantes chez les patients glaucomateux que chez les participants contrôles, avec des durées de fixation plus courtes, ce qui suggère une compensation de la diminution du champ visuel par une augmentation de la fréquence d'échantillonnage de la scène. Jusqu'à

présent il n'a pas été possible de définir les limites de ce type d'adaptation, notamment concernant la façon dont ces conducteurs parviennent à gérer les événements imprévus et critiques.

L'utilisation d'un simulateur de conduite pour l'évaluation permettra la mise au point de scénarios spécifiques, parfaitement contrôlés du point de vue expérimental et adaptés aux différents types de rétrécissements du champ visuel observé. En plus d'être une aide à la décision pour déterminer l'aptitude à conduire, l'analyse du comportement lors de la passation de ces tests peut renseigner :

- sur les processus sensorimoteurs et cognitifs impactés par le déficit visuel.
- sur les mécanismes de compensation mis en œuvre par les patients et sur les conditions de leurs mises en défaut.
- sur les éventuels apprentissages à mettre en place chez les patients pour leur apprendre les stratégies de compensation efficaces tout en ayant conscience de leurs limites.

Par ailleurs, en prenant en compte la probabilité estimée d'occurrence de chaque situation, ces scénarios serviront de base pour la mise au point d'un test d'évaluation des aptitudes à la conduite des patients atteints de neuropathie optique.

A ce jour, des scénarios spécifiques ont été conçus sur le simulateur de conduite de l'IRCCyN en collaboration avec le centre d'Ophtalmologie de la Clinique Jules Vernes de Nantes. Ces scénarios incluent des tests destinés à mesurer le champ visuel en situation statique comparativement à une situation dynamique de conduite (figure 5 .1). Les passations expérimentales sont actuellement en cours sur le simulateur.

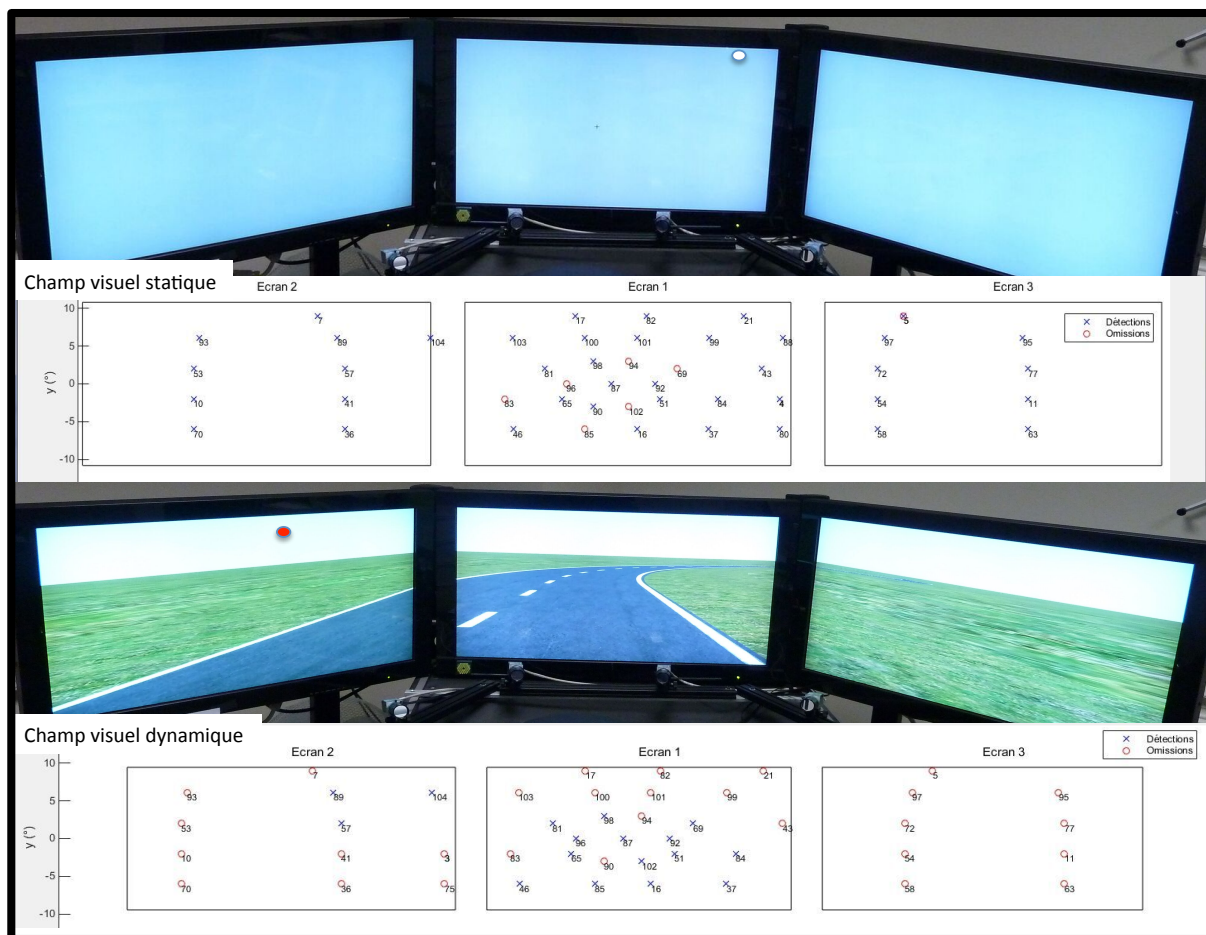


Figure 5.1: Exemple de champ visuel mesuré chez un patient en situation statique (les participants ne conduisent pas le simulateur et le fond visuel est neutre) et dynamique (pendant la conduite). Un point lumineux apparaît de façon aléatoire sur les trois écrans du simulateur. Les participants doivent signaler par une pression du comodo gauche chaque fois qu'ils ont détecté ce point. Les données montrent un rétrécissement du champ visuel lors de la conduite (augmentation des omissions indiquées par les cercles rouges et diminution des détections indiquées par les croix bleues dans la zone périphérique du CV).

II.1.2. Processus d'adaptation lors d'une détérioration des fonctions exécutives chez la personne âgée

Mes travaux devraient également se poursuivre chez les personnes âgées grâce à ma participation au projet LMA et mon implication dans les nouveaux projets de recherches en cours de dépôt et issus de LMA. Il s'agit d'un projet intégrant des chercheurs en géographie (ESO, Université de Nantes), en sociologie (CENS, Université de Nantes), en psychologie (LPPL, Université de Nantes), en STAPS (MIP, Université de Nantes), en Gériatrie (Unité d'investigation Clinique de Gériatrie clinique –Pôle hospitalo-universitaire de Gériatrie Clinique - CHU Nantes) et en ergonomie cognitive (CNRS, IRCCyN). Mon implication particulière permettra de compléter les outils dédiés à l'évaluation des indicateurs du fonctionnement cognitif des PAA (évaluation du statut cognitif, des fonctions exécutives, de la vitesse de traitement, les capacités verbales et de la mémoire). De nombreuses personnes

âgées continuent de conduire en adaptant leur conduite à leurs capacités actuelles (mise en place de stratégies d'évitement, limitation de la vitesse de conduite...). L'objectif est donc d'évaluer les aptitudes à la conduite des personnes âgées à l'aide du simulateur de conduite dont dispose PsyCoTec, et sur lequel ont été développés de nombreux scénarios spécifiques destinés à tester l'attention, l'anticipation, la planification et la mise en place de stratégies de conduite particulières (figure 5.2).

