



HAL
open science

Optimiser la validité des comportements observés sur simulateur de conduite : Etude des interactions entre Immersion, présence et comportement.

Christophe Deniaud

► To cite this version:

Christophe Deniaud. Optimiser la validité des comportements observés sur simulateur de conduite : Etude des interactions entre Immersion, présence et comportement.. Sciences cognitives. Université Aix-Marseille II, 2017. Français. NNT : . tel-01659438v2

HAL Id: tel-01659438

<https://theses.hal.science/tel-01659438v2>

Submitted on 19 Dec 2017

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.

AIX-MARSEILLE Université
UMR 7287, Institut des Sciences du Mouvement Etienne Jules Marey

Ecole Doctorale 463 : Sciences du Mouvement Humain

THESE DE DOCTORAT

Pour obtenir le grade de Docteur d'Aix-Marseille Université
Discipline : Sciences du Mouvement Humain-MRS
Présentée et soutenue publiquement par

Christophe Deniaud

Le 08 décembre 2017

**Optimiser la validité des comportements observés sur
simulateur de conduite : Etude des interactions entre
Immersion, présence et comportement**

Sous la direction de

Daniel Mestre, **Directeur de recherche- HDR (CNRS-AMU)**

Vincent Honnet, **Ingénieur-Tuteur entreprise (PSA)**

Composition du Jury :

| | |
|--|--------------------|
| Daniel MESTRE – DR, CNRS et Aix-Marseille Université | Directeur de thèse |
| Vincent HONNET – ING, PSA | Tuteur entreprise |
| Françoise DARSES – PU, IRBA | Rapporteur |
| Frédéric MERIENNE – PU, ENSAM | Rapporteur |
| Françoise ANCEAUX – MCF, Université de Valenciennes | Examineur |
| Christophe BOURDIN-PU, Aix-Marseille Université | Examineur |

Remerciements

Je remercie en premier lieu mon directeur de thèse, Daniel Mestre, pour m'avoir permis de réaliser ce travail de recherche si exigeant et stimulant à la fois. Plus qu'un travail de recherche, c'est un véritable voyage intellectuel qu'il m'a été donné de faire à ses côtés. Je retiendrai de cette collaboration que la meilleure façon de devenir un esprit libre et indépendant repose sur l'aptitude que l'on a à préférer la question à la réponse. J'ai en outre pu apprécier une véritable autonomie dans mon travail et éprouver l'art du contrepied intellectuel souvent sans concession mais terriblement efficace lorsque l'on veut produire une réflexion digne de ce nom.

Je remercie le laboratoire de l'institut des sciences du mouvement, structure d'accueil qui m'a permis de me familiariser avec le monde de la recherche, et plus particulièrement je remercie les ingénieurs de recherche du Centre de Réalité Virtuelle de la Méditerranée pour m'avoir aidé tout au long de ma thèse dans le montage de mes expérimentations et aussi pour leur bonne humeur et leur accueil plus que sympathique.

Je remercie bien évidemment le groupe PSA et plus particulièrement Estelle Chin et Laurent Kircshe pour avoir donné naissance avec Daniel Mestre à ce projet de thèse CIFRE même s'ils n'ont malheureusement pas pu en suivre le déroulement. Je remercie tout particulièrement mon responsable et tuteur PSA, Vincent Honnet, pour avoir accepté de reprendre le travail d'encadrement de ma thèse dans les meilleurs délais après son lancement. Je te remercie Vincent pour tout d'abord ta gentillesse, ton expertise plus que précieuse et l'aide constante apportée tout au long de mon travail dans cet univers si étrange mais passionnant qu'est celui des simulateurs de conduite.

Je remercie l'ensemble des participants qui m'ont permis de mener à bien les trois campagnes expérimentales sur les différents simulateurs de conduite.

Je tiens également à remercier, Françoise Darses, Frédéric Mérienne, Françoise Anceaux, Christophe Bourdin et Vincent Honnet pour avoir accepté d'être membres de mon jury de thèse.

Je remercie également ma famille et l'ensemble de mes proches pour leur soutien tout au long de cette thèse.

Pour finir, je remercie plus particulièrement ma conjointe Julie, pour m'avoir aidé dans mes réflexions et plus encore dans mon travail, Grant Glickman a dit que

« derrière chaque grand homme il y a une femme », pour ce qui me concerne je dirai qu'il y a avant tout une « grande Femme » à mes côtés. Enfin cette thèse est tout naturellement associée pour moi à la naissance de mon fils Maël, né le 21 septembre 2016 et je tiens à lui adresser ce tendre petit clin d'œil qu'il devrait assurément pouvoir percevoir de l'autre côté du temps, quand au détour de la lecture d'une partition, ou encore d'une déambulation aux abords de la bibliothèque tout en bois massif qu'il nous reste à acheter, il découvrira peut être, couché là, un manuscrit poussiéreux, éprouvé par le temps, et qui aura mis dix ans ou plus à trouver son dédicataire.

**« Nous connaissons la vérité, non seulement par la raison,
mais encore par le cœur. »**

Blaise Pascal

Résumé

Dans le domaine de la conduite automobile, l'usage de la simulation en environnement virtuel repose à l'heure actuelle sur des considérations de sécurité routière et d'utilisabilité de systèmes d'aide à la conduite. Les simulateurs de conduite permettent donc d'étudier le comportement humain dans différentes conditions fixées expérimentalement. Un avantage majeur de la simulation est de ne pas exposer le sujet à un risque objectif et que les conditions de test sont "facilement" mises en œuvre et manipulées. Le recours à la simulation pose néanmoins la question de la généralisation et transposition des comportements observés en simulation à la situation réelle de conduite. En effet, il est nécessaire de s'assurer que le simulateur mesure précisément l'objet d'étude sans le modifier ou l'influencer. L'évaluation du degré de validité est donc cruciale dans toute étude sur simulateur qui cherche à susciter des comportements réalistes de conducteurs. La simulation de conduite est une des composantes de la réalité virtuelle, dont la finalité est de permettre à une personne (ou à plusieurs) une activité sensori-motrice et cognitive dans un monde artificiel, créé numériquement. La conception d'environnements virtuels a cependant trop longtemps reposé sur des considérations focalisées sur une optimisation d'un haut degré de réalisme. Cette approche techno centrée de l'immersion et de l'interaction semble dépassée et il est très largement admis la nécessité d'adopter une approche anthropocentrique afin de permettre à un homme placé dans un environnement virtuel de se percevoir comme un utilisateur à part entière. L'immersion dans un monde virtuel ne peut pas être la même que celle dans le monde réel, l'utilisateur a appris à agir naturellement dans un monde réel et non virtuel (sans biais sensori-moteurs), certains auteurs parlent alors d'immersion pseudo naturelle. De la même manière un utilisateur, perçoit et agit physiquement avec les entités et éléments du monde virtuel sans que cela se traduise toujours par une activité physique sensori motrice. Cet état de fait empêche d'appréhender la réalité virtuelle comme une simple copie du monde réel. Ainsi l'immersion (au sens des contingences sensorimotrices permises par le simulateur) est une condition nécessaire mais pas suffisante pour l'expression en situation virtuelle d'une performance représentative de la situation de conduite réelle. Face à ce problème, un concept, issu des débuts de la réalité virtuelle dans les années 80, semble permettre d'aborder la question de la validité "écologique" des comportements observés sur simulateur : le concept de présence. Ce concept multidimensionnel est considéré comme la capacité des individus à adopter un comportement similaire à celui de la vie de tous les jours et par conséquent leur propension à réagir aux divers stimuli comme s'ils étaient réels. Le postulat de notre travail repose donc sur l'idée que la présence est un concept clé pour évaluer la représentativité des comportements de conduite observés en simulation. Toutefois plusieurs difficultés seront à résoudre. Une des plus cruciales repose sur le fait que la présence est difficilement mesurable en temps réel puisque le fait même de chercher à la mesurer peut rompre l'état de présence plus ou moins existant. Ainsi obtenir des indicateurs comportementaux de la présence constitue un véritable enjeu

pour caractériser la nature d'un phénomène qui à l'heure actuelle est davantage fantasmé à l'aide de mesures post-expérimentation que concrètement démontré par la mise en évidence de comportements spécifiques reproductibles. Ce travail de thèse, a donc pour vocation, à terme, de proposer un ensemble de recommandations concrètes et opérationnelles pour l'élaboration de protocoles expérimentaux cherchant à optimiser la présence dans les simulateurs de conduite.

Mots clés : Réalité virtuelle, Immersion, Présence, Validité des simulateurs de conduite, Performance de conduite, Environnement virtuel

Abstract

In the field of driving, the use of simulation in virtual environment is based at present on considerations of road safety and usability of systems of assistance to the driving. Driving simulators therefore make it possible to study human behavior under different conditions fixed experimentally. A major advantage of the simulation is that it does not expose the subject to objective risk and that the test conditions are "easily" implemented and manipulated. The use of simulation nevertheless raises the question of the generalization and transposition of the behaviors observed in simulation to the actual driving situation. Indeed, it is necessary to ensure that the simulator accurately measures the object of study without modifying or influencing it. Evaluation of the degree of validity is therefore crucial in any simulator study that seeks to elicit realistic behaviors of drivers. Driving simulation is one of the components of virtual reality, the purpose of which is to allow a person (or several) a sensori-motor and cognitive activity in an artificial world, created digitally. The design of virtual environments, however, has for too long been based on considerations focused on optimizing a high degree of realism. This techno centric approach to immersion and interaction seems outdated and it is widely accepted the need to adopt an anthropocentric approach in order to allow a man placed in a virtual environment to perceive himself as a full-fledged user. The interaction of an individual in the virtual world is a transposition of the loop perception, cognition, action of human behavior in the real world. Immersion in a virtual world can not be the same as that in the real world, the user has learned to act naturally in a real and non-virtual world (without sensory-motor biases), some authors then speak of immersion natural pseudo. In the same way, a user perceives and acts physically with the entities and elements of the virtual world without this always translating into physical sensory motor activity. This fact prevents us from grasping virtual reality as a simple copy of the real world. Thus immersion (in the sense of the sensorimotor contingencies allowed by the simulator) is a necessary but not sufficient condition for the virtual expression of a performance representative of the real driving situation. Faced with this problem, a concept, emerging from the beginnings of virtual reality in the 1980s, seems to address the question of the "ecological" validity of behaviors observed on a simulator: the concept of presence. This multidimensional concept is seen as the ability of individuals to adopt a behavior similar to that of everyday life and therefore their propensity to react to the various stimuli as if they were real. The postulate of our work therefore rests on the idea that presence is a key concept to evaluate the representativeness of driving behaviors observed in simulation. However, several difficulties will have to be resolved. One of the most crucial is that presence is hardly measurable in real time since the very fact of trying to measure it can break the state of presence more or less existing. Thus obtaining behavioral indicators of presence constitutes a real stake to characterize the nature of a phenomenon which at the moment is more fantasized by means of post-experimentation measures than concretely demonstrated by the demonstration of reproducible specific behaviors .

The objective of our work is thus to be able to highlight the determinants of the presence in order to develop and calibrate measurement tools capable of evaluating the ecological validity of the behaviors observed in the driving simulators. The aim of this thesis work is to propose a set of concrete and operational recommendations for the development of experimental protocols aiming to optimize the presence in driving simulators

Key words : Virtual reality, Immersion, Presence, Validity of driving simulators, Driving performance Virtual environment

Table des matières

| | | |
|--------|---|----|
| I | INTRODUCTION | 15 |
| II | SIMULATION AUTOMOBILE | 17 |
| II.1 | LE DEVELOPPEMENT DE LA SITUATION AUTOMOBILE | 17 |
| II.2 | USAGES ET PRATIQUES | 18 |
| III | LA VALIDITE DES SIMULATEURS | 23 |
| III.1 | LA VALIDITE : UN CONCEPT MULTIFACTORIEL..... | 23 |
| III.2 | LE SIMULATEUR : UNE MODELISATION LIMITEE DE LA REALITE 24 | |
| III.3 | LA VALIDITE COMPORTEMENTALE | 24 |
| III.4 | LA VALIDITE PSYCHOLOGIQUE : UN PILIER DE LA VALIDITE COMPORTEMENTALE | 26 |
| IV | ETABLIR LA VALIDITE PSYCHOLOGIQUE AU TRAVERS DU CONCEPT DE PRESENCE | 28 |
| IV.1 | LE CONCEPT D'IMMERSION | 28 |
| IV.2 | LE CONCEPT DE PRESENCE..... | 30 |
| IV.3 | FACTEURS DETERMINANTS DE LA PRESENCE | 30 |
| IV.4 | LA MESURE DE LA PRESENCE | 31 |
| IV.4.1 | Mesures subjectives : questionnaires..... | 31 |
| IV.4.2 | Mesures physiologiques | 32 |
| IV.4.3 | Mesures comportementales | 33 |
| IV.5 | PRESENCE ET VALIDITE DES SIMULATEURS | 33 |
| V | PROBLEMATIQUE DE RECHERCHE..... | 35 |
| V.1 | CONTEXTE | 35 |
| V.2 | PROBLEMATIQUE..... | 35 |
| V.3 | POSITIONNEMENT..... | 37 |
| V.4 | PROGRESSION ENVISAGEE..... | 39 |
| VI | EXPERIMENTATION 1 | 40 |
| VI.1 | OBJECTIFS..... | 40 |
| VI.2 | HYPOTHESES..... | 40 |
| VI.3 | METHODOLOGIE | 40 |
| VI.3.1 | Participants | 40 |
| VI.3.2 | Simulateur de conduite | 40 |
| VI.3.3 | Situations de conduite..... | 41 |
| VI.3.4 | Mesures subjectives | 43 |
| VI.3.5 | Mesures objectives de la performance | 45 |
| VI.3.6 | Procédure | 45 |
| VI.4 | RESULTATS : EFFETS PAR INDICATEUR | 46 |
| VI.4.1 | Données subjectives : MEC-SPQ..... | 46 |
| VI.4.2 | Données comportementales de conduite en situation globale | 48 |
| VI.4.3 | Performance à la double tâche..... | 50 |
| VI.5 | RESULTATS : REGRESSIONS POUR DONNEES SUBJECTIVES | 52 |
| VI.6 | DISCUSSION..... | 54 |

| | | |
|---------|---|-----|
| VI.6.1 | Manque de sensibilité du questionnaire MEC SPQ | 54 |
| VI.6.2 | Etude de la validité du modèle de la présence spatiale (Wirth et al., 2007) | 55 |
| VI.6.3 | Indicateurs comportementaux de la présence | 56 |
| VI.6.4 | Performance à la double tâche | 58 |
| VI.6.5 | Perspectives de recherche | 59 |
| VII | EXPERIMENTATION 2 | 60 |
| VII.1 | OBJECTIFS | 60 |
| VII.2 | METHODOLOGIE | 61 |
| VII.2.1 | Participants | 61 |
| VII.2.2 | Simulateur de conduite | 61 |
| VII.2.3 | Situations de conduite | 62 |
| VII.2.4 | Mesures subjectives | 65 |
| VII.2.5 | Mesures objective de la performance | 67 |
| VII.2.6 | Mesures physiologiques | 67 |
| VII.2.7 | Procédure | 69 |
| VII.2.8 | Analyse des données physiologiques | 71 |
| VII.3 | RESULTATS : EFFETS PAR INDICATEUR | 76 |
| VII.3.1 | Données subjectives : MEC-SPQ | 76 |
| VII.3.2 | Données subjectives : IPQ | 77 |
| VII.3.3 | Données valence émotionnelle : PANAS | 79 |
| VII.3.4 | Données comportementales de conduite | 80 |
| VII.3.5 | Variabilité du rythme cardiaque (HRV) : Domaine temporel et domaine fréquentiel | 86 |
| VII.3.6 | Conductance électrodermale | 91 |
| VII.4 | RESULTATS : CORRELATIONS ET REGRESSIONS | 92 |
| VII.4.1 | Régressions entre items du MEC-SPQ | 92 |
| VII.4.2 | Corrélations entre items du IPQ | 93 |
| VII.4.3 | Corrélations entre items du PANAS | 94 |
| VII.4.4 | Corrélations entre items des questionnaires IPQ/SPQ avec les données comportementales de conduite | 95 |
| VII.5 | DISCUSSION | 101 |
| VII.5.1 | Sensibilité du questionnaire MEC SPQ | 101 |
| VII.5.2 | Etude des liens de causalité entre les différentes dimensions du MEC SPQ | 102 |
| VII.5.3 | Etude des liens de causalité entre les différentes dimensions de l'IPQ | 102 |
| VII.5.4 | Etude des liens de causalité entre les différentes dimensions du PANAS | 102 |
| VII.5.5 | Données comportementales de conduite | 103 |
| VII.5.6 | Données physiologiques | 105 |
| VII.5.7 | Perspectives de Recherche | 106 |
| VIII | EXPERIMENTATION 3 | 108 |
| VIII.1 | OBJECTIFS | 108 |

| | | |
|----------|--|-----|
| VIII.2 | METHODOLOGIE | 108 |
| VIII.2.1 | Participants..... | 108 |
| VIII.2.2 | Simulateur de conduite | 109 |
| VIII.2.3 | Situations de conduite | 110 |
| VIII.2.4 | Mesures subjectives | 113 |
| VIII.2.5 | Mesures Physiologiques | 113 |
| VIII.2.6 | Procédure | 115 |
| VIII.3 | RESULTATS : EFFETS PAR INDICATEUR | 117 |
| VIII.3.1 | Données subjectives : MEC-SPQ | 117 |
| VIII.3.2 | Données subjectives : IPQ | 118 |
| VIII.3.3 | Données subjectives : PANAS | 120 |
| VIII.3.4 | Données comportementales de conduite..... | 121 |
| VIII.3.5 | Conductance électrodermale | 125 |
| VIII.3.6 | Rythme cardiaque | 127 |
| VIII.4 | RESULTATS : CORRELATIONS ET REGRESSIONS | 129 |
| VIII.4.1 | Régressions entre items du MEC-SPQ | 129 |
| VIII.4.2 | Corrélations entre items de l'IPQ | 130 |
| VIII.4.3 | Corrélations entre items PANAS et SPQ/IPQ | 131 |
| VIII.4.4 | Corrélations entre items SPQ/IPQ et données comportementales de conduite | 132 |
| VIII.4.5 | Corrélations entre items SPQ/IPQ et l'activité électrodermale | 132 |
| VIII.4.6 | Corrélations entre items SPQ/IPQ et l'activité cardiaque | 134 |
| VIII.5 | DISCUSSION | 135 |
| VIII.5.1 | Sensibilité du questionnaire MEC SPQ et IPQ..... | 135 |
| VIII.5.2 | Données comportementales de conduite..... | 136 |
| VIII.5.3 | . Données physiologiques | 138 |
| VIII.5.4 | Perspectives de Recherche | 139 |
| IX | ETUDE COMPARATIVE ENTRE EXPERIENCES 2 ET 3..... | 140 |
| IX.1 | OBJECTIFS DE L'EXPERIMENTATION COMPARATIVE | 140 |
| IX.2 | ANALYSES STATISTIQUES | 140 |
| IX.2.1 | Données subjectives | 140 |
| IX.2.2 | Données comportementales de conduite | 141 |
| IX.2.3 | Données physiologiques | 141 |
| IX.3 | RESULTATS | 142 |
| IX.3.1 | Données subjectives | 142 |
| IX.3.2 | Données comportementales de conduite en situation globale | 148 |
| IX.3.3 | Données physiologiques d'un point de vue global..... | 151 |
| IX.4 | DISCUSSION..... | 155 |
| IX.4.1 | Données subjectives | 155 |
| IX.4.2 | Données comportementales de conduite | 156 |
| IX.4.3 | Données physiologiques | 157 |
| X | DISCUSSION GENERALE..... | 159 |
| X.1 | EXPERIMENTATION 1 : LES LIMITES DES QUESTIONNAIRES DE PRESENCE | 161 |

| | | |
|-------|--|-----|
| X.2 | EXPERIMENTATION 2 : CARACTERISATION D'INDICATEURS COMPORTEMENTAUX DE LA PRESENCE SUR SIMULATEUR STATIQUE | 163 |
| X.2.1 | Le questionnaire de présence : le problème de la mesure qui modifie en elle même modifie ce qu'elle cherche à déterminer | 163 |
| X.2.2 | La valence émotionnelle du phénomène de présence | 164 |
| X.2.3 | La performance de conduite : observable nécessaire à considérer mais pas suffisante pour constituer un indicateur comportemental de la présence.... | 165 |
| X.2.4 | L'éveil physiologique : le cône d'ombre de la présence | 166 |
| X.3 | EXPERIMENTATION 3 : CARACTERISATION D'INDICATEURS COMPORTEMENTAUX DE LA PRESENCE SUR SIMULATEUR DYNAMIQUE..... | 168 |
| X.3.1 | Le questionnaire de présence : baisse de sensibilité possiblement imputable à l'effet de plus grande immersion du simulateur dynamique..... | 168 |
| X.3.2 | La présence sous simulateur dynamique : expérience émotionnelle plus marquée..... | 170 |
| X.3.3 | La performance de conduite : indicateur moins sensible à la présence sur le simulateur dynamique..... | 170 |
| X.3.4 | La conductance électrodermale : indicateur moins sensible à la présence sur le simulateur dynamique..... | 171 |
| X.4 | BILAN DE L'ETUDE COMPARATIVE DE LA PRESENCE ENTRE LES SIMULATEURS STATIQUE ET DYNAMIQUE | 173 |
| X.4.1 | L'investigation subjective de la présence : de la symptomatologie au diagnostic | 173 |
| X.4.2 | La performance de conduite sur simulateur dynamique : un indicateur de présence ou un effet collatéral des limites de la simulation ?..... | 174 |
| X.4.3 | L'éveil physiologique à travers l'activité électrodermale : indicateur de présence ou de sensation forte ? | 174 |
| X.4.4 | Perspectives de recherche | 176 |
| XI | BIBLIOGRAPHIE | 177 |
| XII | ANNEXES | 184 |
| XIII | LISTE DES ANNEXES | 228 |
| XIV | LISTE DES FIGURES | 230 |
| XV | LISTE DES TABLES | 232 |

I INTRODUCTION

L'activité de conduite automobile, bien que dangereuse et complexe, est une tâche réalisée par le plus grand nombre d'entre nous au quotidien. Plusieurs fonctions perceptives, motrices et cognitives sont sollicitées. La plupart de ces fonctions peuvent être considérablement affectées par la dynamique de l'environnement. Cela dépend aussi du niveau d'expertise du conducteur (Green, 2007). La conduite est donc une activité propre à chaque automobiliste et dont les effets sont directement observables dans le monde réel avec parfois des conséquences dramatiques en matière de sécurité routière. Des méthodes d'analyse sont nécessaires pour évaluer en toute sécurité le comportement de conduite des automobilistes (Bella, 2009). Pour ce faire, des études expérimentales peuvent être réalisées sur route réelle mais un simulateur est souvent privilégié car plus sûr et moins onéreux. Par ailleurs, un simulateur permet de réaliser des mesures objectives et répétées de la performance de conduite; il permet aussi un contrôle complet de toute la dynamique de l'environnement (circulation, météorologie...); l'expérience sur simulateur peut être facilement réalisée dans un laboratoire équipé pour cela.

Dès les premiers temps de l'histoire de la simulation automobile, les simulateurs ont été utilisés au travers d'une multitude d'études cliniques pour comprendre ce qu'était un conducteur, un véhicule, et appréhender plus largement la complexité de l'environnement de conduite. Au fil du temps, les simulateurs de conduite se sont développés sous différentes formes et tailles répondant à une toujours plus grande variabilité dans l'usage, impulsée par une perpétuelle avancée des technologies (Allen, Stein, Aponso, Rosenthal, & Hogue, 1990). La simulation de conduite a donc été un outil de recherche prépondérant ces dernières années dans une grande variété de disciplines (Strauss, 2002). La majorité des chercheurs impliqués dans cette évolution de la simulation automobile ont de plus en plus été motivés par la volonté d'avoir, in fine, un simulateur constituant une représentation valide de l'environnement réel de conduite (Godley, Triggs, & Fildes, 2002). Pour ce faire un simulateur se doit de posséder un certain degré de correspondance physique avec la situation réelle à laquelle il se réfère, c'est-à-dire être capable de stimuler de manière réaliste et cohérente l'ensemble des modalités sensorielles en interaction. C'est ce qu'on peut appeler la validité physique ou le degré de fidélité du simulateur. Il se doit aussi de proposer des tâches en lien avec l'environnement simulé. Ces tâches doivent satisfaire un certain degré de validité psychologique (Ranney, Watson, Mazzae, Papelis, Ahmad, & Wightman, 2005) afin de tenter de placer le conducteur dans un état cognitif proche de la situation réelle. Toutefois, malgré les avancées significatives qui ont été réalisées pour améliorer la fidélité physique, des critiques concernant un certain manque de réalisme perdurent (Garrott, Mazzae, & Goodman,

2005). Plus particulièrement, il est ici question du manque de validité psychologique, qui fait référence à la mesure selon laquelle les risques et les enjeux présentés lors d'une participation à un protocole de recherche correspondent aux risques et aux enjeux inhérents à la situation réelle que l'expérience en laboratoire est sensée reproduire. D'après Duncan (1990), le principal problème des chercheurs dans la simulation de conduite est qu'ils ne parviennent pas à proposer des scénarios avec un véritable challenge qui puisse permettre de réveiller chez le participant une motivation analogue à celle qu'il pourrait éprouver en réalité. Les motivations sont pourtant au cœur de l'activité de conduite, car il est plus qu'admis que l'on ne conduit pas sans but, et qu'en fonction du contexte de conduite dans lequel on est placé on adoptera un comportement bien spécifique (Rosenthal, Parseghian, Allen, & Stein, 1994).

Dans cette revue de question, nous aborderons dans une première partie, différents aspects de la simulation automobile. Nous présenterons les grandes lignes associées au développement de la simulation automobile, et exposerons les différentes pratiques en matière de simulateurs, ainsi que les avantages et les inconvénients associés à ces usages. Notre deuxième partie est destinée à exposer le concept de la validité dans les simulateurs de conduite. Il s'agira de la clef de voûte de notre revue de question, exposant la problématique de la validité et l'intérêt de se focaliser sur un de ses sous-concepts : la validité psychologique. De cette réflexion, nous dégagerons les principaux enjeux et limites à considérer. Ce qui nous amènera dans une dernière partie à présenter les perspectives méthodologiques de recherche qui pourraient permettre au travers de l'optimisation de la validité psychologique de plus globalement répondre à la question de la validité comportementale. Plus particulièrement, notre focus d'analyse portera sur l'utilisation d'un concept appartenant au champ de recherche en réalité virtuelle, datant du début des années 1980, appelé la présence. Il s'agit d'un concept multidimensionnel considéré comme un état psychologique permettant à des sujets en situation immersive d'adopter un comportement similaire à celui de la vie de tous les jours et par conséquent à réagir aux divers stimuli comme s'ils étaient réels (Slater, 2003).

II SIMULATION AUTOMOBILE

II.1 LE DEVELOPPEMENT DE LA SITUATION AUTOMOBILE

La simulation de conduite de véhicules fut à l'origine développée pour éviter le coût élevé associé à des études sur le terrain, permettant de contrôler plus efficacement l'enchaînement et la nature des événements de conduite proposés. Des mesures efficaces du comportement de conduite ont donc pu être réalisées, dans des conditions présentant un danger particulier mais n'ayant aucune conséquence sur la sécurité du conducteur. Ainsi, durant la deuxième moitié du 20^{ème} siècle (Garrott et al., 2005), la simulation fut appliquée avec succès au monde de l'aéronautique, ferroviaire et maritime. Les simulateurs ont ainsi été utilisés dans des études basées sur le comportement de l'opérateur (recherche visuelle d'informations, stratégies, ...), les caractéristiques du véhicule (contrôle du véhicule, design...) et l'environnement (visibilité, caractéristiques de la route,...). A la fin des années 1970, la façon de concevoir les simulateurs a évolué suivant cinq composantes principales: la génération d'informations visuelles et auditives, les informations kinesthésiques, la programmation et développement de scénarios de conduite, le développement des modèles de la dynamique du véhicule, et le développement des cabines ou habitacles avec leur variété de commandes (Green, 2007).

Saluäär (2000) a conçu un système de classification des simulateurs de bas niveau, de niveau intermédiaire, et de haut niveau. Les simulateurs de bas niveau sont associés à l'usage d'un ordinateur, d'un jeu de pédales et d'un volant. Les simulateurs de niveau intermédiaire comprennent généralement une véritable voiture ou une maquette automobile à base fixe, avec des écrans sur lesquels on projette des images à partir d'ordinateurs qui pilotent la simulation et collectent les données de l'étude. Les simulateurs de haut niveau sont les simulateurs les plus avancés et sophistiqués. Ils dépassent généralement la conception des simulateurs de niveau intermédiaire en termes de dispositif de commande, et d'affichage intégrant le plus souvent une plateforme de mouvements à six degrés de liberté (ou hexapode). Les simulateurs de bas niveau sont parmi les plus populaires, en témoigne leur utilisation de plus en plus répandue dans les formations proposées par les auto-écoles, dans les établissements de santé qui font de la rééducation et de la réadaptation fonctionnelle (depuis 2006, l'hôpital de la Musse à Saint Sébastien de Morsent, possède un simulateur de conduite réalisé par la société Eca-Faros, sur une modus offerte par Renault et dont le moteur a été remplacé par un ordinateur) et dans les projets de recherche universitaires. Les simulateurs de niveau intermédiaire sont eux de plus en plus utilisés par les instances gouvernementales de différents pays et universités dans le monde, en raison d'un plus haut degré de réalisme de l'expérience de conduite permis par des sons et des images qui sont d'une qualité bien supérieure à ce qui se fait dans les simulateurs de bas niveau. Les simulateurs de haut niveau impliquent quant à eux un matériel très sophistiqué en termes de dispositifs d'affichage (son et image), de

dispositif de reproduction de mouvements (plateforme de mouvements) et de logiciels avec une puissance de calcul très importante. En raison des coûts très élevés associés à ces types de simulateurs, ils sont pour la plupart exclusivement utilisés dans les universités, les organismes gouvernementaux, et les centres de recherche des principaux grands constructeurs automobiles. Jusqu'en 2007, le plus grand simulateur au monde était le NADS (National advanced Driving Simulator) américain mis en service en 2001 à l'université d'Iowa. Ce géant a été détrôné par le simulateur de Toyota, de configuration semblable et qui vient repousser les limites du réalisme. Ce simulateur est installé au centre de la marque Higashifuji, au Japon. Il s'agit d'un dôme de 4,5 mètres de haut et 7,1 mètres de diamètre, pouvant se déplacer dans le hangar qui le contient (35m par 20m) et s'incliner jusqu'à 25 degrés. Le dôme en question contient un écran à 360 degrés et une voiture entière.

II.2 USAGES ET PRATIQUES

Un état de l'art réalisé par Strauss (2002) sur l'usage des simulateurs a mis en évidence qu'il existait à travers le monde plus d'une cinquantaine de simulateurs suivant la répartition suivante : Australie (3%), Canada (2%), France (8%), Allemagne (14%), Japon (3%), Corée (2%), Nouvelle-Zélande (2%), Norvège (2%), Afrique du Sud (2%), Espagne (3%), Suède (3%), Royaume-Uni (7%) et USA (42%). Environ 81% de ces simulateurs ont été exclusivement utilisés pour de la recherche. Les 19% restant ont été essentiellement utilisés pour de la formation de jeunes conducteurs et pour d'autres applications à visée médicale ou ludique. Un certain nombre des simulateurs de conduite de recherche intègrent la plate-forme de mouvement Stewart à six degrés de liberté (Dasgupta & Mruthyunjaya, 2000). Ce type de base mobile permet de faire varier la position et l'orientation de la plate-forme suivant les composantes longitudinale et transversale. La simulation d'accélération de faible fréquence est dès lors rendue possible. Il est intéressant de relever que l'essentiel des mesures liées à la vision en conduite automobile et à la perception de mouvements sont dans leur grande majorité réalisées sur les simulateurs de haut niveau. Plusieurs caractéristiques liées à la densité du trafic, à la dynamique du véhicule ou encore à la topologie de la route peuvent être fixées en simulateur. La complexité de la route peut ainsi être de plus en plus fidèlement reproduite même si il reste des limites à cette approche. Un simulateur est souvent utilisé au regard d'une question de recherche particulière qui ne nécessitera pas toujours de reproduire toute la complexité d'une scène routière. Ainsi, les simulateurs peuvent être utilisés pour à la fois détecter les comportements à risque de certains conducteurs, dans certaines situations de conduite, et constituer un outil à visée éducative pour le public. En outre ces simulateurs sont de mieux en mieux équipés

pour mesurer la performance de conduite dans des conditions de luminosité et météorologiques toujours plus réalistes. Ces simulateurs sont par exemple utilisés pour évaluer les effets visuels et physiologiques du brouillard sur le comportement (Snowden, Stimpson, & Ruddle, 1998). Snowden et ses collègues (1998) ont notamment pu montrer que le brouillard réduisait la visibilité et augmentait le risque de collision. Différentes densités de brouillard peuvent être ainsi simulées pour mesurer la performance de conduite (écarts types de la vitesse et de la position latérale dans la voie) et évaluer l'efficacité des stratégies des différents patterns de recherche visuelle (mesures oculométriques).

Le simulateur de conduite est utilisé par divers praticiens et chercheurs et ce pour une multitude d'usages consistant essentiellement en de la recherche et de la formation.

Ainsi on peut recenser une liste non exhaustive de l'ensemble de ces usages réalisés sur simulateur de conduite (Allen et al., 1990; Allen, Rosenthal, & Aponso, 2005 ; Bella, 2005 ; Bella, 2009 ; Bonnet & Arand, 2005; Jamson, 1999 ; Strauss, 2002) :

- Réaliser des recherches sur la sécurité routière
- Mener un programme de formation structuré
- Evaluer l'efficacité de programmes de formation
- Evaluer la conception d'un véhicule en termes de son utilisabilité
- Tester des dispositifs de contrôle du trafic
- Comprendre les effets des limites inhérentes à l'être humain sur l'activité de conduite
- Examiner les causes et les conséquences des déficiences du conducteur
- Développer de nouvelles technologies intégrées dans le véhicule comme les systèmes d'aide à la navigation
- Evaluer la géométrie de futures infrastructures routières avant leur conception
- Jouer à des jeux
- Déterminer les capacités technologiques d'un simulateur
- Visualiser des accidents et les contributeurs de collision
- Comprendre les effets de maladies et d'une variété de médicaments sur la conduite

II.3 AVANTAGES ET DESAVANTAGES

Pour justifier le recours à un simulateur, les chercheurs mentionnent souvent les avantages associés à l'usage qu'ils en font, légitimant ainsi leur choix méthodologique au regard d'autres méthodes comme l'observation en situation réelle, ou l'utilisation de véhicules instrumentés. Cependant, les limites de la méthodologie de recherche ne sont pas toujours clairement exposées, minimisant par la même occasion l'existence d'une balance pourtant bien réelle entre les avantages et les désavantages de la simulation face à un problème donné. La prise en compte de cette

complexité en termes d'usage a le mérite de constituer un point de vue critique qui devrait être apprécié par toute personne utilisant un simulateur au regard d'une question de recherche. Une question de recherche impliquera de faire un choix sur certains paramètres quant à l'usage du simulateur et générera en définitive des avantages et des inconvénients. Le tableau ci-dessous illustre un certain nombre d'avantages et de désavantages recensés de façon non exhaustive dans la littérature.

Tableau 1. Avantages et désavantages des simulateurs de conduite

| Avantages | Désavantages | Références |
|---|---|---|
| Les simulateurs permettent de faire des économies au travers de dispositifs flexibles permettant d'instruire un grand nombre de questions de recherche | Les simulateurs les plus récents nécessitent d'importants développements concernant leur logiciel de simulation afin de générer des scénarios | (Blaauw, 1982; Santos, Meret, Mouta, Brookhuis, & de Waard, 2005 ; Fisher, Rizzo, Caird, & Lee, 2011) |
| La simulation de conduite est plutôt convaincante puisqu'elle permet de reproduire des émotions analogues à celles observées en conduite réelle | Les conducteurs peuvent ne pas croire en l'authenticité de la simulation d'un point de vue fondamental, et leurs réponses sont basées sur ce biais ontologique | (Blaauw, 1982; Ranney, Watson, Mazzae, Papelis, Ahmad, & Wightman, 2005; Fisher, Rizzo, Caird, & Lee, 2011) |
| Les simulateurs sont de bons outils pour évaluer la performance de conduite du conducteur | Les simulateurs ne sont pas capables d'évaluer toute la complexité des comportements d'un conducteur puisque l'on ne sait pas exactement ce qu'il fait d'ordinaire dans son véhicule au cours de son activité de conduite réelle. | (Blaauw, 1982; Godley et al., 2002 ; Fisher, Rizzo, Caird, & Lee, 2011) |
| Un programme de formation exhaustif peut être mené sur simulateur auprès de novices en conduite, leur permettant d'acquérir progressivement des compétences transférables dans le monde réel | L'efficacité du transfert de compétences de la simulation à la réalité, en matière de formation à la conduite, reste trop peu méconnue. Par ailleurs ce type d'apprentissage est relativement onéreux. | (Blaauw, 1982; Garrott, Mazzae, & Goodman, 2005 ; Fisher, Rizzo, Caird, & Lee, 2011) |
| On peut placer le conducteur dans des conditions potentiellement accidentogènes ne présentant aucun risque (la drogue, la fatigue, le GPS, le téléphone portable) | Les accidents simulés n'induisent pas les conséquences des accidents réels en termes de dommages corporels. Ils peuvent ainsi générer des effets psychologiques inconnus sur les participants. | (Blaauw, 1982; Kaptein, Theeuwes, & Van der Horst, 1996; Fisher, Rizzo, Caird, & Lee, 2011) |
| De nombreux facteurs présents en conduite réelle, pouvant porter à confusion dans l'interprétation des résultats, peuvent être contrôlés lors de la simulation (la météo, la densité et le flux du trafic, l'éclairage, les feux de signalisation, le comportement irrationnel ou imprévu des autres usagers) | La complexité de la scène routière n'est pas pleinement retranscrite dans la mesure où bon nombre de ces facteurs agissent en perpétuelle interaction. | (Blaauw, 1982; Allen, Rosenthal, & Aponso, 2005 ; Fisher, Rizzo, Caird, & Lee, 2011) |
| La plupart des informations sensorielles sont de mieux en mieux reproduites en simulateur et particulièrement les informations visuelles considérées comme primordiales en conduite | Le monde réel ne pourra jamais être reproduit dans toute sa complexité. L'ensemble des informations sensorielles et proprioceptives en interaction reste un phénomène complexe à reproduire. | (Blaauw, 1982; Bella, 2005 ; Fisher, Rizzo, Caird, & Lee, 2011)) |
| Des événements et scénarios peuvent être créés et reproduits de façon analogue pour chaque participant | Chaque exposition ou essai affecte les réponses du sujet aux expositions ultérieures | (Blaauw, 1982; Sargent, 1998 ; Fisher, Rizzo, Caird, & Lee, 2011) |

La question de la validité n'est pas absolue mais relative à la question de recherche posée. Il n'y a donc pas de bon ou de mauvais simulateur dans l'absolu (Dagonneau 2012). Le besoin de validité physique d'un simulateur n'est pas le même selon l'usage qui en est fait. La problématique de la validité comportementale semble donc davantage porter sur l'utilisabilité du simulateur de conduite que sur le simulateur de conduite en lui-même.

III LA VALIDITE DES SIMULATEURS

III.1 LA VALIDITE : UN CONCEPT MULTIFACTORIEL

La validité est un concept multidimensionnel, recouvrant des dimensions comportementale et physique allant du sentiment perçu, résultat d'une expérience subjective à des indicateurs de performance objectifs (Wade & Hammond, 1998). La validité d'un simulateur de conduite, utilisé comme outil de recherche ou de formation, est évidemment grandement recherchée par l'ensemble des acteurs et décideurs politiques à l'origine de son initiative. Intuitivement, il s'agit de chercher à reproduire un dispositif technique le plus semblable possible à la réalité (Kaptein, Theeuwes, & van der Horst, 1996). On cherche donc à produire un simulateur possédant un haut niveau de fidélité physique (par rapport à un véhicule réel). Cependant il n'est pas toujours nécessaire d'avoir un simulateur de conduite qui reproduise dans toute sa complexité la nature de l'activité de conduite, puisque qu'en définitive la validité sera propre à la question de recherche posée. La validité d'un simulateur de conduite sera dépendante d'un certain nombre de facteurs qui détermineront sa capacité à fournir des mesures fiables en termes de performance de conduite attendue. Deux types de validité sont le plus souvent discutés dans la littérature concernant le domaine de recherche de la simulation automobile : la validité physique et la validité comportementale. En fonction de la question de recherche instruite et de l'usage du simulateur que cela présuppose, ces deux types de validité seront chacune plus ou moins pertinente à considérer.

De manière générale, les procédures de validation focalisent leur attention sur quelques caractéristiques ou composantes de la simulation qui seront sensées éprouver un ensemble de comparaisons avec la réalité. Par exemple, les profils de vitesse utilisés dans les simulateurs ont été validés avec des études sur route réelle constituant un recueil de données plutôt consistant sur lequel s'appuyer (Bella, 2005). De même, les recherches qui se sont intéressées à la prise de décision en conduite, incluant des situations en simulateur où le conducteur devait s'arrêter à l'approche de feux de signalisation en fonctionnement, ont rapporté des résultats analogues à ceux observés en conduite réelle (Allen, Rosenthal, & Aponso, 2005). Par ailleurs, d'autres problèmes ont été mis en avant concernant le type de tâche réalisée et la motivation du conducteur en simulation. Ces deux aspects semblent significativement différents en simulation par rapport à la conduite réelle, induisant un manque de congruence en termes de comportement et de performance observés.

III.2 LE SIMULATEUR : UNE MODELISATION LIMITEE DE LA REALITE

Par le passé, il a été montré qu'il n'est pas possible de complètement valider un simulateur et ce quel que soit le dispositif de mesure expérimental considéré (Allen, Mitchell, Stein, & Hogue, 1991). Par exemple, un simulateur validé pour sa façon de reproduire des profils de vitesses, pourrait ne pas avoir la résolution visuelle suffisante pour permettre une lecture des panneaux de signalisation analogue à celle de la réalité ou encore pourrait échouer à retranscrire fidèlement les distances de sécurité. Un autre exemple pourrait être celui d'un simulateur statique considéré comme performant pour proposer des scénarios complexes mais qui ne serait pas approprié pour évaluer les actions de contrôle du véhicule à cause d'un manque évident d'indices de mouvements lié à l'absence d'une base mobile offrant plusieurs degrés de liberté (Siegler, Reymond, Kemeny, & Berthoz, 2001). Clairement, l'établissement de la validité d'une simulation de conduite automobile est un problème multidimensionnel qui n'est pas trivial et qui réclame encore de nombreux efforts quant à sa formalisation et aux solutions que de futurs travaux de recherche voudront bien lui apporter. Sargent (1998) décrit différentes approches sur des techniques de validation basées sur l'analyse des données. Il relève qu'il n'existe aucun test particulier qui permette de déterminer quelles techniques ou procédures seraient à privilégier en fonction de la question de recherche instruite. On retrouve dans la littérature l'utilisation de différentes dimensions ou catégories sous-jacentes au concept général de validité. Ce concept complexe est souvent employé pour l'évaluation des simulateurs et en particulier ceux destinés à constituer des outils de formation ou de recherche dans le domaine des facteurs humains.

III.3 LA VALIDITE COMPORTEMENTALE

Blaauw (1982), reprenant deux sous-aspects de la validité définis auparavant par Mudd (1968) et McCormick (1970), propose deux autres types de validité : (1) la validité ou fidélité physique, qui est définie par le degré de correspondance physique entre le simulateur et le véhicule réel au niveau des caractéristiques dynamiques et architecturales ; (2) la validité comportementale qui établit la correspondance ou la similitude entre le comportement de l'utilisateur sur simulateur et celui observé en situation réelle. Godley et al. (2002) font remarquer que la littérature se réfère souvent à ces deux concepts de la validité sous les notions suivantes : la fidélité des simulateurs et la validité prédictive. Toutefois, Blaauw (1982) suggère que parmi ces deux aspects de la validité, l'aspect le plus important pour l'évaluation d'un simulateur est la validité comportementale. Il distingue de plus deux niveaux de validité inhérents à la validité comportementale : la validité relative, selon laquelle la comparaison entre les deux environnements (réel et virtuel) doit rendre compte de mesures de performance de même grandeur et allant dans le même sens ; la validité absolue, pour laquelle la comparaison entre les deux systèmes doit rendre compte de

mesures identiques. Dans son analyse bibliographique sur la validité des simulateurs de conduite de deux-roues motorisés, Dagonneau (2012), a montré que c'est la validité relative qui est le plus souvent établie et plus rarement la validité absolue.

En résumé, il y a plusieurs types de validité qui peuvent être appliqués aux simulateurs de conduite. Une approche fréquemment employée consiste à incorporer aux simulateurs le degré de fidélité physique le plus élevé possible afin d'optimiser la validité comportementale. Cette approche est le résultat direct de la croyance que des niveaux élevés de validité physique équivalent à des niveaux élevés de validité du comportement, malgré le fait qu'il existe des preuves qui suggèrent que cela pourrait ne pas être vrai (Liu, Macchiarella, & Vincenzi, 2009) . Il est important de se concentrer sur l'objectif spécifique de la recherche ou de la formation concernée afin d'évaluer dans quelle mesure l'usage d'un simulateur inférieur en termes de fidélité physique, serait entièrement adapté à la situation sous-jacente d'un programme de recherche ou de formation. Cette question de la validité doit aussi plus largement s'étendre à des considérations d'ordre psychologique. En effet, aussi longtemps que les participants sauront qu'il n'y a finalement pas de risque réel d'accident ou de blesser quelqu'un sur simulateur, ils auront des pratiques de conduite toujours plus à risques par rapport à celles de la vie réelle. Face à ce problème, Malaterre et Fréchaux (2001) ont approfondi la définition de la validité proposée par Blaauw (1982) en distinguant quatre niveaux de validité des simulateurs. Ces quatre niveaux de validité correspondent à différents niveaux de similitude entre la conduite simulée et la conduite en situation réelle : (1) la validité physique (fidélité, identité des stimuli auxquels le conducteur est soumis) ; (2) la validité physiologique ou expérientielle (similitude des sensations ressenties par le conducteur, ou encore jugement de ressemblance ou crédibilité subjective de la situation simulée) ; (3) la validité comportementale (analogie des comportements observés) ; et (4) la validité psychologique (similitude des mécanismes et du coût cognitif).

Allen et ses collègues (2005) défendent l'idée au travers de leur état de l'art, qu'une partie des chercheurs directement impliqués dans le développement de la simulation qu'ils comptent utiliser, pourrait parfois passer outre un ensemble de contraintes pourtant induites par leur protocole expérimental. Il serait par exemple ainsi tenu pour acquis le fait que les participants soient systématiquement disposés à faire preuve d'imagination pour se comporter dans le simulateur comme ils le feraient dans leur propre voiture. Cependant, il est probable que cette hypothèse fonctionnelle ne soit que trop largement présumée et qu'à défaut d'être vérifiée, elle puisse s'avérer relever davantage de la spéculation que du fait scientifique (Fisher, Rizzo, Caird, & Lee, 2011). En outre, les études sur simulateurs éliminent le risque de blessures associées à la conduite et ne parviennent pas à reproduire les motivations qui sont à l'origine de l'usage que l'on fait de la voiture dans la réalité, et qui vont fortement conditionner les comportements de conduite ainsi influencés. Malheureusement, il est constaté que peu de chercheurs daignent accorder de l'importance à ce type de problème (Edwards, 1961) l'essentiel des pratiques en matière de recherche sur cette question consiste à donner des instructions sur la conduite en simulateur demandant au sujet de conduire aussi normalement que

possible par rapport à ce qu'il fait dans la réalité. Or en l'absence d'un contexte de conduite bien défini avec de réels objectifs à atteindre, impliquant sérieusement le participant, de telles instructions peuvent être bien souvent très confuses pour le sujet et paraître très artificielles. Tout ceci a été mis en avant par Zeitlin (1996) qui a examiné plus de 106 publications de recherche qui n'apportaient très peu voire aucune considération à cette question de la validité psychologique.

III.4 LA VALIDITÉ PSYCHOLOGIQUE : UN PILIER DE LA VALIDITÉ COMPORTEMENTALE

Les simulateurs possédant une grande fidélité ou validité physique fournissent une expérience réaliste et convaincante pour les sujets participant à des expériences de recherche. Cependant, la crédibilité des résultats obtenus à partir de ces études reste encore très discutée (Horrey & Wickens, 2006). Par exemple McCartt, Hellinga et Braitman (2006) ont recensé 54 études qui utilisaient les simulateurs de conduite ou véhicules instrumentés pour évaluer l'usage du téléphone portable au volant. Leurs observations furent que la variabilité de performance observée d'une étude à l'autre posait clairement la question de leur propension à constituer des bases de réflexion sérieuses pour appréhender l'activité de conduite réelle. En effet, en plus d'avoir mis en avant un ensemble de problèmes méthodologiques, ils ont identifié une des principales faiblesses inhérentes à toutes ces études étant le manque criant de validité comportementale. La validité physique de l'expérience de conduite semble insuffisante pour dépasser la plupart des critiques concernant le manque de validité comportementale. Si comme nous l'avons vu précédemment, Malaterre et Fréchaux (2001) définissent plusieurs composantes de la validité en les plaçant au même niveau, le propos de notre article est de dire que la validité psychologique conditionne la validité comportementale. Nous considérons, dès lors, la validité comportementale comme dépendante de la validité psychologique de la situation de simulation. La validité psychologique est définie comme la mesure selon laquelle les risques et les récompenses qu'offre la participation à une expérience en simulation correspond à ce éprouvé dans la réalité (Goodman et al., 1997).

Pour évaluer la validité comportementale des simulations, Stoffregen et ses collègues (2003) proposent deux critères distincts : la validité subjective de l'expérience (ou validité expérientielle) et la validité de la performance (ou validité de l'action). La première notion de validité expérientielle est formalisée par ces auteurs à travers le concept de présence qui se définit comme le degré auquel une simulation produit une expérience subjective « d'être là » (« being there »). La présence est souvent considérée comme une illusion perceptive (Lombard et Ditton, 1997), qui soulève différentes interrogations et confusions qui seront abordées dans la dernière section de notre exposé. Cette première notion est également désignée dans la littérature sous la notion de fidélité perceptive (Burkhardt, Bardy, & Lourdeaux, 2003) et semble très proche d'un des concepts de la validité, la validité expérientielle, proposée par Malaterre et Fréchaux (2001). La deuxième notion de validité de

l'action, peut être définie en termes de relation entre la performance dans la simulation et celle produite dans le monde réel. On retrouve également dans la littérature ce sous-concept sous le terme de validité psychologique (Burkhardt et al., 2003) ou encore sous le terme de fidélité fonctionnelle telle que définie par Moroney et Moroney (1998).

IV ETABLIR LA VALIDITE PSYCHOLOGIQUE AU TRAVERS DU CONCEPT DE PRESENCE

La simulation de conduite est une des composantes de la réalité virtuelle, dont la finalité est de permettre à une personne (ou à plusieurs) une activité sensori-motrice et cognitive dans un monde artificiel, créé numériquement (Fuchs, 2006). La conception d'environnements virtuels a cependant longtemps reposé sur des considérations focalisées sur une optimisation d'un haut degré de réalisme. Cette approche techno-centrique de l'immersion et de l'interaction est trop réductrice et il est très largement admis qu'il est nécessaire d'adopter une approche anthropocentrique visant à replacer le facteur humain au centre de l'expérience de réalité virtuelle. Il est à noter qu'ici l'immersion doit être comprise comme la mesure dans laquelle les systèmes de restitution sont capables de délivrer une illusion de la réalité aux sens de l'utilisateur qui soit exclusive (l'environnement virtuel supplante l'Environnement Réel), large (toutes les modalités sensorielles sollicitées), englobante (Perception Omnidirectionnelle), juste (Proprioception effective, réalisme perceptif) (Slater & Wilbur, 1997). Cette notion est à distinguer de la présence qui constitue, nous le verrons davantage par la suite, une expérience subjective. Par ailleurs, l'interaction est vue comme la capacité d'un individu à pouvoir modifier son environnement, intervenir sur le contenu de l'expérience. L'utilisateur devient ainsi acteur de l'expérience en pouvant réaliser différentes tâches interactives comme la navigation, la sélection, la manipulation, ou tout autre action de contrôle sur le système.

IV.1 LE CONCEPT D'IMMERSION

La conceptualisation de l'immersion est issue d'une approche essentiellement centrée sur les aspects techniques des environnements virtuels. Cette approche de l'immersion a pour objectif de créer un environnement virtuel interactif, qui retranscrive le plus fidèlement possible la complexité des différentes modalités sensorielles impliquées (Farell, 2008). L'essentiel des avancées techniques observées dans le domaine de la réalité virtuelle ont été impulsées par l'industrie du divertissement (Fisher, Rizzo, Caird, & Lee, 2011). Le développement des cartes graphiques s'est fait peu de temps après la révolution informatique impulsée par IBM dans les années 1980 avec l'avènement du PC ou « personal computer ». En démarrant par les premières versions développées par Texas Instruments ne permettant qu'un affichage 2D, une réelle évolution s'en est suivie avec l'introduction de cartes permettant de gérer l'affichage 3D : les cartes 3DFX ou encore connue maintenant sous le nom de cartes graphiques ATI ou NVIDIA. Ces cartes graphiques actuelles permettent d'avoir des images avec une résolution spatiale et temporelle offrant une présentation des informations suffisamment rapides dans le temps et

suffisamment précises dans l'espace pour que le système perceptif puisse supporter sans fatigue et sans s'adapter ce qui lui est présenté. Si l'on prend maintenant l'exemple du matériel audio, en un siècle, nous sommes passés du mode d'écoute le plus basique, la monophonie (1 seule direction sonore), à la stéréophonie (l'angle d'écoute s'ouvre à une soixantaine de degrés) jusqu'au multicanal des grands complexes cinématographiques et aujourd'hui au binaural (qui reproduit l'espace sonore depuis 360 ° en horizontal jusqu'à l'ensemble de l'espace tridimensionnel). La proprioception s'est également développée dans les simulateurs au travers des dispositifs de retour d'effort dans le volant, de contrôle des pédales et de changement des vitesses. La nécessité de reproduire le plus fidèlement possible l'ensemble les mouvements du corps inhérents à toute activité de conduite a aussi été une des préoccupations majeures des chercheurs dans l'histoire de la simulation automobile (Fisher, Rizzo, Caird, & Lee, 2011). Par ailleurs la nécessité de reproduire des entrées sensorielles somesthésiques, proprioceptives et vestibulaires, semble à l'heure actuelle indiscutable (Allen, Rosenthal, & Aponso, 2005) si l'on veut reproduire une activité de conduite la plus réaliste possible. Les chercheurs (Slater, 2003 ; Riva, Davide, & Ijsselstein, 2003 ; Zahoric & Jenison, 1998) ont mis en évidence que plus les sens de l'utilisateur sont immergés par des périphériques, moins celui-ci est conscient du système technique et plus le système technique devient transparent. On parlera ici d'une approche anthropocentrique de l'immersion. L'immersion est, dans cette approche, assimilable à la sensation d'immersion éprouvée par un utilisateur au cours d'une expérience virtuelle. Cette sensation, basée sur un état physique ou psychologique, pourra donner l'impression à l'utilisateur d'avoir quitté le monde réel et d'être actif dans l'environnement virtuel. Cette sensation est caractérisée par la perception d'être ou de se sentir « enveloppé » par l'environnement virtuel (Dagonneau, 2012).

L'interaction d'un individu dans un monde virtuel au sens large est une transposition de la boucle perception, cognition, action du comportement humain dans le monde réel (Fuchs, 2006). L'immersion dans un monde virtuel ne peut pas être la même que celle dans le monde réel, l'utilisateur a appris à agir naturellement dans un monde réel et non virtuel (sans biais sensori-moteurs), certains auteurs parlent alors d'immersion pseudo naturelle (Arnaldi, Fuchs, & Tisseau, 2003). De la même manière un utilisateur, perçoit et agit physiquement avec les entités et éléments du monde virtuel sans que cela se traduise toujours par une activité physique sensori motrice. Cet état de fait empêche d'appréhender la réalité virtuelle comme une simple copie du monde réel. Ainsi, l'immersion (au sens des contingences sensorimotrices permises par le simulateur) est une condition nécessaire mais pas suffisante pour l'expression en situation virtuelle d'une performance représentative de la situation de conduite réelle (Fuchs, 2006). Face à ce problème, un concept, issu des débuts de la réalité virtuelle dans les années 80, semble permettre d'aborder la question de la validité des comportements observés sur simulateur : le concept de présence. Ce concept multidimensionnel est considéré comme un état psychologique permettant à des sujets en situation immersive d'adopter un comportement similaire à celui de la

vie de tous les jours et par conséquent à réagir aux divers stimuli comme s'ils étaient réels (Slater, 2003).

IV.2 LE CONCEPT DE PRESENCE

D'après Reeves (1991), qui fut l'un des premiers chercheurs à introduire le concept, la présence, est la sensation créée par les technologies « d'être là » ou la « sensation d'être dans l'environnement virtuel ». Avec l'essor de nouvelles technologies, de plus en plus de chercheurs se sont intéressés à l'étude de l'interaction de l'être humain dans la réalité virtuelle (Farrell, 2008). Dans sa revue de littérature, Lee (2004), explique que la sensation de présence que ressent l'utilisateur rend la technique complètement transparente c'est-à-dire que l'utilisateur ne voit plus la machine et expérimente sa pleine subjectivité à travers l'usage d'une technologie en oubliant que sa perception est générée par la machine elle-même. Globalement, l'ensemble des chercheurs (Lombard & Ditton, 1997; Sadowski & Stanney, 2002; Riva, Davide, & IJsselstejn, 2003; Slater et al., 2009) s'accordent à dire que « la présence » est multi-déterminée par la perception, la motricité, l'attention de l'acteur, la tâche et les interactions sociales. Toutefois, aujourd'hui, les chercheurs en réalité virtuelle ne s'entendent pas encore sur une définition commune de ce terme « présence » (Dagonneau, 2012). Or une définition commune partagée par l'ensemble des chercheurs permettrait de développer une approche méthodologique standardisée satisfaisant les critères de reproductibilité, de fidélité et de validité, inhérents à toute mesure scientifique. En outre les perspectives des chercheurs en réalité virtuelle s'articulent autour de deux grandes considérations que sont l'approche rationaliste et l'approche psycho écologique. La conceptualisation de chacun de ces deux concepts est sous-tendue par une approche philosophique ontologiquement singulière (Dagonneau, 2012) : (1) La présence technologique : l'utilisateur est ailleurs que là où il est physiquement, le "ailleurs" est formé par les images, sons et sensations physiques fournis aux sens de l'utilisateur par le système générant l'environnement virtuel. (Slater, 2003) ; (2) La présence psychologique : approche centrée sur l'individu : prégnance du contenu, du scénario, des idées, des émotions induites par un media (Riva, Davide, & IJsselstejn, 2003) ; (3) La présence écologique : l'homme ne perçoit pas un environnement par ses sens puis en déduit des actions possibles mais perçoit l'environnement directement par les possibilités d'action détectées (Bouvier, 2009 ; Zahoric & Jenison, 1998).

IV.3 FACTEURS DETERMINANTS DE LA PRESENCE

Plusieurs facteurs peuvent moduler la présence. De par les différentes conceptualisations qui sous-tendent chacune des approches théoriques et méthodologiques, une très forte hétérogénéité apparaît là aussi dans la littérature sur cette question de la caractérisation de la présence. Quelques tentatives ont été

réalisées pour tenter de définir ces déterminants de la présence (Lombard & Ditton, 1997 ; Sadowski & Stanney , 2002 ;Riva, Davide, & IJsselstejn, 2003). Riva et al. (2003) ont toutefois proposé de réduire l'ensemble des facteurs mentionnés dans la littérature à deux catégories générales de variables : les caractéristiques du média et celles de l'utilisateur.

Les caractéristiques du média définissent tout un ensemble de paramètres pouvant être rangés dans deux catégories (Dagonneau, 2012) : (1) les variables relatives à la forme du média. Elles se réfèrent aux propriétés ou caractéristiques technologiques du système, regroupées par définition sous les concepts d'immersion et interaction, participant à rendre l'interface aussi transparente que possible ; (2) les variables relatives au contenu de l'expérience se référant aux éléments non-technologiques incluant par exemple les objets, personnages, histoire ou événements représentés par le média. L'idée est qu'un même environnement virtuel possédant un ensemble de caractéristiques immersives peut provoquer chez différentes personnes différents niveaux de présence de par les caractéristiques intrinsèques de chaque individu (Slater, 2003,) ; par ailleurs un système immersif ainsi considéré peut également générer un sentiment de présence chez le même utilisateur à une occasion mais pas à une autre (Lombard et Ditton, 1997). Tout ceci permet de dire que l'immersion et l'interaction sont des conditions nécessaires mais pas suffisantes puisque d'autres aspects sont à considérer, comme par exemple les caractéristiques de l'utilisateur. Ces dernières restent toutefois trop peu étudiées, elles regroupent l'ensemble des capacités cognitives, motrices et sensorielles d'un utilisateur mais aussi tout ce qui constitue son expertise avec tout type d'environnement virtuel médiatisé par une interface homme-machine (Lombard et Ditton, 1997). Seulement certains auteurs accordent ainsi une grande importance à l'attention ou l'engagement pour expliquer l'apparition du sentiment de présence (Bystrom, Barfield, & Hendrix, 1999; Riva, Waterworth, & Waterworth, 2004; Witmer et Singer, 1998). En règle générale, l'ensemble des facteurs considérés comme déterminants pour atteindre un sentiment de présence se retrouvent sous les deux notions que sont l'immersion et l'interaction (forme du média) (Dagonneau, 2012). Ces 2 concepts, décrivant les caractéristiques liées à la technologie, définissent également ce que l'on a appelé plus en amont de notre revue de question le niveau de validité physique (ou fidélité physique) d'un simulateur.

IV.4 LA MESURE DE LA PRESENCE

IV.4.1 Mesures subjectives : questionnaires

Les questionnaires apparaissent comme la mesure la plus utilisée dans la littérature pour évaluer le sentiment de présence. Ils présentent plusieurs avantages comme celui de ne pas rompre l'expérience immersive de l'utilisateur dans l'environnement virtuel ; ils sont relativement faciles à administrer et permettent de sonder les différentes dimensions de l'expérience sensible auto-rapportée (Riva,

Davide, & IJsselstejn, 2003; Lee, 2004 ; Slater et al., 2009). Les positions ontologiques étant différentes selon les auteurs, plusieurs questionnaires ont été conçus, tels que : le questionnaire de Présence de Witmer et Singer (1998), le SUS (Slater, Sadagic, Usoh, & Schroeder, 2000), l'ITC-SOPI (Lessiter, Freeman, Keogh, & Davidoff, 2001), le MEC-SPQ (Vorderer, Wirth, & Gouveia, 2004), le TPI (Lombard, Ditton, & Weinstein, 2009), l'IPQ (Schubert, Friedmann, & Regenbrecht, 2001).

Le recours à ce type de mesure présente plusieurs inconvénients (Youngblut, 2003) comme :

- Le manque de fiabilité et de reproductibilité des résultats obtenus (différents questionnaires de la présence peuvent donner des résultats très variables pour une expérience donnée)
- Le questionnaire est une mesure post-test qui ne permet pas d'interroger la dynamique de l'activité ne donnant pas accès aux possibles variations du sentiment de présence au cours du temps
- La mesure repose sur la capacité plus ou moins développée de tout à chacun de se sonder et de rapporter ses propres processus cognitifs
- L'expérience auto-rapportée exige de faire appel à sa mémoire induisant une possible variabilité entre l'expérience vécue et l'expérience remémorée ;
- La notion de présence peut paraître plus ou moins abstraite voire ambiguë d'un individu à l'autre, pouvant induire des problèmes de compréhension, rendant plus ou moins difficile son appropriation pour les participants

Pour illustrer plus largement les difficultés quant à l'usage des questionnaires pour mesurer la présence, il a été rapporté dans une revue de question très complète sur la mesure de la présence dans les environnements virtuels, réalisée par Youngblut en 2003, que sur plus d'une centaine d'études expérimentales, on a compté plus de 70 mesures différentes de la présence.

IV.4.2 Mesures physiologiques

Parallèlement à l'usage des indicateurs comportementaux précédemment cités, peuvent être réalisées différentes mesures physiologiques telles que la fréquence cardiaque (variabilité du rythme cardiaque), les mesures d'activité électrodermale, la température de la peau ou encore la fréquence respiratoire. Ces indicateurs peuvent constituer des marqueurs plus ou moins objectifs de la présence ressentie au cours du temps. Ils restent encore assez peu utilisés dans la grande majorité des études s'intéressant à la question de la présence, seuls certains auteurs se sont penchés sur cette alternative méthodologique. Toutefois, il semble que l'on ait de plus en plus recours à ce type de mesure. Par ailleurs, quelques études semblent avoir mis en avant des relations intéressantes entre les mesures subjectives et ces mesures physiologiques (Meehan, Insko, Whitton, & Brooks, 2002; Slater et al., 2009).

IV.4.3 Mesures comportementales

Ce type de mesure semble une alternative intéressante pour évaluer la dynamique du comportement comparé aux questionnaires qui ne peuvent que donner une information subjective et moyennée de tout ce qui a pu se passer au cours de l'expérience virtuelle. D'après Usoh, Alberto et Slater (1996), un individu ressentant un fort sentiment de présence devrait adopter un comportement dans l'environnement virtuel similaire à celui qu'il adopterait dans des circonstances similaires de la vie (réalité) de tous les jours. Freeman, Avons, Meddis, Pearson et IJsselsteijs (2000) sont les premiers à avoir proposé d'instruire la question de la présence sous l'aspect comportemental et non plus seulement subjectif afin d'objectiver au maximum la nature des résultats. L'approche comportementale de la présence développée par ces auteurs consiste à dire qu'un individu ressentant un sentiment de présence de par son exposition à un environnement virtuel répondra aux stimuli de l'environnement comme il le ferait aux stimuli présents dans le monde réel. Plus concrètement, ils ont cherché à développer des indicateurs comportementaux de la présence, essentiellement basés sur des ajustements posturaux. Néanmoins, leurs résultats, bien qu'indiquant à la fois un effet positif de la présentation stéréoscopique sur l'amplitude des réponses posturales latérales des participants et sur le sentiment de présence ressenti (estimé par des échelles visuelles analogiques), n'ont pas permis de considérer les mesures posturales comme une mesure permettant de se substituer aux évaluations subjectives de présence puisque les deux mesures ne semblent pas être corrélées. D'autres tentatives cherchant à établir des indicateurs comportementaux de la présence ont été faites par le passé, telles que la vection, proposée par Prothero et Hoffman (1995), Ohmi (1998), les réponses réflexes verbales et physiques testées par Nichols, Haldane et Wilson (2000).

IV.5 PRESENCE ET VALIDITE DES SIMULATEURS

Bien que plusieurs travaux de recherche dans le domaine de la réalité virtuelle sont menés sur cette question du sentiment de présence et qu'ils focalisent leur attention sur la caractérisation des facteurs à l'origine de son émergence, un nombre très limité d'études s'est intéressé à ce concept comme un outil pour évaluer les environnements virtuels et plus spécifiquement les simulateurs de conduite (Dagonneau, 2012; Godley et al., 2002). Tichon et al. (2006) et Tichon (2007) ont étudié le degré de présence ressenti par des conducteurs de trains en simulation de conduite et l'impact des différents facteurs de la présence dans le but d'améliorer le simulateur de conduite de train de l'Université de Queensland (Australie). Johnson et ses collègues (2011) ont également étudié la question de la validité des simulateurs en s'intéressant au sentiment de présence induit par ces derniers. Plus récemment, Dagonneau (2012) a repris l'approche de Johnson et al. (2011) mais en l'adaptant aux simulateurs de deux-roues motorisés.

Dans le cadre de cette revue de question, nous appuyons l'idée défendue par Dagonneau (2012) sur la nécessité de proposer une nouvelle approche pour

appréhender les similitudes du comportement entre environnement réel et virtuel (validité comportementale), au travers du concept de présence. Bien qu'étant un phénomène complexe et sous-tendu par de très nombreuses définitions, la présence nous semble être un concept intéressant pour caractériser la validité comportementale avec pour point d'ancrage la validité psychologique. Nous considérons donc la présence comme un état psychologique permettant à des sujets en situation immersive d'adopter un comportement similaire à celui de la vie de tous les jours et par conséquent à réagir aux divers stimuli comme s'ils étaient réels. En conséquence, le sentiment de présence conduirait à l'adoption d'un comportement dans l'environnement virtuel similaire à celui que l'individu adopterait dans des circonstances similaires de la vie de tous les jours (Slater, 2003; Slater et al., 2009). Les mesures subjectives reflétant la validité psychologique de l'expérience pourraient être ainsi corrélables à des mesures comportementales (indicateurs de performance de conduite : variabilité de la position latérale dans la voie, variabilité de la vitesse, la variabilité de l'angle au volant...) et physiologiques (caractérisant l'état d'éveil physiologique ou stress physiologique). Des questionnaires sur les émotions pourraient également être utilisés parallèlement à toutes ces mesures afin d'arbitrer l'état émotionnel du sujet (Diemer, Alpers, Peperkorn, Shibana, & Mühlberger, 2015). Ainsi l'hypothèse sous-jacente à notre travail est qu'un individu éprouvant un fort sentiment de présence dans l'environnement virtuel réagira dans cet environnement comme s'il était réel. Notre analyse bibliographique plaide donc en la faveur d'une plus grande attention à accorder à la validité psychologique au travers du concept de présence, dans l'élaboration de protocoles expérimentaux, désireux d'établir la validité comportementale du simulateur de conduite utilisé.

V PROBLEMATIQUE DE RECHERCHE

V.1 CONTEXTE

Dans le domaine de la conduite automobile, l'usage de la simulation en environnement virtuel repose à l'heure actuelle sur des considérations de sécurité routière et d'utilisabilité d'interfaces hommes machines tels que les systèmes d'aide à la navigation. Les simulateurs de conduite permettent donc d'étudier le comportement humain dans différentes conditions fixées expérimentalement. Un avantage majeur de la simulation est de ne pas exposer le sujet à un risque objectif et que les conditions de test sont "facilement" mises en œuvre et manipulées. Le recours à la simulation pose néanmoins la question de la généralisation et transposition des comportements observés en simulation à la situation réelle de conduite. En effet, il est nécessaire de s'assurer que le simulateur mesure précisément l'objet d'étude sans le modifier ou l'influencer. L'évaluation du degré de validité est donc cruciale dans toute étude sur simulateur qui cherche à susciter des comportements réalistes de conducteurs. La simulation de conduite est une des composantes de la réalité virtuelle, dont la finalité est de permettre à une personne (ou à plusieurs) une activité sensori-motrice et cognitive dans un monde artificiel, créé numériquement (Fuchs, 1996). La conception d'environnements virtuels a cependant trop longtemps reposé sur des considérations focalisées sur une optimisation d'un haut degré de réalisme. Cette approche technocentrique de l'immersion et de l'interaction semble dépassée et il est très largement admis la nécessité d'adopter une approche anthropocentrique afin de permettre à un homme placé dans un environnement virtuel de se percevoir comme un utilisateur à part entière.

V.2 PROBLEMATIQUE

L'interaction et l'immersion d'un individu dans le monde virtuel reposent sur une transposition de la boucle perception, cognition, action du comportement humain dans le monde réel. L'immersion dans un monde virtuel ne peut pas être la même que celle dans le monde réel, l'utilisateur a appris à agir naturellement dans un monde réel et non virtuel (sans biais sensori-moteurs), certains auteurs parlent alors d'immersion pseudo naturelle (Arnaldi et al., 2003). Cet état de fait empêche d'appréhender la réalité virtuelle comme une simple copie du monde réel. Ainsi l'immersion (au sens des contingences sensorimotrices permises par le simulateur) est une condition nécessaire mais pas suffisante pour l'expression en situation virtuelle d'une performance représentative de la situation de conduite réelle. Face à ce problème, un concept, issu des débuts de la réalité virtuelle dans les années 80, semble permettre

d'aborder la question de la validité "écologique" des comportements observés sur simulateur : le concept de présence. Ce concept multidimensionnel est considéré comme la capacité des individus à adopter un comportement similaire à celui de la vie de tous les jours et par conséquent leur propension à réagir aux divers stimuli comme s'ils étaient réels (Slater et al., 2009). Le postulat de notre travail repose donc sur l'idée que la présence nous apparaît être un concept clé pour évaluer la représentativité des comportements de conduite observés en simulation. Par ailleurs un comportement de conduite représentatif est ici défini comme étant un comportement adapté à la situation de conduite optimisant de fait la performance de conduite associée.

La présence est un concept qui reste encore mal défini puisqu'abordé dans la littérature par différents champs théoriques. Du point de vue de la conception ergonomique, la présence est vue comme une fonction directe de la capacité d'immersion d'un système (Waterworth, 2003). La présence est ici bien dissociée de l'immersion puisque ne dépendant pas uniquement de facteurs inhérents à l'interface. Dans une approche plus psychologique, est introduite la notion de «fidélité psychologique» (Leplat, 1992) définie comme la mesure selon laquelle le simulateur produit un comportement semblable à celui exigé dans la situation réelle ou encore comme la proportion dans laquelle la tâche simulée engendre une activité psychologique identique à celle de la tâche réelle (Patrick, 1992). Enfin dans une approche cognitiviste on souligne que les aspects sensoriels fournis par la réalité virtuelle, parfois minimalistes, ne régissent pas à eux seuls la correspondance observée entre virtuel et réel en termes de réactions physiologiques. La présence est dépendante de la cognition, elle est appréhendée comme l'effort cognitif à fournir par le sujet pour se projeter dans l'environnement virtuel alors qu'il est conscient de ne pas y être (Tiberghien, 1991). Il apparaîtrait que la compréhension de la notion de la présence exigerait une prise en considération des facteurs émotionnels. En effet l'état émotionnel peut avoir un impact au niveau comportemental en modifiant qualitativement les mécanismes cognitifs (Guerin, 2008). Il a été montré qu'un sujet peut préférentiellement orienter son comportement vers les informations qui correspondent à son état émotionnel (positif ou négatif) c'est ce que l'on appelle la congruence émotionnelle (Bower, 1981 ; Watkins, Vache, Vernay & Muller, 1996). Ainsi, l'émergence du sentiment de présence serait inextricablement reliée à l'intervention en synergie de mécanismes cognitifs et émotionnels. La dynamique de ces deux processus serait conditionnée par la nature du contexte caractérisant l'expérience virtuelle de simulation. Cette notion de contexte est définie comme l'ensemble des conditions qui accompagnent la réalisation d'un évènement ou la réalisation d'un comportement, il aurait comme effet de focaliser le système cognitif sur des informations pertinentes et d'inhiber ce qui au contraire ne présente pas d'intérêt et va faciliter l'évolution du sujet dans son environnement ainsi que la réalisation de tâches mêmes automatiques (Yeh & Barsalou, 2006). Dans notre étude cet effet de contexte pourra être appréhendé comme une variable indépendante

induisant plus ou moins un degré de challenge c'est à dire induisant une charge cognitive et/ou émotionnelle.

V.3 POSITIONNEMENT

L'émergence du sentiment de présence semble donc reposer sur une dynamique complexe de différents mécanismes cognitifs qui eux-mêmes sont issus d'une architecture cognitive constituée d'entités relevant de la perception, la mémoire, l'attention et l'imagerie mentale. L'activité de conduite que l'on cherche à reproduire en simulateur est nous l'avons vu une activité complexe du point de vue cognitif, nécessitant d'opérer en permanence un compromis cognitif. Ce compromis cognitif caractérise la dynamique de mobilisation des ressources cognitives au regard de la difficulté de la tâche. Ainsi la conceptualisation de la présence dans le cadre de cette thèse se doit de décrire les processus cognitifs sous tendant son émergence. Par ailleurs le modèle que l'on recherche se devra d'accorder une importance particulière à l'attention qui est la dimension cognitive centrale de la tâche de conduite. A partir de l'ensemble de ces considérations nous avons donc choisi de se baser sur un récent modèle de la présence (voir figure 1), appelé le modèle de la présence spatiale (Wirth et al ., 2007). Ce modèle récent présente un premier intérêt puisqu'il correspond aux critères précédemment cités, explicitant les mécanismes cognitifs sous-tendant l'émergence du sentiment de présence. Ce modèle aborde le concept de présence spatiale en exposant l'idée qu'une personne ne serait présente dans un environnement que si elle serait capable de se construire une représentation spatiale de l'environnement traversé. Le deuxième intérêt de ce modèle est qu'il a été relativement peu utilisé et donc tester expérimentalement, ce qui constitue un défi théorique et un challenge méthodologique. Plus concrètement le modèle expose l'idée que dans un premier temps, ce seraient des processus mentaux cognitifs inconscients qui favoriseraient la construction d'une représentation spatiale débouchant dans un deuxième temps sur une expérience subjective consciente de présence physique plus ou moins concluante. Ce modèle de la présence à deux niveaux nous apparaît illustrer au mieux les différentes préoccupations au sujet de la présence par les différents champs théoriques. En effet même si ce modèle ne semble n'appréhender la présence que sous l'angle « spatial », il faut bien comprendre que cette présence spatiale n'en est pas moins la résultante de toutes les dimensions que sont l'immersion, l'interaction et les facteurs internes de l'utilisateur. Au regard de ce modèle une distinction semble nécessaire à faire entre le processus cognitifs de représentation spatiale et le sentiment subjectif de présence spatiale (Schubert, 2009).

Ainsi la question est de savoir comment l'expérience consciente de la présence émerge-t-elle de processus cognitifs inconscients. Schubert répond à ce problème en introduisant la notion de présence comme un sentiment cognitif qui serait un feedback de l'inconscience sur la conscience qui influencerait l'expérience subjective consciente de présence physique. Il révèle ainsi que pour mesurer la présence il faut distinguer les mesures liées à des phénomènes inconscients (cognitifs, comportementaux, ou psychophysiologiques) des mesures subjectives du sentiment de présence physique. L'idée essentielle est donc de ne pas opposer les mesures dites objectives (Physiologiques, psychophysiques...) et qualitatives, mais bien de les utiliser en parallèle, puisqu'en définitive elles ne mesurent pas le phénomène au même niveau.

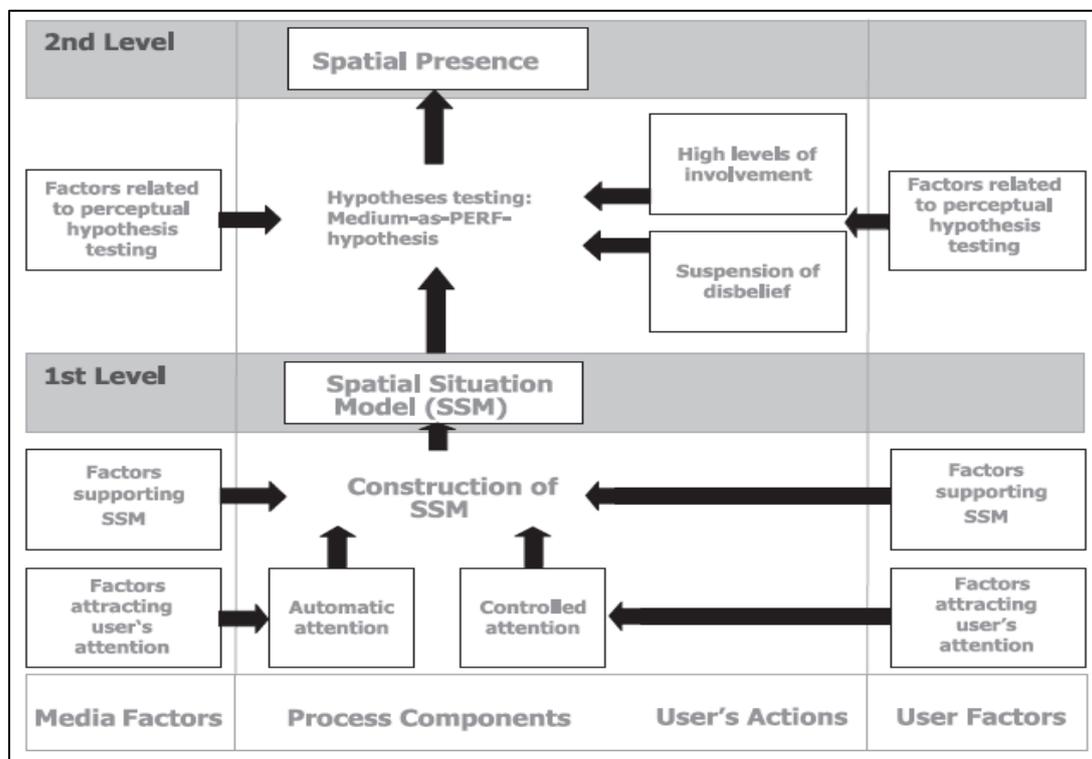


Figure 1. Modèle de la présence spatiale de Wirth et al (2007)

La thèse défendue dans ce travail de recherche repose donc sur l'idée qu'une personne sera d'autant plus présente qu'elle sera en mesure de se construire une représentation spatiale de l'environnement virtuel traversé. Les facteurs tels que l'implication cognitive, la projection d'intentions Top/Down, les processus attentionnels Botton/up, le degré d'interactivité et le contexte modulent la représentation spatiale construite au cours de l'expérience.

La présence spatiale évoquée dans le modèle de Wirth et ses collègues expose l'idée que l'émergence du sentiment de présence est un processus dynamique qui est la résultante de plusieurs déterminants. En effet, les caractéristiques propres à

l'individu (user factors) ainsi que les caractéristiques de l'interface ou de l'environnement (media factors) utilisé, vont venir moduler la mécanique cognitive sous tendant le sentiment de présence. C'est ainsi que, dans un premier niveau, les processus attentionnels évoqués auparavant, vont être influencés par ces combinaisons de facteurs internes et externes à l'individu, amenant ce dernier à se forger un certain degré de représentation mentale (Spatial situation model). Cette conscience spatiale de l'environnement est la clef de voute d'une suite de sous processus mettant en jeu l'implication cognitive (cognitive involvement) de l'utilisateur et sa suspension de discrédit (suspension of disbelief). Plus particulièrement, l'utilisateur va émettre des hypothèses ou inférences sur l'environnement virtuel dans lequel il est placé et cherchera à rationaliser son expérience spatiale d'immersion sur la base des informations constituant la connaissance et la maîtrise qu'il a de son environnement, d'un point de vue spatial. La présence spatiale est donc le résultat d'une construction propre à chaque utilisateur plongé dans un environnement virtuel, et se caractérise dans le modèle, par deux sous dimensions que seraient le sentiment d'autolocalisation de soi (self location) et la propension à pouvoir agir sur son environnement (possible actions).

V.4 PROGRESSION ENVISAGEE

La suite de notre manuscrit sera suivie par l'exposition de trois études sur différents types de simulateurs. La première étude consistera en une étude pilote sur l'évaluation du sentiment de présence sur un simulateur statique faiblement immersif. De cette première approche essentiellement qualitative de la présence en simulateur, nous en ressortirons les principales difficultés rencontrées et les enjeux méthodologiques à relever afin de rendre le concept de présence opérationnel en termes d'instruction de la validité comportementale. Nous définirons dès lors une nouvelle approche plus psycho-comportementale, en définissant de nouveaux indicateurs comportementaux périphériques à la présence. L'idée centrale sera de tester les liens de causalité entre les différents prédicteurs de la présence exposés dans le modèle théorique de la présence préalablement choisi et présenté dans notre partie bibliographique. La deuxième expérimentation, se déroulera sur un simulateur statique plus élaboré que dans la précédente expérimentation, et consistera à évaluer la sensibilité de nos indicateurs comportementaux au regard de la présence. La troisième expérience consistera à reproduire la deuxième expérimentation mais cette fois sur un simulateur de plus haute technicité composé d'une plateforme mobile. Il s'agira de mesurer l'influence de l'immersion sur le sentiment de présence et l'ensemble de nos variables dépendantes.

VI EXPERIMENTATION 1

VI.1 OBJECTIFS

Cette première expérimentation étudiait les effets de la complexité de la situation de conduite (présence de trafic ou non) et d'une double tâche sur le niveau de présence spatiale ressentie. L'objectif de cette première session expérimentale était dans un premier temps de valider le modèle de la présence spatiale de Wirth et al (2007) et de mettre en évidence des indicateurs comportementaux de la présence. Concrètement nous avons artificiellement modulé la charge attentionnelle induite par l'environnement virtuel en termes de processus attentionnels contrôlés et automatisés.

VI.2 HYPOTHESES

Un niveau élevé d'attention ressentie devrait se manifester lorsque la situation de conduite mobilise à la fois des processus attentionnels contrôlés et automatiques (en double tâche et avec du trafic). Par voie de conséquence, plus l'attention ressentie est importante plus un niveau élevé de représentation mentale (SSM) devrait se manifester. Enfin un niveau élevé de présence spatiale devrait se caractériser par un haut niveau de représentation mentale de l'environnement virtuel traversé.

VI.3 METHODOLOGIE

VI.3.1 Participants

20 conducteurs (14 hommes et 6 femmes) étaient répartis en quatre groupes constitués par le croisement de deux variables indépendantes qu'étaient : la présence ou non d'une double tâche à réaliser et la présence d'un trafic bidirectionnel au cours de l'expérience de conduite. L'âge des participants allait de 22 à 45 ans ($M= 32.8$, $SD= 6.45$). Chaque participant possédait au moins cinq années d'expertise de conduite, et parcourait par an au moins 16 000 km. Le recrutement des sujets s'est effectué en démarchant des étudiants et du personnel de la faculté des sciences du sport de Marseille sur le campus de Luminy. Seuls les participants en bonne santé avec une vue normale ou corrigée, n'étant pas sensibles au mal des transports et répondant aux critères d'inclusion ont été sélectionnés. Tous ont signé une fiche d'information et un formulaire de consentement libre et éclairé avant leur participation.

VI.3.2 Simulateur de conduite

L'expérimentation s'est déroulée sur le simulateur de conduite INRETS à base fixe du centre de la réalité virtuelle de la Méditerranée (voir figure 2), équipé d'une architecture parallèle multi-acteurs pour la simulation (ArchiSim) et d'une base de

données provenant du logiciel SIM2-IFSTTAR (ESpié, Gauriat & Duraz, 2005). L'architecture « ArchiSim » s'appuyait sur le modèle de simulation de trafic DR2 (gestion des véhicules « autonomes » et « asservis » dont le comportement est défini par des scripts pour chaque scénario, simulation générée par des capteurs de trafic ponctuels et spatiaux) et sur la boucle de visualisation 3D SIM2. Le poste de conduite interactif était constitué d'un quart de véhicule comprenant un siège, un tableau de bord et des commandes équipées de capteurs, i.e. pédalier et volant.



Figure 2. Simulateur statique (INRETS) de conduite

Les différents mouvements et actions exercés sur le véhicule étaient reproduits virtuellement. Les valeurs d'accélération, de freinage et de direction du simulateur étaient celles d'un véhicule moyen. Les capteurs installés sur le simulateur enregistraient des valeurs en temps réel. Le simulateur avait une boîte de vitesse non automatique et n'était pas équipé de rétroviseurs. La surface de projection des images (résolution de 30Hz), située sur un écran placé devant le simulateur à 1.93 m de l'œil du conducteur, avait un angle d'ouverture de 150° horizontalement et de 40° verticalement. L'écran avait une résolution de 1280x1024 pixels. Un son en quadriphonie diffusé dans le simulateur était composé de bruits internes au véhicule (moteur, roulement et démarreur) et de bruits externes (trafic).

VI.3.3 Situations de conduite

Dans notre expérience, nous avons utilisé une représentation 3D du circuit de course automobile de Versailles Satory (voir figure 3), qui constitue une boucle fermée de 2 km avec une succession de lignes droites et de virages admettant différents rayons de courbure plus ou moins importants. Il s'agit d'une piste de vitesse en 2 x 1 voie avec une largeur de 3,50m qui correspondait à la standardisation internationale des routes principales prenant en compte les marges latérales de

sécurité en fonction des vitesses pratiquées (Vertet & Giausserand, 2006). Le marquage central était une ligne de pointillés blancs autorisant un dépassement. L'utilisation de ce circuit avait pour but de constituer une situation de conduite présentant un challenge puisque l'on demandait à chaque participant de réaliser 10 tours le plus vite possible avec une vitesse maximale de 110km/h.