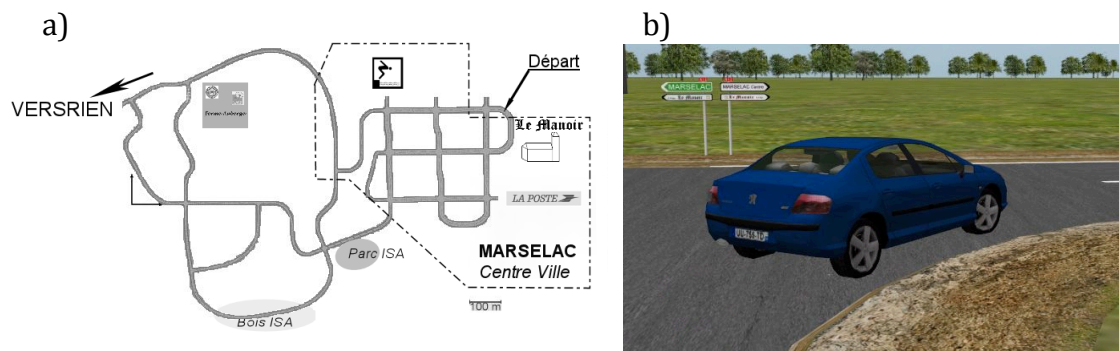


Figure 5.2 : a) circuit à contraintes et choix multiples destiné à tester les fonctions exécutives. b) vue de l'EV de conduite

II.2. EVC et créativité

Mes travaux concernant la collaboration dans les EVC se poursuivront dans la ligné de ceux réalisés jusqu'à présent. Je bénéficierai par ailleurs de l'intégration récente de Cédric Dumas (chercheur en IHM à l'EMN) dans l'équipe PsyCoTec. Ses compétences en communication haptique dans les EVC nous permettront d'enrichir nos protocoles de recherche et de définir des interfaces de communication innovantes. Nous avons pu voir précédemment que la RV permet de préserver le ressenti de utilisateur lors de l'interaction avec de nombreux objets virtuels. Elle permet même de favoriser l'émergence de nouvelles formes de communication et d'échanges via l'exploitation de moyens d'interaction jusqu'alors inaccessibles à l'individu. Il semble donc intéressant et prometteur de poursuivre les recherches dans cette direction et notamment en nous axant sur la dimension créative associée à la qualité et l'originalité du ressenti utilisateur que peut offrir la RV.

Une réponse à l'appel à projet dans le cadre du RFI Atlanstic est actuellement en cours de préparation sur la thématique de la co-conception créative en RV en partenariat avec l'école de Design de Nantes et le CIRV (Centre Industriel de Réalité Virtuelle) de Saint Nazaire (intégré au TechnocampusSmart Factory de Nantes). L'objectif est de définir les bases d'une méthode d'animation de séances d'innovation créative grâce aux technologies de

Réalité Virtuelle. Ceci afin de favoriser la créativité en équipe et sur la base de méthodes existantes et validées en design créatif.

II.3. Interactions sociales et Robotique Humanoïde

Cette problématique de recherche initiée par une collaboration avec le GVLab (TUAT, Tokyo) s'est concrétisée autour du dépôt d'un projet ANR en 2016 ainsi qu'un projet Européen dans le cadre de l'appel H2020 (SC1-PM-14-2016) dont j'étais le porteur (figure 5.3). Bien que ces projets n'aient pas été financés, ils ont permis la création d'un réseau de recherche Européen et international (impliquant le GVLab au Japon) autour de la question de la robotique sociale et fondé sur une collaboration forte entre psychologie, design, robotique, informatique, sociologie, philosophie des sciences et gérontologie. Les évaluations très positives que les deux projets ont reçues nous ont confortées dans notre volonté de poursuivre notre réflexion commune et notre implication dans ce projet de recherche commun. Une réponse à l'appel à projet SC1-PM15-2017, dont je reste le porteur, est actuellement en cours de préparation et intègre de nouvelles compétences en Intelligence Artificielle et Empathie Artificielle. Notre projet a pour but de préserver l'autonomie des personnes en situation de rupture (départ à la retraite, accident de vie, apparition d'une longue maladie) en les stimulant via une interaction régulière avec un robot humanoïde empathique. Le robot leur proposerait des exercices simples visant au maintien des fonctions cognitives (mémoire et attention) et des gestes du quotidien impliquant les membres supérieurs (saisie d'objets, écriture) et envisagés comme support pour travailler sur les dimensions sociales et psychoaffectives. Ce projet repose sur deux contributions majeures : 1- Le robot serait capable de montrer (via l'imitation) aux utilisateurs les gestes liés aux activités proposées tout en les adaptant à leur état psychoaffectif. 2- L'impact de l'interaction avec ce robot empathique serait évalué sur le court et le long terme du point de vue de la dépendance, de l'humeur et du lien social au quotidien. Un poids important sera accordé aux questions socio-éthiques soulevées par la création d'une relation empathique avec un objet non-humain.

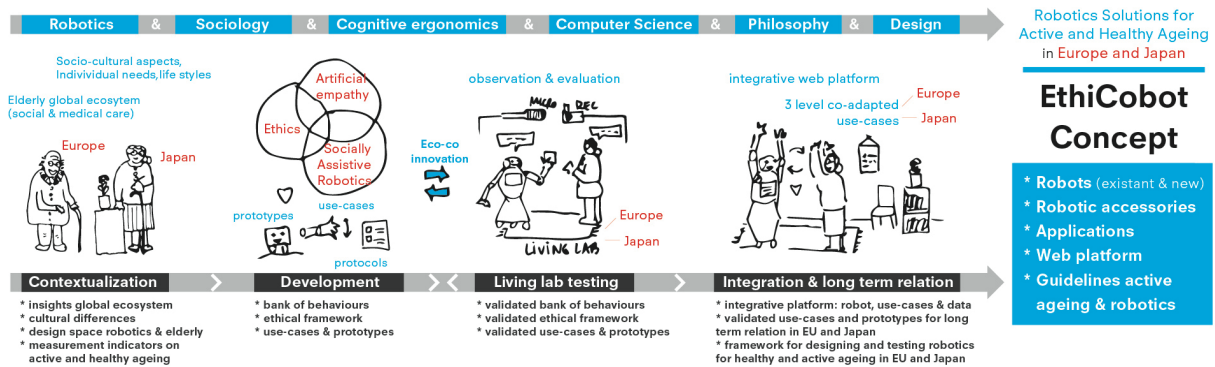


Figure 5.3 : Objectifs généraux du projet Européen EthiCobot déposé en 2016.

Afin de ne pas basculer dans le « gigantesque quiproquo » auquel fait référence Tisseron (2015) au sujet des attentes suscitées par les robots humanoïdes chez les utilisateurs, nous respecterons un principe fondamental dans la position et le statut du robot vis à vis de la personne : les capacités empathiques du robot et son aptitude à identifier l'état émotionnel et physique de la personne ne devront pas servir à en faire un remplaçant de l'humain. Elles devront au contraire permettre au robot d'informer la personne sur ses besoins et de l'orienter vers le bon interlocuteur et éventuellement, de faire lui-même la démarche auprès de cet interlocuteur. Par exemple, en envoyant un message de signalement à la famille : « madame X semble un peu déprimée ce matin, il serait bon de lui téléphoner ». Ou encore le robot pourra prévenir l'équipe soignante : « madame X avait du mal à marcher ces deux derniers jours, il faudrait peut-être avancer son RDV de contrôle chez le kinésithérapeute ». De cette façon nous éviterons qu'un lien « intime » et affectif trop fort puisse se créer avec le robot au détriment de celui entretenu avec les pairs. Ce qui à terme pourrait entraîner une mécompréhension du véritable statut du robot et un isolement de la personne à l'instar de ce que Turkel (2011) observait au sujet de cette pensionnaire de maison de retraite, repliée sur elle-même mais illusionnée par une relation empathique factice avec le robot phoque Paros.

Références bibliographiques

- Anderson, S. W., Rizzo, M., Shi, Q., Uc, E. Y., & Dawson, J. D. (2005). Cognitive abilities related to driving performance in a simulator and crashing on the road. *Proceedings of the Third International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design* (pp. 286–292). Iowa City, IA: University of Iowa.
- Axelsson, A.S., Abelin, A., & Schroeder, R. (2003). Communication in Virtual Environments: Establishing Common Ground for a Spatial Collaborative Task, In *Presence 2003: 6th Annual International Workshop on Presence* URL: <http://www.presence-research.org>.
- Baddeley, A.D., & Sala Della, S. (1996). Working memory and executive control. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 351, 1397–1404.
- Ball, K., Clay, O., Wadley, V., Roth, D., Edwards, J., & Roenker, D. (2005). Predicting driving performance in older adults with the useful field of view test: A meta-analysis. *Proceedings of the Third International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design*. Maine, p 51–57.
- Banakou, D., Groten, R., & Slater, M. (2013). Illusory ownership of a virtual child body causes overestimation of object sizes and implicit attitude changes. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2013 Jul 30;110(31):12846-51. doi: 10.1073/pnas.1306779110.
- Bella, F. (2008). Driving simulator for speed research on two-lane rural roads, *Accident Analysis and Prevention*, 40, 1078-1087.
- Basdogan, C., Ho, C., Srinivasan, M. A., & Slater, M. (2000). An experimental study on the role of touch in shared virtual environments. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, 7 (4), 443-460.
- Bénech, P. (2005). Apprentissage collaboratif et coopératif <http://www.dismoitic.net/-Apprentissage-collaboratif-et-.html>.
- Bittner, A. C., Simsek, O., Levison, W. H., & Campbell, J. L. (2002). On-road versus simulator data in driver model development. Driver performance experience. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, 1803, 38–44.
- Blade, R. A., & Padgett, M. L. (2002). Virtual Environments Standards and Terminology. Handbook of Virtual Environments. In K. M. Stanney (Eds.), *Design, Implementation and Applications* (pp. 15-27), Mahwah, NJ, Lawrence Erlbaum associates.
- Blouin, J., Bard, C., Teasdale, N., Paillard, J., Fleury, M., Forget, R., & Lamarre, Y. (1993). Reference systems for coding spatial information in normal subjects and a deafferented patient. *Experimental Brain Research*, 93, 324-331.
- Bluteau, J., Coquillart, S., Payan, Y., & Gentaz, E. (2008). Haptic guidance improves the visuo-manual tracking of trajectories. *PLoS ONE*, 3 (3), e1775.
- Boer, L. C. (1991). Mental rotation in perspective problems. *Acta Psychologica*, 76(1), 1–9.
- Bouchard (2011). Could virtual reality be effective in treating children with phobias ? *Expert Review of neurotherapeutics*, 11(2), 207-213.
- Bouchard, S., Robillard, G., Renaud, P., & Bernier, F. (2011). Exploring new dimensions in the assessment of virtual reality induced side effects. *Journal of Computer and Information Technology*, 1(3), 20-32.
- Bouchard, S., St-Jacques, J., Robillard, G., & Renaud, P. (2008). Anxiety increases the feeling of presence in virtual reality. *Presence* 17, 376–391. doi:10.1162/pres.17.4.376.
- Bourbousson, J., Poizat, G., Saury, J., & Seve, C. (2011). Description of dynamic shared knowledge : an exploratory study during a competitive team sports interaction. *Ergonomics*, 54(2), 120-138.
- Bowers, A.R., Mandel, A.J., Goldstein, R.B., & Peli, E. (2009). Driving with hemianopia, I: Detection performance in a driving simulator. *Invest Ophthalmol Vis Sci.*,50(11), 5137-47. Doi: 10.1167/iovs.09-3799.
- Brennan, S.E. (1998). The Vocabulary Problem in Spoken Dialogue Systems. In S. Luperfoy (Ed.), *Automated Spoken Dialog Systems*. Cambridge, MA: MIT Press.

- Brookhuis, K.A., & de Waard, D. (2010). Monitoring drivers' mental workload in driving simulators using physiological measures. *Accident Analysis and Prevention*, 42, 898-903.
- Brooks, J.O., Goodenough, R.R., Crisler, M.C., Klein, N.D., Alley, R.L., Koon, B.L., Logan jr, W.C., Ogle, J.H., Tyrrell, R.A., & Wills, R.F. (2010). Simulator sickness during driving simulation studies. *Accident Analysis and Prevention*, 42, 788-796.
- Bryant, D. J., & Tversky, B. (1999). Mental representations of perspective and spatial relations from diagrams and models. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 25(1), 137.
- Bryant, D. J., & Wright, G. W. (1999). How body asymmetries determine accessibility in spatial frameworks. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology: Section A*, 52(2), 487-508.
- Burgess, N. (2008). Spatial cognition and the Brain. *Ann. N.Y. Acad. Sci.*, 1124, 77-97
- Burkhardt, J.M. (2007). Immersion, représentation et coopération : discussion et perspectives de recherches empiriques pour l'ergonomie cognitive de la Réalité Virtuelle. *Intellectica 1(45)*, 59-87.
- Butler, S. (1920). *Erewhon ou de l'autre côté des montagnes*. Gallimard. ISBN : 2070222128.
- Casutt, G., Theill, N., Martin, M., Keller, M., & Jäncke, L. (2014). The drive-wise project : driving simulator training increases real driving performance in healthy older drivers. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 13; 6:85, Doi: 10.3389/fnagi.2014.00085.
- Cegarra, J., & Morgado, N. (2009). Étude des propriétés de la version francophone du NASA-TLX. *Communication présentée à la cinquième édition du colloque de psychologie ergonomique (Epique)*, Nice, France.
- Chan, E., Pradhan, A.J., Pollatsek, A., Knodler, M.A. & Fisher, D. L., (2010). Are driving simulators effective tools for evaluating novice drivers' hazard anticipation, speed management, and attention maintenance skills? *Transportation Research Part F*, 13, 343-353.
- Charlton, S.G. (2009). Driving while conversing: Cell phones that distract and passengers who react. *Accident Analysis and Prevention*, 41 (160-173).
- Charron, C., Hoc, J.M. & Milleville-Pennel, I. (2010). Cognitive control by brain-injured car drivers. An exploratory study, *Ergonomics*, 53(12),1434-1445.
- Chellali, A. (2009). *Etude des interactions homme-homme pour l'élaboration du référentiel commun dans les environnements virtuels collaboratifs*. Unpublished doctoral dissertation, University of Nantes.
- Chellali, A., Milleville-Pennel, I., & Dumas, C. (2013). Influence of Contextual Objects on Spatial Interactions and viewpoints sharing in Virtual Environments. *Virtual Reality Journal*, 17(1),1-15.
- Chellali, A., Dumas, C., & Milleville-Pennel, I. (2012). Haptic communication to support biopsy procedures learning in virtual environments. *PRESENCE: Teleoperators and Virtual Environments*, 21(4), 470-489.
- Chellali, A., Dumas, C., & Milleville-Pennel, I. (2011). Influence of haptic communication on a shared manual task. *Interacting with Computers*, 23(4), 317-328.
- Chellali, A., Dumas, C., & Milleville, I. (2010). Haptic communication to enhance collaboration in virtual environments. In Proceedings of the the European Conference on Cognitive Ergonomics ECCE2010, Delft, The Netherlands. pp. 83-90.
- Chellali, A., Dumas, C., & Milleville, I. (2010). WYFIWIF: A haptic communication paradigm for collaborative motor skills learning. In Proceedings of the International Conference on Web Virtual Reality and Three-Dimensional Worlds (WEB3DW 2010). Freiburg, Germany. pp. 301-308.
- Clark, H.H. (1996). *Using Language*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Clark, H.H., & Brennan, S.E. (1991). Grounding in Communication. In L.B. Resnick, J. Levine, S.D. Teasley (Eds.), *Perspectives on Socially Shared Cognition*. Washington D.C.: APA, pp. 127-149.
- Coeckelbergh, T. R., Cornelissen, F. W., Brouwer, W. H., Wolffelaar, P. V., & Kooijman, A. C. (2002). The Effect of Visual Field Defects on Driving Performance, *Arch Ophthalmol* 120(11),1509-1516.
- Coelho, C.M., Waters, A.M., Hine, T.J. & Wallis, G. (2009). The use of virtual reality in acrophobia research an treatment. *Journal of Anxiety Disorders*, 23, 563-574.