Figure 3. Représentation graphique en rouge de la piste d'essai 2 x 1 voie d'une longueur de 2km Versailles Satory

La charge attentionnelle induite par l'environnement virtuel a été modulée en jouant sur la complexité de la situation de conduite et sur le degré d'une distraction cognitive induite par le laboratoire. D'après la taxonomie des éléments de l'environnement caractérisant la complexité d'une situation de conduite (Fastenmeier, 1995), la complexité de la situation de conduite a été modulée en jouant sur la densité du trafic (sans vs. avec). Le trafic était constitué d'une boucle de 10 véhicules roulant à 90 km/h de telle sorte que les participants perçoivent un enchaînement constant de véhicules.

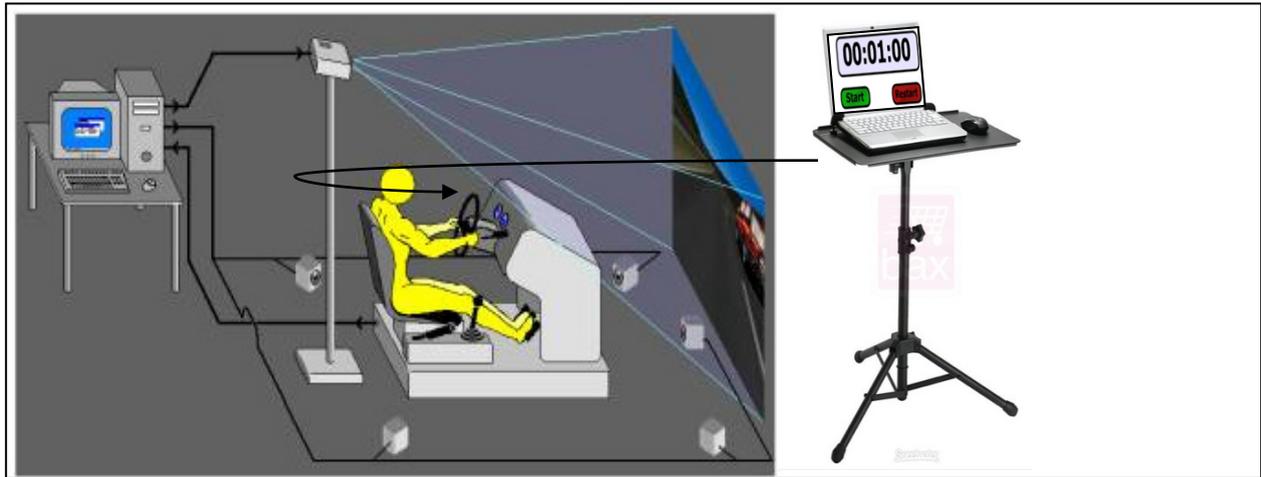


Figure 4. Présentation du dispositif de double tâche avec le simulateur

La distraction cognitive induite par l'environnement réel (le laboratoire) a été modulée en jouant sur l'exécution effective ou non d'une double tâche. Cette dernière consistait à relancer le plus rapidement possible un sablier numérique d'une minute qui était virtuellement matérialisé sur un ordinateur portable. Le temps mis par le participant à réaliser cette tâche a été appelé temps de réaction (voir figure 4).

Cette interface était légèrement déportée sur le côté gauche du simulateur et maintenue sur un pied à hauteur du conducteur, de telle manière à ce qu'il puisse le cas échéant déporter ponctuellement son regard et cliquer sur la souris de l'ordinateur portable dès que le sablier s'était écoulé.

VI.3.4 Mesures subjectives

La présence a été évaluée par le questionnaire MEC-SPQ (Measurement-Effect-Conditions-Spatial-Presence –Questionnaire) (Vorderer, Wirth, Gouveia, Saari, Jäncke, Böcking, Schramm, Gysbers, Hartmann, Klimmt, Laarni, Ravaja, Sacau, Baumgartner, & Jäncke, 2004). Ce dernier comprenait à l'origine 8 dimensions mais pour les besoins de notre expérience nous en avons sélectionnés 6 sur les 8, comme possiblement préconisé par les auteurs du questionnaire afin de réduire le nombre de questions du questionnaire in fine (voir figure 5).

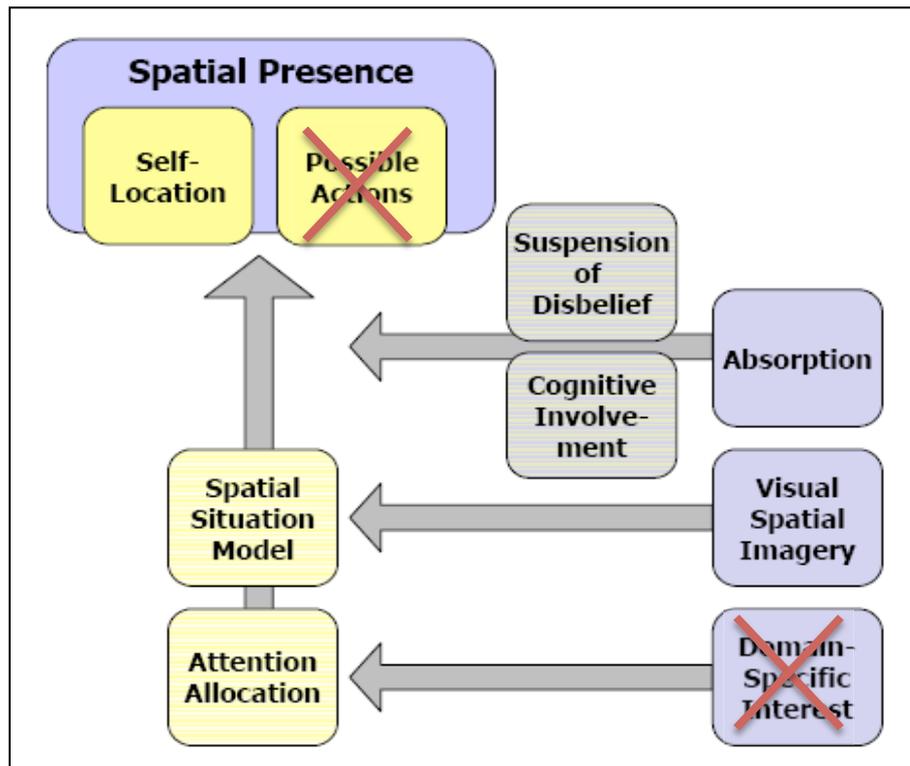


Figure 5 : Les rubriques du MEC-SPQ

Le MEC-SPQ est un questionnaire (2004) sur la mesure de la présence dans tout type d'environnement virtuel. Il est le fruit d'un travail de recherche qui a été engagé par différents chercheurs dans plusieurs pays (USA, Finlande et Portugal). Le questionnaire a été utilisé sur 290 sujets âgés de 15 à 54 ans ($M=21,4$ ans ; $SD=5,2$ ans), il est constitué de 8 rubriques pour 9 concepts avec 103 items. Il a été testé dans 3 systèmes immersifs différents (livre, film, environnement virtuel).

Les concepteurs du questionnaire préconisent un usage du questionnaire sur la base des 8, 6 voire 5 à 4 rubriques. Dans le cadre de notre étude, nous avons choisi d'utiliser le questionnaire avec 5 rubriques afin d'optimiser le temps dédié au remplissage du questionnaire et permettre un retour le plus spontané possible du participant. En outre la rubrique "Domain Specific Interest" ne nous semblait pas pertinente dans notre étude puisque nous avons au préalable choisi nos participants sur la base de critères d'inclusion comprenant notamment leur degré d'expérience en matière d'usage d'environnements virtuels en tout genre. Nous avons également choisi d'enlever le concept "Possible actions" dans la rubrique "Spatial Présence" puisque cela nous semblait permettre d'optimiser le jeu des observables considérées dans le modèle comme essentielles au développement de la présence. Il était concrètement ici question de faire le choix le moins préjudiciable possible, et cela nous a semblé cohérent puisque la rubrique "Spatial Présence" est la seule qui présente deux sous concepts. En effet nous avons estimé qu'au regard de notre protocole expérimental les

différences étaient suffisamment marquées du point de vue de ce concept des "possibles actions" que nous pouvions nous permettre de l'exclure de notre analyse. Enfin la dimension d'imagerie visuo-spatiale a également été retirée du questionnaire puisqu'elle ne se focalise que sur la propension qu'ont des individus à mobiliser leurs ressources visuo-spatiales et ce dans des contextes ou situations n'ayant aucun rapport avec l'expérience immersive proposée. Dans le cadre de notre travail nous avons procédé à la traduction du questionnaire en français.

Les 5 rubriques (voir figure 5) que nous avons utilisé pour notre étude sont les suivantes : **Allocation de l'attention (=Attention allocation)** (Ex : « J'ai accordé toute mon attention à l'environnement virtuel de conduite »), **représentation mentale (=Spatial situation model)** (Ex : « J'étais capable d'imaginer aisément l'agencement des différents espaces traversés dans l'environnement virtuel »), **implication cognitive (=Cognitive involvement)** (Ex : « Je pensais essentiellement aux choses à faire dans l'environnement présenté »)

, **présence spatiale (=Spatial presence : Self Location)** (Ex : « Je me suis senti(e) comme si j'avais été réellement là dans l'environnement présenté »), et **suspension d'incrédulité (=Suspension of disbelief)** (Ex : « J'étais concentré(e) sur l'environnement proposé malgré quelques incohérences. »). Pour chaque dimension, les participants estimaient leur ressenti sur une échelle en 5 points allant de 0=« tout à fait en désaccord » à 5=« tout à fait d'accord ». Ce questionnaire a été choisi car il est directement issu du modèle théorique de la présence spatiale que nous souhaitons valider dans le domaine de la simulation automobile (voir Annexe 1).

VI.3.5 Mesures objectives de la performance

Au cours de l'expérimentation nous avons recueilli les valeurs moyennes de la vitesse et la position latérale dans la voie afin d'avoir des informations sur les différents patterns de comportements; il s'agissait plus concrètement de mettre en évidence les différentes stratégies élaborées par les participants. La performance de conduite a également été regardée à travers le calcul des écarts types de la vitesse et de la position latérale dans la voie afin de jauger de l'efficacité des stratégies de conduite.

Les temps de réaction à la double tâche ont été recueillis pour les 2 groupes l'ayant réalisée. La mesure consistait à évaluer le temps mis par le participant à relancer le sablier numérique d'une minute une fois que ce dernier se soit complètement écoulé.

VI.3.6 Procédure

Avant l'expérience, les participants étaient entraînés sur un circuit impliquant de conduire en ligne droite, de tourner à gauche et à droite et de s'arrêter. Ils se familiarisaient ainsi avec les commandes du simulateur en fonction de différentes

tâches qu'ils avaient à réaliser ensuite durant les situations expérimentales. Leur entraînement s'arrêtait lorsqu'ils le jugeaient suffisant pour se sentir à l'aise avec la conduite sur le simulateur (environ 5 min).

Sur les 20 participants recrutés, $\frac{1}{4}$ de l'effectif était assigné à l'une de nos 4 conditions expérimentales. Quatre groupes expérimentaux ont donc été formés sur la base du croisement de nos 2 variables indépendantes que sont la présence ou non de trafic sur le circuit et sur le fait de devoir réaliser ou non une double tâche pendant la conduite sur simulateur. Pour chacune des conditions expérimentales on donnait la même consigne : « vous allez conduire sur un circuit de course automobile, vous devez effectuer une dizaine de tour, en évitant de sortir de la route et de rentrer en collision avec les véhicules que vous pourriez éventuellement rencontrer. La vitesse maximale autorisée est de 110km/h ». Les 2 groupes soumis à la double tâche (G2 et G4) recevaient la même consigne avec le complément suivant : « vous devez réaliser aussi bien la double tâche que la tâche de conduite ». Les 2 autres groupes (G1 et G3) ne sont pas soumis à une double tâche. Les groupes G1 et G2 étaient soumis à un trafic tout au long de leur conduite contrairement aux groupes G2 et G4. Le questionnaire MEC-SPQ était complété à la fin de la session expérimentale afin de recueillir le niveau subjectif de présence induit. La totalité de l'expérimentation durait environ 1H20.

VI.4 RESULTATS : EFFETS PAR INDICATEUR

VI.4.1 Données subjectives : MEC-SPQ

Un score moyen a été calculé pour chaque groupe et chaque dimension du MEC SPQ (voir tableau 2). Il ressort globalement que les participants rapportent des scores élevés. Plus particulièrement on relève les plus hauts scores pour l'échelle de l'"Attention" (M=4.2; SD=0.70), et les scores les plus faibles pour l'échelle "cognitive involvement" (M=3.33; SD=0.95). L'analyse des corrélations de Bravais-Pearson a révélé une bonne consistance de notre questionnaire (voir Annexe 2).

Tableau 2. Moyenne et écart type pour les différents scores obtenus au MEC Spatial Presence Questionnaire

| Variable 1 : Trafic | Oui | Oui | Non | Non |
|--------------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Variable 2 : Double tâche | Non | Oui | Non | Oui |
| | Groupe 1 | Groupe 2 | Groupe 3 | Groupe 4 |
| Attention allocation (attention) | M=4.07 SD=0.72 | M=4.27 SD=0.28 | M=4.20 SD=0.93 | M=4.33 SD=0.91 |
| Spatial Situation Model (SSM) | M=3.6 SD= 0.28 | M=3.53 SD=0.73 | M=4.27 SD=0.64 | M=3.93 SD=0.60 |
| Cognitive Involvement (CogInv) | M=3.07 SD=1.19 | M=3.80 SD=0.80 | M=3.33 SD=1.10 | M=3.13 SD=0.80 |
| Suspension Of Disbelief (SOD) | M=3.80 SD=0.65 | M=3.67 SD=0.75 | M=3.80 SD=0.90 | M=3.93 SD=0.55 |
| SPSL(Spatial Presence-Self Location) | M=3.50 SD=0.71 | M=4 SD=0.18 | M=3.30 SD=1.31 | M=3.7 SD=0.69 |

Le modèle linéaire général a été utilisé pour tester nos hypothèses en croisant nos deux variables indépendantes. Plus particulièrement une analyse ANOVA a été pratiquée pour évaluer les effets

Tableau 3. Résultats ANOVA (seuil de significativité fixé à $p < 0.05$)

| | Double tâche | Trafic | Double tâche*Trafic |
|--------------------------------------|------------------|------------------|---------------------|
| Attention allocation (attention) | F=0.24 P=0.63 | F=0.09 P=0.77 | F=0.01 P=0.92 |
| Spatial Situation Model (SSM) | F=0.58 P=0.48 | F=4.13 P=0.06 | F=0.26 P=0.62 |
| Cognitive Involvement (CogInv) | F=0.36 P=0.56 | F=0.20 P=0.66 | F=1.11 P=0.31 |
| Suspension Of Disbelief (SOD) | F=0 P=1 | F=0.17 P=0.69 | F=0.17 P=0.69 |
| SPSL(Spatial Presence-Self location) | F=1.48 P=0.24 | F=0.46 P=0.51 | F=0.02 P=0.89 |

L'analyse ANOVA révèle qu'aucun effet d'interaction n'a été observé entre nos deux variables indépendantes qu'étaient la double tâche et la complexité de la situation de conduite (présence de trafic ou non). Tout au plus on relève une tendance significative de la variable « Trafic » sur la rubrique Spatial situation Model SSM (Voir tableau 3).

VI.4.2 Données comportementales de conduite en situation globale

Un score moyen a été calculé pour chaque groupe et chaque donnée comportementale de conduite (voir tableau 5).

Tableau 5. Moyenne et écart type pour les différentes données comportementales

| Variable 1 : Trafic | | Oui | Oui | Non | Non |
|---------------------------|------------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Variable 2 : Double tâche | | Non | Oui | Non | Oui |
| | | Groupe 1 | Groupe 2 | Groupe 3 | Groupe 4 |
| Vitesse (km/h) | M=100.21 SD=16.32 | M=101.70 SD=18.13 | M=84.77 SD=7.44 | M=109.89 SD=14.32 | M=104.50 SD=15.36 |
| SD Vitesse (km/h) | M=35.53 SD=54.51 | M=24.06 SD=4.94 | M=25.42 SD=2.74 | M=21.27 SD=4.08 | M=71.36 SD=109.16 |
| Position Latérale (m) | M=1.08 SD=0.61 | M=1.45 SD=0.34 | M=1.46 SD=0.19 | M=1.01 SD=0.75 | M=0.40 SD=0.29 |
| SD Position Latérale (m) | M=1.31 SD=0.41 | M=1.19 SD=0.28 | M=1.08 SD=0.14 | M=1.14 SD=0.42 | M=1.84 SD=0.19 |

En se basant sur le tableau 5, il semble que les vitesses moyennes les plus élevées sont celles des participants du groupe3 , et les vitesses les plus faibles sont celles des participants du groupe 2 . Les positions latérales moyennes les plus élevées semblent celles rapportée par les groupes 1 et 2, alors que la position latérale

moyenne la plus faible est celle rapportée par le groupe 4. L'écart type moyen de la vitesse le plus élevé semble celui rapporté par le groupe 4 et la valeur la plus basse concerne les groupes 3, 1 et 2. L'écart type moyen de la position latérale semble le plus élevé pour le groupe 4 et le plus faible pour le groupe 2.

Tableau 6. Résultats ANOVA Variables comportementales (seuil de significativité fixé à $p < 0.05$)

| | Double tâche | Trafic | Double tâche*Trafic |
|----------------------|---------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Vitesse | F=3.02 P=0.10 | F=4.72 P=0.04 | F=0.81 P=0.38 |
| SD Vitesse | F=1.11 P=0.31 | F=0.78 P=0.39 | F=0.99 P=0.33 |
| Position latérale | F=2.28 P=0.151 | F=14.06 P=0.002 | F=2.46 P=0.14 |
| SD Position latérale | F=5.67 P=0.03 | F=8.21 P=0.01 | F=10.67 P=0.005 |

L'analyse ANOVA (voir Tableau 6) a révélé :

***Plusieurs effets simples**

- Un effet simple du trafic a été mis en évidence sur la vitesse moyenne ($F=4.72$; $p=0.04 < 0.05$). Les participants soumis au trafic ($M=93.23$, $SD=15.82$) avaient des vitesses plus faibles que les participants non soumis au trafic ($M=107.19$, $SD=14.28$) (voir tableau 6).

- Un effet simple du trafic a été mis en évidence sur la position latérale moyenne ($F=14.06$; $p=0.002 < 0.05$). Les participants soumis au trafic ($M=1.46$, $SD=0.25$) avaient des positions latérales moyennes plus élevées que les participants non soumis au trafic ($M=0.71$, $SD=0.63$).

- Un effet simple du trafic a été mis en évidence sur l'écart type de la position latérale moyenne ($F=8.21$; $p=0.01 < 0.05$). Les participants soumis au trafic ($M=1.13$, $SD=$

0.22) avaient des écarts types de la position latérale plus faibles que les participants non soumis au trafic (M=1.50, SD=0.48).

- Un effet simple de la double tâche a été mis en évidence sur l'écart type de la position latérale moyenne (F=5.67; $p=0.03<0.05$). Les personnes soumises à la double tâche ont eu un écart type de la position latérale plus élevé (M=1.46; SD=0.43) que les personnes non soumises à la double tâche (M=1.16; SD=0.33)

-Un effet simple du trafic a été mis en évidence sur l'écart type de la position latérale moyenne (F=8.21; $p=0.01<0.05$). Les participants soumis au trafic (M=1.13, SD=0.22) avaient des écarts types de la position latérale plus faibles que les participants non soumis au trafic (M=1.50, SD=0.48) (voir tableau 6).

***Un effet d'interaction**

Un effet d'interaction trafic*double tâche a été mis en évidence sur l'écart type de la position latérale (F=10.67; $p=0.005<0.01$). On constate que seule en condition de double tâche, un effet trafic simple existe. Des tests post-hoc de Bonferroni nous confirment ($p=0.003<0.05$) qu'en condition de double tâche les personnes non soumises au trafic (M=1.84; SD=0.19) ont eu des écarts types moyen de la position latérale supérieurs à ceux des personnes soumises au trafic (M=1.08; SD=0.14)

VI.4.3 Performance à la double tâche

La double tâche a été réalisée au moins 15 fois par chaque sujet. Ainsi nous avons décidé de créer 3 indices moyens de performance (3 temps moyens de réaction) associé chacun à un ensemble de 5 taches réalisées successivement. Un score moyen de performance à la double tâche (temps de réaction moyen) a été calculé pour les 2 groupes soumis à la double tâche (voir tableau 7).

Tableau 7. Moyenne et écart type pour des temps de réaction

| | Trafic | Double tâche | Temps moyen de réaction à la double tâche (T1, T2, T3, T4, T5) | Temps moyen de réaction à la double tâche (T6, T7, T8, T9, T10) | Temps moyen de réaction à la double tâche (T11, T12, T13, T14, T15) |
|-------------|--------|--------------|--|---|---|
| Moyenne (s) | 0 | 1 | 3.09 | 4.68 | 4.79 |
| Moyenne (s) | 1 | 1 | 12.30 | 9.73 | 7.48 |
| SD(s) | 0 | 1 | 1.84 | 4.98 | 4.09 |
| SD(s) | 1 | 1 | 7.85 | 6.30 | 7.38 |

Les participants soumis au trafic semblent avoir eu plus de difficultés à optimiser la réalisation de la deuxième tâche puisqu'ils rapportent des temps de réaction moyens plus élevés que les participants non soumis au trafic. Il semble aussi qu'un effet d'apprentissage soit observé chez les participants soumis au trafic qui ont amélioré leur performance en abaissant progressivement leur temps moyen de réalisation de la double tâche.

Tableau 8. Résultats ANOVA Temps de réaction double tâche (seuil de significativité fixé à $p < 0.05$)

| | Trafic |
|---|---------------------------------|
| Temps moyen de réalisation de la tâche (de T1 à T5) | F=6.51 p=0.03* |
| Temps moyen de réalisation de la tâche (de T6 à T10) | F=1.97 p=0.20 |
| Temps moyen de réalisation de la tâche (de T11 à T15) | F=0.51 p=0.49 |

L'analyse ANOVA (voir tableau 8) a révélé :

-Un effet simple du trafic a été mis en évidence sur le temps moyen de réalisation de la tâche de T1 à T5 ($F=6.51$; $p=0.03 < 0.05$). Le temps moyen de réalisation de la double tâche a été significativement plus élevé pour les sujets soumis au trafic ($M=12.30$; $SD=7.85$) comparé aux sujets non soumis au trafic

(M=3.09;SD=1.84). Les analyses post-Hoc ont révélé que les participants soumis au trafic ont significativement diminué leur temps de réaction au fur et à mesure qu'ils réalisaient la double tâche ($p < 0.05$). Cet effet n'était pas observé pour les participants non soumis au trafic ($p = 0.49 > 0.05$).

-Aucune différence significative n'a été mise en évidence pour les groupes de tâches T6 à T10 et T11 à T15.

VI.5 RESULTATS : REGRESSIONS POUR DONNEES SUBJECTIVES

Nous avons cherché à évaluer les prédictions du modèle MEC-SPQ par l'intermédiaire d'analyses de régressions simples voici les résultats concernant l'ensemble des participants (Voir Tableau 9).

Tableau 9. Résultats Régressions MEC-SPQ global (seuil de significativité fixé à $p < 0.05$)

| Variable prédictive | Variable dépendante | Beta | p |
|---------------------|----------------------|-------------|-----------------|
| Attention | SSM | 0.20 | 0.42 |
| SSM | Self-location | 0.34 | 0.14 |
| SOD | SSM | 0.44 | 0.04* |
| SOD | Self-location | 0.46 | 0.03* |
| CogInv | SSM | 0.04 | 0.87 |
| CogInv | Self-location | 0.71 | 0.0004** |

Plusieurs régressions ont été mis en évidence:

-La suspension d'incrédulité (SOD) est un prédicteur positif de la représentation mentale (SSM) (effet linéaire : $\beta = 0.44$, $p < 0.04$).

-La suspension d'incrédulité (SOD) est un prédicteur positif de la présence spatiale (Self-location) (effet linéaire : $\beta = 0.46$, $p < 0.03$).

-L'engagement (CogInv) est un prédicteur positif de la présence spatiale (Self-location) effet linéaire : $\beta = 0.71$, $p < 0.01$).

Pour affiner notre compréhension du modèle MEC-SPQ, nous avons cherché à évaluer les prédictions du modèle MEC-SPQ en pratiquant des analyses de régressions des différentes dimensions du modèle pour chaque groupe expérimental (Voir Annexe 3).

- **Aucune régression significative n'a été mise en évidence pour les groupes 1 et 2.**

- Pour le groupe 3 (sans trafic et avec une double tâche):

- La représentation mentale (SSM) de l'environnement est un prédicteur positif de la présence spatiale (Self-location) (effet linéaire : $\beta=0.98$, $p<0.01$).

-La suspension d'incrédulité (SOD) est un prédicteur positif de la présence spatiale (Self-location)(effet linéaire : $\beta=0.90$, $p<0.05$).

- Pour le groupe 4 (sans trafic et avec une double tâche):

La suspension d'incrédulité (SOD) est un prédicteur positif de la représentation mentale (SSM) de l'environnement (effet linéaire : $\beta=0.92$, $p<0.05$).

VI.6 DISCUSSION

VI.6.1 *Manque de sensibilité du questionnaire MEC SPQ*

Notre hypothèse principale était que l'exécution d'une double tâche devait interférer en termes de ressources attentionnelles visuo-spatiales avec la tâche principale de conduite, puisque pour réaliser la double tâche il fallait déporter son regard de la scène visuelle principale pour contrôler régulièrement l'état d'avancement du sablier numérique.

***Aucun impact du degré de distraction cognitive sur la présence spatiale et ses déterminants**

Nous faisons l'hypothèse que le degré de distraction cognitive était un prédicteur négatif de la représentation mentale et de la présence spatiale. Cette hypothèse n'a toutefois pas été validée par notre analyse. Il semble que la hausse du degré de distraction cognitive n'ait pas été rapportée par les sujets comme plus contraignante et ne semble pas les avoir gênée. Notre interprétation serait que la tâche principale de conduite relevait davantage d'une tâche automatisée peu sollicitante du point de vue cognitif.

***Aucun impact de la complexité de la situation sur la présence spatiale et ses déterminants**

Nous faisons l'hypothèse que la complexité de la situation (c'est à dire ici la présence de trafic) était un prédicteur positif de la représentation mentale (SSM) et de la présence spatiale. Cette hypothèse n'a pas été validée. La complexité de la situation avec cette hausse du trafic ne semble pas avoir participé à accrocher davantage le participant dans son expérience subjective de présence. Il est probable que la complexité de la situation relevait davantage dans la façon de gérer sa vitesse et sa trajectoire uniquement par rapport à la topographie du circuit, le trafic apparaissait comme plutôt artificiel, et la principale préoccupation des participants semblait davantage de ne pas sortir de la route.

VI.6.2 Etude de la validité du modèle de la présence spatiale (Wirth et al., 2007)

Le modèle de la présence spatiale de Wirth et ses collègues (2007) n'a été que partiellement vérifié au cours de notre expérience. L'analyse des régressions sur l'ensemble des conditions expérimentales a révélé que la suspension d'incrédulité et l'implication cognitive étaient bien des prédicteurs positifs de la présence spatiale. En outre nous avons également mis en évidence que la suspension d'incrédulité était bien un prédicteur de la représentation mentale. Toutefois notre analyse n'a pas permis de montrer que l'attention était un prédicteur de la représentation mentale et que la représentation mentale était un prédicteur de la présence spatiale. Nous expliquons ce résultat en nous basant sur le fait que pour notre expérimentation les sujets ont probablement eu recours à des processus attentionnels davantage automatisés que contrôlés. Or dans le modèle il est spécifié que c'est la synergie des dimensions contrôlée et automatique qui permet de concevoir l'attention comme un prédicteur de la représentation mentale. A l'évidence notre protocole expérimental n'a pas permis de suffisamment moduler les processus attentionnels contrôlés afin d'observer une véritable modulation de la présence spatiale et de l'ensemble des concepts qui sous tendent son émergence. L'hypothèse selon laquelle l'imagerie visuo-spatiale influencerait positivement l'attention n'a pas été validée. Cette rubrique semble n'influencer aucune autre dimension du modèle. Cette rubrique semble plus largement poser problème puisqu'elle sonde davantage une propension à se forger des images mentales qu'à réellement interroger le participant sur sa capacité au cours de l'expérience à avoir eu recours aux processus de l'imagerie mentale.

L'étude des régressions pour chaque condition expérimentale, a mis en évidence des disparités en termes de pattern de covariance du point de vue des différentes rubriques du questionnaire MEC-SPQ. Il ressort ainsi que dans les groupes 1 et 2 soumis au trafic, aucune régression n'a été trouvée entre les différentes dimensions du modèle. A l'inverse pour le groupe 3 non soumis au trafic et à la double tâche la représentation mentale et la suspension d'incrédulité se sont avérés être tous les deux des prédicteurs positifs de la présence spatiale. Enfin dans le groupe 4 non soumis au trafic mais soumis à la double tâche, la suspension d'incrédulité s'est avérée être un prédicteur positif de la représentation mentale. Au vue de ces résultats il semblerait que ce soit le groupe 3 qui témoigne le plus d'un développement du sentiment de présence illustrant les liens de covariance attendus par la théorie. Paradoxalement la condition trafic (G1 et G2) ne semble pas avoir sollicité la mécanique de présence décrite par le modèle, cela reviendrait à dire que les participants n'ont pas mobilisé leur représentation mentale ou leur attention de manière consciente. Cela signifierait que si présence il y a eu elle était de nature différente des autres groupes. On peut penser que pour les groupes soumis au trafic leur activité de conduite consistait davantage en un jeu de stimulus réponse et bien moins en une planification et anticipation de leur activité de supervision et de navigation. Il est intéressant de souligner que cette absence de corrélation entre les concepts du modèle de la présence spatiale est donc clairement observée pour les

personnes du groupe 2 soumis au trafic et à la double tâche. La double tâche n'a eu, à l'évidence aucune incidence sur la perception attentionnelle qu'on eu les participants de ce groupe par rapport à ceux non soumis à la double tâche. Cela reviendrait à dire que l'activité des personnes du groupe 1 comme celles du groupe 2 était essentiellement automatisée et que leur présence était davantage une présence physique, basée sur jeu d'affordances comportementales et tout un ensemble de logiques opératoires de bas niveaux. Paradoxalement il apparaît que le groupe le moins contraint que ce soit par du trafic ou une double tâche à savoir le groupe 3 témoigne donc davantage d'un cercle vertueux de présence en accord avec la théorie. Cela pourrait s'expliquer en définitive par le fait que les participants dans cette condition ont davantage eu besoin recours à leur imagination pour donner du sens à leur conduite, puisqu'il faut le rappeler la tâche consistait à exécuter 10 tours de circuits. La recherche de sens et la nécessité de se donner un horizon dans la régulation de leur tâche de conduite leur était indiscutablement plus possible que tout autre groupe contraint par des évènements souvent imprévus. Il semblerait que leur tâche de conduite ait été contrairement à ce qui était attendu plus challengeant et stimulante en termes de développement de la présence. En effet leur activité devait être pensée sur une échelle de temps plus longue que celle des 3 autres groupes, leur laissant ainsi davantage de temps pour se construire une représentation mentale consciente de l'environnement considérée comme clef de voute de l'émergence du sentiment de présence.

VI.6.3 Indicateurs comportementaux de la présence

L'objectif de l'étude était également de trouver des indicateurs comportementaux de la présence physique garantissant l'optimisation de la performance de conduite. La présence de trafic a diminué la vitesse moyenne tout comme le fait de devoir réaliser une double tâche. Toutefois, la présence de la double tâche n'a pas eu d'incidence sur la vitesse moyenne ou l'écart type de la vitesse. Ainsi donc la performance de conduite ne semble pas avoir été impactée par une hausse de degré de distraction cognitive ou par une hausse de la complexité de la situation. Une fois encore on peut expliquer ce résultat dans la mesure où les marges de régulation du comportements était intrinsèquement déjà très faibles de par la topographie du circuit. Il semblerait que les participants quelque soit la condition aient conduit à peu près à la même vitesse et avec le même écart type de vitesse. Il apparaît que l'ensemble des participants a adopté la même stratégie de régulation de leur vitesse tangentielle indépendamment des contraintes extérieures. Ceci nous amène donc à penser que la vitesse était implicitement contrainte par le terrain en lui même et qu'en définitive les marges de régulation étaient faibles si l'on voulait suivre la consigne qui était de rester sur la voie principale et éviter les sorties de route. Le terrain était donc peut être en lui même trop complexe pour pouvoir observer un effet comportemental de la présence en termes de variabilité de la vitesse.

Concernant la position latérale moyenne dans la voie, un effet du trafic a été observé. Il est apparu que les participants soumis au trafic ont davantage roulé à droite. Cela apparaît donc clairement comme une stratégie d'anticipation de véhicules qui pouvaient venir en sens inverse. Cette stratégie a certainement été utilisée pour toutes les fois où se présentait une succession de virages et où la visibilité était réduite. Cette stratégie peut donc d'ailleurs nous renseigner sur l'étrange résultat qui est que le sentiment de présence n'a pas été accru dans cette situation expérimentale. En effet une fois que les participants ont compris qu'il suffisait de rester sur la voie de droite pour se prémunir d'éventuelles collisions ce qui à l'origine devait être une tâche complexe de gestion des commandes et de supervision est devenu une tâche davantage de plus bas niveau, ne constituant pas en elle même une tâche plus challengeant en termes de processus attentionnels contrôlés. En outre il est important de souligner le fait que la répétition de l'activité de conduite exigée sur 10 tours a certainement contribué à l'établissement de ces procédures automatisées déconnectant à termes les participants.

Un effet de la double tâche a toutefois été mis en évidence sur l'écart type de la position latérale. Les participants soumis à la double tâche ont eu des valeurs plus élevées que les personnes non soumis à la double tâche. Ce résultat est central puisqu'il constitue à lui seul, l'unique preuve attestant que la hausse de la distraction cognitive a eu un effet sur les participants. Les participants soumis à la double tâche n'ont pas verbaliser différemment leur expérience de présence comparé aux personnes non soumis à la double tâche or il apparaît clairement qu'en termes de maintien de la trajectoire leur performance de conduite n'a pas été la même. Il apparaît donc que le questionnaire échoue à mettre en évidence un effet de performance attesté par les données comportementales. De même on a trouvé que l'écart type de la position latérale était significativement plus faible pour les personnes soumises au trafic que pour les personnes non soumises au trafic. Cette stratégie montre bien que les participants soumis au trafic ont cherché à diminuer leur charge attentionnelle en limitant leur prise de risque en se plaçant sur la voie de droite. Une fois encore cet effet du trafic sur le comportement et plus encore sur la performance de conduite n'est pas corroboré par le questionnaire de présence. Tout ceci amène à poser la question de la nature des processus cognitifs qui semblent sous tendre l'établissement de la présence. Il nous apparaît évident qu'une mesure de la présence qui ne soit pas témoin pas de ce qui se passe du point de vue de la performance n'est pas intéressante. La question méthodologique de l'évaluation de la présence est posée. L'activité de conduite est une tâche hautement automatisée et qui requiert en fonction de la complexité des situations l'établissement de procédures ou logiques opératoires cognitives de plus ou moins haut niveau. La question de la présence semble se poser pour toutes ses tâches de conduite qui relèvent d'un certain niveau de conscience toutefois si comme dans notre expérience on cherche à mesurer la présence comme gage de performance dans des tâches de conduite de bas niveaux nous ne parviendrons pas à obtenir des correspondances d'effets entre les données comportementales et les données subjectives. Nous pensons que la question de la présence et plus encore de la volonté d'obtenir des indicateurs comportementaux de la

présence se pose donc en simulateur de conduite uniquement pour des tâches d'un certain niveau cognitif exigeant un certain degré de conscience afin que les personnes puissent verbaliser une expérience qui puisse être corroborée par le comportement. La littérature souligne clairement l'idée que plusieurs mesures comportementales et physiologiques doivent être faites en parallèle de la mesure de la présence par questionnaire. Notre expérience visait clairement à étalonner notre mesure par questionnaire de la présence. La mesure de la présence par questionnaire ne permet pas de donner une information sur ce qui s'est passé au cours de l'expérimentation. La littérature expose aussi clairement que la présence est un processus dynamique. Nous mettons donc en avant qu'en simulation automobile il serait nécessaire d'utiliser des mesures périphériques comme des mesures physiologiques pour donner des informations sur l'éveil physiologique et ses fluctuations au cours de l'activité de conduite. Ces mesures pourraient être analysées en covariance avec les données comportementales et les données subjectives afin de se construire une vision plus complète de la présence. En effet notre expérience a mis en évidence que plusieurs participants pouvaient déclarer un même degré de présence sans pour autant avoir une performance de conduite analogue. Il semble donc crucial d'affiner notre analyse du comportement afin de préciser le type de présence observé. Est ce davantage une présence physique et ou psychologique. C'est ainsi que dans notre expérience on met en avant l'idée que la présence rapportée par notre questionnaire de présence serait davantage une présence physique qu'une présence psychologique. Cet état de fait nous amène à penser qu'il serait souhaitable d'utiliser un deuxième questionnaire de présence davantage plus basé sur notamment la notion de réalisme comme le questionnaire IPQ qui semblerait un questionnaire intéressant à utiliser en complément pour nos prochaines expérimentations.

VI.6.4 Performance à la double tâche

Un effet du trafic a été observé sur la performance de conduite, les personnes soumises au trafic ont eu des temps de réalisation de la double tâche, supérieurs aux personnes non soumises au trafic. Il est important de souligner que cet effet n'a été observé que pour les cinq premières réalisations de la double tâche. Cet effet du trafic n'apparaît plus à partir de la septième fois que la tâche est réalisée. Un effet d'apprentissage apparaît chez les personnes soumises au trafic elles parviennent à diminuer leur temps de réalisation et s'approcher des temps des participants non soumis au trafic. Cette performance accrue pour les personnes soumises au trafic témoigne d'une réorientation attentionnelle sur la tâche secondaire. Cela a certainement été rendu possible par la stratégie de ces participants qui soumis au trafic se sont placés à droite de la voie en limitant leur variabilité de la position latérale. Tout ceci témoigne bien que la tâche principale de conduite était peu « challengeante » en termes de ressources attentionnelles ce qui corrobore nos

observations précédentes sur la nature de la tâche de conduite plutôt de bas niveau dans sa globalité.

VI.6.5 Perspectives de recherche

Notre objectif est de trouver des indicateurs comportementaux de la présence qui soient gage de performance. En outre on a souligné par cette première expérimentation la nécessité d'affiner notre approche méthodologique de la présence en utilisant un deuxième questionnaire de présence pour rendre plus robuste les résultats qui en découleraient et éventuellement interroger des dimensions plus psychologiques de la présence. C'est ainsi que nous avons pu mettre en avant que pour un même score de présence on pouvait avoir différents comportements associés. Cette réalité ne doit pas être négligée et dans le souci de fournir un modèle méthodologique le plus robuste possible il nous semble important d'affiner ce que l'on appelle présence en utilisant des indicateurs périphériques qui nous donneraient plus de critères comme par exemple l'utilisation de mesures physiologiques. Ces dernières nous permettraient d'appréhender la présence spatiale en termes d'éveil physiologique voire même en termes de stress ou d'émotions. Nous pensons donc également utiliser un questionnaire sur les émotions comme le PANAS afin d'interroger la valence de l'expérience de présence. La présence est davantage à l'heure actuelle considérée comme une boîte noire du comportement, il nous semble crucial de dépasser cette vision behavioriste de la présence et de l'actualiser au regard des théories plus cognitivistes c'est la raison pour laquelle le modèle de la présence spatiale a été choisi et que nous pensons qu'il serait plus facilement « opérationnalisable » si on pouvait y rajouter des éléments liés à la dynamique du traitement de l'information et peut être même des éléments sur la valence émotionnelle de l'expérience de présence.

VII EXPERIMENTATION 2

VII.1 OBJECTIFS

Cette deuxième expérimentation avait pour ambition de développer des indicateurs comportementaux physiologiques constituant une mesure « online » du sentiment de présence en simulation automobile.

La littérature définit la présence comme un phénomène de conscience éveillée ("awareness phenomenon") qui requiert l'usage de processus attentionnels contrôlés et qui est basé sur une interaction de différents stimuli ou facteurs environnementaux qui vont susciter un engagement et favoriser l'implication de processus internes d'un individu placé dans un environnement virtuel. A ce titre, l'objectif de cette deuxième expérimentation est donc d'induire différents niveaux d'attention dirigée en modulant des facteurs environnementaux tels que la richesse du décor de l'environnement virtuel proposé et la visibilité de la route, afin d'induire différents niveaux de présence ressentie. Ces deux variables indépendantes semblent tout à fait adaptées puisque une fois encore la littérature sur le sentiment de présence en environnement virtuel admet que la richesse du décor et le degré de visibilité sont des prédicteurs de l'immersion et donc de la présence. La spécificité de cette expérimentation repose sur la volonté de trouver des indicateurs comportementaux et physiologiques de la présence en simulation automobile ce qui, à notre connaissance, a été très peu fait jusqu'à présent. Concrètement il s'agissait d'évaluer les niveaux d'éveil et de stress physiologique des participants soumis à différents stimuli susceptibles d'influer sur leurs états attentionnel et émotionnel. L'éveil dont on parle ici fait référence à la notion d'éveil cognitif, c'est à dire un niveau d'attention suffisant pour traiter l'information en conduite automobile (Lemerrier & Celier, 2008). Bien que de multiples conceptions sous tendent le concept de stress, nous choisissons de parler ici de stress physiologique appréhendable comme la conséquence physiologique d'un ressenti émotionnel et environnemental (Guillet, 2008). Il est donc question ici d'une réaction de l'organisme soumis à des actions ou stimuli quelconques. Pour ce faire nous avons étudié les effets de la richesse du décor de l'environnement virtuel et du niveau de visibilité de la route sur les niveaux subjectifs de présence et les niveaux objectifs d'éveil physiologique. En préambule de ce manuscrit, nous avons exposé que dans la littérature l'immersion, au sens de l'ensemble des caractéristiques techniques du média virtuel proposé, agit comme un prédicteur positif de la présence et qu'en outre la hausse de la présence était le plus souvent associée à une hausse de l'éveil physiologique (Nash, Edwards, & Thompson, 2000). En outre nous savons que l'activité de conduite automobile est une tâche complexe qui mobilise plus qu'aucune autre la modalité sensorielle visuelle (Owsley & McGwin, 2010). Ces éléments nous ont donc amené à formuler, en lien avec notre thématique de recherche portant sur l'activité de conduite automobile, l'hypothèse selon laquelle des niveaux subjectifs élevés de présence et des niveaux objectifs élevés d'éveil physiologique devraient se

manifester lorsque le niveau de richesse du décor virtuel est le plus élevé, et cela devrait être d'autant plus accentué pour la situation en condition de visibilité réduite.

VII.2 METHODOLOGIE

VII.2.1 Participants

14 conducteurs (8 hommes et 6 femmes) avec au moins 5 ans d'expérience ont été placés dans un simulateur de conduite à base fixe afin de réaliser chacun consécutivement six scénarios de conduite dans un ordre différent. L'âge des participants allait de 22 à 30 ans ($M=25.4$ ans, $SD=4.5$). Le recrutement des participants s'est effectué auprès des étudiants et du personnel de la faculté des sciences du sport d'Aix-Marseille Université sur le campus de Luminy. Les participants étaient sélectionnés en fonction des critères d'inclusion (ne pas porter de lunettes ou lentilles, et ne présenter aucune sensibilité au mal des transports) et ne devaient présenter aucun problème de santé qui puisse interférer avec les données physiologiques étudiées. Un questionnaire d'informations générales était complété afin de s'assurer qu'ils pouvaient participer à l'expérimentation. Chaque participant signait une fiche d'information ainsi qu'un formulaire de consentement libre et éclairé avant leur participation à l'expérimentation.

VII.2.2 Simulateur de conduite

L'expérimentation s'est déroulée sur le nouveau simulateur de conduite Oktal, à base fixe du Centre de Réalité Virtuelle de la Méditerranée. Il s'agissait d'un simulateur compact conçu pour fournir au conducteur une interface réaliste et un large champ de vision (voir Figure 6). Ce simulateur était équipé de 3 écrans LCD 16/9, d'une boîte de vitesse manuelle, d'un frein à main et d'un volant réel avec retour d'effort. Il est essentiellement utilisé par les universités, les instituts de formation ou les secteurs de l'ingénierie et de la recherche qui l'utilisent comme un simulateur de préparation à la conduite.