- Crabb, D. P., Smith, N. D., Rausher, F. G., Chisholm, C. M., Barbur, D. E., Edgar, D. F., & Garway-Heath, D. F. (2010). Exploring Eye Movements in Patients with Glaucoma When Viewing a Driving Scene. *PLoS ONE*, 5(3). <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0009710>.
- Crundall, D., & Underwood, G. (1998). Effects of experience and processing demands on visual information acquisition in drivers. *Ergonomics*, 41, 448–458.
- Damasio, HC. (1995). On some functions of the human prefrontal cortex. In Grafman J, Holyoak KJ, Boller F, (Eds). Structure and functions of the human prefrontal cortex. *Special issue of Annals of the New York Academy of Sciences*, 769, 241–251.
- Dillenbourg, P. (1999). What do you mean by collaborative learning? In P. Dillenbourg (Ed.), *Collaborative learning: Cognitive and Computational Approaches*. Oxford: Elsevier Science, , pp. 1-19.
- DiZio, P., & Lackner, J.R. (2000). Motion sickness side effects and aftereffects of immersive virtual environments created with helmet-mounted visual displays. In NATO RTO-MP-54, *The Capability of Virtual Reality to Meet Military Requirements*, pp 11-1–11-4.
- Dobie, T., McBride, D., Dobie Jr., T., & May, J. (2001). The effects of age and sex on susceptibility to motion sickness. *Aviat. Space Environ. Med.* 72, 13–20.
- Duncan, J. (1986). Disorganisation of behaviour after frontal lobe damage. *Cognitive Neuropsychology*, 3, 271–290.
- Drexler, J. (2006). *Identification of system design features that affect sickness in virtual environments*. Ph.D. dissertation, University of Central Florida, United States – Florida. Retrieved November 21, 2008, from Dissertations Theses: full text database (publication no. AAT 3210350).
- Endsley, M. R. (1995). Toward a theory of situation awareness in dynamic systems. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 37(1), 32–64.
- Erickson, T. (1993). From Interface to Interplace: The Spatial Environment as a Medium for Interaction. In *the Proceedings of Conference on Spatial Information Theory*.
- Faglioni, P. (1998). The Frontal lobe. In: Denes G, Pizzamiglio L, (Eds). *Handbook of clinical and experimental neuropsychology*. London: Psychology Press, Taylor and Francis, pp 525–569.
- Falkmer, T., & Gregersen, N. A. (2005). comparison of eye movement behaviour of inexperienced and experienced drivers in real traffic environments. *Optometry and Vision Science*, 82, 332–339.
- Feygin, D., Keehner, M., & Tendick, F. (2002). Haptic Guidance: Experimental Evaluation of a Haptic Training Method for a Perceptual Motor Skill. In *Proceedings of the 10th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems: HAPTICS'02* , 40-47.
- Fox, G.K., Bowden, S.C., & Smith, D.S. (1998). On-road assessment of driving competence after brain impairment: review of current practice and recommendations for a standardized examination. *Archives of Physical Medecine & Rehabilitation*, 79, 1288-1296.
- Galati, A., & Avraamides, M. N. (2014). Social and Representational Cues Jointly Influence Spatial Perspective-Taking. *Cognitive science*, 39(4), 739-765.
- Galati, G., Pelle, G., Berthoz, A., & Committeri, G. (2010). Multiple reference frames used by the human brain for spatial perception and memory. *Exp Brain res*, 206, 109-120.
- Gamache, PL., Lavallière, M., Tremblay, M., Simoneau, M., & Teasdale, N. (. (2011). In-simulator training of driving abilities in a person with a traumatic brain injury. *Brain Inj.*, 25(4), 416-25. Doi: 10.3109/02699052.
- Gauthier, J., & Bouchard, S. (1993). Adaptation canadienne-francaise de la version revise du state-trait anxiety inventory de Spielberger. *Can. J. Behav. Sci.* 25 (4), 559–589.
- Gaver, W.W., Sellen, A., Heath, C., & Luff, P. (1993) One is not enough: multiple views in a media space. In: *Proceedings of INTERCHI*, pp 335–341.
- Gerhard, M., Moore, D. J., & Hobbs, D. J. (2001). Continuous presence in collaborative virtual environments: Towards a hybrid avatar-agent model for user representation. In A. de Antonio, R. Aylett, and D. Ballin (Eds.), *IVA 2001, LNAI 2190*, pp. 137–155.
- Giboin, A. (2004). La construction de référentiels communs dans le travail coopératif. Dans J. Hoc, & F. Darses (Éds.), *Psychologie ergonomique tendances actuelles* (pp. 119-139). Paris: Presses Universitaires de France.
- Gibson, J.J. (1979). *The ecological approach of visual perception*. Boston, Houghton Mifflin Co.