Figure 6. Simulateur Oktal de conduite

La salle d'expérimentation était divisée en deux parties séparées par un rideau, avec une partie réservée au simulateur et une autre réservée à l'expérimentateur qui interagissait avec les ordinateurs de contrôle de la simulation.

Dans cette deuxième expérimentation nous avons donc utilisé un simulateur permettant une plus grande immersion que le simulateur utilisé lors de la première expérimentation. Les deux sont à base statique, toutefois la qualité de la représentation graphique ainsi que les retours visuels et auditifs du simulateur Oktal étaient clairement plus réalistes que ceux du simulateur INRETS bien moins récent.

VII.2.3 Situations de conduite

Les situations de conduites étaient au nombre de six et résultaient du croisement de deux variables indépendantes qu'étaient le niveau de richesse du décor virtuel et le niveau de visibilité de la route. Concrètement 3 scénarios de conduite ont été créés correspondant aux trois décors. Dans chaque scénario la tâche de conduite consistait à suivre une voiture rouge tout en respectant le code de la route. Il était précisé aux participants qu'il était possible de perdre de vue la voiture rouge et que dans ce cas il finirait par la retrouver tôt ou tard sur son chemin. En pratique la voiture rouge ne constituait pas en soi un lièvre mais était censé donner les indications de directions aux intersections. Les participants perdaient très rapidement la trace de la voiture rouge puisque plusieurs événements finissaient par s'interposer entre eux.

Dans chaque scénario on retrouvait la même typologie d'évènements :

- Piétons qui traversent subitement
- Cyclistes dans un virage
- Situations de dépassements sans visibilité
- Priorités à droite
- croisement d'une voiture de police avec la sirène
- tracteur gênant

L'ensemble de ces évènements est utilisé pour créer des situations de conduite le plus écologique possible en accord avec la taxonomie des situations de conduite établie par Fastenmeier et Gstalter (2007).

1) La variable indépendante concernant la richesse du décor virtuel comprenait 3 occurrences conditions :

-Décor 1 très riche : présence d'un décor plus riche en textures d'objets et plus abouti en termes d'infographie (voir Figure 7)



Figure 7. Environnement virtuel avec le décor le plus riche

-Décor 2 moyennement riche : présence d'un décor d'autoroute, de campagne et de ville mais avec des textures manquantes pour les arbres et certains bâtiments ou maisons du décor. (Voir Figure 8).



Figure 8. Environnement virtuel avec le décor moyennement riche

-Décor 3 peu riche : absence de décor, d'arbres, de maisons, d'immeubles et de panneaux de signalisation (Voir Figure 9).



Figure 9. Environnement virtuel avec le décor le moins riche

2) La variable indépendante concernant la visibilité de la route comprenait 2 occurrences :

-Visibilité parfaite, conduite de jour (Voir Figure 10) :



Figure 10. Exemple de condition de visibilité parfaite

-Visibilité réduite, conduite de nuit, avec de la neige et de la pluie (Voir Figure 11) :



Figure 11. Exemple de condition de visibilité réduite

VII.2.4 Mesures subjectives

***Le sentiment de présence**

Les mesures subjectives de présence étaient réalisées à l'aide de deux questionnaires (MEC-SPQ et IPQ), afin de vérifier la robustesse du questionnaire MEC-SPQ utilisé dans la précédente étude et d'avoir une information plus complète sur la perception du réalisme en lien avec l'expérience de présence vécue lors de la simulation virtuelle. Le MEC-SPQ (Voir Annexe 1) et le IPQ (Voir Annexe 20) sont complémentaires dans la mesure où ils permettent de couvrir respectivement l'influence de différents facteurs environnementaux en matières de réalisme perçu et d'engagement, et bien que redondants sur quelques rubriques (attention, engagement...) ils couvrent respectivement des aspects bien singuliers de l'expérience de présence. Par exemple le MEC-SPQ permet d'interroger l'établissement du sentiment de présence en deux étapes ce que le questionnaire IPQ ne permet pas puisque le modèle qui s'y rattache n'est pas basé sur ce postulat. Le MEC-SPQ permet donc de nous donner des informations sur la dynamique de la présence. A l'inverse le questionnaire IPQ permet de sonder plus concrètement le caractère réaliste de l'engagement observé au cours l'expérience virtuelle de par ses rubriques comme le "réalisme perçu (Realness)" et "l'engagement "Involvement".

- le questionnaire MEC-SPQ (Measurement-Effect-Conditions-Spatial-Presence – Questionnaire) (Vorderer, Wirth, Gouveia, Saari, Jäncke, Böcking, Schramm, Gysbers, Hartmann, Klimmt, Laarni, Ravaja, Sacau, Baumgartner, & Jäncke, 2004). Les 6 rubriques utilisées pour notre étude reprennent les 5 rubriques utilisées précédemment exposées au cours de l'expérience 1 : **Allocation de l'attention (=Attention allocation)**, **représentation mentale (=Spatial situation model)**, **implication cognitive (=Cognitive involvement)**, **présence spatiale (=Spatial presence : Self Location=SPSL)**, et **suspension d'incrédulité (=Suspension of disbelief)**. La 6^{ième} rubrique utilisée correspond au deuxième item de la présence

spatiale-actions possibles (Spatial presence : possible actions=SPPA). Cette dernière rubrique a finalement été réintroduite pour cette deuxième campagne de mesure. Ce qui avait été une omission lors de l'expérience 1 pour optimiser la taille de notre questionnaire, s'est avérée, dans un deuxième temps, être à nos yeux un choix judicieux pour appréhender plus finement dans un environnement virtuel de conduite plus complexe que dans l'expérience 1, le pouvoir perçu par un individu à agir sur son environnement.

- le questionnaire IPQ (Igroup Presence Questionnaire)(Schubert, Friedmann, & Regenbrecht, 2001) : Il s'agit d'un questionnaire utilisé pour mesurer le sentiment de présence suivant 14 items évalués chacun sur une échelle de likert à 7 points. Ce questionnaire comprend 4 sous échelles qui correspondent chacune à une dimension de la présence. La sous échelle appelée « Involvement » consiste à évaluer l'attention accordée envers l'environnement virtuel (Ex : « je n'étais pas conscient de l'environnement virtuel »). La sous échelle « the spatial presence » évaluait la sensation d'être physiquement présent dans l'environnement virtuel (Ex : « j'ai senti que j'agissais davantage dans l'environnement virtuel plutôt que dans le monde réel »). La sous échelle « Realness » évaluait le réalisme attribué à l'environnement virtuel (Ex : « Dans quelle mesure votre expérience dans l'environnement virtuel ressemblait à celle du monde réel ? »). Enfin une autre échelle appelée « Sense of being there » (Ex : « j'avais l'impression d'être dans le monde virtuel proposé »). La moyenne total à l'ensemble de ces 4 rubriques donnait un score global moyen appelé score IPQ moyen.

***Les émotions**

Les émotions perçues ont été analysées puisqu'elles nous semblaient pertinentes pour interroger la nature écologique des régulations comportementales opérées au cours de la simulation de conduite. En, effet, les émotions permettent de donner une information périphérique à la présence. Elles nous donnent une information sur la valence émotionnelle de l'expérience, précisant le caractère angoissant ou grisant de l'expérience virtuelle, qui peut être comparé à ce qui est observé dans le monde réel. Plus concrètement cela pourra nous permettra de savoir si la personne a un profil émotionnel en simulation cohérent à ce qui peut être attendu en situation de conduite réelle ou bien si cela correspond davantage à un pattern émotionnel relevant davantage, par exemple, de l'expérience d'un jeu vidéo.

Les mesures subjectives des émotions étaient réalisées à l'aide du questionnaire PANAS (Positive and Negative Affect Schedule) (Watson, Clark, & Tellegen, 1988). Cette mesure était composée d'une liste de 20 adjectifs utilisés pour décrire 10 émotions positives (qui composaient un score global pour la dimension « PA » (=Positive Affect) et 10 émotions négatives (qui composaient un score global pour la dimension « NA » (=Negative Aspect). Les participants devaient rapporter après chaque scénario le degré de congruence de leur état émotionnel avec plusieurs

émotions proposées par le questionnaire sur une échelle de 5 points (allant de « très légèrement à extrêmement affecté »)

VII.2.5 Mesures objective de la performance

L'activité de conduite a été analysée en termes de stratégies ou logiques opératoires utilisées au travers de l'évolution des indicateurs de conduite usuels (moyenne de la vitesse, moyenne de la position latérale dans la voie) au cours du temps. La performance de conduite a quant à elle été analysée en termes de variabilité de la position latérale et de variabilité de la vitesse.

VII.2.6 Mesures physiologiques

-Boîtier Biopac

L'enregistrement des signaux physiologiques s'effectuait par la station Biopac MP150, système d'acquisition sans fil de données physiologiques (voir Figure 12). Ce type de dispositif nous a permis de faire l'acquisition de l'ECG (rythme cardiaque) et l'EDA (conductance de la peau).



Figure 12. Boîtier Biopac MP150

Les électrodes (ECG et EDA) consistaient en des patches à usage unique, qui étaient chacun relié par des fils à une ceinture composée d'un boîtier d'acquisition qui lui-même communiquait à la station ou boîtier MP150 par Bluetooth (émetteur BIO NOMADIX) (voir Figure 13).

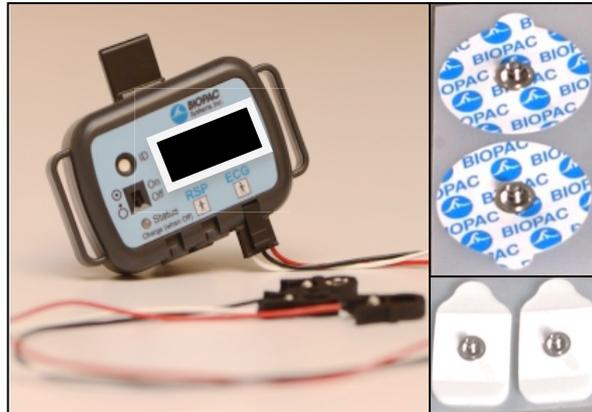


Figure 13. Ceinture d'acquisition et connectique (électrodes ECG en haut à droite ; électrodes EDA en bas à droite)

-Activité Electrodermale (EDA)

L'activité électrodermale était enregistrée à partir d'un capteur digital (voir Figure 14). Deux électrodes Ag-AgCl de 6 mm étaient placées sous les phalanges distales de l'index et du majeur de la main gauche (dermatome C7) dans le but de limiter les artefacts liés à la préhension du volant (Clarion, 2009). La position des électrodes n'affectait pas les mouvements du volant et la main droite était disponible pour changer les vitesses. Les électrodes étaient imprégnées d'un gel (ou électrolyte) isotonique qui assurait la bonne conduction électrique entre la peau et les électrodes. Le signal représentait la sudation produite les glandes sudoripares endocrines en cas de stress ou d'émotion. Le signal tonique enregistré était acquis à une fréquence d'échantillonnage de 1000Hz avec un filtre passe-bande de 0 à 35 Hz. L'impédance était en dessous de 5 kilos ohms ($k\Omega$).

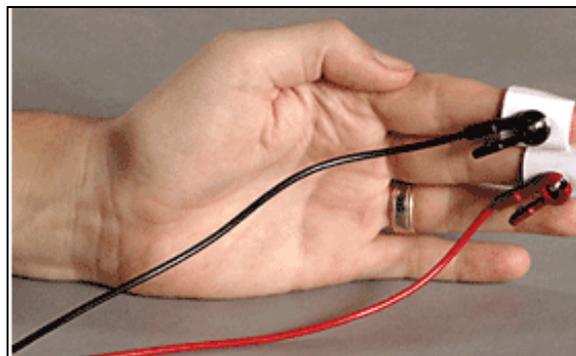


Figure 14. Dispositif de mesure EDA

- Electrocardiogramme (ECG)

Un électrocardiogramme était recueilli au cours de la tâche de conduite permettant de récupérer en temps réel la fréquence cardiaque et de procéder en post traitement à une analyse de la variabilité cardiaque. Les électrodes formaient un triangle d'Einthoven permettant de récupérer un ECG standard enregistré sur 12 dérivations (voir Figure 15). La fréquence d'échantillonnage utilisée était de 256 Hz.

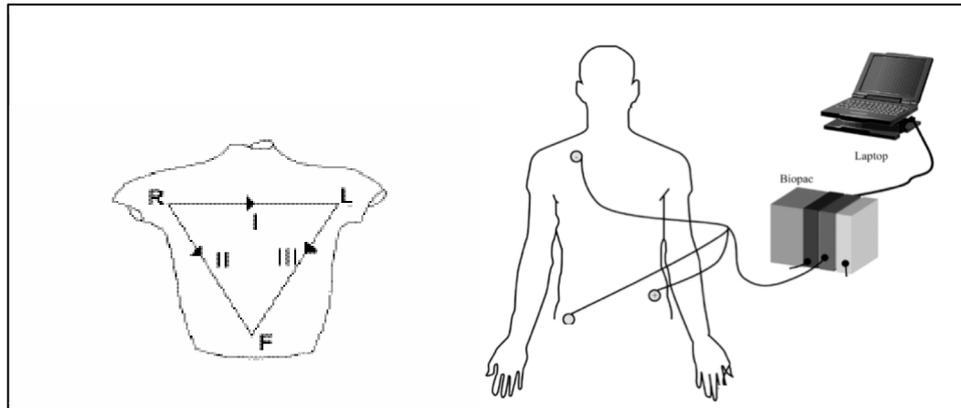


Figure 15. Dispositif de mesure ECG

VII.2.7 Procédure

-Installation des participants

Les participants commençaient par lire et signer la fiche d'information relative à l'étude, le formulaire de consentement libre et éclairé, ainsi que le questionnaire d'informations générales. Ils étaient ensuite appareillés avec les deux outils d'enregistrements physiologiques (ECG et EDA) et placés au repos pendant 15 min afin de recueillir une mesure au repos de l'éveil physiologique (ECG et EDA). Par la suite ils prenaient place dans le simulateur de conduite, réglant alors leur siège à leur convenance en hauteur comme en longueur.

-Déroulement de l'étude

Les participants débutaient par un scénario d'entraînement constitué de plusieurs lignes droites et virages afin de se familiariser avec les commandes du simulateur. Les six scénarios de conduite étaient ensuite présentés dans un ordre différent à chaque participant (voir Figure 16). Les enregistrements physiologiques étaient effectués pendant les phases d'activité de conduite.

| | |
|---|---|
| Entraînement | |
| Repos | |
|  |  |
| Questionnaires IPQ, MEC-SPQ, PANAS | |
|  |  |
| Questionnaires IPQ, MEC-SPQ, PANAS | |
|  |  |
| Questionnaires IPQ, MEC-SPQ, PANAS | |
|  |  |
| Questionnaires IPQ, MEC-SPQ, PANAS | |
|  |  |
| Questionnaires IPQ, MEC-SPQ, PANAS | |
|  |  |
| Questionnaires IPQ, MEC-SPQ, PANAS | |

Figure 16. Procédure de l'expérimentation 2 (exemple de succession des scénarios)

Après chaque scénario de conduite, le participant remplissait les deux questionnaires de présence (IPQ et MEC-SPQ) puis le questionnaire sur les émotions (PANAS). Concrètement chaque participant réalisait deux conduites sur chacun des 3 décors, la première sous condition de visibilité parfaite et la deuxième sous condition de visibilité dégradée. Le décor 1 correspond au décor le plus riche, le décor 2 correspond au décor moyennement riche en termes d'informations visuelles et le décor 3 correspond au décor le plus pauvre (voir Annexes 21).

VII.2.8 Analyse des données physiologiques

-Approche globale pour EDA et ECG :

La première minute de chaque période de repos et de chaque période d'activité de conduite était supprimée afin d'éliminer, d'une part, la période de stabilisation du signal et d'autre part, la période d'activité de conduite durant laquelle les performances n'étaient pas observées (période de familiarisation). De plus la dernière minute d'enregistrement était également supprimée. L'effet de bord était ainsi évité, en supprimant les données du début correspondant au temps d'adaptation et en enlevant également les données de la fin souvent biaisées par l'impatience des participants à terminer. De manière générale nous avons cherché à récupérer des informations globales à l'échelle du scénario réalisé sur l'état d'éveil physiologique moyen des sujets en termes de conductance électrodermale et de variabilité du rythme cardiaque.

-Filtrage de signaux :

Des filtres digitaux à réponse impulsionnelle infinie (IIR) étaient appliqués aux différents signaux afin d'éliminer les artefacts les plus importants en fonction du temps de réponse de chaque signal. Un filtre passe bande haut fixé à 1 Hz a été utilisé pour nettoyer le signal cardiaque tandis qu'un filtre passe bande bas fixé à 1 Hz était appliqué au signal EDA afin de ne laisser passer que les basses fréquences représentatives.

-Données physiologiques cardiaques : rythme cardiaque et variabilité du rythme cardiaque

Après avoir récupéré l'ECG nous avons récupéré la fréquence cardiaque que nous avons analysée et nous avons réalisé une analyse temporelle et fréquentielle du signal cardiaque afin de procéder à l'analyse de la variabilité du rythme cardiaque (VRC). Attardons-nous quelque peu sur les origines et bases scientifiques de la VRC. Depuis les années 1970 (Bernston et al., 1997), les variations de l'activité cardiaque ont été utilisées pour obtenir une mesure globale de l'effort cognitif impliqué dans la réalisation d'une tâche à dominante cognitive.

Il a été établi assez rapidement que les variations du rythme cardiaque (écart type du rythme cardiaque) sont assez peu corrélées à l'effort cognitif, tout du moins qu'elles ne sont pas suffisamment prononcées pour être un indicateur fiable. En définitive l'augmentation de l'effort cognitif se traduit par une augmentation du rythme cardiaque d'au mieux 10 battements/minute ce qui est facilement « masquable » par des efforts physiques même légers (exemples : changement de posture, étirement du corps). Pour pallier à cette difficulté, les recherches se sont orientées vers l'analyse de la variabilité du rythme cardiaque (VRC à ne pas confondre avec l'écart type de rythme cardiaque). La suppression de ce paramètre se révèle être un marqueur beaucoup plus fiable de l'investissement dans la tâche que l'augmentation du rythme cardiaque.

La variabilité du rythme cardiaque (VRC) à ne pas confondre avec le rythme cardiaque (RC), est un phénomène physiologique qui se manifeste par le fait que les durées entre chaque pulsation cardiaque sont variables et que ces variations se font de manière rythmique (voir figure 17).

La latence des réponses de l'électrocardiogramme manifestées par les battements cardiaques est d'environ 150 secondes. De manière générale cette rythmicité a deux origines physiologiques. Premièrement, elle résiderait dans la dynamique des boucles de régulation végétative qui règlent le rythme cardiaque en fonction d'un certain nombre de paramètres physiologiques, les plus importants étant la pression sanguine et le couplage avec le rythme respiratoire. Deuxièmement les noyaux végétatif du tronc cérébral (i.e ; noyaux solitaires, noyaux caudaux ventromedullaires, noyaux ambigus, noyaux dorsomoteurs, et noyaux rostraux ventromedullaires) d'où émergent les fibres parasymphatiques et orthosympatiques qui se projettent sur le coeur (nerf vague) sont en bout de chaîne du système CAN (Central Autonomous Network, Thayer & Lane 2009 ; Brenston, 2007). Ce dernier est composé de structures corticales (i.e Noyaux central de l'amygdale, substance grise périe-aqueducule et noyaux parabrachiaux hypothalamiques), les noyaux hypothalamiques agissant directement sur les noyaux cardio régulateur du tronc cérébral. Des travaux pharmacologiques (Gianaros, 2008 ; cité par Thayer & Lane, 2009) ont montré qu'une activation de l'amygdale entraîne une désinhibition des centres médullaires cardio modérateurs, ce qui se traduit par une légère augmentation du rythme cardiaque et une suppression de la variabilité du rythme cardiaque.

Cette activation est, il faut le noter, également obtenue par une levée de l'inhibition du cortex préfrontal. Aussi, lorsque le sujet s'engage dans une activité impliquant fortement le cortex préfrontal la succession d'évènements corticaux et sous corticaux décrite précédemment est également observée.

De nombreuses études ont utilisé l'analyse de la VRC lorsque les sujets s'engagent dans des tâches cognitives (Capa, Audiffren, & ragot, 2008 ; Duschek, Muckenthaler, Werner, & Reyes del Paso, 200ç, 2009 ; RYU & Myung, 2005, Backs,

1994). Si la diagnosticité de la méthode est discutée (Nickel & narchreiner, 2003) sa sensibilité aux efforts cognitifs est maintenant admise.

Le rythme cardiaque augmente à l'inspiration et diminue à l'expiration, l'activité parasympathique étant diminuée pendant l'inspiration. La fluctuation de ce rythme caractérise la variabilité de la fréquence cardiaque (VFC). Bien que le cœur soit relativement stable, les temps entre deux battements cardiaques peuvent être très différents. En situation dite normale (En cas de non pratique d'une activité physique et soumis à aucun stress quel qu'il soit) il existe une variabilité naturelle du rythme cardiaque, toutefois en condition de stress cette variabilité a tendance à disparaître. Le signal cardiaque est un des plus forts du corps et il est facilement mesurable par des techniques non invasives (positionnement d'électrodes sur le torse). De plus l'extraction des composantes des troubles du rythme cardiaque (arythmie) ne nécessite que de recueillir les durées unitaires entre chaque pulsation cardiaque, il n'y a donc que très peu d'exigence sur le positionnement des électrodes sur la peau.

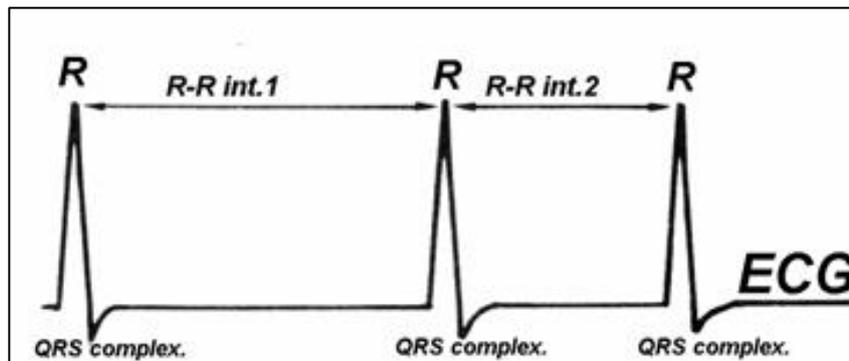


Figure 17. Variabilité cardiaque

Le calcul de la VRC se fait selon deux modalités :

-dans le domaine temporel avec des techniques statistiques fondées sur des calculs de variance et on dénombre plusieurs variables dérivées directement de la mesure des intervalles R-R :

-NN (intervalle entre 2 battements cardiaques, normal to normal, NN) ;

-SDNN (déviatoin standard de l'intervalle RR sur toute la période d'enregistrement, standard deviation of all NN intervals) qui renseigne sur la variabilité globale ;

-SDNN index ou ASDNN (moyenne des déviations standards de l'intervalle R-R sur des segments de 5 min, pendant toute la période d'enregistrement, mean of the standard deviations of all NN intervals for all 5 min segments) qui renseigne sur la variabilité à court terme ;

-SDANN (déviations standard de la moyenne des intervalles R-R des segments de 5 min sur toute la période d'enregistrement, standard deviation of the averages of NN intervals in all 5 min segments of the entire recording) qui exprime la variabilité globale des cycles de 5 min, c'est-à-dire la variabilité à long terme.

-NN50 (nombre d'intervalles RR successifs différant de plus de 50 ms, number of adjacent NN intervals differing by more than 50 ms) ;

-SDSD (déviations standard de la différence entre les intervalles RR successifs, standard deviation of differences between adjacent NN intervals) ;

-pNN50 (NN50 divisé par le nombre total d'intervalles, NN50 count divided by the total number of all NN intervals) qui exprime la variabilité de haute fréquence principalement d'origine parasympathique, modulée par la respiration ;

-RMSSD (la moyenne quadratique des intervalles R-R successifs) qui exprime aussi la variabilité de haute fréquence principalement d'origine parasympathique, modulée par la respiration. Cette mesure est préférable à pNN50 et à NN50 d'après la Task Force.

-dans le domaine fréquentiel avec l'usage de la transformation rapide de Fourier afin d'extraire les composantes rythmiques du signal à partir de l'ensemble de ces calculs, des logiciels (AcqKnowledge 4.1 de la société Biopac) extraient la VRC totale, le poids des influences parasympathiques et orthosympathiques et la balance vagale.

L'analyse spectrale permet donc d'évaluer qu'une influence sympathique plus élevée qu'une influence vagale caractériserait une situation de stress pour la charge cognitive.

Communément, les résultats de la littérature présentent les quatre composants spectraux suivants :

-Les hautes fréquences (HF) entre 0,15 et 0,4 Hz. Elles sont un indicateur de l'activité parasympathique. Toutefois, les HF ne reflètent pas uniquement l'activité parasympathique dans le cas où l'activité respiratoire est inférieure à 0,15 Hz (9 cycles par minute) ce qui reste relativement peu fréquent (Novak et Novak 1993; Berntson et al. 1997).

-Les basses fréquences (LF) entre 0,04 et 0,15 Hz. Elles traduiraient principalement l'activité sympathique. Néanmoins, pour certains auteurs, elles représenteraient un amalgame d'activités sympathique et parasympathique contrôlant le nœud sinusal (Pomeranz et al. 1985; Persson et al. 1992; Houle et Billman 1999) alors que pour d'autres, les LF ne refléteraient qu'une activité sympathique (Pagani et al. 1986). Les oscillations de la fréquence cardiaque dans cette gamme de fréquence seraient liées à l'activité baroréflexe (Robbe et al. 1987).

-Les basses fréquences normalisées LF n.u (%) : $LF/(LF+HF)*100$

-Les hautes fréquences normalisées HF n.u (%) : $HF/(LF+HF)*100$

-Les très basses fréquences (VLF) entre 0,0033 et 0,04 Hz. Elles traduisent les mécanismes de régulation à long terme, probablement liés à la thermorégulation, à la vasomotricité, au système rénine-angiotensine ou à d'autres facteurs. Ces rythmes sont difficiles à analyser avec les méthodes traditionnelles d'analyse spectrale.

-Les ultra-basses fréquences (ULF) entre 0 et 0,0033 Hz. Elles sont caractérisées par des rythmes très lents spontanés, et sont calculées à partir des enregistrements de longue durée (au moins de 24 h). L'estimation de la variabilité dans cette bande de fréquence n'est pas seulement un outil de recherche mais a des implications dans l'évaluation clinique, comme par exemple dans l'hypertension et comme valeur prédictive de mortalité après cardiopathie ischémique.

Pour la fréquence cardiaque et chacun des indicateurs physiologiques temporels et fréquentiels issus de la variabilité du rythme cardiaque, un différentiel de mesure a été fait entre la période d'activité et la période de repos.

-Données physiologiques activité électrodermale : Conductance électrodermale

Contrairement au signal de la fréquence cardiaque, l'activité électrodermale a une latence de réponse de 10 secondes (0.10 Hz) (Braithwaite, Watson, Jones, & Rowe, 2013). L'activité électrodermale moyenne en microsiemens (μS) était obtenue à partir du signal tonique enregistré durant les périodes de repos et d'activité. Le différentiel d'activité électrodermale était donc effectué entre la période de repos et chaque période d'activité. Pour notre étude nous nous sommes focalisé sur la partie tonique du signal EDA, c'est-à-dire au niveau de conductance de la peau indiquant le tonus affectif de base. Les réponses rapides (le signal phasique) de l'activité électrodermale n'ont pas été étudiées puisqu'il y avait trop d'évènements dans chaque scénario pour pouvoir attribuer tel ou tel pic à un évènement saillant particulier.

VII.3 RESULTATS : EFFETS PAR INDICATEUR

VII.3.1 Données subjectives : MEC-SPQ

Un score moyen a été calculé pour chaque groupe et chaque dimension du MEC SPQ (voir tableau 10).

Tableau 10. Moyenne et écart type pour les différents scores obtenus au MEC Spatial Presence Questionnaire

| | Décor 1 | | Décor 2 | | Décor 3 | |
|--|---------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|
| | Visibilité parfaite | Visibilité détériorée | Visibilité parfaite | Visibilité détériorée | Visibilité parfaite | Visibilité détériorée |
| Attention allocation (Attention) | M=4.64 SD=0.32 | M=4.57 SD=0.45 | M=4.44 SD=0.59 | M=4.60 SD=0.48 | M=4.56 SD=0.57 | M=4.61 SD=0.54 |
| Spatial Situation Model (SSM) | M=4.25 SD=0.54 | M=3.92 SD= | M=3.90 SD=0.80 | M=3.78 SD=0.83 | M=4.04 SD=0.68 | M=3.78 SD=0.72 |
| SPSL (Spatial Presence-Self Location) | M=3.69 SD=0.82 | M=3.60 SD=0.95 | M=3.49 SD=0.79 | M=3.58 SD=0.74 | M=3.43 SD=0.89 | M=3.68 SD=0.78 |
| Cognitive Involvement (CogInv) | M=3.80 SD=0.57 | M=3.82 SD=0.58 | M=3.63 SD=0.61 | M=3.68 SD=0.61 | M=3.54 SD=0.68 | M=3.68 SD=0.65 |
| Suspension Of Disbelief (SOD) | M=3.59 SD=0.52 | M=3.60 SD=0.70 | M=3.56 SD=0.57 | M=3.65 SD=0.45 | M=3.50 SD=0.62 | M=3.56 SD=0.66 |
| SPPA (Spatial Presence-Possible actions) | M=3.83 SD=0.57 | M=3.68 SD=0.55 | M=3.82 SD=0.70 | M=3.63 SD=0.74 | M=3.75 SD=0.54 | M=3.51 SD=0.66 |

Le modèle linéaire général a été utilisé pour tester nos hypothèses en croisant nos deux variables indépendantes. Plus particulièrement une analyse ANOVA a été pratiquée pour évaluer les effets (voir tableau 11)

Tableau 11. Résultats ANOVA (seuil de significativité fixé à $p < 0.05$)

| | Richesse du décor | visibilité | Richesse du décor*visibilité |
|--|-------------------|-------------------|------------------------------|
| Attention | F=0.53 p=0.59 | F=0.308 p=0.59 | F=1.31 p=0.28 |
| Spatial Situation Model (SSM) | F=3.13 p=0.057 | F=2.92 p=0.11 | F=0.53 p=0.60 |
| Cognitive Involvement (CogInv) | F=1.86 p=0.17 | F=1.23 p=0.28 | F=0.43 p=0.66 |
| Suspension Of Disbelief (Sod) | F=0.60 p=0.56 | F=0.73 p=0.40 | F=0.12 p=0.89 |
| Spatial presence possible actions (SPPA) | F=1.17 p=0.32 | F=6.56 p=0.02* | F=0.08 p=0.93 |
| Self-Location (SPSL) | F=0.64 p=0.64 | F=0.58 p=0.46 | F=1.29 p=0.29 |

L'analyse ANOVA révèle qu'un effet simple ($F=6.56$; $p=0.02 < 0.05$) a été observé sur la rubrique Spatial presence possible actions (SPPA). Les participants ont eu des scores de présence SPPA plus élevés en condition de visibilité parfaite ($M=3.80$; $SD=0.59$) plutôt qu'en condition de visibilité dégradée ($M=3.61$; $SD=0.65$).

VII.3.2 Données subjectives : IPQ

Un score moyen a été calculé pour chaque groupe et chaque dimension du IPQ (voir tableau 12).

Tableau 12. Moyenne et écart type pour les différents scores obtenus au MEC Spatial Presence Questionnaire

| | Décor 1 | | Décor 2 | | Décor 3 | |
|------------------|---------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|
| | Visibilité parfaite | Visibilité détériorée | Visibilité parfaite | Visibilité détériorée | Visibilité parfaite | Visibilité détériorée |
| G | M=4.56 SD=1.10 | M=4.56 SD=1.38 | M=3.89 SD=1.64 | M=4.67 SD=0.97 | M=4.50 SD=1.34 | M=4.28 SD=1.13 |
| Realism | M=3.13 SD=0.66 | M=2.93 SD=0.99 | M=2.86 SD=0.83 | M=2.85 SD=0.70 | M=2.74 SD=0.99 | M=2.65 SD=1.01 |
| Spatial presence | M=4.24 SD=0.92 | M=4.53 SD=1.06 | M=4.11 SD=1.13 | M=4.22 SD=0.95 | M=4.24 SD=1.28 | M=3.87 SD=1.02 |
| Involvement | M=3.36 SD=1.13 | M=3.93 SD=1.69 | M=3.36 SD=1.20 | M=3.57 SD=1.21 | M=3.64 SD=1.41 | M=3.61 SD=1.22 |

Le modèle linéaire général a été utilisé pour tester nos hypothèses en croisant nos deux variables indépendantes. Plus particulièrement une analyse ANOVA a été pratiquée pour évaluer les effets (voir tableau 13)

Tableau 13. Résultats ANOVA (seuil de significativité fixé à $p < 0.05$)

| | Richesse du décor | Visibilité | Richesse du décor*Visibilité |
|------------------|---------------------------------|-------------------|---------------------------------|
| Spatial presence | F=3.05 p=0.04* | F=0.005 p=0.94 | F=2.30 p=0.12 |
| Involvement | F=0.41 p=0.67 | F=1.62 p=0.22 | F=1.15 p=0.33 |
| Realism | F=2.14 p=0.13 | F=0.89 p=0.36 | F=0.31 p=0.74 |
| G | F=0.89 p=0.42 | F=0.89 p=0.36 | F=3.95 p=0.03* |
| IPQ | F=1.57 p=0.22 | F=0.46 p=0.51 | F=1.48 p=0.24 |

L'analyse ANOVA révèle qu'un effet simple de la richesse du décor ($F=7.52$; $p=0.01$) a été observé sur la rubrique Spatial presence de l'IPQ. Des tests post Hoc mettent en évidence que les participants ont eu des scores de présence spatiale plus élevés dans le décor 1 ($M=4.39$; $SD=0.98$) plutôt que dans le décor 3 ($M=4.06$; $SD=1.16$).

Un effet d'interaction a également été mis en évidence entre la richesse du décor et la visibilité de la route sur l'item "G" (= "la sensation d'être là"). Des tests post Hoc ($p=0.03 < 0.05$) ont mis en évidence que contrairement aux décors 1 et 3, un effet de la visibilité existe dans le décor 2. En effet, dans le décor 2 (voir tableau 13), les participants ont eu des scores de "G" plus élevés dans la condition de visibilité détériorée ($M=4.67$; $SD=0.97$) plutôt que dans la condition de visibilité "parfaite" ($M=3.89$; $SD=1.64$).

VII.3.3 Données valence émotionnelle : PANAS

Un score moyen a été calculé pour chaque groupe et chaque dimension du PANAS (voir tableau 14).

Tableau 14. Moyenne et écart type pour les différents scores obtenus au PANAS

| | Décor 1 | | Décor 2 | | Décor 3 | |
|----|---------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|
| | Visibilité parfaite | Visibilité détériorée | Visibilité parfaite | Visibilité détériorée | Visibilité parfaite | Visibilité détériorée |
| PA | M=34.72 SD=5.20 | M=34.72 SD=5.13 | M=34 SD=6.89 | M=35.28 SD=5.13 | M=33.83 SD=7.16 | M=34 SD=7.06 |
| NA | M=14.61 SD=4.28 | M=16 SD=5.07 | M=14.72 SD=5.14 | M=15.83 SD=4.12 | M=14.89 SD=4.36 | M=15.83 SD=4.96 |

Le modèle linéaire général a été utilisé pour tester nos hypothèses en croisant nos deux variables indépendantes. Plus particulièrement une analyse ANOVA a été pratiquée pour évaluer les effets.

Tableau 15. Résultats ANOVA PANAS (seuil de significativité fixé à $p < 0.05$)

| | Richesse du décor | Visibilité | Richesse du décor*Visibilité |
|----|-------------------|-------------------|------------------------------|
| PA | F=0.89 P=0.42 | F=0.36 P=0.56 | F=0.70 P=0.50 |
| NA | F=0.01 P=0.99 | F=4.34 P=0.04* | F=0.05 P=0.95 |

L'analyse ANOVA révèle qu'un effet simple de visibilité ($F=4.34$; $p=0.04 < 0.05$) a été observé sur la dimension NA (Negative affect) du questionnaire PANAS. Les participants ont eu des scores de NA plus élevés (voir Tableau 15) en condition de visibilité dégradée ($M=15.89$; $SD=4.65$) plutôt qu'en condition de visibilité parfaite ($M=14.74$; $SD=4.53$).

Les émotions négatives sont corrélées négativement à l'attention et ce dans la plupart des situations expérimentales sauf dans le décor 3 avec visibilité détériorée et dans le décor 2 avec visibilité détériorée. Il est intéressant de noter que dans ces 2 conditions expérimentales on a trouvé une corrélation positive entre l'attention et la dimension PA du PANAS. Il semblerait ainsi que plus les participants ressentent des émotions négatives moins ils sont attentifs à l'inverse que plus ils ressentent des émotions positives plus ils sont attentifs. Aucune corrélation n'a été établie dans le décor 1 en condition de visibilité parfaite.

VII.3.4 Données comportementales de conduite

*** Vitesse moyenne (en km/h) et écart type de la vitesse**

Un score moyen a été calculé pour chaque groupe et chaque variable comportementale de conduite (voir tableau 16).

Tableau 16. Moyenne et écart type pour la vitesse

| | Décor 1 | | Décor 2 | | Décor 3 | |
|-------------------|---------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|
| | Visibilité parfaite | Visibilité détériorée | Visibilité parfaite | Visibilité détériorée | Visibilité parfaite | Visibilité détériorée |
| Vitesse (km/h) | M=41.01 SD=4.20 | M=42.05 SD=3.96 | M=54.56 SD=4.15 | M=53.72 SD=5.15 | M=33.92 SD=4.08 | M=34.04 SD=3.61 |
| SD Vitesse (km/h) | M=24.41 SD=2.83 | M=24.28 SD=3.00 | M=31.37 SD=2.67 | M=29.08 SD=4.09 | M=22.59 SD=2.91 | M=23.01 SD=2.12 |

Le modèle linéaire général a été utilisé pour tester nos hypothèses en croisant nos deux variables indépendantes. Plus particulièrement une analyse ANOVA a été pratiquée pour évaluer les effets (voir tableau 17).

Tableau 17. Résultats ANOVA Vitesse moyenne et écart type de la vitesse (seuil de significativité fixé à $p < 0.05$)

| | Richesse du décor | Visibilité | Richesse du décor*Visibilité |
|------------|-------------------------------------|------------------|--------------------------------|
| Vitesse | F=567.124 P=0.00** | F=0.03 P=0.87 | F=0.714 P=0.49 |
| SD Vitesse | F=117.20 P=0.00** | F=2.9 P=0.11 | F=5.4 P=0.01* |

L'analyse ANOVA révèle qu'un effet simple du décor ($F=567.124$; $p=0.00 < 0.05$) a été observé sur la vitesse moyenne (voir Figure 18). Les participants placés dans le décor 2 ($M=54\text{km/h}$, $SD=4.62$) ont eu des vitesses moyennes plus élevées que celles obtenues dans le décor 1 ($M=41.53$; $SD=4.06$) ou encore dans le décor 3 ($M=33.98$; $SD=3.79$).

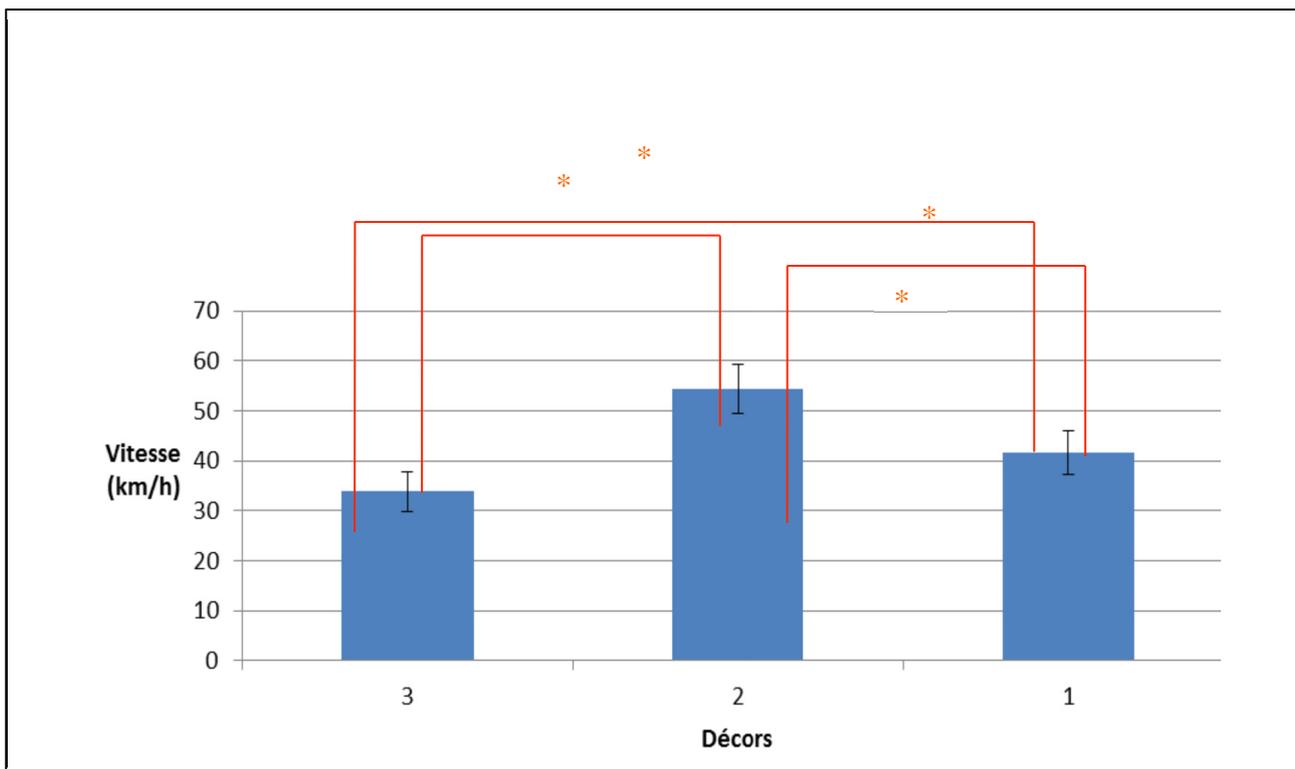


Figure18. La vitesse en fonction du degré de la richesse du décor

Des tests post hoc ($p < 0.05$) ont permis de mettre en évidence les résultats suivants. Les participants ont eu des vitesses moyennes plus élevées dans le décor 2 ($M=54.42$, $SD=4.83$) plutôt que dans le décor 3 ($M=33.86$, $SD=4.03$) ou le décor 1 ($M=41.62$, $SD=4.29$). De même les participants ont eu des vitesses moyennes plus élevées dans le décor 1 ($M=41.62$, $SD=4.29$) plutôt que dans le décor 3 ($M=33.86$, $SD=4.03$). (Voir Figure 18)

L'analyse ANOVA révèle aussi qu'un effet simple du décor ($F=117.20$; $p=0.00 < 0.01$) a été observé sur l'écart type de la vitesse. Les participants ont eu des écarts types de vitesses plus élevés dans le décor 2 ($M=29.79$, $SD=3.16$) plutôt que dans le décor 3 ($M=22.79$, $SD=2.62$) ou le décor 1 ($M=24.48$, $SD=3.03$). De même les participants ont eu des écarts types de vitesses plus élevés dans le décor 1 ($M=24.48$, $SD=3.03$) plutôt que dans le décor 3 ($M=22.79$, $SD=2.62$). (Voir Figure 18).

Un effet d'interaction entre le Degré de richesse du décor (D) et le Degré de dégradation de visibilité de la route (V) sur l'écart type de la vitesse ($F=5.4$, $p < 0.01$) a été mis en évidence. Les analyses post-hoc ($p > 0.05$) ont révélé que les participants soumis aux meilleurs conditions de visibilité de la route, ont eu des écarts types de vitesse plus élevés dans le décor 2 ($M=30.99$, $SD=2.24$) que dans le décor 1 ($M=24.55$, $SD=3.02$) or cet effet n'est pas observé dans la condition de visibilité très

dégradée (Voir Figure 18). Par ailleurs les participants ont eu des écarts types de vitesse plus élevés en condition de bonne visibilité ($M=31$, $SD=3.01$) qu'en condition de mauvaise visibilité ($M=28.59$, $SD=2.12$) mais uniquement dans le décor 2. Cet effet de la visibilité sur l'écart type de la vitesse n'est pas observé dans le décor 1 ou le décor 3.

*** Position latérale moyenne (en m) et écart type moyen de la position latérale**

Un score moyen a été calculé pour chaque situation expérimentale et chaque variable comportementale de conduite (voir tableau 18).

Tableau 18. Moyenne et écart type pour la position latérale

| | Décor 1 | | Décor 2 | | Décor 3 | |
|--------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| | Visibilité parfaite | Visibilité détériorée | Visibilité parfaite | Visibilité détériorée | Visibilité parfaite | Visibilité détériorée |
| Position latérale (m) | M=0.88 SD=0.12 | M=0.89 SD=0.08 | M=0.80 SD=0.13 | M=0.85 SD=0.12 | M=0.83 SD=0.12 | M=0.88 SD=0.13 |
| SD Position latérale (m) | M=0.56 SD=0.04 | M=0.58 SD=0.03 | M=0.55 SD=0.06 | M=0.59 SD=0.04 | M=0.52 SD=0.06 | M=0.55 SD=0.04 |

Le modèle linéaire général a été utilisé pour tester nos hypothèses en croisant nos deux variables indépendantes. Plus particulièrement une analyse ANOVA a été pratiquée pour évaluer les effets.

Tableau 19. Résultats ANOVA moyenne de la position latérale dans la voie et écart type de la position latérale dans la voie (seuil de significativité fixé à $p < 0.05$)

| | Richesse du décor | Visibilité | Richesse du décor*Visibilité |
|-------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|
| Position Latérale | F=6.38 P=0.004** | F=6.031 P=0.025* | F=0.98 P=38 |
| SDLP | F=8.07 P=0.001* | F=11.90 P=0.003* | F=1.10 P=0.345 |

L'analyse ANOVA révèle qu'un effet simple du décor ($F=6.38$; $p=0.004 < 0.05$) a été observé sur position latérale moyenne. Les participants placés dans le décor 2 ($M=0.82$, $SD=0.13$) ont eu des positions latérales moyennes plus basses que celles obtenues dans le décor 1 ($M=0.89$; $SD=0.09$) ou encore dans le décor 3 ($M=0.86$; $SD=0.13$) (Voir Figure 19).

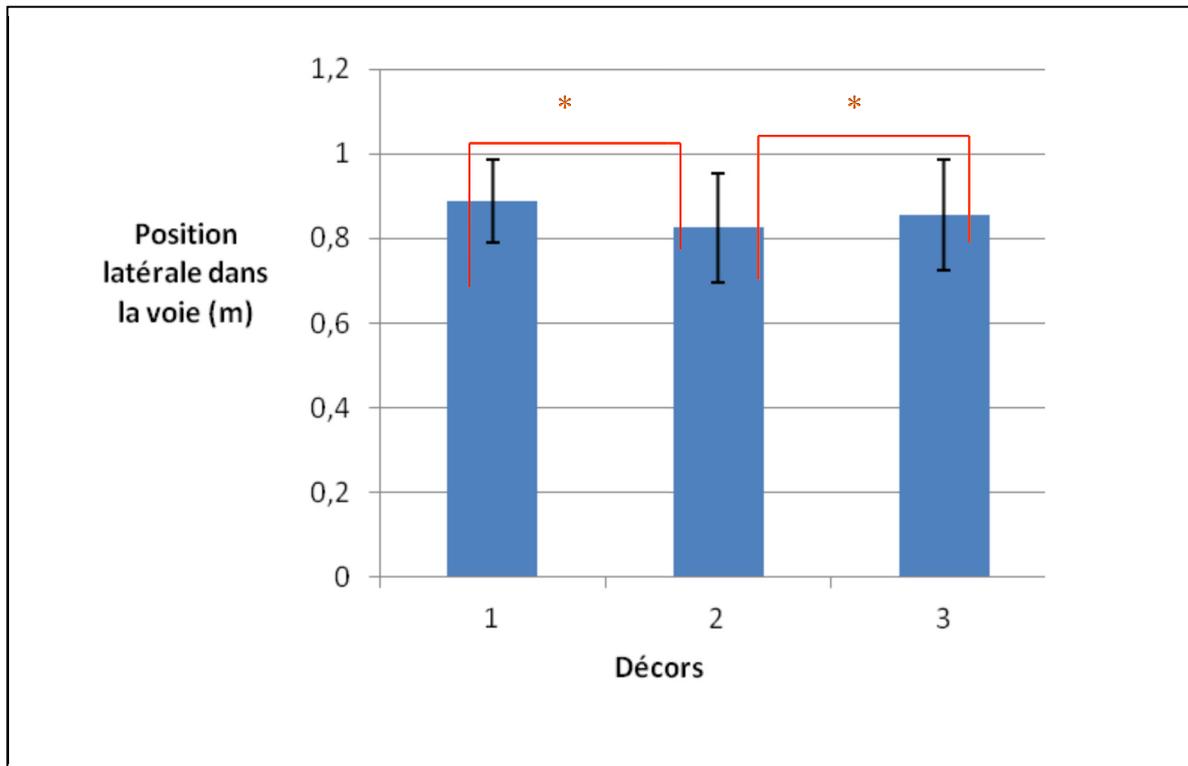


Figure 19. Position latérale moyenne en fonction du degré de richesse du décor

Un effet simple de la visibilité ($F=6.031$; $p=0.025$) de la route a également été mis en évidence sur la position latérale dans la voie. Les participants ont eu des positions latérales moyennes plus élevées dans les situations de mauvaise visibilité ($M=0.89$, $SD=0.18$) que dans les situations de bonne visibilité ($M=0.84$, $SD=0.23$).

Un effet simple de la richesse du décor sur l'écart type de la position latérale dans la voie a été mis en évidence ($F=8.07$; $p=0.001^*$). Les participants ont eu des écarts types de position latérales plus faibles dans le décor 3 ($M=0.53$; $SD=0.05$) que dans les décors 1 ($M=0.57$; $SD=0.04$) et 2 ($M=0.57$; $SD=0.05$).

Un effet simple de la visibilité ($F=11.90$; $p=0.003^{**}$) de la route a également été mis en évidence sur l'écart type de la position latérale dans la voie. Les participants ont eu des écarts types de positions latérales plus élevés dans les situations de mauvaise visibilité ($M=0.57$, $SD=0.15$) que dans les situations de bonne visibilité ($M=0.54$, $SD=0.18$) (Voir Figure 19).

VII.3.5 Variabilité du rythme cardiaque (HRV) : Domaine temporel et domaine fréquentiel

On souhaite étudier l'influence de nos 2 variables indépendantes que sont la richesse du décor et la visibilité de la route sur l'ensemble des paramètres temporels de la HRV (voir Tableau 20) et sur l'ensemble des paramètres fréquentiels de la HRV (voir Tableau 22). Rappelons qu'il s'agit ici de mesures de différentiels physiologiques (par rapport à une valeur seuil au repos).

Tableau 20. Moyenne et écart type pour les paramètres temporels de la HRV

| | | Décor 1 | Décor 2 | Décor 3 |
|----------------------------------|-----|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|
| Δ Max (ms) | R-R | M=-77.67 SD=97.05 | M=-55.44 SD=89.07 | M=-93.44 SD=126.91 |
| Δ MinMaxRR Diff (msec) | | M=-98.11 SD=119.93 | M=-78.45 SD=108.09 | M=-122.67 SD=129.16 |
| Δ MeanHR (bpm) | | M=3.38 SD=4.88 | M=2.77 SD=4.09 | M=4.65 SD=5.72 |
| Δ SDHR (bpm) | | M=-0.42 SD=1.99 | M=-0.34 SD=1.76 | M=-0.76 SD=1.95 |
| Δ Min (msec) | R-R | M=20.45 SD=104.87 | M=23 SD=111.11 | M=29.22 SD=106.54 |
| Δ Mean (msec) | R-R | M=-44.63 SD=62.71 | M=-36.03 SD=52.75 | M=-60.02 SD=71.89 |
| Δ SDNN (msec) | | M=-9.80 SD=20.82 | M=-7.87 SD=18.31 | M=-14.32 SD=18.61 |
| Δ SDANN (msec) | | M=-3.60 SD=8.36 | M=-0.46 SD=7.82 | M=-5.70 SD=7.14 |

| | | | |
|------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| Δ SDNNindex (msec) | M=-11.88 SD=22.19 | M=-11,75 SD=21,33 | M=-12.34 SD=21 |
| Δ RMSSD (msec) | M=-4.48 SD=16.51 | M=-4.81 SD=15.33 | M=-4.60 SD=14.78 |
| Δ SDSD (msec) | M=-4.45 SD=16.48 | M=-4.84 SD=15.32 | M=-4.69 SD=14.87 |
| Δ NN50 (msec) | M=8.43 SD=99.84 | M=20.49 SD=109,71 | M=1.50 SD=104.76 |
| Δ PNN50 (%) | M=7.58 SD=71.89 | M=7.00 SD=71.70 | M=2.45 SD=37.85 |

Pour les valeurs moyennes des indicateurs temporels de la HRV et des écarts type des indicateurs temporels de HRV (voir tableau 20) l'analyse ANOVA 3 (degré de richesse du décor : pas réaliste, moyennement réaliste, très réaliste) \times 2 (niveau de visibilité de la route : bonne ou mauvaise visibilité) a été utilisée.

Tableau 21. Résultats ANOVA HRV domaine temporel (seuil de significativité fixé à $p < 0.05$)

| HRV domaine temporel | | Richesse du décor | Visibilité | Richesse du décor*Visibilité |
|----------------------------------|-----|-----------------------------------|------------------|---------------------------------|
| Δ Max (ms) | R-R | F=4.22 p=0.04* | F=0.58 p=0.45 | F=1.58 p=0.22 |
| Δ MinMaxRR Diff (msec) | | F=3.35 p=0.04* | F=0.01 p=0.94 | F=3.00 p=0.06 |
| Δ MeanHR (bpm) | | F=4.43 p=0.02* | F=0.10 p=0.75 | F=0.32 p=0.72 |
| Δ SDHR (bpm) | | F=4.74 p=0.02* | F=0.81 p=0.37 | F=0.02 p=0.97 |
| Δ Min (msec) | R-R | F=0.259 p=0.77 | F=0.68 p=0.42 | F=0.58 p=0.56 |
| Δ Mean (msec) | R-R | F=4.48 p=0.02* | F=0.14 p=0.70 | F=0.22 p=0.79 |
| Δ SDNN (msec) | | F=8.97 p=0.00* | F=0.76 p=0.39 | F=1.11 p=0.34 |
| Δ SDANN (msec) | | F=5.90 p=0.01* | F=0.59 p=0.45 | F=1.19 p=0.32 |
| Δ SDNNindex (msec) | | F=2.68 p=0.08 | F=0.35 p=0.56 | F=1.08 p=0.35 |
| Δ RMSSD (msec) | | F=0.29 p=0.74 | F=0.37 p=0.55 | F=0.69 p=0.51 |
| Δ SDSD (msec) | | F=0.44 p=0.65 | F=0.19 p=0.67 | F=0.64 p=0.53 |
| Δ NN50 (msec) | | F=13.44 p=0.00** | F=0.14 p=0.71 | F=1.65 p=0.21 |
| Δ PN50 (%) | | F=0.51 p=0.60 | F=0.16 p=0.70 | F=1.40 p=0.26 |

Concernant le domaine temporel:

Un effet très marqué du décor a été mis en évidence pour 8 indicateurs du domaine temporels (Δ Max R-R, Δ MinMaxRR, Δ Mean HR, Δ SDHR, Δ Mean R-R, Δ SDNN, Δ SDANN, Δ NN50) sur 13 au total.

-Pour Δ MaxR-R les tests post Hoc de bonferonni ($p=0.04<0.05$) nous précisent que les participants ont de plus fortes valeurs dans le décor 2 que dans le décor3 (Voir Tableau 20).

- Pour Δ MinMaxRR les tests post Hoc de Nonferonni ($p=0.04<0.05$) nous précisent que les participants ont de plus fortes valeurs dans le décor 2 que dans le décor 3 (Voir Tableau 20).

- Pour Δ Mean HR les test post hoc de bonferonni ($p=0.02<0.05$) nous précisent que les participants dans le décor 2 ont eu des valeurs moyenne de rythme cardiaque plus faibles que dans le décor 3 (Voir Tableau 20).

-Pour Δ SDHR les test post hoc de bonferonni ($p=0.02<0.05$) nous précisent que les participants dans le décor 2 ont eu des valeurs moyenne d'écart type du rythme cardiaque plus faibles que dans le décor 3 (Voir Tableau 20).

-Pour Δ MeanRR,les tests post hoc de bonferonni ($p=0.01<0.05$) nous précisent que les participants dans le décor2 ont eu des valeurs plus élevées que dans le décor 3.

-Pour Δ SDNN, les tests post hoc de bonferonni nous précise que les participants ont eu des valeurs plus élevées dans le décor 2 que dans le décor 3 ($p=0.0007<0.01$) On relève également que les participants ont également eu des valeurs plus élevées ($p=0.02<0.05$) dans le décor 1 que dans le décor 3.

-Pour Δ SDANN, les tests post hoc de bonferonni ($p=0.005<0.05$) nous précise que les participants dans le décor 2 ont eu des valeurs plus élevées que dans le décor 3.

-Pour Δ NN50, les tests post hoc de bonferonni ($p=0.005<0.05$) nous précise que les participants dans le décor 2 ont eu des valeurs plus élevées que dans le décor 3.

Concernant le domaine fréquentiel:

Tableau 22. Résultats ANOVA HRV domaine fréquentiel (seuil de significativité fixé à $p < 0.05$)

| HRV domaine fréquentiel | Richesse du décor | Visibilité | Richesse du décor*Visibilité |
|-----------------------------------|-------------------|------------------|------------------------------|
| ΔTP (msec ²) | F=0.08 p=0.92 | F=2.32 p=0.15 | F=1.73 p=0.19 |
| ΔVLF (msec ²) | F=0.55 p=0.58 | F=1.58 p=0.23 | F=1.08 p=0.35 |
| ΔLF (msec ²) | F=0.73 p=0.49 | F=1.49 p=0.24 | F=1.73 p=0.19 |
| ΔHF (msec ²) | F=0.38 p=0.69 | F=1.14 p=0.30 | F=1.42 p=0.26 |
| ΔLF_{norm} (n,u) | F=3.46 p=0.05 | F=0.14 p=0.71 | F=4.61 p=0.02* |
| ΔHF_{norm} (n,u) | F=1.91 p=0.16 | F=0.02 p=0.89 | F=2.41 p=0.11 |
| $\Delta LF/HF$ | F=0.16 p=0.47 | F=0.54 p=0.47 | F=0.57 p=0.57 |

Un effet d'interaction du décor et de la visibilité (voir tableau 22) a été mis en évidence sur la dimension ΔLF norm (n.u) (F=3.46; $p=0.04 < 0.05$). Les tests bonferonni nous précisent qu'uniquement en condition de visibilité dégradée les participants rapportent des valeurs de " ΔLF norm" sont plus élevées ($p=0.01 < 0.05$) dans le décor 2 que dans le décor 1. A l'inverse les valeurs de " ΔLF_{norm} " sont plus élevées dans le décor 3 que dans le décor 2 et ce uniquement pour une condition de visibilité dégradée.

VII.3.6 Conductance électrodermale

Un score moyen et un écart type d'EDA ont été calculés pour chaque situation expérimentale (voir tableau 23). Rappelons que les valeurs d'EDA traitées sont des mesures différentielles de conductance électrodermale (par rapport à une mesure seuil au repos).

Tableau 23. Moyenne et écart type pour la conductance électrodermale

| | Décor 1 | | Décor 2 | | Décor 3 | |
|------------------------------------|---------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|
| | Visibilité parfaite | Visibilité détériorée | Visibilité parfaite | Visibilité détériorée | Visibilité parfaite | Visibilité détériorée |
| Δ MoyenneEDA (microsiemens) | M=3.11 SD=3.18 | M=3.36 SD=3.06 | M=2.63 SD=3.06 | M=3.47 SD=2.89 | M=2.87 SD=3.19 | M=3.62 SD=2.94 |

Le modèle linéaire général a été utilisé pour tester nos hypothèses en croisant nos deux variables indépendantes. Plus particulièrement une analyse ANOVA a été pratiquée pour évaluer les effets (voir Tableau 24).

Tableau 24. Résultats ANOVA EDA (seuil de significativité fixé à $p < 0.05$)

| | Richesse du décor | Visibilité | Richesse du décor*Visibilité |
|-------------------------------------|-------------------|--------------------|------------------------------|
| Δ Moyenne EDA (microsiemens) | F=0.58 p=0.57 | F=6.75 p=0.022* | F=0.598 p=0.558 |

Un effet simple de la visibilité du décor a été mis en évidence sur la moyenne électrodermale (F=6.75; p=0.02*). Les participants soumis à la condition de visibilité dégradée (M=3.49; SD=2.89) ont présenté de plus fortes valeurs moyennes d'activité électrodermale qu'en situation de visibilité parfaite (M=2.87; SD=3.07)

VII.4 RESULTATS : CORRELATIONS ET REGRESSIONS

VII.4.1 Régressions entre items du MEC-SPQ

Nous avons cherché à évaluer les prédictions du modèle MEC-SPQ par l'intermédiaire d'analyses de régressions simples. Voici les résultats concernant l'ensemble des participants (Voir Tableau 25).

Tableau 25. Résultats Régressions MEC-SPQ global (seuil de significativité fixé à $p < 0.05$)

| Variable prédictive | Variable dépendante | Beta | p |
|---------------------|---------------------|------|---------|
| Attention | SSM | 0.31 | 0.001** |
| SSM | SPPA | 0.49 | 0.000** |
| SSM | SPSL | 0.62 | 0.000** |
| SOD | SSM | 0.44 | 0.000** |
| SOD | SPSL | 0.55 | 0.000** |
| SOD | SPPA | 0.40 | 0.000** |
| CogInvolvement | SSM | 0.27 | 0.004** |
| CogInvolvement | SPSL | 0.29 | 0.002** |
| CogInvolvement | SPPA | 0.37 | 0.000** |

Toutes les régressions testées se sont avérées significatives. Les différentes tendances prédites par le modèle MEC SPQ ont été trouvées expérimentalement:

-L'attention est un prédicteur positif de la représentation mentale de l'environnement (SSM).

-La représentation mentale est à son tour un prédicteur positif de la présence spatiale (SPPA et SPSL).

-La suspension d'incrédulité est un prédicteur positif de la représentation mentale de l'environnement (SSM).

-La suspension d'incrédulité est un prédicteur positif de la présence spatiale (SPPA et SPSL)

-L'engagement est un prédicteur positif de la représentation mentale de l'environnement (SSM).

-L'engagement est un prédicteur positif de la présence spatiale (SPPA et SPSL).

Pour affiner notre compréhension du modèle MEC-SPQ, nous avons cherché à évaluer les prédictions du modèle MEC-SPQ en pratiquant des analyses de régressions des différentes dimensions du modèle pour chaque groupe expérimental (Voir Annexe 11).

On constate que pour les différentes situations expérimentales, la représentation mentale de l'environnement virtuel (SSM) est un prédicteur de la présence spatiale (SPSL). On constate aussi que l'on trouve plus de régressions dans les décors 1, 2 et 3 en condition de visibilité parfaite plutôt qu'en condition de visibilité réduite. Enfin, en condition de mauvaise visibilité, on note que c'est dans le décor 3 (considéré comme le moins riche en termes de qualité du décor) que l'on relève le moins de régressions puis dans le décor 2 et enfin dans le décor 1.

VII.4.2 Corrélations entre items du IPQ

Nous avons cherché à évaluer les liens de covariance entre les différentes rubriques de notre questionnaire IPQ à l'aide de corrélations Gamma (Voir Tableau 26).

Tableau 26. Résultats corrélations gamma IPQ global (seuil de significativité fixé à $p < 0.05$)

| | SP | INV | REAL | G |
|------|----|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| SP | | 0.41 ($p=0.00^{**}$) | 0.42 ($p=0.00^{**}$) | 0.85 ($p=0.00^{**}$) |
| INV | | | 0.25 ($p=0.00^{**}$) | 0.44 ($p=0.00^{**}$) |
| REAL | | | | 0.47 ($p=0.00^{**}$) |

Toutes les rubriques du questionnaire IPQ sont corrélées significativement les unes aux autres et ce positivement. On relève que la corrélation la plus forte concerne celle reliant la présence spatiale (SP) et la sensation d'être là (G) avec $\text{Gamma}=0.85$. De la même manière on relève que la corrélation la plus faible trouvée est celle reliant l'engagement (Involvement) et le réalisme perçu (Realism) avec $\text{Gamma}=0.25$.

Pour affiner notre compréhension, nous avons cherché à évaluer les corrélations des différents items du IPQ pour les différentes configurations expérimentales (Voir Annexe 12).

L'étude des corrélations nous montre que c'est dans le décor 1 que nous trouvons le plus de corrélations positives et ce à la fois pour la condition de visibilité parfaite ou détériorée. On observe autant de corrélations positives (comparées au décor 1) entre les items du IPQ dans le décor 3 mais uniquement dans la condition de visibilité parfaite. En outre on observe le moins de corrélations positives pour le décor 2 et ce à la fois en condition de visibilité parfaite ou détériorée.

VII.4.3 Corrélations entre items du PANAS

Des corrélations ont été calculées entre les items des questionnaires de présence IPQ et SPQ avec les deux items du questionnaire du PANAS. Nous souhaitons préciser la valence émotionnelle de l'expérience de présence ressentie (Voir Tableau 27).

Tableau 27. Résultats corrélations IPQ- PANAS- SPQ(seuil de significativité fixé à $p < 0.05$)

| | PA | NA |
|--|-----------------|------------------|
| Attention | 0.34 (p=0.00**) | -0.20 (p=0.01*) |
| Spatial Situation Model (SSM) | -0.06 (p=0.42) | -0.21 (p=0.00**) |
| Cognitive Involvement (CogInv) | -0.14 (p=0.06) | -0.12 (p=0.08) |
| Suspension Of Disbelief (SOD) | 0.04 (p=0.53) | -0.19 (p=0.00**) |
| Spatial presence possible actions (SPPA) | -0.01 (p=0.89) | 0.01 (p=0.90) |
| Self-Location (SPSL) | 0.11 (p=0.10) | 0.01 (p=0.96) |
| G | 0.06(p=0.41) | 0.05(p=0.48) |
| Realism (REAL) | 0.05(p=0.49) | -0.07(p=0.35) |
| Spatial presence (SP) | 0.12(p=0.07) | -0.02(p=0.98) |
| Involvement (INV) | 0.13(p=0.06) | 0.07(p=0.91) |

Seules des corrélations entre les rubriques du MEC-SPQ et les dimensions du PANAS ont été relevées, aucune corrélation significative n'a pu être mise en évidence entre le IPQ et le PANAS. Il en ressort qu'une corrélation négative a été établie entre l'attention et les émotions positives associées à la réalisation de la tâche dans l'environnement virtuel. Et à l'inverse des corrélations négatives ont été mises en évidence entre le score NA d'émotions négatives et l'attention mais aussi avec le score SSM (construction d'une représentation mentale de l'environnement) et le score SOD (suspension d'incrédulité) (Voir Tableau 27).

Pour affiner notre compréhension, nous avons cherché à évaluer les corrélations des différents items du IPQ pour les différentes configurations expérimentales.

VII.4.4 Corrélations entre items des questionnaires IPQ/SPQ avec les données comportementales de conduite

*** Corrélations entre items SPQ/IPQ et vitesse moyenne/écart type de la vitesse**

Des corrélations ont été calculées entre les items des questionnaires de présence IPQ et SPQ avec la vitesse moyenne et l'écart type de la vitesse moyenne. Nous souhaitons mettre en évidence des indicateurs comportementaux de la présence.

Plusieurs corrélations ont pu être mises en évidence entre les données subjectives de présence et les données comportementales de conduite. L'attention est un prédicteur positif de la performance de conduite en termes d'écart type de vitesse (voir tableau 28). Concrètement une corrélation négative relie l'attention et l'écart type de la vitesse. Par ailleurs il semble également que l'attention soit un prédicteur négatif de la vitesse puisque l'on trouve une corrélation négative entre la vitesse et l'attention. Enfin contrairement à ce qui était attendu une corrélation positive entre le réalisme perçu et l'écart type de la vitesse, tendrait à montrer que le réalisme perçu influencerait négativement la performance de conduite en simulateur. Ce résultat sera davantage abordé et éprouvé dans la discussion.

Tableau 28. Résultats corrélations IPQ/SPQ avec la vitesse moyenne/écart type de la vitesse (SD Vitesse)(seuil de significativité fixé à $p < 0.05$)

| | SD Vitesse | Vitesse |
|--|-----------------|-----------------|
| Attention | -0.15 (p=0.04*) | -0.14 (p=0.04*) |
| Spatial Situation Model (SSM) | 0.00 | 0.03 |
| Cognitive Involvement (CogInv) | 0.00 | -0.03 |
| Suspension Of Disbelief (Sod) | 0.03 | 0.02 |
| Spatial presence possible actions (SPPA) | 0.09 | 0.05 |
| Self-Location (SPSL) | 0.12 | 0.03 |
| G | 0.14 | 0.06 |
| Realism (REAL) | 0.15 (p=0.03*) | 0.08 |
| Spatial presence (SP) | 0.10 | 0.06 |
| Involvement (INV) | -0.03 | -0.06 |

Pour affiner notre compréhension, nous avons cherché à évaluer les corrélations des différents items du IPQ et du SPQ avec la vitesse moyenne et l'écart type de la vitesse pour les différentes configurations expérimentales (Voir Annexe 13).

Il est intéressant de noter que la majeure partie des corrélations entre le comportement de vitesse et les réponses aux questionnaires correspond à la situation de visibilité dégradée du décor 1, décor qui, dans notre expérience est considéré comme le plus complet en termes de richesse du décor.

*** Corrélations entre items SPQ/IPQ et moyenne de la position latérale dans la voie/écart type de la position latérale dans la voie**

Des corrélations ont été calculées entre les items des questionnaires de présence IPQ et SPQ avec la moyenne de la position latérale dans la voie et l'écart type de la position latérale. Nous souhaitons mettre en évidence des indicateurs comportementaux de la présence.

Tableau 29. Résultats corrélations IPQ/SPQ avec la moyenne de la position latérale dans la voie/écart type de la position latérale (SDLP)(seuil de significativité fixé à $p<0.05$)

| | Position latérale dans la voie | SDLP |
|--|--------------------------------|-----------------|
| Attention | -0.05 | -0.14 (p=0.04*) |
| Spatial Situation Model (SSM) | -0.11 | -0.07 |
| Cognitive Involvement (CogInv) | 0.04 | 0.04 |
| Suspension Of Disbelief (SOD) | -0.19 (p=0.006**) | -0.04 |
| Spatial presence possible actions (SPPA) | -0.21 (p=0.003**) | -0.15 (p=0.03*) |
| Self-Location (SPSL) | -0.08 | -0.11 |
| G | 0.02 | -0.09 |
| Realism (REAL) | 0.13 | 0.08 |
| Spatial presence (SP) | 0.01 | -0.07 |
| Involvement (INV) | 0.24 (p=0.00**) | -0.025 |

On constate que l'attention et la présence spatiale (SPPA) sont respectivement chacune reliée à la performance de conduite (ici l'écart type de la position latérale dans la voie) par une corrélation négative. Tout ceci tendrait à prouver que l'attention et la présence spatiale seraient des prédicteurs de la performance de conduite. En ce qui concerne les deux corrélations négatives qui relient d'une part "involvement" (ou "engagement") avec la position latérale et d'autre part la présence spatiale (SPPA) avec la position latérale, il semble que cela puisse relever d'une stratégie de positionnement dans la façon de gérer sa trajectoire traduisant une vigilance constante.

*** Corrélations entre items SPQ/IPQ/PANAS et paramètres temporels et fréquentiels HRV**

Des corrélations ont été calculées entre les items des questionnaires de présence IPQ et SPQ avec les paramètres temporels et fréquentiels de la HRV (Voir Annexe 15). Nous souhaitons mettre en évidence des indicateurs physiologiques de la présence.

Dans l'ensemble nous avons dénombré un grand nombre de corrélations entre les différentes rubriques des 2 questionnaires de présence et les indicateurs physiologiques d'éveil. Les deux questionnaires de présence SPQ et IPQ semblent présenter un certain nombre de résultats intéressant à ce sujet, toutefois nous soulignons le fait que le questionnaire IPQ est celui qui semble être le plus fiable pour constituer un socle de résultats utilisables puisqu'il ne rassemble pas autant de corrélations positives et négatives pour un seul et même item bien que cela puisse s'expliquer.

L'essentiel des corrélations seraient plutôt positives (pour les rubriques SSM, CogInV, SPPA, SPSL, G,) entre les données subjectives et les paramètres temporels de la HRV amenant à dire qu'une hausse du sentiment de présence s'accompagnerait d'une baisse du stress comme exposé dans la littérature.

Concernant le domaine fréquentiel, plusieurs corrélations ont été mises en évidence (Voir Annexe 16). Dans le questionnaire de présence SPQ on relève une corrélation positive entre l'attention et LF norm et en même temps existe aussi une corrélation négative entre l'attention et HF norm ce qui signifie en clair que dans un cas on va stimuler le système sympathique et dans un autre cas on va inhiber l'activité parasympathique ce qui correspond à une situation de stress. Cette tendance de hausse de stress véhiculée par les corrélations du SPQ semble également appuyée par le questionnaire IPQ. En effet pour la rubrique engagement on relève également une corrélation positive avec LFnorm et en même temps une corrélation négative avec HF norm.

*** Corrélations entre items SPQ/IPQ/PANAS et moyenne de la conductance électrodermale/écart type de la conductance électrodermale**

Des corrélations ont été calculées entre les items des questionnaires de présence IPQ et SPQ et émotions PANAS avec la moyenne et l'écart type moyen de la conductance électrodermale. Nous souhaitons mettre en évidence des indicateurs physiologiques de la présence (voir Tableau 30).

Tableau 30. Résultats corrélations IPQ- SPQ-PANAS-EDA (seuil de significativité fixé à $p < 0.05$)

| | Δ Moyenne EDA | Δ Ecart type EDA |
|-----------|------------------------|-------------------------|
| Attention | -0.09 | 0.02 |
| SSM | -0.04 | 0.03 |
| CogInv | 0.17* ($p < 0.05$) | 0.09 |
| SOD | 0.07 | 0.08 |
| SPPA | 0.03 | 0.07 |
| SPSL | -0.08 | -0.07 |
| G | -0.26** ($p < 0.01$) | -0.21** ($p < 0.01$) |
| Real | -0.14* | -0.13* |
| SP | -0.17* | -0.14* |
| INV | -0.02 | -0.20** |
| PA | -0.13* | -0.14* |
| NA | 0.13 | 0.05 |

Sur les deux questionnaires de présence utilisés, c'est avec l'IPQ que l'on obtient le plus d'informations en termes de covariances sur l'ensemble de nos facteurs. Il ressort que plusieurs rubriques du questionnaire de présence comme la sensation d'être là "G" ou encore l'item clairement associé à la présence spatiale dans l'IPQ sont clairement corrélées négativement à la moyenne de l'EDA et à l'écart type de l'EDA. En outre la perception du réalisme se trouve elle aussi corrélée négativement avec les deux composantes moyenne et écart type de l'EDA. Ces résultats semblent donc souligner que la présence serait associée à l'établissement d'un processus d'éveil progressif et relativement calme. Enfin une corrélation négative a été relevée entre l'item PA (positive affect) du PANAS et l'activité électrodermale (Moyenne et écart type). Il est intéressant de noter que les émotions positives sont associées à une moindre variabilité du signal EDA, (moins chaotique), et à une baisse de l'activité électrodermale moyenne.

VII.5 DISCUSSION

VII.5.1 Sensibilité du questionnaire MEC SPQ

L'objectif de l'étude était de valider le modèle de la présence spatiale afin d'identifier les déterminants de la présence spatiale en simulation de conduite automobile. La modulation des processus attentionnels considérés dans le modèle comme à l'origine du développement de la présence a été réalisée par la présence de deux variables : le degré de richesse du décor de l'environnement virtuel et le niveau de visibilité de la route.

Impact du degré de richesse du décor sur la présence spatiale et ses déterminants

Notre hypothèse principale était que le niveau de richesse du décor était un prédicateur positif de la présence spatiale et de ses déterminants. Cette hypothèse n'a été validée que pour le questionnaire de présence IPQ et non pas pour le questionnaire SPQ. La richesse du décor a ainsi été montrée comme un prédicateur positif de la présence spatiale, du réalisme.

Impact du niveau de visibilité sur la présence spatiale et ses déterminants

Nous faisons l'hypothèse que le degré de dégradation de visibilité de la route était un prédicateur positif de la présence spatiale et de ses déterminants. Cette hypothèse n'a été que partiellement validée. Pour le questionnaire SPQ un effet de la visibilité a été rapporté sur un des deux items liés à la présence spatiale (SPPA) qui s'est avérée être négativement impactée par une hausse de la dégradation de la visibilité de la route (Voir figure X). Cet effet de la visibilité a été rapporté au travers du questionnaire IPQ mais uniquement dans le décor 2.

Impact du degré de richesse du décor sur les émotions perçues

Nous faisons l'hypothèse que le degré de richesse du décor était un prédicateur positif des émotions positives (PA=positive affect) du questionnaire PANAS. Cette hypothèse n'a pas été validée. Les participants n'ont pas rapporté de différences significatives en termes d'affect entre les trois conditions de richesse visuel du décor

Impact du niveau de visibilité sur les émotions perçues

Nous faisons l'hypothèse que le degré de dégradation de visibilité de la route était un prédicateur positif des émotions négatives (NA=positive affect) du questionnaire PANAS. Cette hypothèse a été validée, les participants ont rapporté

des émotions significativement plus négatives en condition de mauvaise visibilité comparée à la condition de bonne visibilité.

VII.5.2 Etude des liens de causalité entre les différentes dimensions du MEC SPQ

La plupart de nos hypothèses qui suivaient le modèle de la présence spatiale de Wirth et ses collègues (2007) ont été validées via l'analyse des régressions. L'attention devait être un prédicteur positif de la représentation mentale. La représentation mentale devait quant à elle être un prédicteur positif de la présence spatiale. L'implication cognitive, et la suspension d'incrédulité devaient être quant à eux, des prédicteurs positifs de la représentation mentale et/ou de la présence spatiale.

VII.5.3 Etude des liens de causalité entre les différentes dimensions de l'IPQ

L'analyse des corrélations a mis en évidence que la présence spatiale était positivement corrélée à l'engagement, le réalisme perçu, et la sensation d'être là. Ces résultats vont dans le sens des préconisations du modèle de Wirth et ses collègues (2007) à ceci près que dans l'IPQ il est explicitement demandé au sujet d'interroger le degré de réalisme de l'expérience ce qui nous paraît être précieux comme information et qui légitime pleinement l'usage de ces deux questionnaires qui nous apparaissent complémentaires. En outre l'engagement et le réalisme de l'IPQ sont positivement corrélés au réalisme perçu et à la "sensation d'être là (G)". Les deux questionnaires semblent donc rapporter les mêmes tendances.

VII.5.4 Etude des liens de causalité entre les différentes dimensions du PANAS

L'analyse des corrélations entre items du SPQ, IPQ et items du PANAS, a mis en évidence que l'attention et la suspension d'incrédulité du SPQ étaient négativement corrélées aux émotions négatives. Il semblerait donc que l'émergence de sentiments négatifs dans le cadre de notre expérience de conduite pourrait avoir compromis le mécanisme de présence proposé par le modèle de la présence spatiale sur lequel repose le questionnaire SPQ. Il ne s'agit pas de dire que le fait d'induire des émotions négatives amène à une rupture systématique de la présence mais plutôt de souligner que des situations, à l'origine conçues comme « challengeantes », avec il est vrai un potentiel anxiogène (Baisse de visibilité), peuvent parfois échouer à jouer leur rôle de stimulateurs de challenge. La baisse de la visibilité induisait une attention accrue de la part du conducteur qui a pu in fine éprouver une gêne qui a été rapportée par la suite

d'avantage comme négative que positive impactant négativement in fine le sentiment de présence ou tout du moins ses prédicteurs

VII.5.5 Données comportementales de conduite

L'objectif de l'étude était également de trouver des indicateurs comportementaux de la présence physique garantissant l'optimisation de la performance de conduite. Plusieurs analyses ont été menées.

***Vitesse moyenne et écart type moyen de la vitesse**

La hausse de la richesse du décor a significativement augmenté la vitesse moyenne des participants. Les participants ont roulé plus vite dans le décor 2 (moyennement réaliste) que dans le décor 3 (peu réaliste). De même les participants ont roulé plus vite dans le décor 1 (très réaliste) que dans le décor 3 (peu réaliste). Toutefois on relève que les participants exposés au décor le plus réaliste, le décor 1, ont eu une vitesse inférieure aux personnes du décor 2 considéré comme la situation intermédiaire. En considérant que les 3 décors proposaient la même dynamique de conduite, on peut dès lors dire que la baisse de vitesse observée dans le décor 1 et dans le décor 3 par rapport au décor 2 peut s'expliquer par le fait que dans un cas (le décor 1) le décor très réaliste chargé de détails en termes d'infographie, induit une charge attentionnelle et cognitive plus importante que dans le décor 2 moins élaboré de ce point de vue. Il s'agit de la même explication pour le décor 3 à ceci près que cette fois c'est l'absence quasi-totale de décor qui suscite la curiosité du participant qui observe probablement les incohérences du décor pouvant ainsi expliquer cette baisse de la vitesse moyenne. En outre ces interprétations sont étayées par les observations concernant l'état de la performance de conduite en termes d'écart type de vitesse. En effet les participants ont eu leur plus mauvaise performance de conduite dans le décor 2. En effet les participants ont eu des écarts de vitesse plus élevés dans le décor 2 que dans le décor 1 et de même que dans le décor 3. Contrairement à ce qui était attendu la hausse du degré de dégradation de visibilité de la route n'a pas significativement impacté la vitesse ou l'écart type de la vitesse sauf dans le décor 2 où les participants ont eu des écarts types de vitesse plus faibles en condition de mauvaise visibilité par rapport à la condition de visibilité parfaite.

Des corrélations négatives ont été trouvées entre l'attention et l'écart type de la vitesse, l'attention et la vitesse. Ce résultat est intéressant puisqu'il souligne l'idée que plus on est engagé « attentionnellement » dans la tâche de conduite, plus on optimise sa performance de conduite. De plus considérant le fait que l'attention a été plus haut montrée comme un prédicteur positif de la représentation mentale, et ce dernier concept ayant été montré également comme prédicteur positif de la présence spatiale, on peut aisément conclure que plus on est attentif plus on est présent ce qui

s'accompagnerait d'un gain de performance de conduite. En outre l'attention indirectement corrélée à la présence semble induire un comportement de vitesse prudent puisque les participants attentionnés baissent leur vitesse moyenne et régulent leur activité de conduite en termes de variabilité de la vitesse pour assurer un maintien de la trajectoire optimal. Un autre résultat intéressant est la corrélation positive observée entre le réalisme perçu et l'écart type de la vitesse. Si il a été montré que le réalisme était positivement corrélé à la présence spatiale dans l'IPQ, ce résultat semble quelque peu contradictoire. Il semblerait que le réalisme accru ne soit pas gage absolu d'une performance accrue.

***Position latérale moyenne et écart type moyen de la position latérale**

La hausse du degré de dégradation de la visibilité de la route a significativement augmenté la position latérale dans la voie. Les participants ont davantage roulé à droite dans la voie. Il apparaît qu'ils ont utilisé ce type de stratégie afin de se prémunir de collision avec d'éventuels véhicules en sens inverse. Toutefois cette stratégie s'est avérée peu efficace car il a été montré que la hausse du degré de dégradation de la visibilité de la route a également entraîné une hausse de l'écart type de la position latérale dans la voie. Il apparaît que les participants ont eu plus de difficultés en condition de mauvaise visibilité à assurer l'efficacité de leur tâche de conduite. Les ressources attentionnelles visuo-spatiales semblent avoir été davantage sollicitées pour mener à bien la tâche de conduite. Un effet du décor a été observé sur la position latérale moyenne et sur l'écart type de la position latérale. Les participants placés dans le décor le plus riche ont produit les plus hautes valeurs d'écart type de la position latérale. Ce résultat est à mettre en relation avec la précédente corrélation positive trouvée entre l'écart type de la vitesse et le réalisme perçu. On peut expliquer ces résultats inattendus par le fait que paradoxalement un décor très abouti peut détourner l'attention du conducteur sur des éléments périphériques de la scène visuelle agissant comme une distraction cognitive en termes de traitement de l'information. Les différences de position latérales observées montrent que les participants ont roulé plus à droite dans le décor 1 que le décor 2, et à l'inverse ils ont roulé plus à droite dans le décor 3 que dans le décor 2. Le décor 1 est considéré comme le plus abouti en termes de réalisme alors que le décor 2 est considéré comme inachevé avec des textures manquantes et des éléments du décor qui sont plus ou moins bien agencés (en termes de cohérence, signalétique), enfin le décor 3 est vide d'objets. Il apparaît que dans les deux extrêmes de la variable richesse du décor les participants ont davantage roulé à droite peut être par stratégie afin de stabiliser leur trajectoire et se laisser dans un cas le temps d'observer le décor dans le cas du décor 1 et dans l'autre cas de minimiser leurs efforts en évitant toute collision avec d'autres véhicules peut être davantage par ennui.

Des corrélations négatives ont été trouvées entre une des deux dimensions de la présence spatiale du SPQ à savoir SPPA avec l'écart type de la position latérale

(SDLP), et entre l'attention et SDLP. Ces résultats vont dans le sens de ce qui a été précédemment exposé à savoir que plus on est engagé dans l'expérience virtuelle de conduite plus on est attentif plus on optimise sa performance de conduite à la fois en termes de variabilité de la position latérale et de la variabilité de la vitesse.

VII.5.6 Données physiologiques

***Conductance électrodermale EDA**

La hausse du degré de dégradation de la visibilité de la route a entraîné une hausse de la conductance électrodermale. Nous interprétons cette hausse de l'éveil physiologique comme étant un plus grand stress ressenti par le fait de conduire dans des conditions de mauvaise visibilité. L'analyse des corrélations entre l'EDA et les données subjectives a révélé que pour l'IPQ, la sensation d'être là, la présence spatiale sont négativement corrélées à la moyenne de l'activité électrodermale. Ce résultat est intéressant et aurait tendance à souligner le fait que plus on est présent moins on est stressé. De plus on a également pu trouver que la sensation d'être là et la présence spatiale étaient négativement corrélées à la variabilité du rythme cardiaque ce qui témoigne d'une plus grande stabilité en terme d'éveil physiologique.

***Variabilité du rythme cardiaque : Domaine temporel**

La hausse du degré de richesse du décor a entraîné globalement une hausse de la variabilité du rythme cardiaque dans le domaine temporel. Cet effet est essentiellement marqué entre le décor 2 et le décor 3. Sur la dizaine d'indicateurs temporels 8 se sont révélés être positivement impactés par la richesse du décor. Nous interprétons cette hausse de variabilité du rythme cardiaque dans le domaine temporel comme une baisse du stress. L'analyse ANOVA dans le domaine fréquentiel n'a donné qu'un effet d'interaction de la richesse du décor avec la visibilité. On a trouvé que les basses fréquences augmentaient significativement dans le décor 2 comparé au décor 1 mais uniquement dans la condition de visibilité dégradée. L'interprétation du domaine fréquentiel est compliquée, puisque ce qui est connu c'est que lorsque les basses fréquences augmentent et que les hautes fréquences diminuent cela est interprétable comme du stress, on ne peut pas vraiment conclure sur le domaine fréquentiel car il n'y a que trop peu d'effet significatifs recensés. Néanmoins il est intéressant de souligner que pour l'heure l'EDA et la HRV dans le domaine temporel soulignent la même idée qui est que plus on est présent moins on est stressé. L'analyse des corrélations entre des données HRV avec les données subjectives va dans le même sens. En effet on a pu mettre en évidence que la majorité des corrélations entre les données de l'IPQ/SPQ et les indicateurs temporels étaient positives, on l'interprète toujours de la même manière en rappelant qu'une hausse de la variabilité du rythme cardiaque est gage de bien être, d'activité sans stress physiologique. Il est vrai qu'une fois encore dans le domaine fréquentiel cela reste un peu moins clair puisque si la majorité des corrélations sont positives on ne les

interprète pas de la même manière que dans le domaine temporel. En effet ce qui importe dans le domaine fréquentiel ce sont le poids des basses et hautes fréquences les unes par rapport aux autres traduisant les influences indirectes des systèmes sympathiques et parasympathiques. En ce qui nous concerne on trouve uniquement pour l'attention (rubrique du SPQ) un effet inattendu qui va dans le sens inverse de ce que nous avons pour l'heure exposé puisque pour cette item de la présence spatiale on trouve une corrélation positive avec les basse fréquences et une corrélation négative avec les hautes fréquences ce qui s'interprète directement comme une hausse du stress.