- Gillespie, R. B., O'Modhrain, M., Tang, P., Zaretsky, D., & Pham, C. (1998). The virtual teacher. In *Proceedings of the ASME International Mechanical Engineering Conference and Exposition*.
- Godley, S.T., Triggs, J.T., & Fildes, B.N., (2002). Driving simulator validation for speed research. *Accident Analysis & Prevention* 34, 589–600.
- Golding, J.F. (2006). Motion sickness susceptibility. *Autonomic Neuroscience: Basic and Clinical*, 129, 67-76.
- Gorini, A., Capideville, C.S., DeLeo, G., Mantovani, F., & Riva, G. (2011). The role of immersion and narrative immediate presence : the virtual hospital experience. *Cyberpsychol Behav Soc Netw*, 14, 99–105. doi:10.1089/cyber.
- Gorman, J.C., Cooke, N.J., & Winner, J.L., (2006). Measuring team situation awareness in decentralized command and control environments. *Ergonomics*, 49, 1312–1325.
- Haut, M., & Shetty, M. (1992). Pattern of verbal learning after closed head injury. *Neuropsychology*, 6, 51–58.
- Harm, DL., (2002) Motion sickness neurophysiology, physiological correlates, and treatment. In: Stanney KM (ed) *Handbook of virtual environments: design, implementation, and applications*. Erlbaum, Mahwah, pp 637- 661.
- Hart, S.G., & Staveland, L.E. (1988). Development of NASA-TLX (Task Load Index) : Results of empirical and theoretical reasearch. In P.A. Hancock & N. Meshkati (Eds.). *Human Mental Workload* (pp. 239-250). Amsterdam : North Holland Press.
- Heuer, H., & Su'izenbru'ck, S. (2013). Towards mastery of complex visuo-motor transformations. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7. doi: 10.3389/fnhum.2013.00032
- Hill, K.J., & Howarth, P.A. (2000). Habituation to the side effects of immersion in a virtual environment. *Display*, 21, 25-30.
- Hindmarsh, J., Fraser, M., Heath, C., Benford, S., & Greenhalagh, C. (1998) Fragmented interaction: establishing mutual orientation in vir- tual environments. In: *Proceedings of the ACM 1998 conference on computer-supported cooperative work*, pp 217–226
- Hintzman, D. L., O'Dell, C. S., & Arndt, D. R. (1981). Orientation in cognitive maps. *Cognitive Psychology*, 13, 149–206.
- Hoc, J.M. (2003). *Coopération humaine et systèmes coopératifs. Ingénierie Cognitive*. France: Lavoisier.
- Horberry, T., Anderson, J., Regan, M.A., Triggs, T.J., & Brown, J. (2006). Driver distraction: The effects of concurrent in-vehicle tasks, road environment complexity and age on driving performance. *Accident Analysis and Prevention*, 38, 185-191.
- Jamson, S.L., & Jamson, A.H. (2010). The validity of a low-cost simulator for the assessment of the effects of in-vehicle information systems. *Safety Science*, 48, 1477-1483.
- Jahn, G., Oehme, A., Krems, J.F., & Gelau, C. (2005). Peripheral detection as a workload measure in driving: Effects of traffic complexity and route guidance system use in a driving study. *Transportation research Part F*, 8, 255-275.
- Johnson, M.J., Chahal, T., Stinchcombe, A., Mullen, N., Weaver, B. & Bedard, M. (2011). Physiological responses to simulated and on-road driving. *International Journal of Psychophysiology*, 81, 203-208.
- Kastanis, I., & Slater, M. (2012). Reinforcement learning utilizes proxemics: An avatar learns to manipulate the position of people in immersive virtual reality. *ACM Transactions on Applied Perception (TAP)*, 9(1), 3.1-3.15.
- Kennedy, R.S., Lane, N.E., Berbaum, K.S., & Lilienthal, M.G. (1993). Simulator Sickness Questionnaire (SSQ): A new method for quantifying simulator sickness. *International Journal of Aviation Psychology*, 3(3), 203-220.
- Kimura, D. (2001). *Cerveau d'homme, cerveau de femme ?*. Odile Jacob, Paris.
- Kirschbaum, C., Pirke, K.M., & Hellhammer, D.H. (1993). The trier social stress test – a tool for investigating psychobiological stress responses in a laboratory setting. *Neuropsychobiology* 28, 76–81.
- Klinger, E., & Joseph, P.A. (2008). Rééducation des troubles cognitifs par réalité virtuelle. In Froger J, Pélissier J, (Eds). *Rééducation instrumentalisée après cérébrolésion vasculaire*. Paris: Masson, pp.149-165

- Kokkinara, E., & Slater, M. (2014). Measuring the effects through time of the influence of visuomotor and visuotactile synchronous stimulation on a virtual body ownership illusion. *Perception, 43*(1), 43-58.
- Kolb, B., & Whishaw, I. (2002). *Cerveau et comportement*. De Boeck Université.
- Koscik, T., O'Leary, D., Moser, D.J., Andreasen, N.C., & Nopoulos, P. (2009). Sex differences in parietal lobe morphology: Relationship to mental rotation performance. *Brain Cognition, 69*, 3, 451-459.
- Krauss, R. M., & Fussell, S. R. (1991). Perspective-Taking in Communication: Representations of Others Knowledge in Reference. *Social Cognition, 9*, 2-24.
- Kuziemsky, C.E., & O'Sullivan, T. (2015). A model for common ground development to support collaborative health communities. *Social Science & Medicine, 128*, 231-238.
- Land, M.F. (1998). The visual control of steering. In: Harris LR, Jenkins H, (Eds). *Vision and action*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, pp 163–180.
- Land, M.F. (2001). Does steering in car involve perception of the velocity flow field? In: Zanker JM, Zeil J, (Eds). *Motion vision: Computational, neural and ecological constraints*. Berlin Heidelberg, New York: Springer Verlag, pp 227–235.
- Land, M.F. (2006). Eye movements and the control of actions in everyday life. *Progress in Retinal and Eye Research, 25*, 296–324.
- Land, M.F. (2016). Do we have an internal model of the outside world ? *Phil. Trans. R. Soc. B 369*: 20130045. <http://dx.doi.org/10.1098/rstb.2013.0045>.
- Land, M.F., & Horwood, J. (1996). The relation between head and eye movements during driving. In A.G., Gale, I.D., Brown, C.M., Haslegrave, & S.P., Taylor (Eds). *Vision in Vehicules-V*. (pp. 153-160). Elsevier Science, Amsterdam.
- Lane, N. E., & Kennedy, R. S. (1988). *A new method for quantifying simulator sickness: Development and application of the simulator sickness questionnaire (SSQ)* (Report No. EOTR 88-7). Orlando, FL: Essex Corporation.
- Land, M.F., & Lee, D.N. (1994). Where wee look when wee steer. *Letters to Nature, 369*, 742–744.
- Lathan, C., Cleary, K., & Traynor, L. (2000). Human-Centered Design of a Spine Biopsy Simulator and the Effects of Visual and Force Feedback on Path-Tracking Performance. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments, 9* (4), 337-349.
- Lawson, B.D., Graeber, D.A., Mead, A.M., & Muth, E.R. (2002). Signs and symptoms of human syndromes associated with synthetic experiences. In K.M. Stannay (Eds.) *Handbook of Virtual Environments* (pp. 589-618). New Jersey: Erlbaum.
- Lawther, A., & Griffin, M.J. (1988). Motion sickness and motion characteristics of vessels at sea. *Ergonomics 31*, 1373–1394.
- Lechner, D., Delanne, Y., Schaefer, G., & Schmitt, V. (1997). Methodologie de validation du logiciel de dynamique automobile CALLAS. SIA 970202. In *Congree's SIA Lyon, Avril 1997*. Reprinted in *Ingénieurs de l'Automobile*, No. 713.
- Lecuyer, A. (2009). Simulating haptic feedback using vision: A survey of research and applications of pseudo-haptic feedback. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments, 18*(1), 39–53.
- Lemay, M., & Proteau, L. (2003). Aging effects pointing to unseen targets encoded in an allocentric frame of reference. *Exp Aging Res, 29*(3), 319-33
- Lew, H. L., Poole, J. H., Lee, E. A., Jaffe, D. L., Huang, H. C., & Brodd, E. (2005). Predictive validity of drivingsimulator assessments following traumatic brain injury: A preliminary study. *Brain Injury, 19*, 177–188.
- Levine, S. C., Vasilyeva, M., Lourenco, S. F., Newcombe, N. S., & Huttenlocher, J. (2005). Socioeconomic status modifies the sex difference in spatial skills. *Psychological Science, 16*(11), 841-845.
- Livingstone, S.A., & Skelton, R.W. (2007). Virtual environment navigation tasks and the assessment of cognitive deficits in individuals with brain injury. *Behavioural Brain Research, 185*, 21–31.
- Loiselet, A., & Hoc, J.M. (2001). La gestion des interférences et du référentiel commun dans la coopération: implications pour la conception. *Psychologie Française, 46*, 167-179.
- Loula, F., Prasad, S., Harber, K., & Shiffrar, M.(2005). Recognizing people from their movement. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 31*(1), 210–220.