VII.5.7 Perspectives de Recherche

Cette deuxième expérience a permis de davantage opérationnaliser notre modèle de la présence spatiale. En outre nos deux variables indépendantes la richesse du décor et la visibilité de la route se sont avérées pertinentes pour moduler la présence en termes d'attention, de représentation mentale. Par ailleurs l'utilisation d'un deuxième questionnaire de présence a permis de confirmer les tendances observées par le questionnaire SPQ tout en rajoutant des informations complémentaires sur notamment le réalisme perçu de l'expérience. Nos mesures des émotions par le biais du questionnaire PANAS a permis de jauger de la valence des émotions associées à la présence et de confirmer que plus on est engagé dans la tâche plus à priori les émotions rapportées sont positives. La performance de conduite en termes d'écart type de la position latérale et de la vitesse témoignent que la présence dans notre expérience est clairement associée à un gain de performance. Nos conditions expérimentales semblent avoir contrairement à la première expérimentation davantage sollicité des processus attentionnels contrôlés gages d'après le modèle de la présence spatiale d'un regain de présence globale. En outre les indicateurs physiologiques se sont avérés nous donner une information supplémentaire sur le degré de stress ou tout du moins d'éveil physiologique associé au sentiment de présence. Il ressort que plus on est présent plus les valeurs d'EDA sont basses témoignant d'une baisse de stress. De même une hausse des valeurs des indicateurs temporels associés à des valeurs hautes de scores de présence témoigne d'une baisse du stress. Notre méthodologie semble avoir porté ses fruits et fournir un ensemble de mesures robustes pour opérationnaliser notre modèle de la présence spatiale.

Dans la suite de cette thèse, nous souhaitons évaluer la robustesse de notre socle méthodologique en translatant cette même expérience mais sur un simulateur de plus grande immersion. La littérature décrit clairement que l'immersion est une condition nécessaire mais pas toujours suffisante de la présence. En outre dans le modèle de la présence spatiale il est aussi spécifié dans la rubrique "les caractéristiques du média" que toutes ces considérations immersives sont des prédicteurs positifs de la présence. Afin de continuer à opérationnaliser ce modèle nous nous proposons de mener la même expérience avec à peu près le même arsenal

méthodologique afin de valider l'hypothèse immersive du modèle et la fiabilité de notre méthodologie d'analyse.

Concernant les résultats des 2 questionnaires de présence, on constate que l'IPQ semble avoir été plus sensible à l'ensemble des conditions expérimentales que le MEC-SPQ. Une seule rubrique SPPA dans le MEC-SPQ s'est avérée significativement plus élevée en condition de visibilité parfaite qu'en condition de visibilité dégradée. Il est intéressant de noter que l'IPQ ne valide ou n'invalide pas ce résultat. Toutefois il montre que la présence (SP) a été significativement plus élevée dans le décor le plus riche que dans le décor le plus pauvre. Le réalisme (G) a quant à lui été plus élevé dans la condition de visibilité détériorée que dans la condition de visibilité parfaite. Ce dernier résultat nous porterait à croire que la présence avérée et caractérisée par le SPQ et l'IPQ ne repose pas sur un sentiment de réalisme profond. On peut dès lors se poser la question s'il ne serait pas intéressant d'implémenter dans le modèle de la présence spatiale de Wirth et ses collègues cet item du réalisme. La présence évaluée dans le SPQ et pensée par les chercheurs semble présupposer que les participants associent l'idée du réalisme quand ils évaluent leur degré de présence. Or il apparaît avec l'IPQ que ce qu'ils associent au terme 'présence' concerne davantage leur degré d'immersion que de 'présence'. Il semble y avoir un problème d'appropriation du questionnaire SPQ avec des concepts comme la suspension d'incrédulité (SOD) ou encore la construction de la représentation mentale (SSM) complexes à appréhender au cours d'un processus d'autoévaluation. Il n'en reste pas moins que le modèle SPQ reste pour nous un modèle intéressant à investiguer puisqu'il est le seul à décrire l'émergence du sentiment de présence. Nous soulignons néanmoins l'importance de retravailler l'utilisabilité d'un tel outil, en révisant le nom des items. Ce n'est pas pour autant l'objectif de notre travail de thèse c'est la raison pour laquelle cette remarque est davantage une piste de travail qu'un réel axe méthodologique sur lequel nous nous appuierons.

VIII

EXPERIMENTATION 3

VIII.1 OBJECTIFS

Cette troisième expérimentation avait pour ambition de reprendre l'approche de la deuxième expérimentation mais sur un simulateur dynamique. L'idée était d'interroger la reproductibilité des résultats obtenus dans l'expérimentation 2 sur un simulateur statique en analysant ce qui se produit sur un simulateur permettant une grande immersion, en introduisant notamment de la stimulation proprioceptive. Ce dernier permet en effet d'offrir un retour pluri-sensoriel bien plus complet et permet la restitution des forces d'inertie via une plateforme de mouvement qui n'existe pas sur un simulateur à base fixe, Nous souhaitons donc évaluer l'impact de cette source d'information supplémentaire sur le sentiment de présence (modulations des facteurs de contenu).

Le protocole expérimental était essentiellement similaire à celui de l'expérimentation précédente : L'objectif était de développer des indicateurs comportementaux physiologiques attestant de la dynamique du sentiment de présence en simulation automobile. Concrètement il s'agissait d'évaluer les niveaux d'éveil et de stress physiologique des participants soumis à différents stimuli susceptibles d'influer sur leurs états attentionnel et émotionnel. Pour ce faire nous avons étudié les effets de la richesse du décor de l'environnement virtuel et du niveau de visibilité de la route sur les niveaux subjectifs de présence et les niveaux objectifs d'éveil physiologique. L'hypothèse était que des niveaux subjectifs élevés de présence et des niveaux objectifs élevés d'éveil physiologique devraient se manifester lorsque le niveau de richesse du décor virtuel est le plus élevé, et cela devrait être d'autant plus accentué pour la situation en condition de visibilité réduite, demandant un engagement attentionnel plus important.

VIII.2 METHODOLOGIE

VIII.2.1 Participants

19 conducteurs (14 hommes et 5 femmes) avec au moins 5 ans d'expérience ont été placés dans un simulateur de conduite à base fixe afin de réaliser chacun consécutivement six scénarios de conduite dans un ordre différent. L'âge des participants allait de 23 à 45 ans ($M=35.2$ ans, $SD=6.4$). Le recrutement des participants s'est effectué auprès du personnel de l'entreprise. Les participants étaient sélectionnés en fonction des critères d'inclusion (ne pas porter de lunettes ou lentilles, et ne présenter aucune sensibilité au mal des transports) et ne devaient présenter aucun problème de santé qui puisse interférer avec les données physiologiques

étudiées. Un questionnaire d'informations générales était complété afin de s'assurer qu'ils pouvaient participer à l'expérimentation. Chaque participant signait une fiche d'information ainsi qu'un formulaire de consentement libre et éclairé avant leur participation à l'expérimentation.

VIII.2.2 Simulateur de conduite

L'expérimentation s'est déroulée au centre technique de Vélizy de PSA, sur le simulateur dynamique de conduite SHERPA (acronyme de « Simulateur Hybride d'Etude et de la Recherche de PSA). Il est utilisé principalement pour des projets de recherche concernant les comportements de conduite et leur impact sur la sécurité routière. Il a subi de nombreuses évolutions visant à améliorer le réalisme de la simulation et également à répondre aux exigences des projets futurs (voir Figure 20).



Figure 20. Simulateur de conduite

Le simulateur dynamique SHERPA² se présente sous la forme d'un demi-véhicule de Citroën C1 comportant deux sièges et contenant divers équipements, le tout positionné face à trois écrans assurant un champ visuel de 160°. L'intérieur de la cabine est constitué de haut-parleurs, de trois écrans et de trois vidéoprojecteurs haute résolution créant un large champ visuel pour le conducteur, d'un écran permettant d'afficher le tableau de bord et de trois écrans LCD pour les 3 rétroviseurs. La cabine du simulateur SHERPA² est positionnée sur un hexapode (voir Figure 20) lui-même situé sur deux rails (un longitudinal et l'autre latéral) qui permettent de restituer le

comportement dynamique des véhicules. Autrement dit, ce système de mouvement à huit degrés de liberté est constitué :

- d'un chariot coulissant sur deux niveaux de rails pour les déplacements longitudinaux X (sur 10 mètres) et latéraux Y (sur 5,5 mètres), donnant deux degrés de liberté,
- d'un hexapode constitué de six vérins électriques pour créer les mouvements latéraux, longitudinaux, de pompage et les trois rotations : tangage, roulis, lacet, soit six degrés de liberté.

VIII.2.3 Situations de conduite

Contrairement à la deuxième expérimentation, le scénario très réaliste (décor 1) a été utilisé comme scénario d'entraînement afin de sélectionner les sujets et ce afin de réduire le temps de la passation sur simulateur. Il a été observé que la sinuosité du parcours était à l'origine d'un mal accru du simulateur ressenti chez les participants. Il a été en effet constaté que pour les mêmes scénarios créés, le simulateur dynamique est globalement apparu plus critique en termes de fréquence d'occurrence du mal du simulateur que le simulateur statique. Les situations de conduites étaient au nombre de quatre et résultaient du croisement de deux variables indépendantes qu'étaient le niveau de richesse du décor virtuel et le niveau de visibilité de la route. Concrètement 2 scénarios de conduite ont été créés correspondant aux deux décors 2 et 3 de la précédente expérimentation. Nous rappelons que Le décor 2 correspondait à un décor moyennement riche en termes d'informations visuelles alors que le décor 3 était associé à un décor considéré comme très pauvre. Ce dernier n'était constitué que de très peu d'élément de paysage contextualisant la situation de conduite dans un environnement admettant une correspondance dans le monde réel. Dans chaque scénario la tâche de conduite consistait à suivre une voiture rouge du mieux possible en respectant le code de la route. En pratique la voiture rouge ne constituait pas en soi un lièvre mais était censé donner les indications de direction aux intersections. Les participants perdaient très rapidement la trace de la voiture rouge puisque plusieurs événements finissaient par s'interposer entre eux. Et c'est la raison pour laquelle chaque scénario possédait plusieurs représentations de la voiture rouge au cas où un participant perdait sa trace.

Dans chaque scénario on retrouvait la même typologie d'évènements :

- Piétons qui traversent subitement
- Cyclistes dans un virage

- Situations de dépassements sans visibilité
- Priorités à droite
- croisement d'une voiture de police avec la sirène
- tracteur gênant

1) La variable indépendante concernant la richesse du décor virtuel comprenait 2 occurrences :

-Décor 3 peu réaliste : absence de décor, d'arbres, de maisons, d'immeubles et de panneaux de signalisation (Voir Figure 21).



Figure 21. Environnement virtuel avec le décor le moins réaliste

-Décor 2 moyennement réaliste : présence d'un décor d'autoroute, de campagne et de ville mais avec des textures manquantes pour les arbres et certains bâtiments ou maisons du décor. (Voir Figure 22).



Figure 22. Environnement virtuel avec le décor moyennement réaliste

2) La variable indépendante concernant la visibilité de la route comprenait 2 occurrences :

-Visibilité parfaite, conduite de jour (Voir Figure 23) :



Figure 23. Exemple de condition de visibilité parfaite

-Visibilité réduite, conduite de nuit, avec de la neige et de la pluie (Voir Figure 24) :



Figure 24. Exemple de condition de visibilité réduite

VIII.2.4 Mesures subjectives

Pour la mesure du sentiment de présence et de celle de la valence émotionnelle, les mêmes questionnaires que dans l'expérience 2 ont été utilisés (MEC SPQ et IPQ).

VIII.2.5 Mesures Physiologiques

-Boîtier Biopac

L'enregistrement des signaux électriques s'effectuait par la station Biopac MP150, système d'acquisition sans fil de données physiologiques (voir Figure 25). Ce type de dispositif nous a permis de faire l'acquisition du rythme cardiaque via la mesure du PPG (Photopléthysmographie) et l'EDA (conductance de la peau). Nous avons été contraint de changer de système d'acquisition du rythme cardiaque puisque nous ne disposions plus du même capteur ECG que pour l'expérience 2. Ce qui nous a empêché de pouvoir envisager une mesure de la variabilité du rythme cardiaque comme nous aurions souhaité pourvoir le faire initialement.



Figure 25. Boîtier Biopac MP150 et dispositifs de mesures EDA PPG

Les électrodes EDA consistaient en des patchs à usage unique, qui étaient chacun relié par des fils à une ceinture composée d'un boîtier d'acquisition qui lui-même communiquait à la station ou boîtier MP150 par Bluetooth (émetteur BIO NOMADIX) (voir Figure 26). L'acquisition du signal PPG consistait en un capteur placé à l'extrémité du majeur directement incorporé à la connectique que l'on relie au boîtier d'acquisition et sur lequel est aussi reliée la connectique de la mesure EDA.



Figure 26. dispositifs de mesures EDA PPG

-Activité Electrodermale (EDA)

Le même protocole que celui de l'expérimentation 2 a été reproduit. Des mesures différentielles de conductance électrodermale ont été réalisées par rapport à une valeur seuil de repos.

-Rythme cardiaque via la mesure Photopléthysmographie (PPG)

Le rythme cardiaque était recueilli au cours de la tâche de conduite via la technique de mesure appelée la Photopléthysmographie (PPG). Cette technique permet d'observer les variations de volume sanguin dans un tissu de manière non invasive (voir Figure 27).



Figure 27. Dispositif de mesure PPG

Le signal PPG permet de mesurer et d'estimer l'état du système nerveux autonome, la saturation en oxygène et l'activité cardiaque. Dans le cadre de notre étude nous nous sommes focalisés sur l'obtention du rythme cardiaque via cette mesure PPG. L'onde PPG (voir Figure 28) correspond aux fluctuations du volume

sanguin induites par l'activité cardiaque. La fréquence du signal est approximativement de 1 Hz pour un sujet sain et au repos.

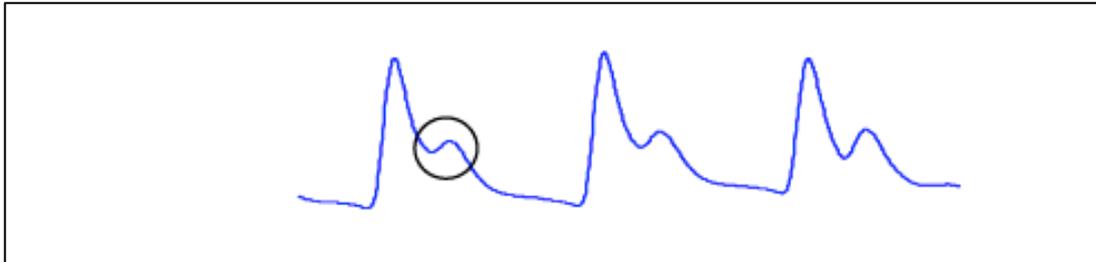


Figure 28. Onde PPG (composante pulsatile)

Pour que l'onde PPG soit convenablement détectée, un bon contact entre la peau et le capteur est nécessaire. Dans le cadre de notre expérimentation réalisée sous simulateur de conduite, nous avons été amenés à nous affranchir en post traitement par l'usage de filtres, des artefacts liés essentiellement à la manipulation du volant et l'actionnement des clignotants. Les mouvements peuvent en effet modifier la force de contact entre le capteur et le site de mesure. Ces effets se traduisent par des parasites qui modifient l'allure, la forme et l'intensité de la partie pulsatile du signal PPG.

Des mesures différentielles de PPG ont été réalisées.

VIII.2.6 Procédure

-Installation des participants

Les participants commençaient par lire et signer la fiche d'information relative à l'étude, le formulaire de consentement libre et éclairé, ainsi que le questionnaire d'informations générales. Ils étaient ensuite appareillés avec les deux outils d'enregistrements physiologiques (PPG et EDA) et placés au repos pendant 15 min afin de recueillir une mesure au repos de l'éveil physiologique (PPG et EDA). Par la suite ils prenaient place dans le simulateur de conduite, réglèrent alors leur siège à leur convenance en hauteur comme en longueur.

-Déroulement de l'étude

Les participants débutaient par un scénario d'entraînement constitué de plusieurs lignes droites et virages afin de se familiariser avec les commandes du simulateur. Les quatre scénarios de conduite étaient ensuite présentés dans un ordre différent à chaque participant (voir Figure 29). Les enregistrements physiologiques étaient effectués pendant les phases d'activité de conduite.

| | |
|---|---|
|  | <p>Entraînement</p>  |
| <p>Repos</p> | |
| <p>Questionnaires IPQ, MEC-SPQ, PANAS</p> | |
|  | <p>Scénario 2</p>  |
| <p>Questionnaires IPQ, MEC-SPQ, PANAS</p> | |
|  | <p>Scénario 3</p>  |
| <p>Questionnaires IPQ, MEC-SPQ, PANAS</p> | |
|  | <p>Scénario 2</p>  |
| <p>Questionnaires IPQ, MEC-SPQ, PANAS</p> | |
|  | <p>Scénario 3</p>  |
| <p>Questionnaires IPQ, MEC-SPQ, PANAS</p> | |

Figure 29. Procédure de l'expérimentation 3.

VIII.3 RESULTATS : EFFETS PAR INDICATEUR

VIII.3.1 Données subjectives : MEC-SPQ

Un score moyen a été calculé pour chaque groupe et chaque dimension du MEC SPQ (voir tableau 31).

Tableau 31. Moyenne et écart type pour les différents scores obtenus au MEC Spatial Presence Questionnaire

| | Décor 2 | | Décor 3 | |
|--|---------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|
| | Visibilité parfaite | Visibilité détériorée | Visibilité parfaite | Visibilité détériorée |
| Attention | M=4.70 SD=0.30 | M=4.55 SD=0.38 | M=4.62 SD=0.40 | M=4.55 SD=0.44 |
| Spatial Situation Model (SSM) | M=4.02 SD=0.66 | M=3.82 SD=0.75 | M=4.08 SD=0.78 | M=3.89 SD=0.91 |
| Spatial Presence Self-Location (SPSL) | M=3.89 SD=0.59 | M=3.58 SD=0.77 | M=3.76 SD=0.88 | M=3.71 SD=0.85 |
| Cognitive Involvement (CogInv) | M=3.95 SD=0.63 | M=3.89 SD=0.46 | M=3.83 SD=0.65 | M=3.91 SD=0.57 |
| Suspension Of Disbelief (SOD) | M=3.74 SD=0.39 | M=3.51 SD=0.52 | M=3.68 SD=0.56 | M=3.58 SD=0.58 |
| Spatial Presence Possible Actions (SPPA) | M=3.70 SD=0.70 | M=3.74 SD=0.67 | M=3.99 SD=0.77 | M=3.77 SD=0.85 |

Le modèle linéaire général a été utilisé pour tester nos hypothèses en croisant nos deux variables indépendantes. Plus particulièrement une analyse ANOVA a été pratiquée pour évaluer les effets (voir Tableau 32).

L'analyse ANOVA n'a révélé aucun effet significatif sur les données du questionnaire SPQ.

Tableau 32. Résultats ANOVA (seuil de significativité fixé à $p < 0.05$)

| | Richesse du décor | Visibilité | Richesse du décor*Visibilité |
|--|---------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Attention | F=0.608 p=0.45 | F=4.29 p=0.05 | F=0.78 p=0.39 |
| Spatial Situation Model (SSM) | F=0.44 p=0.52 | F=1.94 p=0.18 | F=0.01 p=0.94 |
| Cognitive Involvement (CogInv) | F=1.86 p=0.19 | F=0.02 p=0.88 | F=0.86 p=0.37 |
| Suspension Of Disbelief (SOD) | F=0.01 p=0.91 | F=2.35 p=0.14 | F=0.73 p=0.40 |
| Spatial Presence Possible Actions (SPPA) | F=3.75 p=0.07 | F=0.66 p=0.43 | F=3.42 p=0.08 |
| Self-Location (SPSL) | F=0.00 p=1 | F=2.22 p=0.15 | F=2.45 p=0.14 |

VIII.3.2 Données subjectives : IPQ

Un score moyen a été calculé pour chaque groupe et chaque dimension du IPQ (voir tableau 33).

Tableau 33. Moyenne et écart type pour les différents scores obtenus au IPQ

| | Décor 2 | | Décor 3 | |
|------------------|---------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|
| | Visibilité parfaite | Visibilité détériorée | Visibilité parfaite | Visibilité détériorée |
| G | M=3.84 SD=0.83 | M=3.53 SD=1.26 | M=3.68 SD=1.29 | M=3.58 SD=1.30 |
| Realism | M=3.28 SD=0.83 | M=2.67 SD=1.25 | M=3 SD=0.96 | M=2.89 SD=1.22 |
| Spatial presence | M=4.77 SD=0.87 | M=4.63 SD=0.89 | M=4.86 SD=0.84 | M=4.81 SD=0.99 |
| Involvement | M=4.31 SD=0.78 | M=4.32 SD=0.83 | M=4.43 SD=0.75 | M=4.41 SD=0.80 |

Le modèle linéaire général a été utilisé pour tester nos hypothèses en croisant nos deux variables indépendantes. Plus particulièrement une analyse ANOVA a été pratiquée pour évaluer les effets (voir Tableau 34)

Tableau 34. Résultats ANOVA (seuil de significativité fixé à $p < 0.05$)

| | Richesse du décor | Visibilité | Richesse du décor*Visibilité |
|-----------------------|-------------------|-------------------|------------------------------|
| Spatial presence (SP) | F=1.33 p=0.26 | F=0.27 p=0.61 | F=0.18 p=0.67 |
| Involvement (INV) | F=1.49 p=0.24 | F=0.01 p=0.96 | F=0.04 p=0.84 |
| Realism (REAL) | F=0.06 p=0.81 | F=6.36 p=0.02* | F=3.11 p=0.09 |
| G | F=0.1 p=0.76 | F=1.57 p=0.23 | F=0.46 p=0.51 |

L'analyse ANOVA révèle qu'un effet simple de la visibilité ($F=6.36$; $p=0.02<0.05$) a été observé sur la rubrique du réalisme perçu. Les participants ont eu des scores de réalisme perçu plus élevés sous la condition de visibilité parfaite ($M=3.14$; $SD=0.89$) plutôt que dans la condition de visibilité dégradée ($M=2.78$; $SD=1.25$).

VIII.3.3 Données subjectives : PANAS

Un score moyen a été calculé pour chaque groupe et chaque dimension du PANAS (voir tableau 35).

Tableau 35. Moyenne et écart type pour les différents scores obtenus au PANAS

| | Décor 2 | | Décor 3 | |
|----|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| | Visibilité parfaite | Visibilité détériorée | Visibilité parfaite | Visibilité détériorée |
| PA | M=38.05 SD=4.08 | M=35 SD=6.37 | M=36.74 SD=4.53 | M=35.22 SD=6.15 |
| NA | M=15.79 SD=4.21 | M=14.84 SD=4.05 | M=13.53 SD=3.70 | M=14.11 SD=4.12 |

Le modèle linéaire général a été utilisé pour tester nos hypothèses en croisant nos deux variables indépendantes. Plus particulièrement une analyse ANOVA a été pratiquée pour évaluer les effets (voir Tableau 36)

Tableau 36. Résultats ANOVA PANAS (seuil de significativité fixé à $p<0.05$)

| | Richesse du décor | Visibilité | Richesse du décor*Visibilité |
|----|---------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| PA | F=1.27 p=0.28 | F=6.21 p=0.02* | F=1.41 p=0.25 |
| NA | F=10.99 p=0.01 | F=0.08 p=0.78 | F=2.35 p=1.43 |

L'analyse ANOVA révèle qu'un effet simple de visibilité ($F=6.21$; $p=0.02<0.05$) a été observé sur la dimension PA (Positive affect) du questionnaire PANAS. les participants ont eu des scores de PA plus élevés en condition de visibilité parfaite ($M=37.39$; $SD=4.30$) plutôt qu'en condition de visibilité dégradée ($M=35.11.74$; $SD=6.18$).

L'analyse ANOVA révèle qu'un effet simple du décor ($F=10.99$; $p=0.01<0.05$) a été observé sur la dimension NA (Negative affect) du questionnaire PANAS. les participants ont eu des scores de de NA plus élevés dans la condition moyenne de richesse du décor ($M=15.32$; $SD=4.08$) plutôt que dans la condition pauvre de richesse du décor ($M=13.82$; $SD=4.05$).

VIII.3.4 Données comportementales de conduite

*Vitesse moyenne (en km/h) et écart type de la vitesse

Un score moyen a été calculé pour chaque groupe et chaque variable comportementale de conduite (voir tableau 37).

Tableau 37. Moyenne et écart type pour la vitesse

| | Décor 2 | | Décor 3 | |
|-------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| | Visibilité parfaite | Visibilité détériorée | Visibilité parfaite | Visibilité détériorée |
| Vitesse (km/h) | M=53.08 SD=3.37 | M=53.79 SD=6.20 | M=33.14 SD=2.26 | M=32.78 SD=4.48 |
| SD Vitesse (km/h) | M=25.23 SD=1.90 | M=22.41 SD=1.79 | M=19.05 SD=1.82 | M=18.62 SD=3.27 |

Le modèle linéaire général a été utilisé pour tester nos hypothèses en croisant nos deux variables indépendantes. Plus particulièrement une analyse ANOVA a été pratiquée pour évaluer les effets. (voir Tableau 38)

Tableau 38. Résultats ANOVA vitesse moyenne et écart type de la vitesse (seuil de significativité fixé à $p < 0.05$)

| | Richesse du décor | Visibilité | Richesse du décor*Visibilité |
|-------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Vitesse (km/h) | F=527.5 p=0.00** | F=0.00 p=0.84 | F=0.5 p=0.49 |
| SD Vitesse (km/h) | F=70.22 p=0.00** | F=19.34 p=0.00** | F=11.23 p=0.00** |

L'analyse ANOVA révèle qu'un effet simple du décor ($F=567.124$; $p=0.00 < 0.05$) a été observé sur la vitesse moyenne. Les participants placés dans le décor 2 ($M=53.44$, $SD=4.93$) auraient eu des vitesses moyennes plus élevées que celles obtenues dans le décor 3 ($M=32.96$; $SD=3.50$)(Voir Tableau 38).

Un effet simple du décor ($F=70.22.124$; $p=0.00 < 0.05$) a été observé sur l'écart type de la vitesse. Les participants placés dans le décor 2 ($M=23.82$, $SD=2.31$) ont eu des écarts types de vitesses plus élevés que dans le décor 3 ($M=18.84$; $SD=2.62$)(Voir Tableau 38).

Un effet simple de la visibilité ($F=19.34$; $p=0.00 < 0.05$) a été observé sur l'écart type de la vitesse. Les participants placés dans la condition de visibilité dégradée ($M=20.51$, $SD=3.23$) ont eu des écarts types de vitesses plus faibles que dans la condition de décor parfaite ($M=22.14$, $SD=3.63$)(Voir Tableau 38).

Un effet d'interaction a été trouvé entre la richesse du décor et la visibilité sur l'écart type de la vitesse ($F=11.23$; $p=0.00 < 0.05$). Seulement dans le décor 2, est observé un effet de la visibilité, les participants ont eu des écarts types de vitesse plus élevées ($M=25.23$, $SD=1.89$) dans la condition de visibilité parfaite que dans la condition de visibilité dégradée ($M=22.41$; $SD=1.79$) (Voir Figure 30).

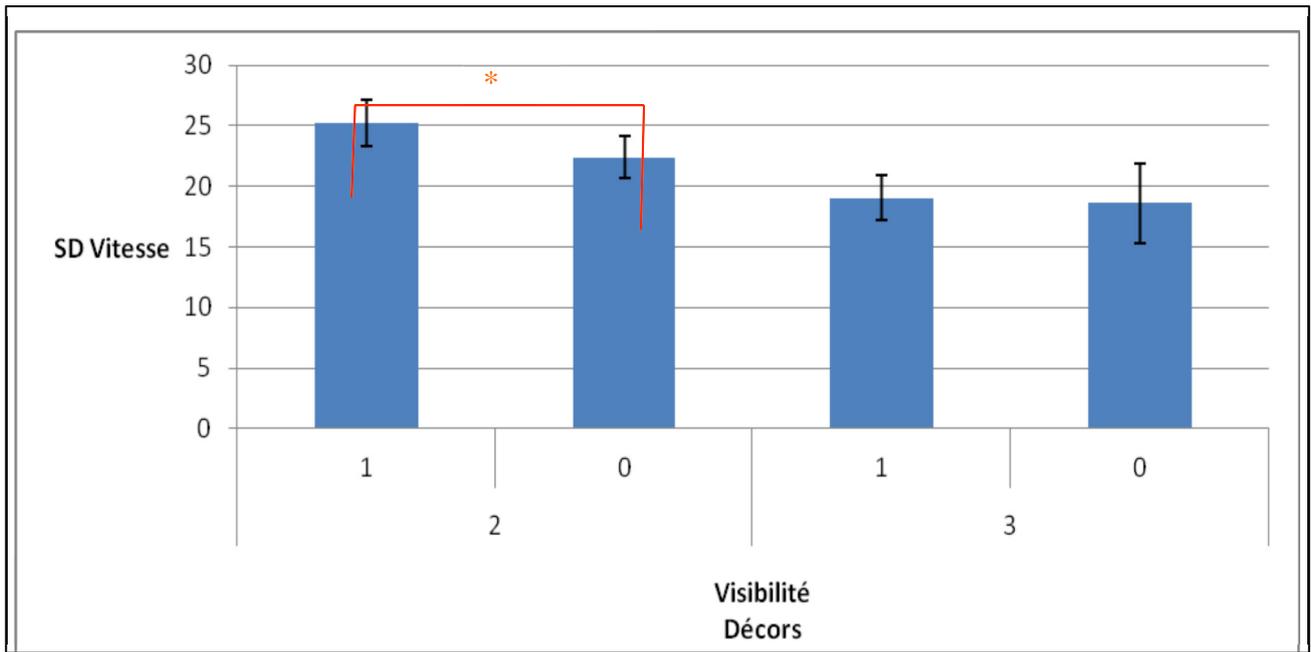


Figure 30. Ecart type moyen de la vitesse en fonction de la richesse du décor et de la visibilité

*** Position latérale moyenne (en m) et écart type moyen de la position latérale**

Un score moyen a été calculé pour chaque situation expérimentale et chaque variable comportementale de conduite (voir tableau 39).

Tableau 39. Moyenne et écart type pour la position latérale

| | Décor 2 | | Décor 3 | |
|--------------------------|---------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|
| | Visibilité parfaite | Visibilité détériorée | Visibilité parfaite | Visibilité détériorée |
| Position latérale (m) | M=0.11 SD=0.08 | M=0.17 SD=0.09 | M=-0.09 SD=0.06 | M=-0.09 SD=0.09 |
| SD Position latérale (m) | M=0.45 SD=0.05 | M=0.45 SD=0.05 | M=0.37 SD=0.07 | M=0.40 SD=0.08 |

Le modèle linéaire général a été utilisé pour tester nos hypothèses en croisant nos deux variables indépendantes. Plus particulièrement une analyse ANOVA a été pratiquée pour évaluer les effets (voir Tableau 40).

Tableau 40. Résultats ANOVA moyenne de la position latérale dans la voie et écart type de la position latérale dans la voie (seuil de significativité fixé à $p < 0.05$)

| | Richesse du décor | Visibilité | Richesse du décor*Visibilité |
|-------------------|-----------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|
| Position Latérale | F=68.02 p=0.00** | F=4.52 p=0.04* | F=10.23 p=0.00** |
| SDLP | F=26.63 p=0.00** | F=4.76 p=0.04* | F=2.48 p=0.13 |

L'analyse ANOVA révèle qu'un effet simple du décor ($F=68.02$; $p=0.00 < 0.05$) a été observé sur la position latérale moyenne. Les participants placés dans le décor 2 ($M=0.45$, $SD=0.05$) ont eu des positions latérales moyennes plus élevées que celles dans le décor 3 ($M=0.39$; $SD=0.08$).

Un effet simple de la visibilité sur la position latérale dans la voie ($F=4.52$; $p=0.04 < 0.05$) a été observé sur la position latérale moyenne. Les participants placés dans la condition de visibilité parfaite ont eu une position latérale moyenne inférieure ($M=0.01$, $SD=0.11$) à celle observée dans la condition de visibilité dégradée ($M=0.11$, $SD=0.16$).

Un effet d'interaction (voir Figure 31) entre la richesse du décor et la visibilité a été observée ($F=10.23$; $p=0.00**$). Un effet de visibilité est seulement observé dans le décor 2, les participants ont eu des positions latérales moyennes supérieures en condition de visibilité dégradée ($M=0.17$; $SD=0.05$) comparées à celles dans la condition de visibilité parfaite ($M=0.10$; $SD=0.08$).

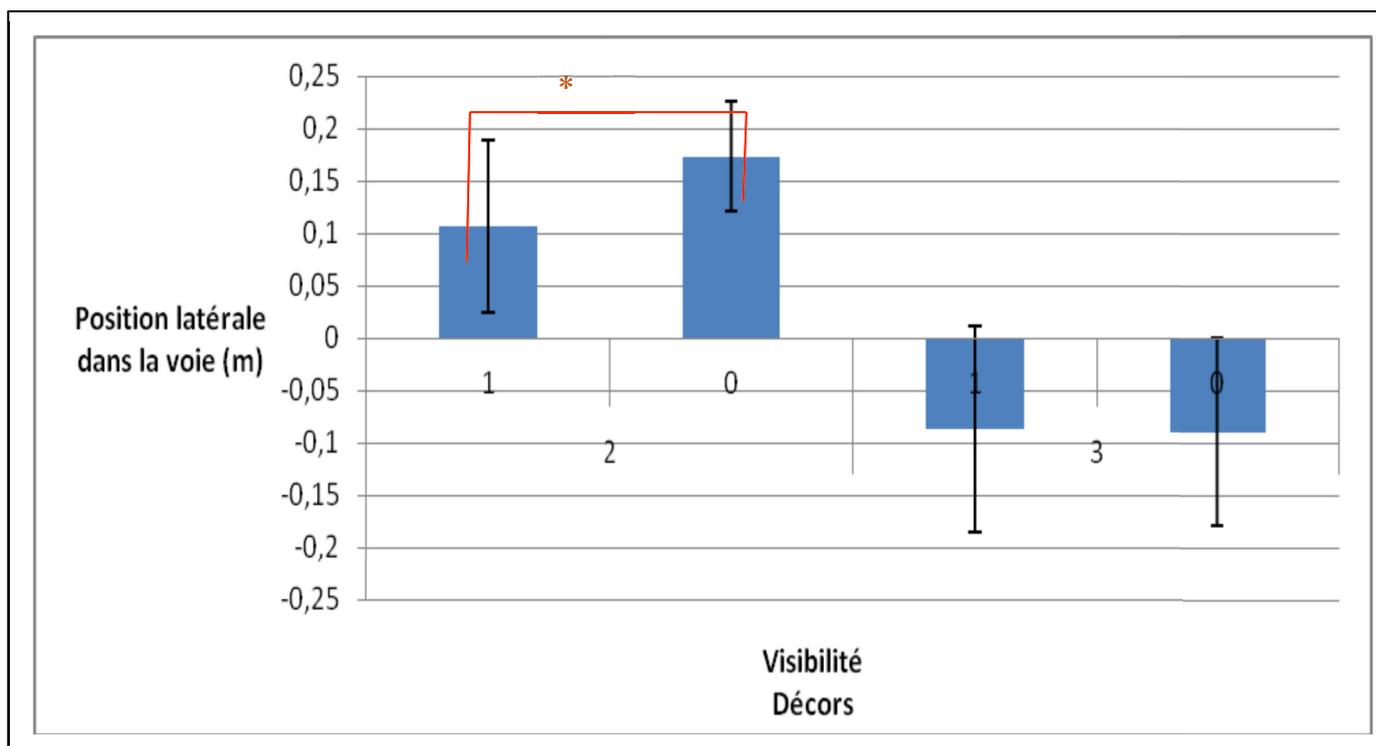


Figure 31. Position latérale dans la voie en fonction de la visibilité et de la richesse du décor

Un effet du décor a été observé sur l'écart type de la position latérale dans la voie ($F=26.63$; $p=0.00<0.05$). Les participants ont eu un écart type plus élevé ($M=0.45$; $SD=0.05$) dans le décor 2 que dans le décor 3 ($M=0.38$; $SD=0.07$).

Un effet de la visibilité a été observé sur l'écart type de la position latérale dans la voie ($F=4.76$; $p=0.04^*$). Les participants dans la condition de visibilité dégradée ont eu un SDLP plus élevée ($M=0.43$; $SD=0.06$) que dans la condition de visibilité parfaite ($M=0.40$; $SD=0.07$).

VIII.3.5 Conductance électrodermale

Un score moyen et un écart type d'EDA ont été calculé pour chaque situation expérimentale (voir tableau 41). Rappelons que les valeurs d'EDA sont des mesures différentielles (par rapport à une valeur seuil au repos).

Tableau 41. Moyenne et écart type pour la conductance électrodermale

| | Décor 2 | | Décor 3 | |
|-------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| | Visibilité parfaite | Visibilité détériorée | Visibilité parfaite | Visibilité détériorée |
| Δ Moyenne EDA (microsiemens) | M=2.41 SD=1.92 | M=5.29 SD=3.45 | M=4.19 SD=1.80 | M=5.30 SD=3.40 |

Le modèle linéaire général a été utilisé pour tester nos hypothèses en croisant nos deux variables indépendantes. Plus particulièrement une analyse ANOVA a été pratiquée pour évaluer les effets (voir Tableau 42).

Tableau 42 Résultats ANOVA EDA (seuil de significativité fixé à $p < 0.05$)

| | Richesse du décor | Visibilité | Richesse du décor*Visibilité |
|-------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Δ Moyenne EDA (microsiemens) | F=4.48 p=0.04* | F=18.73 p=0.00 | F=6.28 p=0.02* |

Un effet du décor a été observé sur l'écart type de la vitesse ($F=4.48$; $p=0.04 < 0.05$). Les participants ont une moyenne EDA plus élevée ($M=3.85$; $SD=3.12$) dans le décor 3 que dans le décor 2 ($M=4.75$; $SD=2.74$).

Un effet de la visibilité a été observé sur l'écart type de la vitesse ($F=18.73$; $p=0.00^{**}$). Les participants dans la condition de visibilité dégradée ont eu une moyenne d'EDA plus élevée ($M=5.30$; $SD=3.38$) que dans la condition de visibilité parfaite ($M=3.30$; $SD=2.05$).

Un effet d'interaction entre la richesse du décor et la visibilité a été observée ($F=6.28$; $p=0.02^*$). Un effet de visibilité est seulement observé dans le décor 2, les participants ont eu des moyennes d'EDA supérieures en condition de visibilité dégradée ($M=5.29$; $SD=3.45$) comparées à celles observées dans la condition de visibilité parfaite ($M=2.41$; $SD=1.93$) (Voir Figure 32)

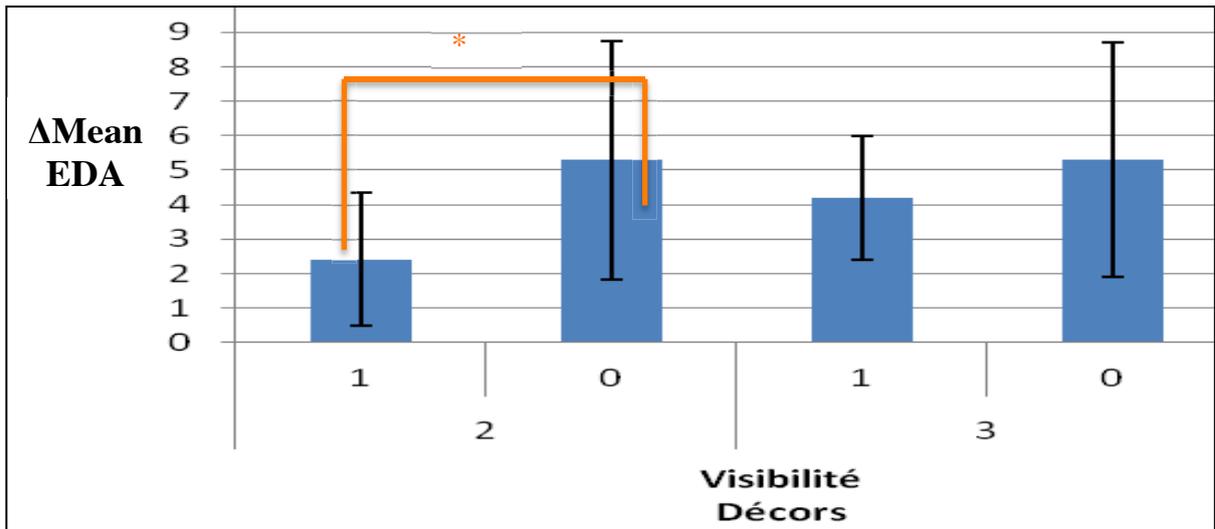


Figure 32. Conductance électrodermale moyenne (EDA) en fonction de la visibilité et de la richesse du décor

VIII.3.6 Rythme cardiaque

Un score moyen et un écart type du rythme cardiaque ont été calculés pour chaque situation expérimentale (voir tableau 43). Rappelons que les valeurs de rythme cardiaque sont des mesures différentielles (par rapport à une valeur seuil au repos). Dans le tableau ci-dessous sont donc présentées des moyennes et écarts types de différentiel cardiaque, puisqu'une mesure moyennée du rythme cardiaque au repos a été prise pour chaque participant.

Tableau 43. Moyenne et écart type du rythme cardiaque

| | Décor 2 | | Décor 3 | |
|---|---------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|
| | Visibilité parfaite | Visibilité détériorée | Visibilité parfaite | Visibilité détériorée |
| Δ Moyenne Rythme cardiaque (bpm) | M=7.22 SD=8.87 | M=12.56 SD=13.04 | M=9.91 SD=11.87 | M=8.99 SD=21.75 |
| Δ SD Rythme cardiaque (bpm) | M=0.36 SD=2.15 | M=0.69 SD=2.62 | M=1.14 SD=2.04 | M=0.29 SD=2.51 |

Le modèle linéaire général a été utilisé pour tester nos hypothèses en croisant nos deux variables indépendantes. Plus particulièrement une analyse ANOVA a été pratiquée pour évaluer les effets (voir tableau 44).

Tableau 44 Résultats ANOVA Rythme Cardiaque (seuil de significativité fixé à $p < 0.05$)

| | Richesse du décor | Visibilité | Richesse du décor*Visibilité |
|-----------------------------------|-------------------|------------------|------------------------------|
| Δ Moyenne Rythme Cardiaque | F=0.03 p=0.87 | F=0.59 p=0.45 | F=1.29 p=0.27 |
| Δ SD Rythme cardiaque | F=0.37 p=0.55 | F=0.48 p=0.5 | F=2.35 p=0.14 |

Aucun effet significatif n'est observé sur les déterminants de l'activité cardiaque.

VIII.4 RESULTATS : CORRELATIONS ET REGRESSIONS

VIII.4.1 Régressions entre items du MEC-SPQ

Nous avons cherché à évaluer les prédictions du modèle MEC-SPQ par l'intermédiaire d'analyses de régressions simples voici les résultats concernant l'ensemble des participants (Voir Tableau 45).

Tableau 45. Résultats Régressions MEC-SPQ global (seuil de significativité fixé à $p < 0.05$)

| Variable prédictive | Variable dépendante | Beta | p |
|---------------------|---------------------|------|--------|
| Attention | SSM | 0.19 | 0.11 |
| SSM | SPPA | 0.65 | 0.00** |
| SSM | Self-location | 0.69 | 0.00** |
| SOD | SSM | 0.57 | 0.00** |
| SOD | Self-location | 0.74 | 0.00** |
| SOD | SPPA | 0.45 | 0.00** |
| Involvement | SSM | 0.16 | 0.16 |
| Involvement | Self-location | 0.18 | 0.12 |
| Involvement | SPPA | 0.27 | 0.02* |

Plusieurs régressions se sont avérées significatives appuyant les liens de causalité défendus par le modèle de la présence spatiale, à l'exception du fait que l'attention n'a pas pu être montré comme étant un prédicteur positif de la représentation mentale:

- La représentation mentale est un prédicteur positif de la présence spatiale (SPPA et SPSL).
- La suspension d'incrédulité est un prédicteur positif de la représentation mentale de l'environnement (SSM).
- La suspension d'incrédulité est un prédicteur positif de la présence spatiale (SPPA et SPSL)
- L'engagement est un prédicteur positif de la présence spatiale (SPPA).

Pour affiner notre compréhension du modèle MEC-SPQ, nous avons cherché à évaluer les prédictions du modèle MEC-SPQ en pratiquant des analyses de

régressions des différentes dimensions du modèle pour chaque groupe expérimental (Voir Annexe 17).

On constate que pour les différentes situations expérimentales, la représentation mentale de l'environnement virtuel est un prédicteur de la présence spatiale (SPSL). On constate aussi que la suspension d'incrédulité (SOD) s'avère être comme attendu un prédicteur positif de la présence spatiale (SPPS et SPSL ou self location). Les seules différences concernent le fait que c'est uniquement dans le décor 2 avec la condition de visibilité parfaite que l'attention s'est avérée être un prédicteur positif de la SSM et que la SOD ne s'est pas avéré être un prédicteur de la SSM et de la présence spatiale (SPPA et SPSL) contrairement à toutes les autres situations expérimentales.

VIII.4.2 Corrélations entre items de l'IPQ

Nous avons cherché à évaluer les liens de covariance entre les différentes rubriques de notre questionnaire IPQ à l'aide de corrélations Gamma (Voir Tableau 46).

Tableau 46. Résultats corrélations gamma IPQ global (seuil de significativité fixé à $p < 0.05$)

| | SP | INV | REAL | G |
|------|----|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| SP | | 0.61 ($p=0.00^{**}$) | 0.45 ($p=0.00^{**}$) | 0.83 ($p=0.00^{**}$) |
| INV | | | 0.45 ($p=0.00^{**}$) | 0.65 ($p=0.00^{**}$) |
| REAL | | | | 0.52 ($p=0.00^{**}$) |

Toutes les rubriques du questionnaire IPQ sont corrélées significativement les unes aux autres et ce positivement. On relève que la corrélation la plus forte concerne celle reliant la présence spatiale (SP) et la sensation d'être là (G) avec $\text{Gamma}=0.83$. De la même manière on relève que les corrélations les plus faibles trouvées sont celles reliant l'engagement (Involvement=INV) et le réalisme perçu (Realism=REAL) avec $\text{Gamma}=0.45$ et la présence spatiale avec le réalisme $\text{Gamma}=0.45$. Pour affiner notre compréhension, nous avons cherché à évaluer les corrélations des différents items du IPQ pour les différentes configurations expérimentales (Voir Annexe 18).

L'étude des corrélations nous montre que dans la plupart des décors de fortes corrélations apparaissent entre les différents items du questionnaire IPQ. Les corrélations les plus fortes sont observées entre SP et G (voir Tableau 46).

VIII.4.3 Corrélations entre items PANAS et SPQ/IPQ

Des corrélations ont été calculées entre les items des questionnaires de présence IPQ et SPQ avec les deux items du questionnaire du PANAS. Nous souhaitons préciser la valence émotionnelle de l'expérience de présence ressentie (Voir Tableau 47).

Tableau 47. Résultats corrélations IPQ- PANAS- SPQ(seuil de significativité fixé à $p < 0.05$)

| | PA | NA |
|--|-------|--------|
| Attention | 0.52* | -0.22* |
| Spatial Situation Model (SSM) | 0.27* | -0.12 |
| Cognitive Involvement (CogInv) | 0.30* | -0.07 |
| Suspension Of Disbelief (Sod) | 0.48* | -0.04 |
| Spatial Presence Possible actions (SPPA) | 0.28* | -0.14 |
| Spatial Presence Self-Location (SPSL) | 0.36* | -0.24* |
| G | 0.50* | -0.28* |
| Realism (REAL) | 0.37* | -0.09 |
| Spatial presence (SP) | 0.29* | -0.28* |
| Involvement (INV) | 0.19* | -0.09 |

Toutes les corrélations calculées sont significatives pour PA avec les dimensions des deux questionnaires SPQ et IPQ. On relève qu'elles sont toutes positives ce qui permet de dire que plus l'on est présent plus on ressent des émotions positives. A l'inverse peu de corrélations ont été trouvées pour la dimension NA en lien avec les items du SPQ. Toutes les corrélations significatives calculées avec les

items de l'IPQ sont négatives ce qui permet de dire que moins l'on est présent plus cela s'accompagnerait d'émotions négatives. (Voir Tableau 47).

Pour affiner notre compréhension, nous avons cherché à évaluer les corrélations des différents items du IPQ pour les différentes configurations expérimentales (Voir Annexe 19). Toutefois en ayant au préalable constaté qu'il n'y avait aucune corrélation significative entre les données du IPQ et les dimensions du PANAS, nous ne présenterons dans la tableau ci-dessous que les résultats des corrélations entre le SPQ et le PANAS.

Les émotions négatives ne sont pratiquement jamais corrélées significativement aux différentes dimensions des deux questionnaires de présence. Le questionnaire SPQ a plus de corrélations avec la dimension PA du PANAS que le IPQ. Toutes les corrélations avec PA sont significatives.

VIII.4.4 Corrélations entre items SPQ/IPQ et données comportementales de conduite

*** Corrélations entre items SPQ/IPQ et vitesse moyenne/écart type de la vitesse**

Des corrélations ont été calculées entre les items des questionnaires de présence IPQ et SPQ avec la vitesse moyenne et l'écart type de la vitesse moyenne. Nous souhaitons mettre en évidence des indicateurs comportementaux de la présence. La seule corrélation observée est une corrélation négative (-0,18) entre l'attention (dimension du questionnaire SPQ) avec la vitesse moyenne.

*** Corrélations entre items SPQ/IPQ et moyenne de la position latérale dans la voie/écart type de la position latérale dans la voie**

Des corrélations ont été calculées entre les items des questionnaires de présence IPQ et SPQ avec la moyenne et l'écart type de la position latérale dans la voie. Nous souhaitons mettre en évidence des indicateurs comportementaux de la présence. On ne relève aucune corrélation entre les dimensions de l'IPQ et SPQ avec la moyenne et l'écart type de la position latérale.

VIII.4.5 Corrélations entre items SPQ/IPQ et l'activité électrodermale

Des corrélations ont été calculées entre les items des questionnaires de présence IPQ et SPQ avec la moyenne et l'écart type EDA (voir Tableau 48). Nous souhaitons mettre en évidence des indicateurs comportementaux de la présence.

**Tableau 48. Résultats corrélations IPQ- Δ Mean EDA- Δ SD EDA- SPQ
(seuil de significativité fixé à $p < 0.05$)**

| | Δ Mean EDA | Δ Ecart type EDA |
|--|-------------------|-------------------------|
| Attention | 0.08 | -0.16 |
| Spatial Situation Model (SSM) | -0.09 | -0.21* |
| Cognitive Involvement (CogInv) | -0.09 | -0.26* |
| Suspension Of Disbelief (Sod) | 0.07 | -0.06 |
| Spatial presence possible actions (SPPA) | -0.12 | -0.14 |
| Self-Location (SPSL) | -0.10 | -0.23* |
| G | -0.09 | -0.28* |
| Realism | -0.17* | -0.17* |
| Spatial presence | -0.01 | -0.18* |
| Involvement | 0.01 | -0.28* |

Globalement, l'essentiel des corrélations a été trouvé entre les dimensions de l'IPQ et du SPQ avec l'écart type de l'EDA. Une corrélation négative a été trouvée entre le réalisme et la moyenne de l'EDA. Plus les personnes rapportent un sentiment de réalisme plus leur activité électrodermale diminue. Il y a plus de corrélations entre le questionnaire IPQ et l'écart type de l'EDA qu'entre le questionnaire SPQ et l'écart type de l'EDA. Il ressort globalement que plus l'on serait présent, engagé dans la tâche plus la variabilité de notre activité électrodermale diminuerait (Voir Tableau 48).

VIII.4.6 Corrélations entre items SPQ/IPQ et l'activité cardiaque

Des corrélations ont été calculées entre les items des questionnaires de présence IPQ et SPQ avec la moyenne et l'écart type du rythme (voir Tableau 49). Nous souhaitons mettre en évidence des indicateurs comportementaux de la présence.

Tableau 49. Résultats corrélations IPQ- SD Rythme cardiaque-Moyenne rythme cardiaque- SPQ(seuil de significativité fixé à $p < 0.05$)

| | Δ Mean Rythme cardiaque | Δ SD Rythme cardiaque |
|--|--------------------------------|------------------------------|
| Attention | 0.12 | 0.08 |
| Spatial Situation Model (SSM) | 0.24* | 0.10 |
| Cognitive Involvement (CogInv) | 0.08 | 0.00 |
| Suspension Of Disbelief (Sod) | 0.17* | 0.07 |
| Spatial presence possible actions (SPPA) | 0.13 | 0.20 |
| Self-Location (SPSL) | 0.21* | 0.02 |
| G | 0.20* | 0.23 |
| Realism | 0.21* | 0.10 |
| Spatial presence | 0.19* | 0.09 |
| Involvement | 0.31* | 0.17 |

Globalement, l'essentiel des corrélations ont été trouvé entre les dimensions de l'IPQ et de la moyenne du rythme cardiaque. Il ressort que toutes sont des corrélations positives avec la moyenne du rythme cardiaque laissant penser qu'une hausse du sentiment de présence s'accompagnerait d'une hausse de l'activité cardiaque (Tableau 49).

VIII.5 DISCUSSION

VIII.5.1 Sensibilité du questionnaire MEC SPQ et IPQ

L'objectif de l'étude consistait à valider le modèle de la présence spatiale afin d'identifier les déterminants de la présence spatiale en simulation de conduite automobile. La modulation des processus attentionnels considérés dans le modèle comme à la l'origine du développement de la présence a été réalisée par la manipulation de deux variables : le degré de richesse du décor de l'environnement virtuel et le niveau de visibilité de la route.

Effets sur les dimensions du SPQ

Aucun effet n'a été recensé sur le SPQ à l'aide de l'analyse ANOVA. L'analyse des régressions a révélé que la plupart des liens de causalité prédits par le modèle de la présence spatiale étaient vérifiés, sauf pour l'attention qui ne s'est pas avéré être un prédicteur positif de la représentation mentale de l'environnement.

Effets sur les dimensions de l'IPQ

Un effet de la visibilité a été mis en évidence sur la dimension du réalisme perçu. Les participants ont rapporté davantage de réalisme en condition de parfaite visibilité qu'en condition de visibilité dégradée. Cela corrobore l'idée que lorsque la visibilité est réduite les participants ont moins d'informations visuo-spatiales sur leur environnement et ont plus de difficultés à se construire une représentation mentale de l'environnement ce qui semble contribuer également à abaisser le réalisme perçu. L'analyse des corrélations sur les dimensions de l'IPQ a mis en évidence que la présence spatiale était corrélée positivement à l'implication ou l'engagement, au réalisme, à la sensation d'être là. De plus l'engagement était corrélé positivement au réalisme et à la sensation d'être là. Enfin le réalisme était positivement corrélé à la sensation d'être là. Les patterns de covariances attendus par la théorie sont corroborés par l'expérience.

Effets sur les dimensions du PANAS

Un effet de la visibilité a été recensé sur les émotions positives (PA). Les participants ont rapporté de plus nombreuses émotions positives dans la condition de visibilité parfaite que dans la condition de visibilité dégradée. Il apparaît que notre condition expérimentale de visibilité dégradée a été perçue comme plus négative et ce probablement parce que la tâche de conduite devenait plus complexe à assurer en

termes de maintien et d'anticipation de la trajectoire. En outre un effet du décor a été mis en évidence sur les émotions négatives, les émotions négatives étaient rapportées de manière plus forte dans le décor 2 que dans le décor 3. Le décor 2 était une situation intermédiaire avec des éléments de décors mais avec des textures en moins ce qui semble avoir été perçu comme plus déroutant que la situation du décor 3 où il n'y avait aucun objet. On peut supposer que dans le décor 2 les participants ont beaucoup inféré sur le réalisme de l'expérience créant des attentes voire des frustrations ou incompréhension alors que dans la situation 3, en définitive ne ressemblant à rien d'existant dans la réalité a été perçu comme peut être plus curieuse que déroutante. Cet effet est intéressant car il semble que plus on cherche à optimiser le réalisme visuel d'un environnement virtuel plus on se heurte à la représentation subjective de tout à chacun plaçant le seuil d'exigence de plus en plus haut en prenant le risque de voir le participant devenir de plus en plus suspicieux voire critique. L'analyse des corrélations montre que toutes les dimensions du SPQ sont corrélées positivement aux émotions positives. La plupart des corrélations observées entre l'IPQ et les émotions négatives sont négatives. L'ensemble de ces résultats attestent donc que plus on est engagé et présents dans l'expérience de simulation plus on est présent.

VIII.5.2 Données comportementales de conduite

L'objectif de l'étude était également de trouver des indicateurs comportementaux de la présence physique garantissant l'optimisation de la performance de conduite. Plusieurs analyses ont été menées.

Vitesse moyenne et écart type moyen de la vitesse

La hausse de la richesse du décor a significativement augmenté la vitesse moyenne des participants. Les participants ont roulé plus vite dans le décor 2 (moyennement réaliste) que dans le décor 3 (peu réaliste). Il apparaît que la hausse du degré de richesse du décor soit également caractérisable par une augmentation de l'écart type de la vitesse, assimilable à une baisse de la performance de conduite. Il est possible que le décor plus réaliste ait davantage attiré l'œil du participant le rendant paradoxalement davantage focalisé sur les détails de la scène virtuelle au dépend de l'activité de conduite en elle-même. Cette baisse de performance ne semble pas pour autant assimilable à une diminution ou rupture de présence mais à une réorientation attentionnelle en lien avec des éléments de l'environnement virtuel puisque « la sensation d'être là » s'est révélée être un prédicteur positif de l'écart type de la vitesse. Il faut à ce stade de l'analyse soulever une véritable difficulté qui est que nous ne pouvons pas nous assurer que ces résultats ne soient pas simplement liés à la différence de circuit qui caractérise les décor 2 et 3. Nous avons néanmoins des événements qui interviennent à la même fréquence sur chacun des 2 circuits

gageant que la nature de l'activité de conduite était sensiblement la même malgré des différences liées à la topologie du terrain.

Les émotions négatives semblent avoir été des prédicteurs positifs de la vitesse moyenne. Les participants auraient conduit plus rapidement sous l'influence d'émotions négatives. Un effet de la visibilité a été observé sur l'écart type de la vitesse, en condition de visibilité parfaite l'écart type était plus élevé qu'en condition de visibilité dégradée. Une stratégie a donc été mise en place par les participants en condition de visibilité dégradée. L'analyse des corrélations entre les dimensions IPQ/SPQ et les données comportementales de vitesse que l'attention (SPQ) était négativement corrélée à la vitesse. Une fois encore il semble que les participants logiquement ont diminué leur vitesse et leur écart type de vitesse afin garder un maintien nominal de leur trajectoire.

Position latérale moyenne et écart type moyen de la position latérale

La hausse de la richesse du décor a engendré une hausse de la position latérale moyenne. Les participants semblent avoir davantage roulé à droite dans la voie. Une fois encore la hausse de la richesse du décor a engendré une diminution de la performance de conduite puisqu'une hausse de la variabilité de la position latérale a été relevée. Les participants semblent s'être placés le plus à droite de la voie afin de pouvoir éviter d'éventuelles collisions afin d'optimiser au mieux leur tâche de navigation, la gestion des commandes s'avérant plus critique sur simulateur dynamique. Cette stratégie n'a pas réellement permis aux participants d'optimiser leur performance de conduite bien que leurs scores de présence spatiale et d'engagement se soient avérés être des prédicteurs de l'écart type de la position latérale. Par ailleurs, la hausse du degré de dégradation de la visibilité de la route a également entraîné une hausse de l'écart type de la position latérale dans la voie. Il apparaît que les participants ont eu plus de difficultés en condition de mauvaise visibilité à assurer l'efficacité de leur tâche de conduite. Les ressources attentionnelles visuo-spatiales semblent avoir été davantage sollicitées pour mener à bien la tâche de conduite ce qui peut expliquer pourquoi dans notre approche attentionnelle de la présence spatiale (Wirth et al., 2007) le sentiment de présence semble avoir été plus élevé en condition de visibilité dégradée qu'en condition de visibilité parfaite. L'analyse des corrélations entre les dimensions IPQ/SPQ et les données comportementales de position latérale n'a révélé aucune corrélation significative.

VIII.5.3. Données physiologiques

Conductance électrodermale EDA

La hausse du degré de richesse du décor a engendré une baisse de la conductance électrodermale moyenne. Les participants semblent avoir été moins physiologiquement éveillés dans le décor réaliste. Un effet de la visibilité a été observé sur l'activité électrodermale moyenne, les plus fortes valeurs ont été observées dans la condition de visibilité dégradée que dans la condition de visibilité parfaite. Une fois encore on met en évidence le fait que la baisse de la performance de conduite est associée à un stress d'autant plus grand en termes d'activité électrodermale. L'analyse des corrélations a fait ressortir qu'il n'existait qu'une corrélation négative entre la moyenne de l'EDA et le score de réalisme perçu. Ainsi plus on perçoit l'expérience comme réaliste plus notre seuil d'éveil physiologique semble stable et gage d'un bien être. Enfin une corrélation négative a été mise en évidence entre l'écart type de l'EDA et les dimensions de l'IPQ/SPQ. Il apparaît que plus l'on est présent sur notre variabilité de l'activité électrodermale est faible témoignant encore une fois d'un état nominal.

Rythme cardiaque

Aucun effet significatif n'a pu être mis en évidence à l'aide de l'analyse ANOVA. L'analyse des corrélations mesure du rythme cardiaque avec les dimensions SPQ/IPQ ont révélées une corrélation positive entre la représentation mentale (SPQ) et la moyenne du rythme cardiaque. Ce résultat ne peut pas être interprété comme une hausse directe de l'activité physiologique. On ne peut donc pas conclure sur ce résultat.

VIII.5.4 Perspectives de Recherche

Cette troisième expérimentation a globalement confirmé les résultats de la deuxième expérimentation. Il est important de préciser que cette troisième expérimentation a également montré les mêmes résultats en termes de corrélations entre les données comportementales et les données subjectives de présence. On a également montré que l'activité électrodermale était négativement corrélée aux scores de présence. On a aussi confirmé que la présence est associée à des scores plus élevés d'émotions positives. L'analyse des régressions pour le questionnaire SPQ a été tout aussi concluante que dans l'expérience précédente sauf pour la rubrique de l'attention. L'intérêt d'utiliser deux questionnaires a également été souligné afin de sonder des dimensions connexes à celles proposées dans le SPQ comme le réalisme perçu de l'IPQ. Il semble toutefois que nos variables indépendantes ont moins bien modulé les dimensions de la présence que ce soit pour le SPQ ou l'IPQ. Nous avons pu plus globalement trouver des indicateurs comportementaux et physiologiques de la présence en simulation en étalonnant ces indicateurs sur une échelle immersive. Il nous reste désormais à regarder de plus près ce sur quoi pourrait se différencier les deux simulateurs utilisés. Plusieurs limites doivent être exposées avant de débiter ce nouveau chapitre comparatif sur le poids de l'immersion sur l'expérience subjective et comportementale de la présence. En effet la première limite est le fait que ce ne sont pas les mêmes sujets qui ont été utilisés dans les deux études. Bien que nous ayons fixé des critères d'inclusion (voir méthodologie) la variabilité interindividuelle nous oblige à rester prudent sur le caractère homogène de nos deux échantillons statistiques. La deuxième critique porte sur un caractère imprévu qui s'est imposé à nous en faisant notre troisième expérimentation sur le simulateur dynamique. En effet, au regard du taux élevé du mal de simulateur recensés (50%) au cours des pré-tests chez des sujets, nous avons été obligés d'enlever le décor 1 qui de par sa topographie induisait un problème accru de cinétose. Notre approche expérimentale n'est donc pas exempte de limites méthodologiques mais nous pensons néanmoins pouvoir par notre travail donner des éléments de réflexion utiles sur une nouvelle approche d'évaluation de la validité écologique à travers l'opérationnalisation du concept de présence.

IX ETUDE COMPARATIVE ENTRE EXPERIENCES 2 ET 3

IX.1 OBJECTIFS DE L'EXPERIMENTATION COMPARATIVE

Cette quatrième phase d'analyse s'intéresse à évaluer l'influence de l'immersion sur les scores de présence (IPQ et SPQ), résultats physiologiques (EDA et rythme cardiaque) et les résultats comportementaux de conduite. L'objectif est d'évaluer dans quelle mesure les patterns de résultats trouvés sur simulateur statique correspondent à ce que l'on a trouvé sur simulateur dynamique. Le principal intérêt de cette session est donc de reprendre l'ensemble des analyses faites séparément précédemment mais en y injectant cette fois la variable indépendante supplémentaire qu'est l'immersion qui est supposée être plus élevée dans le simulateur dynamique que dans le simulateur statique.

IX.2 ANALYSES STATISTIQUES

Comme pour la première expérimentation, la première minute de chaque situation était considérée comme une familiarisation à la tâche. Par conséquent aucune donnée n'était enregistrée durant cette durée. Plusieurs analyses statistiques ont été réalisées en fonction des différents scénarios de conduite. Une analyse ANOVA via le modèle linéaire général sous statistica a été réalisée (pas à pas descendante) sur des données standardisées afin d'étudier les effets simples et d'interactions entre le degré de richesse du décor virtuel, le niveau de visibilité de la route et d'autres variables indépendantes sur nos variables dépendantes. Les analyses post-hoc étaient ensuite réalisées avec des t de Student pour groupes indépendants pour des comparaisons par paires et avec des régressions linéaires simples pour l'effet d'une variable sur une autre dans chaque condition.

IX.2.1 Données subjectives

Questionnaire MEC-SPQ

La première analyse testait le plan expérimental croisé 3 (degré de richesse du décor : pauvre, moyen) × 2 (niveau de visibilité de la route : bonne ou mauvaise visibilité) × 2 (niveau d'immersion : faible, élevé). Les variables dépendantes étaient respectivement chaque rubrique du questionnaire de présence (MEC-SPQ) : la présence subjective, l'attention subjective, la représentation mentale subjective, l'implication cognitive subjective, la suspension d'incrédulité subjective, et l'imagerie visuo-spatiale subjective.

Questionnaire IPQ

La deuxième analyse testait le plan expérimental croisé 3 (degré de richesse du décor : pauvre, moyen) × 2 (niveau de visibilité de la route : bonne ou mauvaise visibilité) × 2 (niveau d'immersion : faible, élevé). Les variables dépendantes étaient respectivement chaque rubrique du questionnaire de présence (IPQ) : le réalisme, l'engagement, la présence spatiale et la sensation d'être là.

Questionnaire PANAS

La troisième analyse testait le plan expérimental croisé 3 (degré de richesse du décor : pauvre, moyen) × 2 (niveau de visibilité de la route : bonne ou mauvaise visibilité) × 2 (niveau d'immersion : faible, élevé). Les variables dépendantes étaient respectivement chaque rubrique du questionnaire du PANAS : PA=Positive affect et NA=négative affect

IX.2.2 Données comportementales de conduite

Pour l'ensemble des analyses réalisées dans cette section le plan expérimental suivant a été testé : le plan expérimental croisé 2 (degré de richesse du décor : pauvre, moyen) × 2 (niveau de visibilité de la route : bonne ou mauvaise visibilité) × 2 (niveau d'immersion : faible, élevé). Les variables dépendantes étaient respectivement la vitesse, l'écart type de la vitesse, la position latérale moyenne dans la voie, l'écart type de la position latérale dans la voie, et la force moyenne de la pédale de frein et l'écart type de cette force.

Le modèle linéaire général a été utilisé pour tester l'influence de variables indépendantes continues (rubrique du questionnaire de présence) et catégorielles (degré de richesse du décor, degré de visibilité de la route, niveau d'immersion) sur les variables dépendantes en lien avec la performance de conduite (écart type de la vitesse, écart type de la position latérale dans la voie et écart type de la force de la pédale de frein) :

IX.2.3 Données physiologiques

Activité électrodermale (EDA)

Pour l'ensemble des analyses réalisées dans cette section le plan expérimental suivant a été testé : le plan expérimental croisé 2 (degré de richesse du décor : pauvre, moyen) × 2 (niveau de visibilité de la route : bonne ou mauvaise visibilité) × 2 (niveau d'immersion : faible, élevé). La variable dépendante était la moyenne de l'activité électrodermale.

Le modèle linéaire général a été utilisé pour tester l'influence de variables indépendantes continues (rubrique du questionnaire de présence) et catégorielles (degré de richesse du décor, degré de visibilité de la route) sur l'activité électrodermale moyenne.

Rythme cardiaque (ECG)

Pour l'ensemble des analyses réalisées dans cette section le plan expérimental suivant a été testé : Le plan expérimental croisé 2 (degré de richesse du décor : pauvre, moyen) × 2 (niveau de visibilité de la route : bonne ou mauvaise visibilité) × 2 (niveau d'immersion : faible, élevé). La variable dépendante était la moyenne du rythme cardiaque.

Le modèle linéaire général a été utilisé pour tester l'influence de variables indépendantes continues (rubrique du questionnaire de présence) et catégorielles (degré de richesse du décor, degré de visibilité de la route, × 2 (niveau d'immersion : faible, élevé)) sur la moyenne du rythme cardiaque.

IX.3 RESULTATS

IX.3.1 Données subjectives

***Les dimensions du MEC-SPQ**

Le modèle linéaire général a été utilisé pour tester nos hypothèses en croisant nos trois variables indépendantes (voir tableau 50). Les effets simples non significatifs de la Richesse du décor et de la Visibilité ne sont pas présentés dans le tableau.

Tableau 50 Résultats ANOVA (seuil de significativité fixé à $p < 0.05$)

| | Simulateurs | Richesse du décor*Simulateurs | Visibilité*Simulateurs | Richesse du décor*visibilité*Simulateurs |
|--|----------------------------------|-------------------------------|------------------------|--|
| Attention | F=0.48 p=0.50 | F=0.44 p=0.51 | F=1.89 p=0.17 | F=0.33 p=0.57 |
| Spatial Situation Model (SSM) | F=0.42 p=0.52 | F=0.001 p=0.98 | F=0.001 p=0.98 | F=0.08 p=0.77 |
| Cognitive Involvement (CogInv) | F=6.96 p=0.00** | F=0.01 p=0.95 | F=0.17 p=0.69 | F=0.02 p=0.89 |
| Suspension Of Disbelief (SOD) | F=0.49 p=0.49 | F=0.21 p=0.65 | F=1.84 p=0.18 | F=0.21 p=0.65 |
| Spatial presence possible actions (SPPA) | F=1.11 p=0.29 | F=1.22 p=0.27 | F=0.27 p=0.60 | F=0.21 p=0.64 |
| Self-Location (SPSL) | F=2.21 p=0.14 | F=0.01 p=0.93 | F=1.93 p=0.17 | F=0.06 p=0.81 |

Un effet de l'immersion ("effet simulateur") a été trouvé sur l'implication cognitive (F=6.96; $p < 0.01$). Les participants placés dans le simulateur statique ont rapporté des scores moins élevés (M=3.69;SD=0.61) que ceux sur simulateur dynamique (M=3.89; SD=0.57) (Voir Figure33)

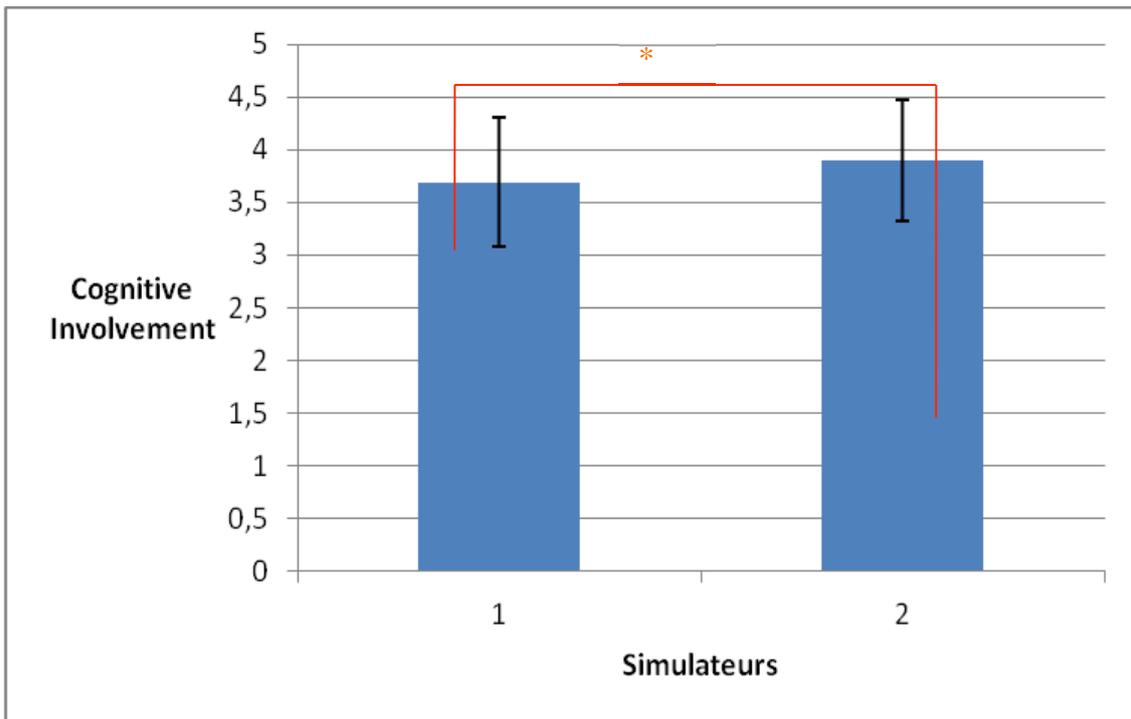


Figure33. Implication cognitive en fonction du degré d’immersion

*** Les dimensions du IPQ**

Le modèle linéaire général a été utilisé pour tester nos hypothèses en croisant nos trois variables indépendantes (voir tableau 51). Plus particulièrement une analyse ANOVA a été pratiquée pour évaluer les effets.

Tableau 51 Résultats ANOVA (seuil de significativité fixé à $p < 0.05$)

| | Simulateurs | Richesse du décor*Simulateurs | Visibilité*Simulateurs | Richesse du décor*visibilité*Simulateurs |
|-----------------------|-----------------------------------|-------------------------------|------------------------|--|
| Spatial presence (SP) | F=16.06 P=0.00** | F=0.58 P=0.45 | F=0.01 P=0.92 | F=0.73 P=0.39 |
| Involvement (INV) | F=23.10 P=0.00* | F=0.02 P=0.90 | F=0.07 P=0.79 | F=0.08 P=0.77 |
| Realism (REAL) | F=1.14 P=0.25 | F=0.14 P=0.71 | F=0.96 P=0.33 | F=0.81 P=0.37 |
| G | F=11.10 P=0.00** | F=0.16 P=0.69 | F=1.44 P=0.23 | F=2.15 P=0.15 |

-Trois effets simples de l'immersion sont respectivement apparus sur la rubrique "Spatial Presence", "Involvement", et "G" ("sensations d'être là"):

-Un effet de l'immersion ("effet simulateur") a été trouvé sur la dimension "spatial presence" ($F=16.06$; $p < 0.01$). Les participants placés dans le simulateur statique ont rapporté des scores moins élevés ($M=4.20$; $SD=1.06$) que ceux sur simulateur dynamique ($M=4.77$; $SD=0.89$) (Voir Figure34).

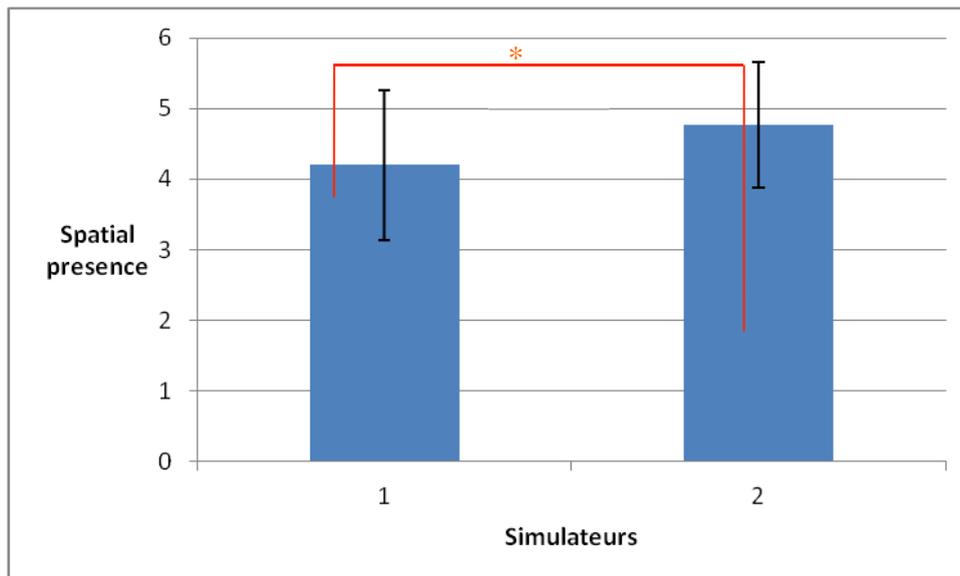


Figure34. La présence spatiale en fonction du degré d'immersion

-Un effet de l'immersion ("effet simulateur") a été trouvé sur la dimension "involvement" ($F=23.10$; $p<0.01$). Les participants placés dans le simulateur statique ont rapporté des scores moins élevés ($M=3.58$; $SD=1.31$) que ceux sur simulateur dynamique ($M=4.37$; $SD=0.78$) (Voir Figure35).

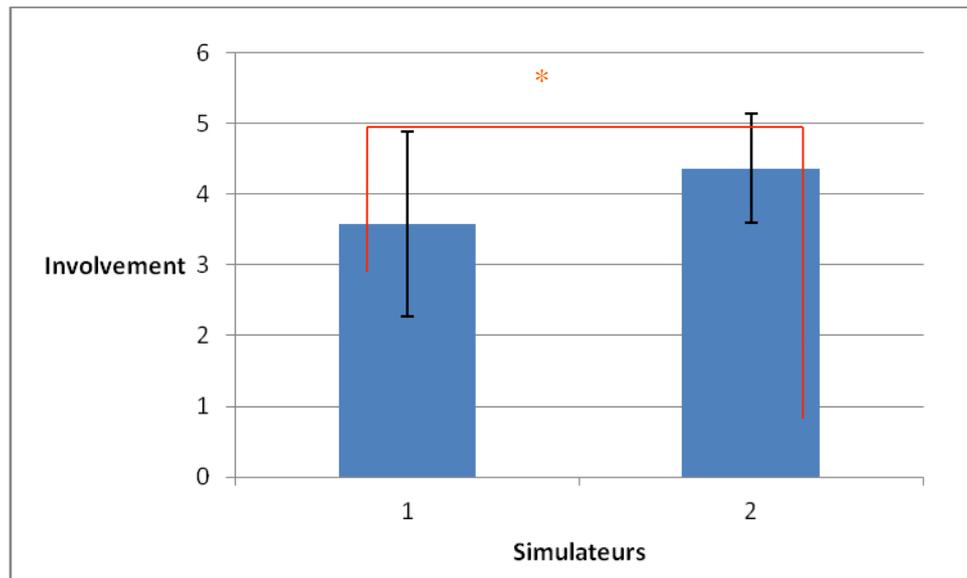


Figure35. L'engagement en fonction du degré d'immersion

* Les dimensions du PANAS

Le modèle linéaire général a été utilisé pour tester nos hypothèses en croisant nos trois variables indépendantes (voir tableau 52). Plus particulièrement une analyse ANOVA a été pratiquée pour évaluer les effets

Tableau 52 Résultats ANOVA PANAS (seuil de significativité fixé à $p<0.05$)

| | Simulateurs | Richesse du décor*Simulateurs | Visibilité*Simulateurs | Richesse du décor*visibilité*Simulateurs |
|----|---------------------------------|-------------------------------|------------------------|--|
| PA | F=4.05 p=0.04* | F=0.01 p=0.95 | F=2.42 p=0.12 | F=0.46 p=0.50 |
| NA | F=1.11 p=0.29 | F=1.30 p=0.26 | F=0.70 p=0.41 | F=0.37 p=0.54 |

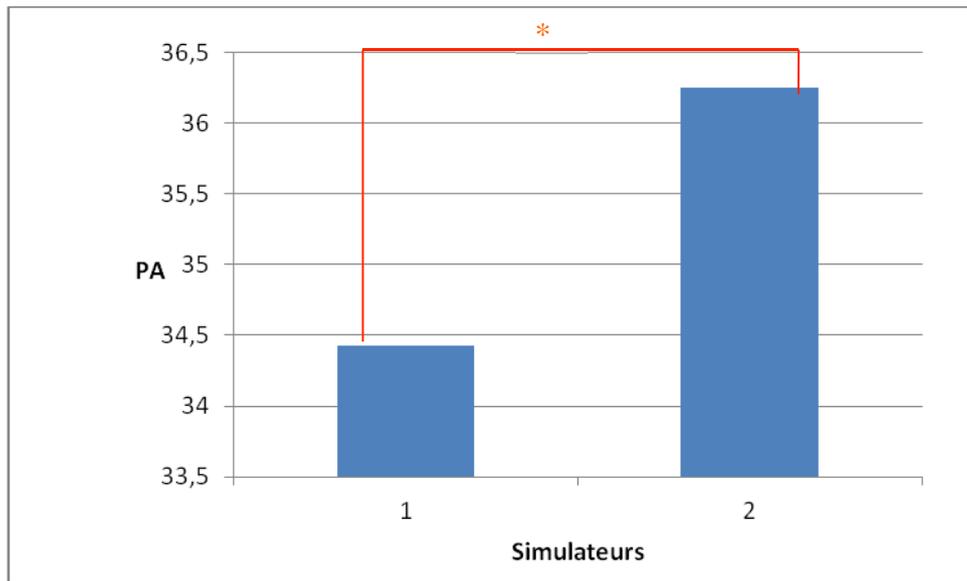


Figure36. PA (positive Affect) en fonction du degré d'immersion

-Un effet de l'immersion ("effet simulateur") a été trouvé sur la dimension "PA" (émotions positives) ($F=4.05$; $p<0.01$). Les participants placés dans le simulateur statique ont rapporté des scores moins élevés ($M=34.43$; $SD=6.05$) que ceux sur simulateur dynamique ($M=36.25$; $SD=5.41$) (Voir Figure36).

IX.3.2 Données comportementales de conduite en situation globale

* Vitesse moyenne (en km/h) et écart type de la vitesse

Le modèle linéaire général a été utilisé pour tester nos hypothèses en croisant nos trois variables indépendantes (voir tableau 53). Plus particulièrement une analyse ANOVA a été pratiquée pour évaluer les effets

Tableau 53 Résultats ANOVA (seuil de significativité fixé à $p < 0.05$)

| | Simulateurs | Richesse du décor*Simulateurs | Visibilité*Simulateurs | Richesse du décor*visibilité* Simulateurs |
|------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|------------------------|---|
| Vitesse moyenne (km/h) | F=0.22 p=0.64 | F=0.15 p=0.70 | F=0.02 p=0.89 | F=0.08 p=0.78 |
| SD Vitesse (km/h) | F=55.83 p=0.00** | F=2.30 p=0.13 | F=0.30 p=0.58 | F=0.00 p=0.95 |

Un effet de l'immersion ("effet simulateur") a été trouvé sur l'écart type de la vitesse (F=55.83; $p < 0.01$). Les participants placés dans le simulateur statique ont rapporté des valeurs plus élevées (M=0.86;SD=0.12) que ceux sur simulateur dynamique (M=0.03; SD=0.14) (Voir Figure37).

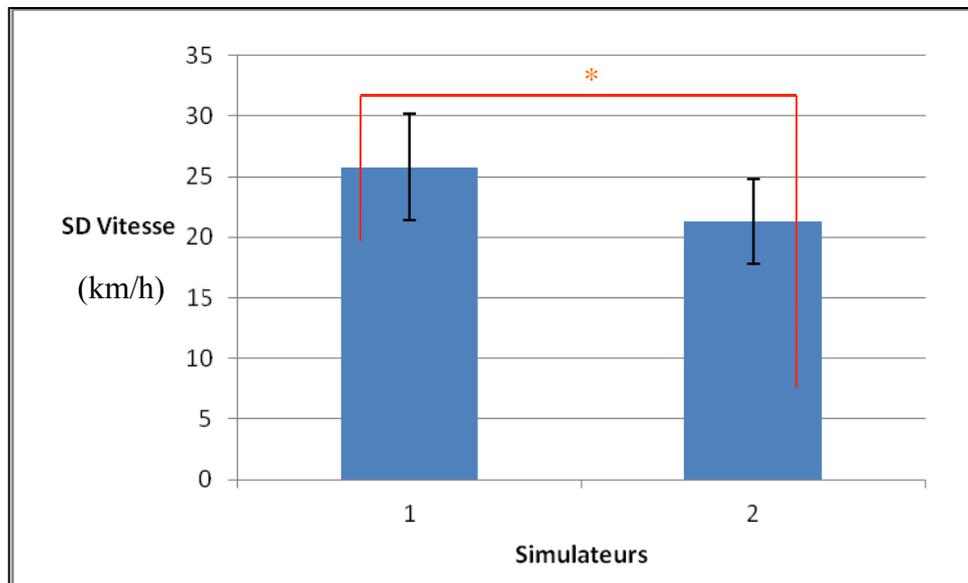


Figure37. Ecart type de la vitesse en fonction du degré d’immersion

*** Position latérale moyenne (en m) et écart type moyen de la position latérale**

Le modèle linéaire général a été utilisé pour tester nos hypothèses en croisant nos trois variables indépendantes (voir tableau 54). Plus particulièrement une analyse ANOVA a été pratiquée pour évaluer les effets de chacune de nos variables indépendantes.

| | Simulateurs | Richesse du décor*Simulateurs | Visibilité*Simulateurs | Richesse du décor*visibilité*Simulateurs |
|--|-----------------------------------|-------------------------------|------------------------|--|
| Moyenne position latérale dans la voie (m) | F=1702 p=0.00** | F=0.79 p=0.54 | F=0.0 p=0.73 | F=1 p=0.37 |
| SDLP (m) | F=167.4 p=0.00** | F=2.6 p=0.11 | F=0.5 p=0.49 | F=0.8 p=0.38 |

Tableau 54 Résultats ANOVA (seuil de significativité fixé à p<0.05)

Un effet de l'immersion ("effet simulateur") a été trouvé sur la position latérale dans la voie ($F=1702$; $p<0.01$). Les participants placés dans le simulateur statique ont rapporté des valeurs plus élevées ($M=34.43$; $SD=6.05$) que ceux sur simulateur dynamique ($M=36.25$; $SD=5.41$) (Voir Figure38).

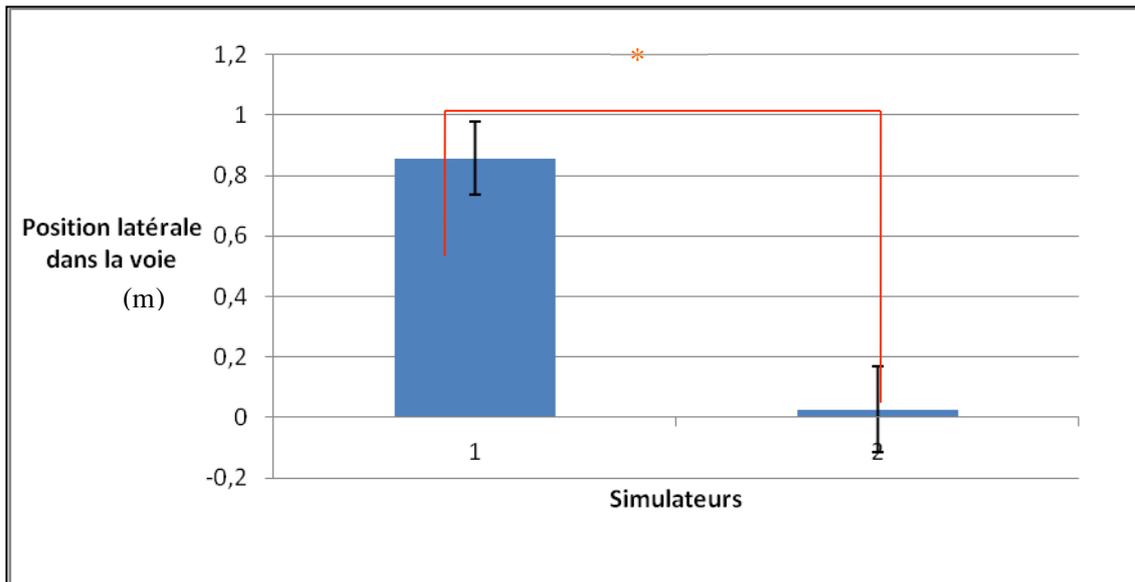


Figure38. Position latérale dans la voie en fonction du degré d'immersion

Un effet de l'immersion ("effet simulateur") a été trouvé sur l'écart type de la position latérale dans la voie ($F=167.4$; $p<0.01$). Les participants placés dans le simulateur statique ont rapporté des valeurs plus élevées ($M=0.56$; $SD=0.05$) que ceux sur simulateur dynamique ($M=0.42$; $SD=0.07$) (Voir Figure39).