- Martens, M., & Fox, M. (2007). Does road familiarity change eye fixations? A comparison between watching a video and real driving. *Transportation Research Part F*, 10, 33–47.
- Matthews, R., Legg, S., & Charlton, S. (2003). The effect of cell phone type on drivers subjective workload during concurrent driving and conversing. *Accident Analysis and Prevention*, 35, 451-457.
- Mattson, A.J., & Levin, H.S. (1992). Frontal lobe dysfunction following closed head injury: A review of the literature. *The Journal of Nervous and Mental Disease*, 178 ; 282–291.
- Mayhew, D.R., Simpson, H.M., Wood, K.M., Lonerio, L., Clinton, K.M. & Johnson, A.G. (2011). On-road and simulated driving : concurrent and discriminant validation. *Journal of safety Research*, 42, 267-275.
- McNamara, T. P. (2003). How are the locations of objects in the environment represented in memory? In *Spatial cognition III* (p. 174–191). Springer.
- McDowell, S, Whyte, J, & D’esposito, M. (1997). Working memory impairments in traumatic brain injury: Evidence from dualtask paradigm. *Neuropsychologia*, 35, 1341–1353.
- Meehan, M. (2001). *Physiological reaction as an objective measure of presence in virtual environments*. Doctoral dissertation, Computer Science, University of North Carolina, Chapel Hill, NC.
- Meehan, M., Razaque, S., Insko, B., Whitton, M., & Brooks, F. (2005). Review of four studies on the use of physiological reaction as a measure of presence in stressful virtual environments. *Applied Psychology and Biofeedback*, 30(3), 239-258.
- Mestre, D.R. & Fuchs, P (2006). Immersion et Présence. *Traité de la Réalité Virtuelle*. Ecole des Mines de Paris. pp 309-338.
- Michelon, P., & Zacks, J. M. (2006). Two kinds of visual perspective taking. *Perception & psychophysics*, 68(2), 327–337.
- Milleville-Pennel, I. (2008). A visual sign of lateral acceleration for steering assistance. *International Journal of Human Computer Studies*, 66, 145-157.
- Milleville-Pennel, I., & Charron, C. (2015a). Driving for real or on a fixed-base simulator: Is it so different? An explorative study. *Presence*, 24(1), 74-91.
- Milleville-Pennel, I., & Charron, C. (2015b). Do mental workload and presence experienced when driving a real car predispose drivers to simulator sickness? An exploratory study. *Accident Analysis and Prevention*, 74, 192-202.
- Milleville-Pennel, I., & Charron, C. (2013). Quelle(s) validité(s) pour un simulateur de conduite: étude exploratoire. *ÉPIQUE’2013* (pp. 381-387). ARPEGE Science Publishing, Presse Universitaires de Bruxelles asbl.
- Milleville-Pennel, I., Pothier, J., Hoc, J.M., & Mathè, J.F., (2010). Consequences of cognitive impairments following traumatic brain injury: pilot study on visual exploration while driving. *Brain Injury*, 24(4), 678-691.
- Miller, L.D., Silva, C., Bouchard, S., Bellanger, C., & Taucer-Sanson, T. (2012). Using virtual reality and other computer technologies to implement cognitive-behavior therapy for the treatment of anxiety disorders in youth. In T.E. Davis III et al. (Eds.), *Intensive One-Session Treatment of Specific Phobias, Autism and Child Psychopathology Series*, DOI 10.1007/978-1-4614-3253-1_12, Springer Science+Business Media, LLC 2012.
- Money, K. E., Lackner, J. R., & Cheung, R. S. K. (1996). The autonomic nervous system and motion sickness. In B.J. Yates & A. D. Miller (Eds.), *Vestibular autonomic regulation* (pp. 147-173). Boca Raton, FL: CRC Press.
- Morris, D., Tan, H., Barbagli, F., Chang, T., & Salisbury, K. (2007). Haptic Feedback Enhances Force Skill Learning. In *proceedings of EuroHaptics: Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, (pp. 21-26).
- Mou, W., McNamara, T. P., Rump, B., & Xiao, C. (2006). Roles of egocentric and allocentric spatial representations in locomotion and reorientation. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 32, 1274–1290.
- Mou, W., McNamara T.P., Valiquette, C.M., & Rump, B. (2004). Allocentric and egocentric updating of spatial memories. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 30, 142–157.

- Muhrer, E. & Vollrath, M. (2011). The effect of visual and cognitive distraction on driver's anticipation in a simulated car following scenario. *Transportation Research Part F*, 14, 555-566.
- Mullen, N.W., Weaver, B., Riendeau, J.A., Morrison, L.E., & Bedard, M. (2010). Driving performance and susceptibility to simulator sickness : are they related ? *The American Journal of Occupational Therapy*, 64(2), 288-295.
- Nova, N., Girardin, F., & Dillenbourg, P. (2005) A Mobile Game to Explore the Use of Location Awareness on Collaboration. HCI International 2005, Las Vegas, USA.
- Novack, T., Banos, J., Alderson, A., Schneider, J., Weed, W., Blankenship, J., & Salisbury, D. (2006). UFOV performance and driving ability following traumatic brain injury. *Brain Injury*, 20, 455-461.
- Otmani, S., Rogé, J., & Muzet, A. (2005). Sleepiness in professional drivers: Effect of age and time of day. *Accident Analysis and Prevention*, 37, 930-937.
- Ott, D. (1999). *Collaboration dans un environnement virtuel 3D: influence de la distance à l'objet reference et du "view awareness" sur la resolution d'une tâche de "grounding"*. Unpublished master's thesis. University of Genève.
- Peterson LR & Peterson MJ. (1959). Short-term retention of individual verbal items. *Journal of Experimental Psychology*, 58, 193-198.
- Paillard, J., Jordan, P., & Brouchon, M. (1981). Visual motion cues in prismatic adaptation: evidence of two separate and additive processes. *Acta Psychologica*, 48, 253-270.
- Paillard, J. (1991). Motor and representational framing of space. In: J., Paillard (ed) *Brain and space*. Oxford University Press, Oxford, pp 163-182.
- Park, K., Kapoor, A., Scharver, C., & Leigh, J. (2000) Exploiting multiple perspectives in tele-immersion. In: *Proceedings of the 4th immersive projection technology workshop*, Ames.
- Park, J.R., Lim, D.W., Lee, S.Y., Lee, H.W., Choi, H.H., & Chung, S.C. (2008). Long-term study of simulator sickness: differences in EEG response due to individual sensitivity. *International Journal of Neuroscience*, 118, 857-865.
- Park, N., Moscovitch, M., & Robertson, I. (1999). Divided attention impairments after traumatic brain injury? *Neuropsychologia*, 37:1119-1133.
- Patomella A, & Kottorp A. (2005). An evaluation of driving ability in a simulator. A good predictor of driving ability after stroke? *PROCEEDINGS of the Third International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design*. Rockport, Maine.
- Pennel, I., Ferrel, C., Coello, Y., & Orliaguet, J.P. (2002). Contrôle sensori-moteur en situation de téléopération: données théoriques et perspectives ergonomiques. *Le Travail Humain*, 65(1), 29-58.
- Pennisi, P., Tonacci, A., Tartarisco, G., Billeci, L., Ruta, L., Gangemi, S., & Pioggia, G. (2015). Autism and social robotics: A systematic review. *Autism Research*, 9(2), 165-83. doi: 10.1002/aur.1527.
- Peterson, L.R., & Peterson, M.J. (1959). Short-term retention of individual verbal items. *Journal of Experimental Psychology*, 58, 193-198.
- Pouliquen-Lardy, L., Mars, F., Guillaume, F., & Milleville-Pennel, I. (2015). Virtual collaboration: effect of spatial configuration on spatial statements production. *Cognitive Processing*, 16, S337-S342.
- Pouliquen-Lardy, L., Milleville-Pennel, I., & Mars, F. (2014). Remote collaboration: spatial communication in immersive virtual environments. *28th International Congress of Applied Psychology ICAP 2014*. Paris (France)
- Pouliquen-Lardy, L., Milleville-Pennel, I., Guillaume, F. & Mars, F. (2016). Remote collaboration in virtual reality: asymmetrical effects of task distribution on spatial processing and mental workload.
- Pouliquen-Lardy, L. (2016). *Collaboration à distance : étude de la compréhension mutuelle dans les environnements virtuels collaboratifs immersifs. Le cas de la communication spatiale*. Unpublished doctoral dissertation, University of Rennes 2.
- Pradhan, A.K., Hammel, K.R., DeRamus, R., Pollatsek, A., Noyce, D.A., & Fisher, D.L. (2005). Using eye movements to evaluate effects of driver age on risk perception in a driving simulator. *Hum Factors*, 47(4), 840-52.

- Prévost, C., Milleville-Pennel, I., & Hoc, J.M. (2012). Contribution à l'évaluation des aptitudes à la conduite chez les cérébrolésés. *Symposium ARPEGE 2012*. Paris, France, Oct.
- Prévost, C., Milleville-Pennel, I., Hoc, J.M., Pothier, J., & Charron, C. (2011). Protocole d'évaluation de la conduite automobile chez les personnes cérébrolésées. *Actes ÉPIQUE'2011* (pp. 93-105). Nancy, France: Presses Universitaires de Nancy.
- Prévost, C., Milleville-Pennel, I., Hoc, J.M., Pothier, J., & Charron, C. (2011). Évaluation de la conduite automobile chez des patients cérébrolésés. *Congrès de la SOFMER*. Nantes, France, Oct.
- Puntambekar, S. (2006). Analyzing collaborative interactions: divergence, shared understanding and construction of knowledge. *Computers & Education*, 47, 332–351.
- Rasmussen, J. (1983). Skills, rules, knowledge: signals, signs and symbols and other distinctions in human performance models. *IEEE transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 13 (3), 257-266.
- Reason, J. T. (1978). Motion sickness adaptation: A neural mismatch model. *Journal of the Royal Society of Medicine*, 71, 819-829.
- Regenbrecht, H., & Schubert, T. (2002). Real and illusory interaction enhance presence in virtual environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 11(4), 425-434.
- Reimer, B., & Melher, B. (2011). The impact of cognitive workload on physiological arousal in young adult drivers: a field study and simulation validation. *Ergonomics*, 54(10), 932-942.
- Riccio, G.E., & Stoffregen, T.A. (1991). An ecological theory of motion sickness and postural instability. *Ecological Psychology*, 3(3), 195-240.
- Roberts, R. J., & Aman, C. J. (1993). Developmental differences in giving directions: spatial frames of reference and mental rotation. *Child development*, 64(4), 1258–1270.
- Rogalski, J. (1994). Formation aux activités collectives. *Le Travail humain*, 57 (4), 367-386.
- Roger, M., Knutsen, D., Bonnardel, N., & Le Bigot, L. (2013). Landmark Frames of Reference in Interactive Route Description Tasks. *Applied Cognitive Psychology*, 27(4), 497–504. doi:10.1002/acp.2927
- Rogé, J., Pébayle, T., & Muzet A. (2003). Does the useful field of view vary as a function of sleep debt and driver age? *Recherche Transports Sécurité*, 81, 157-163.
- Roschelle, J., & Teasley, S.D. (1995). Construction of shared knowledge in collaborative problem solving. In C. O'Malley (Ed.), *Computer-supported collaborative learning* (pp. 69- 97). New York: Springer-Verlag.
- Sanchez-Vives, M.V., & Slater, M. (2005). From presence to consciousness through virtual reality. *Nature Review*, 6, 333-339.
- Sallnäs, E.L., Rasmussen-Gröhn, K., & Sjöström, C. (2000). Supporting presence in collaborative environments by haptic force feedback. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, 7 (4), 461-476.
- Santos, J., Merat, N., Mouta, S., Brookhuis, K., & de Waard, D. (2005). The interaction between driving and in-vehicle information systems: Comparison of results from laboratory, simulator and real-world studies. *Transportation Research Part F*, 8, 135-146.
- Schober, M. F. (1995). Speakers, addressees, and frames of reference: Whose effort is minimized in conversations about locations? *Discourse Processes*, 20(2), 219–247. doi:10.1080/01638539509544939.
- Schubert, T., Friedmann, F., & Regenbrecht, H. (1999). Embodied presence in virtual environments. In R. Paton & I. Neilson (Eds.), *Visual representations and interpretations* (pp. 269–278). London: Springer-Verlag.
- Serino, A., Ciaramelli, E., Di Santantonio, A., Malagu, S., Servadei, F., & Ladavas, E. (2006). Central executive system impairment in traumatic brain injury. *Brain Injury*, 20, 23–32.
- Serino, S., Mestre, D., Mallet, P., Pergandi, J.M., Smialek, G., Cipreso, P., & Riva, G. (2015). Being Present in Space: The Role of Allocentric and Egocentric Reference Frames. *Stud Health Technol Inform*, 219, 64-68.
- Shallice, T. (1982). Specific impairments of planning. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, B*, 298, 199–209.

- Sholl, M. J. (2001). The role of a self-reference system in spatial navigation. In D. Montello (Ed.), *Spatial information theory: Foundations of geographical information science* (pp. 217–232). Berlin: Springer-Verlag.
- Slater, M. (2009). Place illusion and plausibility can lead to realistic behaviour in immersive virtual environments. *Phil. Trans. R. Soc. B*, 364, 3549-3557.
- Slater, M., Khanna, P., Mortensen, J., & Yu, I. (2009). Visual realism enhances realistic response in an immersive virtual environment. *IEEE Comput Graph Appl*, 29(3), 76-84.
- Slater, M., Linakis, V., Usoh, M., Kooper, R., & Street, G. (1996). Immersion, presence, and performance in virtual environments: An experiment with tri-dimensional chess. In: *ACM Virtual Reality Software and Technology (VRST)*. pp. 163–172.
- Slater, M., Spanlang, B., Sanchez-Vives, M.V., & Blanke, O. (2010). First Person Experience of Body Transfer in Virtual Reality. *PLoS ONE* 5(5): e10564. doi:10.1371/journal.pone.0010564
- Slater, M., & Steed, A. (2000). A virtual presence counter. *Presence-Teleoperators and Virtual Environments*, 9, 413-434.
- Slater, M., Usoh, H., & 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.
- Smith, K.E., & Faig, K.E. (2014). The Role of Flexibility in Personal Space Preferences. *The Journal of Neuroscience*, 34(31), 10135-10136.
- Solis, J., Avizzano, C., & Bergamasco, M. (2003). Validating a skill transfer system based on reactive robots technology. In *Proceedings of The 12th IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication, ROMAN'03*, 175- 180.
- Spante, M., Schroeder, R., & Axelsson, A.S. (2004) How putting yourself into the other person's virtual shoes enhances collaboration. In: *Proceedings of the 7th international workshop on presence*, Valencia, pp 190–196.
- Spielberger, C.D. (1983). *Manual for the State-Trait Anxiety Inventory, (Form Y) (Self- Evaluation Questionnaire)*. Consulting Psychologist Press, Palo Alto.
- Stanney, K.M., Hale, K.S., Nahmens, I., & Kennedy, R. S. (2003). What to expect from immersive virtual environment exposure: influence of gender, body mass index, and past experience. *Human Factors*, 45 (3), 504-520.
- Stanney, K.M., & Hash, P. (1998). Locus of user-initiated control in virtual environments: influences on cybersickness. *Presence: Teleop. Virt. Environ.* 7, 447–459.
- Stay, W., Justiss, M., McCarthy, D., Mann, W., & Lanford, D. (2008). Predictability of clinical assessments for driving performance. *Journal of Safety Research*, 39, 1–7.
- Stefik, M., Bobrow, D. G., Lanning, S., & Tatar, D. (1987). WYSIWIS revised: Early experiences with multiuser interfaces. *ACM Transactions on Information Systems*, 5 (2), 147-167.
- Stern, E. B. (2004). Driving simulation: A pilot study of persons with brain injury and matched controls. *Sixth National Workshop for Driver Rehabilitation Specialists*. Edmonton, Canada.
- Stevens, J.A., Fonlupt, P., Shiffrar, M., & Decety, J. (2000). New aspects of motion perception: selective neural encoding of apparent human movements. *NeuroReport*, 11(1), 109-115.
- Stoffregen, T. A., Hettinger, L. J., Haas, M. W., Roe, M., & Smart, L. J. (2000). Postural instability and motion sickness in a fixed- base flight simulator. *Human Factors*, 42, 458–469.
- Stoffregen, T. A., & Smart, L. J. (1998). Postural instability pre- cedes motion sickness. *Brain Research Bulletin*, 47, 437–448.
- Tanaka, N., & Takagi, H. (2004). Virtual reality environment design of managing both presence and virtual reality sickness. *J Physiol Anthropol Appl Human Sci*, 23, 313-317.
- Takac, B., Chellali, A., Dumas, C., Milleville-Pennel, I., Grosdemouge, C., & Cao, C.G.L. (2011). Haptic Communication for a 2-D Pointing Task in a Virtual Environment. In *the Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*. Las Vegas, USA. pp 2168-2172.
- Tisseron, S. (2015). *Le jour où mon robot m'aimera, vers l'empathie artificielle*, Paris, Albin Michel.
- Treisman, M. (1977). Motion sickness: An evolutionary hypothesis. *Science*, 197, 493-495.
- Turkle, S. (2011). *Alone Together. Why We Expect More from Technology and Less from Each Other*. New York : Basic Books. ISBN 978-0465010219.

- Underwood, G., Chapman, P., Bowden, K., & Crundall, D. (2002). Visual search while driving: Skill and awareness during inspection of the scene. *Transportation Research part F*, 5, 87–97.
- Underwood, G., Chapman, P., Brocklehurst, N., Underwood, J., & Crundall, D. (2003). Visual attention while driving: Sequences of eye fixations made by experienced and novice drivers. *Ergonomics*, 46, 629–646.
- Van Zomeren, A.H., & Brouwer, W.H. (1994). *Clinical neuropsychology of attention*. New York: Oxford University Press.
- Verjat, I. (1994). Confrontation de deux approches de la localisation spatiale. *L'année psychologique*, 94(3), 403-423. <http://doi.org/10.3406/psy.1994.28774>
- Villani, D., Repetto, C., Cipresso, P., & Riva, G. (2012). May I experience more presence in doing the same thing in virtual reality than in reality? An answer from a simulated job interview. *Interacting with Computers*, 24, 265–272.
- Villard, S.J., Flanagan, M.B., Albanese, G.M., & Stoffregen, T.A. (2008). Postural instability and motion sickness in a virtual moving room. *Human Factors*, 50(2), 332-345.
- Vuadens, P., & Comte, P. A. (2001). Evaluation des aptitudes à la conduite automobile chez le cérébrolésé. *Revue Médicale de la Suisse Romande*, 121, 453–456.
- Vorderer, P., Wirth, W., Gouveia, F. R., Biocca, F., Saari, T., Jäncke, F., Böcking, S., Schramm, H., Gysbers, A., Hartmann, T., Klimmt, C., Laarni, J., Ravaja, N., Sacau, A., Baumgartner, T. & Jäncke, P. (2004). *MEC Spatial Presence Questionnaire (MECSPQ): Short Documentation and Instructions for Application*. Report to the European Community, Project Presence: MEC (IST-2001-37661). Online. Available from <http://www.ijk.hmt-hannover.de/presence>.
- Wang, R.F. (2012). Theories of spatial representations and reference frames: What can configuration errors tell us? *Psychon Bull Rev*, 19, 575–587.
- Wang, J., Chellali, A., & Cao, C.G.L. (2015). Haptic Communication in Collaborative Virtual Environments. *Human Factors*, 58(3), 496-508.
- Wang, R. F., & Spelke, E. S. (2002). Human spatial representation: Insights from animals. *Trends in Cognitive Sciences*, 6, 376–382.
- Warwick-Evans, L.A., Church, R.E., Hancock, C., Jochim, D., Morris, P.H., & Ward, F. (1987). Electrodermal activity as an index of motion sickness. *Aviat. Space Environ. Med.*, 58, 417–423.
- Weibel, D., Schmutz, J., Pahud, O., & Wissmath, B. (2015). Measuring Spatial Presence: Introducing and Validating the Pictorial Presence SAM. *Presence*, 24(1), 44–61.
- Wilson, C.J., & Sorenzo, A. (2015). The use of virtual reality in psychology : a case study in visual perception. *Computational and Mathematical Methods in Medicine*, vol. 2015, 7 pages.
- Witmer, B.G., & Singer, M.J. (1998). Measuring presence in virtual environments: a presence questionnaire. *Presence* 7 (3), 225–240.
- Xiao, C., Mou, W., & McNamara, T. P. (2009). Use of self-to-object and object-to-object spatial relations in locomotion. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 35, 1137–1147.
- Xiong, M., Milleville-Pennel, I., Dumas, C., & Palluel-Germain, R. (2013). Comparing haptic and visual training method of learning chinese handwriting with a haptic guidance. *Journal of Computers*, 8(7), 1815-1820.
- Yilmaz, E., & Nakayama, K. (1995). Fluctuation of attentional levels during driving. *Investigative Ophthalmology and Visual Science*, 36, S940.
- Young, S. D., Adelstein, B. D., & Ellis, S. R. (2006) Demand characteristics of a questionnaire used to assess motion sickness in a virtual environment.: or does taking a motion sick-ness questionnaire make you sick?, *IEEE Trans.on visualization and computer graphics*, 13(3) 1-7.
- Yoshikawa, T., & Henmi, K. (2000). Human Skill Transfer Using Haptic Virtual Reality Technology. In *Proceedings of the 6th international Symposium on Experimental Robotics VI*, 250, (pp. 351-360).
- Zoccolotti, P., Matano, A., Deloche, G., Cantagallo, A., Passadori, A., Leclercq, M., Braga, L.W., Cremel, N., Pittau, P., Renom, M., Rousseaux, M., Truche, A., Fimm, B., & Zimmermann, P. (2000). Patterns of attentional impairments following a closed head injury: A collaborative European study. *Cortex*, 36: 93–107.

Wirth, W., Hartmann, T., Bocking, S., Vorderer, P., Klimmt, C., Schramm, H., Saari, T., Laarni, J., Ravaja, N., Gouveia, F.R., et al. (2007). A process model of the formation of spatial presence experiences. *Media Psychology*, 9(3):493–525.