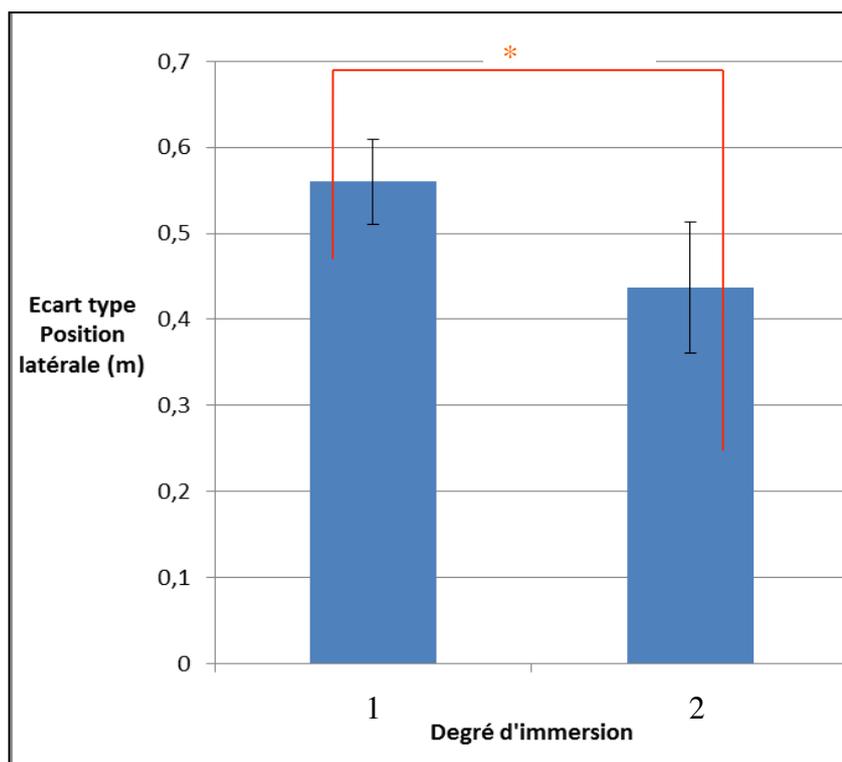


Figure39. Ecart type de la position latérale dans la voie en fonction du degré d'immersion

IX.3.3 Données physiologiques d'un point de vue global

* Conductance électrodermale moyenne et écart type

Le modèle linéaire général a été utilisé pour tester nos hypothèses en croisant nos trois variables indépendantes (voir tableau 55). Plus particulièrement une analyse ANOVA a été pratiquée pour évaluer les effets. Rappelons que les valeurs d'EDA présentées sont des mesures différentielles (par rapport à une valeur seuil au repos).

Tableau 55 Résultats ANOVA (seuil de significativité fixé à $p < 0.05$)

| | Simulateurs | Richesse du décor*Simulateurs | Visibilité*Simulateurs | Richesse du décor*visibilité* Simulateurs |
|---|------------------------------------|-------------------------------|------------------------|---|
| Δ Moyenne EDA (μ S) | F=10.42 p=0.002** | F=0.55 p=0.46 | F=3.09 p=0.08 | F=0.97 p=0.33 |
| Δ Ecart type (SD)-EDA (μ S) | F=19.66 p=0.00** | F=3.56 p=0.06 | F=0.04 p=0.85 | F=0.30 p=0.59 |

Un effet de l'immersion ("effet simulateur") a été trouvé sur la moyenne de l'EDA ($F=10.42$; $p<0.01$). Les participants placés dans le simulateur statique ont rapporté des valeurs plus faibles ($M=2.80$; $SD=2.79$) que ceux sur simulateur dynamique ($M=4.30$; $SD=2.95$) (Voir Figure40).

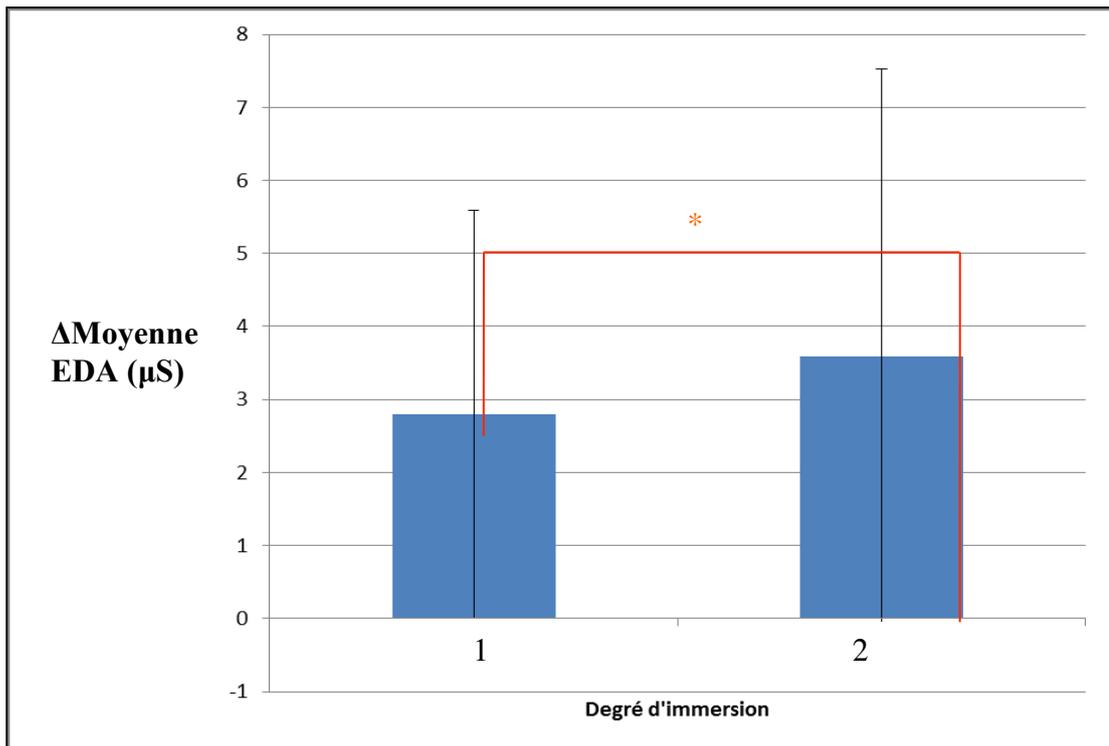


Figure40. Conductance électrodermale moyenne en fonction du degré d'immersion

Un effet de l'immersion ("effet simulateur") a été trouvé sur l'écart type de l'EDA ($F=19.66$; $p<0.01$). Les participants placés dans le simulateur statique ont rapporté des valeurs plus faibles ($M=-0.09$; $SD=0.47$) que ceux sur simulateur dynamique ($M=0.27$; $SD=0.41$) (Voir Figure41).

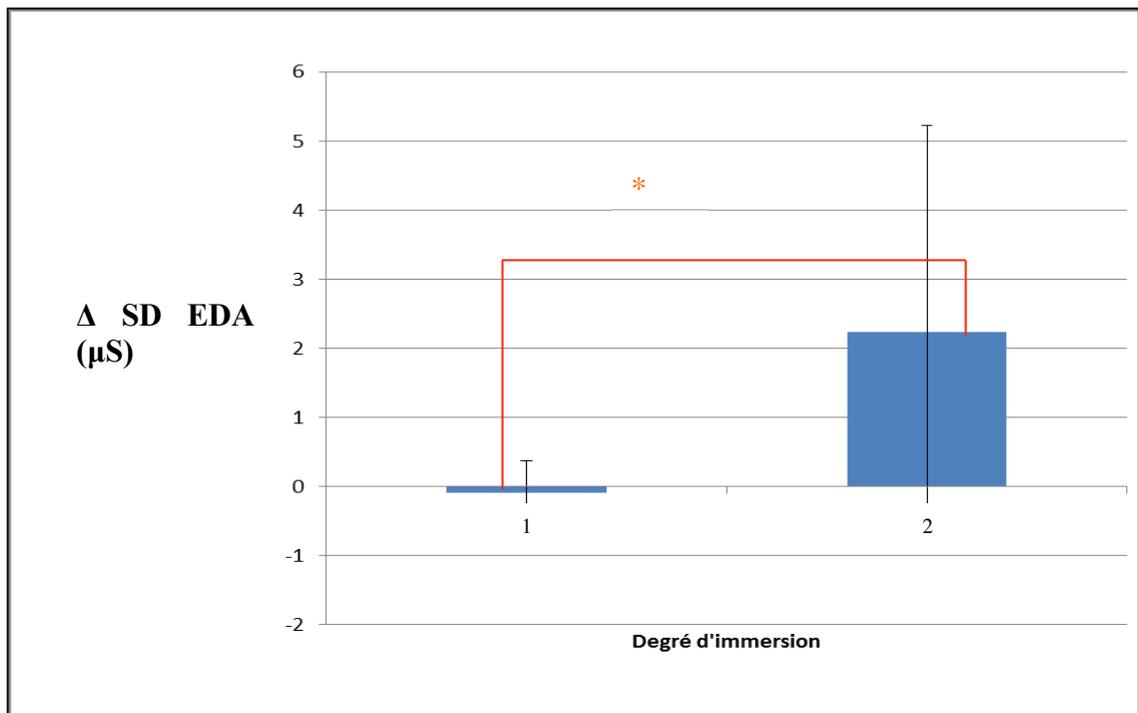


Figure41. Ecart type de la conductance électrodermale en fonction du degré d'immersion

*** Rythme cardiaque et écart type**

Le modèle linéaire général a été utilisé pour tester nos hypothèses en croisant nos trois variables indépendantes (voir tableau 56). Plus particulièrement une analyse ANOVA a été pratiquée pour évaluer les effets. Rappelons que les valeurs de rythme cardiaque présentées sont des mesures différentielles (par rapport à une valeur seuil au repos).

Tableau 56 Résultats ANOVA (seuil de significativité fixé à $p < 0.05$)

| | Simulateurs | Richesse du décor*Simulateurs | Visibilité*Simulateurs | Richesse du décor*visibilité* Simulateurs |
|---------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|------------------------|---|
| ΔMoyenne Fréquence cardiaque (bpm) | F=10.76 p=0.001** | F=0.40 p=0.53 | F=0.40 p=0.52 | F=0.50 p=0.48 |
| ΔEcart type fréquence cardiaque (bpm) | F=11.21 p=0.001** | F=0.73 p=0.40 | F=0.40 p=0.53 | F=0.86 p=0.36 |

Un effet de l'immersion ("effet simulateur") a été trouvé sur la fréquence cardiaque ($F=10.76$; $p<0.01$). Les participants placés dans le simulateur statique ont rapporté des valeurs plus faibles ($M=3.60$; $SD=4.96$) que ceux sur simulateur dynamique ($M=9.67$; $SD=14.52$) (Voir Figure42).

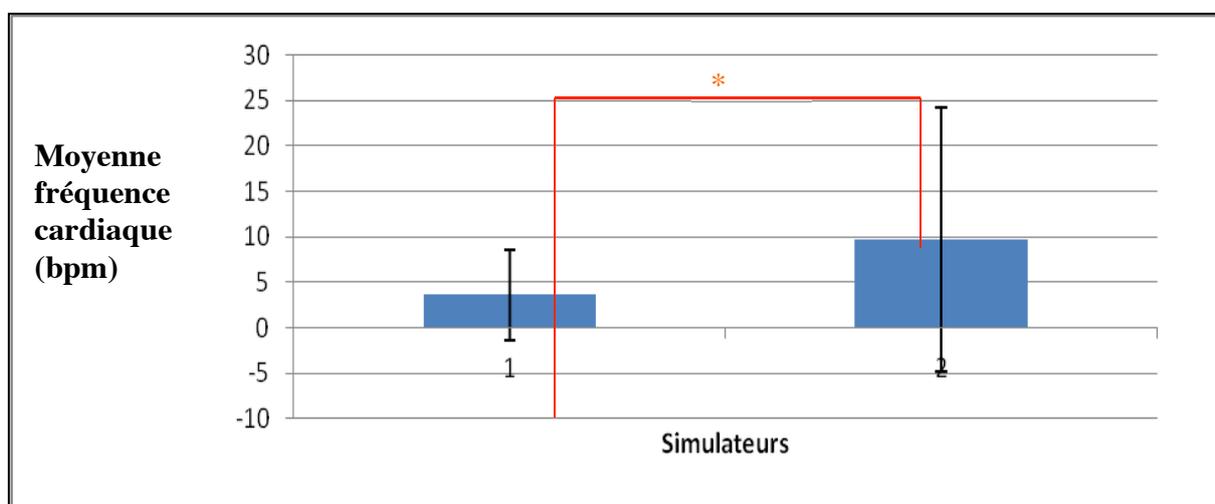


Figure42. Fréquence cardiaque moyenne en fonction du degré d'immersion

Un effet de l'immersion ("effet simulateur") a été trouvé sur l'écart type de la fréquence cardiaque ($F=11.21$; $p<0.01$). Les participants placés dans le simulateur statique ont rapporté des valeurs plus faibles ($M=-0.50$; $SD=1.90$) que ceux sur simulateur dynamique ($M=0.62$; $SD=2.32$) (Voir Figure43).

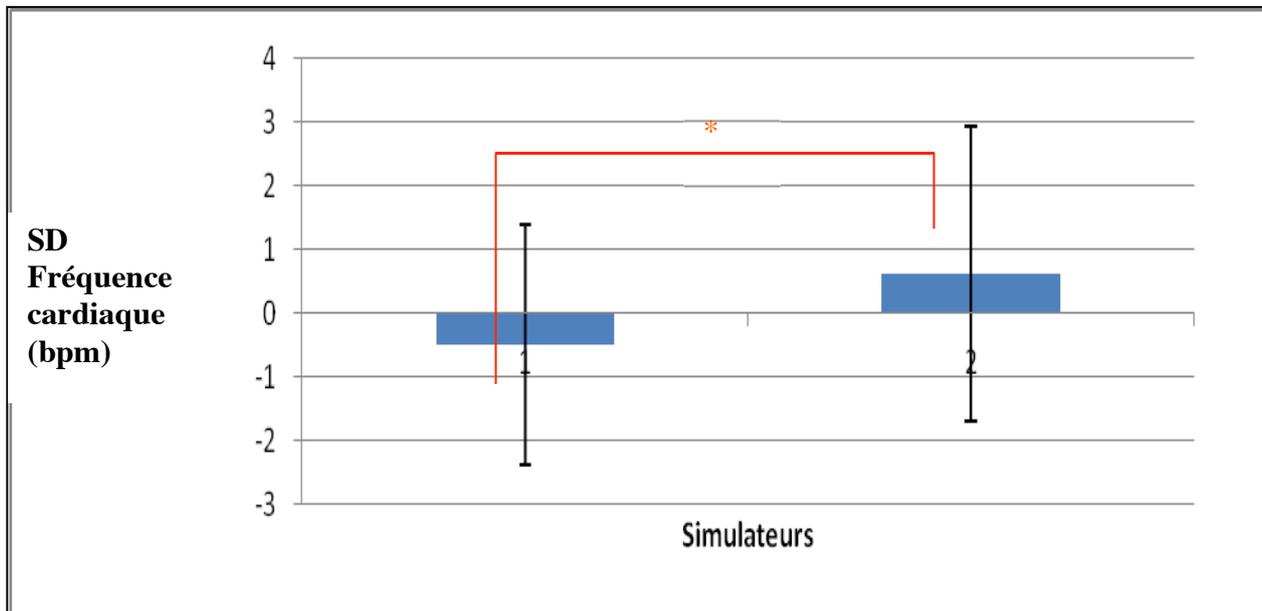


Figure43. Ecart type de la fréquence cardiaque en fonction du degré d'immersion

IX.4 DISCUSSION

L'objectif de l'étude consistait à étudier l'influence de l'immersion sur la présence spatiale et ses déterminants. Nous souhaitons évaluer dans quelle mesure les patterns de résultats trouvés sur le simulateur statique correspondaient à ceux trouvés sur le simulateur dynamique. Il s'agissait donc d'évaluer l'influence des caractéristiques du média présentés dans le modèle de la présence spatiale (Wirth et al., 2007) comme déterminants indirects de la présence spatiale.

IX.4.1 Données subjectives

***Impact du degré d'immersion sur les dimensions de la présence spatiale SPQ**

Notre hypothèse principale était que le degré d'immersion était un prédicteur positif des dimensions de la présence spatiale rattachées au questionnaire SPQ. Contrairement à ce qui était attendu seule la rubrique « implication cognitive » s'est avérée positivement impactée par la hausse du degré d'immersion. On a en effet montré que l'implication cognitive était significativement plus forte sur le simulateur dynamique que sur le simulateur statique.

***Impact du degré d'immersion sur les dimensions de la présence spatiale IPQ**

Notre hypothèse principale était que le degré d'immersion était un prédicteur positif des dimensions de la présence spatiale rattachées au questionnaire IPQ. Cette hypothèse a été validée, puisque le degré d'immersion a agi comme un prédicteur positif des différentes rubriques de l'IPQ (Involvement, Spatial Presence, Sense of being there). Les participants ont été significativement plus présents sur le simulateur dynamique que sur le simulateur statique comme en attestent leurs scores globaux de présence IPQ.

***Impact du degré de richesse du décor sur les émotions perçues**

Notre hypothèse principale était que le degré d'immersion était un prédicteur positif des émotions négatives et positives. Cette hypothèse n'a été que partiellement validée puisque l'on a montré que plus le degré d'immersion était important plus les participants ont majoritairement éprouvé des émotions positives

IX.4.2 Données comportementales de conduite

L'objectif de l'étude était également de trouver des indicateurs comportementaux de la présence physique garantissant l'optimisation de la performance de conduite. Plusieurs analyses ont été menées afin de déterminer si le degré d'immersion était un prédicteur positif de la performance de conduite.

***Vitesse moyenne et écart type moyen de la vitesse**

Notre hypothèse était que la hausse du degré d'immersion était un prédicteur négatif de l'écart type de la vitesse. Cette hypothèse a été validée puisque l'on a pu mettre en évidence que les participants placés dans le simulateur dynamique ont eu un écart type de la vitesse en moyenne plus faible que sur le simulateur statique. Il apparaît donc qu'en termes d'écart type de vitesse la performance de conduite soit plus élevée sur le simulateur dynamique que sur le simulateur statique. Ceci peut s'expliquer par l'existence d'un retour inertiel (géré par des lois de mouvement plus ou moins réalistes) qui semble avoir positivement impacté le comportement de l'automobiliste. Il est envisageable de penser que pour se prémunir d'amplitudes de mouvements trop importantes du type tangage, roulis ou lacet, pouvant accentuer le mal du simulateur, les participants aient préféré optimiser leurs accélérations longitudinale ou latérale qui seules sont à l'origine de mouvements sur le simulateur dynamique. Il est à noter que la hausse du degré d'immersion n'a eu aucun effet significatif sur la vitesse moyenne puisque contrairement à ce qui était attendu la

vitesse moyenne n'a pas été significativement moins élevée sur le simulateur dynamique que sur le simulateur statique.

***Position latérale moyenne et écart type moyen de la position latérale**

La hausse du degré d'immersion a entraîné une baisse de la position latérale et de l'écart type de la position latérale. Les participants ont roulé plus au centre de la voie sur le simulateur dynamique que sur le simulateur statique, cherchant probablement à adopter un comportement de conduite leur évitant de faire trop d'écarts du volant. Il est raisonnable de penser que de par la présence des mouvements de tangage et de roulis, cette stratégie de positionnement visait à se prémunir du mal du simulateur. Cette stratégie semble avoir été payante puisque cela leur a permis d'optimiser leur performance de conduite. On a en effet relevé que les automobilistes avaient eu des écarts types de la position latérale moins élevés sur le simulateur dynamique que sur le simulateur statique.

Il a également été mis en évidence que sur le simulateur dynamique uniquement, la baisse du richesse du décor a amené les participants à rouler davantage au centre de la voie diminuant par la même occasion leur écart type de la position latérale. Une fois encore cette stratégie de positionnement semble attester d'un souci de se prémunir des amplitudes de mouvements trop importantes du type tangage, roulis ou lacet. Il n'en reste pas moins que ce comportement de conduite ne semble pas relever d'un comportement très réaliste puisque ce comportement n'est observé que dans les scénarios où la richesse du décor est altéré. Cet effet n'étant pas observé sur le simulateur statique il apparaît que le réalisme du décor est considérablement assujéti au réalisme inertiel sur le simulateur dynamique ce qui doit nous amener à rester prudent quant à la préconisation qui consisterait à recommander l'usage systématique d'un simulateur dynamique pour étude qui chercherait à augmenter le réalisme de l'expérience.

En outre il apparaît que les indicateurs comportementaux de performance de vitesse, bien qu'ayant été rapportés comme évoluant dans des marges de régulations nominales donc à priori réalistes, ne sont pas forcément gages d'un engagement à coup sûr témoignant d'une plus grande expérience subjective de présence.

IX.4.3 Données physiologiques

*** Conductance électrodermale EDA**

La hausse de l'immersion a engendré une hausse de la conductance électrodermale moyenne et de l'écart type de la conductance électrodermale moyenne. L'expérimentation menée sur simulateur de conduite dynamique a engendré un stress physiologique plus élevé que sur le simulateur statique. Ceci

pouvant s'expliquer de par l'existence de secousses ou mouvements plus ou moins abruptes inhérents à la simulation à base mobile qui n'existent pas en simulations base fixe. En outre cet effet est accentué en condition de visibilité dégradée, puisque lorsque l'on place les automobilistes en situation de visibilité dégradée une fois encore la conductance électrodermale moyenne observée est plus élevée sur le simulateur dynamique que sur le simulateur statique. En outre on a mis en évidence que la baisse de visibilité entraîne une hausse significative de la conductance électrodermale moyenne et ce, uniquement sur simulateur dynamique. Cette hausse de stress nous semble provenir du fait que sur le simulateur dynamique la baisse de visibilité accentue le ressenti et la survenue de mouvements liés aux accélérations. Cela induirait chez le participant une hausse d'une certaine tension liée au fait qu'un évènement serait plus difficile à identifier ou à gérer. Cela rendrait la tâche de conduite plus complexe en termes de vigilance et potentiellement plus désagréable en termes de secousses intempestives liées à des situations d'évitement ou des manques d'anticipation du fait d'une moindre visibilité.

*** Rythme cardiaque**

La hausse du degré d'immersion a engendré une hausse du rythme cardiaque et de l'écart type moyen de la fréquence cardiaque, ce qui une fois encore signifierait que les participants étaient plus stressés dans le simulateur dynamique que sur le simulateur statique.

Plus particulièrement, on a montré que cet effet était accentué dans la condition de décor moyennement réaliste. Enfin on a montré que la hausse du degré d'immersion en condition de décor peu réaliste a engendré une hausse de l'écart type moyen de la fréquence cardiaque. Il est intéressant de noter que la hausse de l'éveil physiologique dans le simulateur dynamique est associée à une hausse de la présence globale perçue. Ce résultat est différent de ce qui a été observée respectivement dans chaque simulateur. On rappelle effectivement que dans chacune des expériences (2 et 3), la hausse de l'éveil physiologique observée suite aux modulations de nos deux variables indépendantes qu'étaient la richesse du décor et le degré de visibilité de la route était corrélée négativement au sentiment de présence. Il semble donc que les caractéristiques immersives peuvent tantôt induire une hausse de la présence et tantôt une baisse. La hausse du stress occasionnée par le degré d'immersion global sur le simulateur dynamique ne semble donc pas de la même nature que celle observée sur le simulateur statique. On remarque que les amplitudes d'éveil physiologique sur le simulateur dynamique sont plus élevées que celles sur le simulateur statique. Il semble qu'il y ait un offset émotionnel qui se surajoute sur le simulateur dynamique.

X DISCUSSION GENERALE

L'objectif de la thèse était de développer des indicateurs comportementaux de la présence afin d'évaluer la validité psychologique des simulateurs de conduite. Pour ce faire nous avons choisi de nous appuyer sur un modèle (MEC-SPQ) qui présentait l'intérêt de caractériser l'émergence du sentiment de présence comme un processus dynamique.

Le sentiment de présence est particulièrement difficile à mesurer puisqu'il nécessite presque toujours le recours à une mesure subjective « offline » qui par définition est limitée puisque ne reposant que sur la plus ou moins juste propension d'un participant à jauger un état qu'il n'a par définition que rarement l'occasion d'évaluer. Ceci n'est évidemment pas le seul fait de la mesure de la présence mais plus largement celui des mesures par questionnaire. Il n'en reste pas moins que la question de la présence caricaturalement résumable à : « êtes-vous présent dans cet univers virtuel ? » est une question qui ne se pose quasi exclusivement qu'en laboratoire et qui n'admet aucune correspondance dans la vie tous les jours. Ainsi donc, la principale difficulté du questionnaire de présence est sa propension à réveiller chez un participant la conscience d'un état de présence que probablement il ignore dans sa matrice de référence qu'est le monde réel. Cela signifie que lorsque l'on demande à un participant de jauger de son état de présence par rapport à un référentiel réel (via des questions concernant son implication dans la tâche, ou encore sa sensation d'être physiquement impliqué dans la réalité) se pose la question suivante : « présent par rapport à quoi ? ». On pourrait reformuler et dire « suis-je présent dans cette expérience virtuelle comme dans la réalité ? » et à cette question il nous apparaît que cela est presque impossible de répondre. En effet, il y a une certaine caducité de la présence à s'opérationnaliser au travers de l'usage d'un seul questionnaire. Finalement le problème est que l'on demande à un individu de jauger son état de présence dans un univers virtuel par rapport à une situation réelle, à priori analogue, mais pour laquelle cela nécessiterait de s'être au moins déjà posé la question du degré de conscience de la tâche réalisée. Cette réflexion a d'ailleurs déjà été posée par Slater (2004) soulignant la caducité du questionnaire de présence à mesurer ce qu'il cherche à établir.

En définitive la mesure subjective n'est pas inintéressante puisqu'elle a le mérite d'évaluer des composantes de l'activité cognitive en lien avec la réalisation de la tâche dans l'univers virtuel mais elle échoue à statuer sur la validité absolue, et à considérer le monde virtuel comme le corrélat du monde réel, c'est à dire qu'à la question « est-ce que je me comporte comme dans la réalité » aucune réponse légitime ne semble pouvoir être donnée puisque ne reposant pas sur une approche comparative sensée. Il est vrai pourtant que des chercheurs ont mené des campagnes de tests à la fois sur simulateur et sur route, toutefois si dans chacun des cas un questionnaire de présence était administré, le corrélat réel n'était qu'une occurrence expérimentale par définition encadrée par un protocole de recherche. Il nous a donc

semblé que si nous devions statuer sur cette question de la validité cela ne pourrait porter que sur la validité relative et non absolue.

Ainsi nous avons choisi, au travers de nos expérimentations de développer tout un panel de mesures comportementales, physiologiques présentant l'intérêt d'être « on-line » possiblement corrélables entre-elles et à interroger par rapport aux mesures subjectives de présence « off-line ». Ce choix méthodologique a été décidé à la suite de la première expérience. En outre cette démarche s'inscrit dans les plus récentes analyses bibliographiques réalisées sur la façon la plus adéquate de mesurer la présence et de la considérer comme un concept multifactoriel (*Van Baren, & IJsselsteijn, 2004*)

X.1 EXPERIMENTATION 1 : LES LIMITES DES QUESTIONNAIRES DE PRESENCE

Dans cette première campagne expérimentale, nous cherchions à évaluer si le questionnaire de présence reflétait ce que le comportement de conduite attestait. Aucune mesure physiologique n'avait été alors envisagée. La conclusion a été que les conditions expérimentales n'ont eu d'impact significatif que sur le comportement et pas sur le retour subjectif des participants sur leur état de présence. Si des explications quant à la nature plus ou moins automatisée de la tâche induite par l'expérience, et peut-être des situations expérimentales pas assez discriminantes du point de vue cognitif ont été apportées, il ne restait pas moins que la seule appréciation du sentiment de présence échouait à caractériser différents patterns de comportements. Ainsi notre objectif de caractériser la présence du point de vue comportemental s'est vu confronté à une première difficulté qui était que nous ne pouvions pas caractériser la variation de l'état de présence pour des situations cognitives non significativement différentes.

A ce stade plusieurs questions se sont posées. La première était de savoir si finalement les participants avaient « jouer le jeu » mais en définitive n'avaient pas été conscients d'une différence dans leur interaction comportementale et ne l'avait donc pas rapportée dans leur score de présence. La deuxième question découlant de la première, était qu'ils en avaient peut être été conscients mais que cela n'avait pas influencé leur perception de leur état de présence. Or quand l'on regarde les conditions expérimentales données, et que l'on considère qu'ils étaient placés soit en double tâche ou non, et/ou avec du trafic ou non, il semble raisonnable de penser que ces conditions ont généré des différences de comportement qu'ils ont certainement perçues mais qui n'ont pas influencés leur degré de présence. Leurs scores ayant été assez élevés nous nous sommes dit que sans le savoir ils n'avaient vraisemblablement pas apprécié leur état de présence mais leur degré d'immersion, puisqu'en définitive la situation de conduite proposée, c'est à dire sur un circuit de course automobile, ne correspondait à aucune expérience réelle. La troisième question était de se demander si la question de la présence était pertinente dans l'activité de conduite automobile. En effet dans bon nombre de situations, l'activité automobile apparaît comme hautement automatisée et donc hermétique à la présence, puisqu'en définitive le comportement de conduite et ses modulations ne sont pas accessibles à la conscience. A l'issue de la première expérience, nous avons décidé de prendre d'autres indicateurs comportementaux que ceux liés à l'activité de conduite. Deux indicateurs physiologiques en lien avec l'éveil physiologique et le stress ont été utilisés. Il s'agissait dans un premier temps de statuer sur la légitimité à accorder à nos résultats de présence avérés par le questionnaire. Par la suite nous souhaitons également évaluer dans quelle mesure nos conditions expérimentales étaient à même d'induire

des patterns d'allocations de ressources attentionnelles différents et donc comme le prédit le modèle de Wirth et ses collègues, des degrés de présence différents. Les conditions expérimentales ont été changées et nous avons choisi de moduler la visibilité de la route et la richesse du décor afin d'induire différentes perceptions de l'environnement virtuel. En outre nous avons réalisé la deuxième expérience sur un simulateur de plus grande immersion que le premier ayant un rendu visuel plus abouti en termes de textures et de choix de décors. Afin d'évaluer le réalisme accordé à l'environnement virtuel élément que nous n'avons pas pu évaluer au travers du questionnaire SPQ et qui nous a fait défaut pour réellement apprécié si nos précédents participants avaient « cru » à leur expérience virtuelle, un autre questionnaire de présence l'IPQ a été sélectionné. En outre, le questionnaire IPQ présentait l'avantage d'avoir une rubrique « Spatial presence » analogue à celle du SPQ. Il est intéressant de noter que certains auteurs ont déjà tenté d'utiliser le SPQ et se sont également confrontés à des limites liées à la sensibilité du questionnaire, tout en actant le caractère prometteur de l'outil en lui même (Ratan & Hasler, 2009).

X.2 EXPERIMENTATION 2 : CARACTERISATION D'INDICATEURS COMPORTEMENTAUX DE LA PRESENCE SUR SIMULATEUR STATIQUE

L'objectif de cette deuxième campagne de mesure était donc de caractériser la présence à la fois par des indicateurs comportementaux de conduite comme dans l'expérience 1 mais aussi par des indicateurs physiologiques.

X.2.1 Le questionnaire de présence : le problème de la mesure qui modifie en elle même modifie ce qu'elle cherche à déterminer

Bien que nous n'ayons relevé qu'assez peu d'effets significatifs sur l'ensemble des items évalués, les questionnaires de présence semblent avoir été plus sensibles aux conditions expérimentales que dans l'expérience 1, ce qui tend à prouver que le croisement de nos variables indépendantes a pu générer cette fois-ci des situations de conduites différentes en matière de sollicitation attentionnelle et donc in fine de présence.

Il est intéressant de noter que le SPQ et l'IPQ ne donnent pas tout à fait les mêmes tendances en termes de résultats. Notamment sur l'item SPPA (Spatial Presence Possible Actions) comparable à l'item G (sensation d'être là) de l'IPQ. On remarque que les participants se sont dits plus présents sous l'item SPPA en condition de visibilité parfaite qu'en condition de visibilité dégradée alors que sous l'item G c'est le contraire. Il apparaît donc que les questionnaires de présence présentent un problème apparent de fiabilité puisque pour des rubriques sensées évaluer les mêmes dimensions nous obtenons des résultats différents. Ce problème n'est pas nouveau et a déjà été souligné dans la littérature. En définitive pouvons-nous véritablement comparer ces 2 questionnaires ? La réponse n'est pas triviale puisque même si l'on a randomisé l'ordre des questions pour l'administration des 2 questionnaires, il n'en reste pas moins qu'on a posé à chaque participant plusieurs fois la même question et que cela pourrait expliquer la forte variabilité en termes de résultats. En effet, les deux questionnaires présentent des formulations qui leur sont propres mais relativement assez proches, ce qui pourrait avoir été perçu par les participants comme une redondance dans la façon de les interroger sur leur parcours d'utilisateur. Rappelons que sur l'ensemble des 6 scénarios, chaque participant devait à chaque fois répondre aux questions du SPQ, de l'IPQ et du PANAS. Ainsi donc, le manque de congruence de nos résultats sur l'ensemble des 2 questionnaires semble davantage à questionner sur cet aspect d'ennui, induit par une session de questionnaire

probablement trop longue, plutôt que sur la fiabilité des questionnaires en eux mêmes. Le mode d'administration est donc probablement à l'origine de ses disparités. On souligne donc encore une fois la difficulté à appréhender la présence du point de vue du retour subjectif.

Le modèle SPQ a néanmoins été validé par l'expérience et l'ensemble des liens de causalité exposés dans la littérature ont tous été retrouvés par nos analyses de régression.

X.2.2 La valence émotionnelle du phénomène de présence

L'utilisation du questionnaire de valence des émotions, le PANAS, s'est avérée intéressante puisque l'on a pu montrer que quel que soit le questionnaire de présence utilisé, que le sentiment de présence s'est révélé négativement corrélé aux émotions négatives. Ce résultat semble donc prouver que la présence est bien une expérience émotionnelle avec une véritable valence. Dans notre expérience nos résultats ont montré que c'est la condition de visibilité dégradée qui a été davantage marquée par une hausse des émotions négatives. Ce résultat est intéressant puisqu'à priori dans le modèle SPQ n'interviennent que des dimensions cognitives comme l'attention et la construction d'une représentation mentale, il n'est nullement question de la valence émotionnelle de l'expérience immersive. Or si l'on se fie au modèle, plus l'on est engagé dans la tâche plus l'on se construit une représentation mentale de l'environnement traversé et donc plus l'on est à même de développer un sentiment élevé de présence. Force est de constater que c'est exactement le contraire qui est déclaré à travers la dimension SPPA. Ceci pourrait s'expliquer dans la mesure où la baisse de visibilité a certainement requis un plus grand degré d'attention pour la capture attentionnelle d'éléments pertinents afin d'assurer un maintien de la trajectoire efficient mais a probablement occasionné une gêne ou une fatigue visuelle à l'origine de ce décrochage.

La présence est abordée dans la littérature comme un sentiment et non une émotion. Ce qui signifie à priori que la présence est un phénomène qui se construit dans le temps et qui se stabilise sur la base d'une conscientisation à la différence d'une émotion qui est plus fugace et qui échappe au prisme de la conscience. Or nous constatons que la présence repose sur des émotions avec une certaine valence, et même si ce n'est pas le propos de cette thèse il semble important de souligner l'idée que l'émergence du sentiment de présence devrait intégrer cette question de la valence émotionnelle de l'expérience immersive proposée. Plusieurs auteurs se sont déjà intéressés à cette question en essayant d'induire de la présence par rapport à l'expression d'une émotion le plus souvent négative induite par l'expérience (Baños et al., 2008 ; Malbos et al., 2012)

X.2.3 La performance de conduite : observable nécessaire à considérer mais pas suffisante pour constituer un indicateur comportemental de la présence

Dans notre analyse de la performance de conduite, nous avons mis en évidence des corrélations négatives entre la rubrique de l'attention du SPQ avec l'écart type de la vitesse, mais aussi entre l'attention et l'écart type de la position latérale, SPPA et l'écart type de la position latérale. L'ensemble de ces résultats tendent à démontrer que plus l'on est présent, engagé dans la tâche plus cela se traduit par un comportement de conduite efficient correspondant à un niveau de performance analogue à celui que l'on pourrait observer dans la réalité pour des conditions de conduite similaires. En effet la capacité d'un participant à avoir une trajectoire plus ou moins rectiligne et sa capacité à moduler sa vitesse de manière relativement souple en simulateur apparaissent comme des éléments caractéristiques d'un comportement réaliste. Toutefois il est clair que l'on pourrait tout aussi bien attribuer cette performance à autre chose que le seul fait de se croire dans une mère copie de la réalité. Cela pourrait tout aussi bien être révélateur d'un fort degré d'adhésion à l'expérience virtuelle de conduite mais sur la base d'un rapport plus ludique que sérieux et qui n'aurait dans ce cas rien à voir avec l'idée de se comporter comme dans la réalité. De même ce comportement à priori nominal pourrait également être lié au contexte même d'une expérimentation et pourrait résulter d'un biais de complaisance avec l'expérimentateur ou encore avec l'idée de satisfaire aux exigences des chercheurs qui administrent le test. Ainsi donc pour éviter toutes ces considérations il faudrait s'assurer que ce qui est évalué derrière le concept de présence par les participants ne revêt pas autre chose que leur propension à se comporter comme dans la réalité. Il nous apparaît qu'une dimension comme le degré ludique pourrait également être investiguée dans le MEC-modèle comme jauge d'appréciation du caractère sérieux de l'expérience qui participerait à affiner le crédit à accorder à ce que l'on cherche à déterminer comme présence. L'ensemble de cette réflexion semble étayée par le fait que l'on a trouvé une corrélation positive entre le réalisme et l'écart type de la vitesse, nous apparaissant dire autre chose que ce que semblait assez simplement vouloir nous dire le jeu de résultats précédemment cité. En effet une hausse du réalisme perçu associée avec une baisse de la performance, c'est à dire ici une hausse de l'écart type de la vitesse, pourrait laisser transparaître que l'expérience virtuelle ait été vécue comme davantage ludique que sérieuse. La prise de risque accentuée par une hausse de la variabilité de la vitesse semble attester de cette idée que les participants ne se sont pas comportés comme dans la réalité. Tout du moins si les écarts de la position latérale dans la voie attestent d'un comportement alerte approximable à celui que l'on pourrait trouver dans la réalité, la forte variabilité de la vitesse semble nuancer notre conclusion précédente nous amenant à dire que les seules corrélations entre performance de conduite et présence ne suffisent pas pour

considérer les indicateurs de performance de conduite comme des indicateurs de présence fiable à 100 %. En définitive, ils constituent à nos yeux une condition nécessaire à vérifier pour attester de la présence sans que cela soit suffisant pour véritablement statuer. Nous pensons qu'il faudrait pouvoir évaluer la dimension ludique de l'expérience virtuelle pour pouvoir arbitrer ces observations. La question de la présence comme gage d'une performance n'est pas nouvelle et a toujours été au cœur des préoccupations des chercheurs en réalité virtuelle (Barfield et al., 1995 ; Kalawsky, 2000).

X.2.4 L'éveil physiologique : le cône d'ombre de la présence

La présence est nous l'avons vu un phénomène que l'on mesure à posteriori, sans véritablement pouvoir le mesurer « on line ». La seule façon de pouvoir appréhender le phénomène de présence comme un phénomène dynamique mesurable au cours du temps a été de considérer que la présence devait être marquée indirectement par des fluctuations de l'éveil physiologique que l'on a choisi de caractériser par des fluctuations de l'activité électrodermale et de la variabilité du rythme cardiaque. Concrètement notre idée était de dire que plus l'on est présent plus notre activité électrodermale est élevée et plus notre variabilité du rythme cardiaque est faible. Sur ce dernier indicateur il y aurait beaucoup à dire. En effet les fluctuations du rythme cardiaque sont on le sait modulées par les centres sympathiques et parasympathiques. Or s'il est admis que lorsque l'on est stressé au sens contraint physiologiquement parlant on a une baisse de l'activité électrodermale, il n'est pas trivial voire peut être erroné de dire que la présence est en tout temps associée à une hausse de stress. Nous répondrons à cette remarque en disant que c'est la raison pour laquelle nous avons choisi de manipuler le degré de visibilité de la route puisque nous pensions que de cette manière nous nous assurerions de générer un certain degré de stress légitimement corrélable à une prise de conscience accrue de la complexité supplémentaire de la tâche de conduite, qui si véritablement considérée, devait se traduire par une hausse du stress et donc de la présence.

L'analyse des mesures physiologiques pose plus de questions qu'elle n'en résout véritablement. Et même si des auteurs semblent présenter les mesures physiologiques comme des mesures objectives de la présence, il apparaît que la validité de leur assertion souffre de reposer sur un protocole expérimental pas facilement transposable à d'autres situations plus complexes du monde réel que l'on souhaiterait idéalement tester en environnement virtuel (Meehan, 2001). Contrairement à ce qui était attendu nous obtenons des résultats qui ne vont pas dans la direction attendue. L'activité électrodermale (EDA) est un indicateur intéressant de l'éveil physiologique corrélable à la présence mais qui semble dire que plus les participants ont eu l'impression d'être là (Rubrique G de l'IPQ) et une hausse de la sensation de réalisme (Rubrique Realism de l'IPQ), plus leur activité électrodermale moyenne a baissé. Ce résultat est d'ailleurs à mettre en relation avec le

fait que plus les participants ont eu des émotions positives plus ils ont eu un niveau d'activité électrodermale faible. La présence dans cette deuxième expérimentation semble avoir été associée à une expérience revêtant un seuil d'éveil physiologique moins élevé que prévu. Ceci étant dit nous interprétons ce résultat par rapport au fait qu'il existait des situations de conduite plus stressantes que d'autres (avec la condition de visibilité dégradée) et que donc selon toute vraisemblance les participants se sont déclarés plus présents dans les scénarios non pas où ils étaient moins éveillés mais ceux où ils étaient le moins stressés. Ce résultat est intéressant puisqu'il semble que les conditions de visibilité dégradée aient été perçues par les participants comme étant probablement plus gênantes que réalistes. Elles ont également pu être vécues comme plus fatigantes de part le flux visuel aussi plus important généré par une image représentant une pluie qui tombait tout au long du trajet.

La mesure de la variabilité du rythme cardiaque n'a pas été concluante, des résultats différents semblent se contredire lorsque l'on regarde le domaine temporel avec le domaine fréquentiel. Il semble qu'il aurait été préférable de faire une mesure de la variabilité du rythme cardiaque en lien avec des événements référencés précisément au cours du temps comme cela peut déjà avoir été fait dans la littérature (Guger et al., 2004). Il est toutefois à relever que faire de l'« event related » avec un scénario de conduite qui ne doit pas être trop long et en même temps donner à voir des situations de conduite réaliste dans leur dynamique contraint fortement la façon de penser l'utilisation d'une mesure comme la HRV puisqu'elle est caractérisée par des temps de latence d'activité physiologique proches de 5min. (Bernardi et al., 1998)

L'expérience 2 nous a donc permis de valider en partie un protocole expérimental basé sur un ensemble de mesures subjectives, comportementales et physiologiques, à même d'interroger le concept de présence comme un phénomène multifactoriel. Le modèle MEC-SPQ a par ailleurs été validé et nous avons souligné les possibles améliorations qui pourraient y être apportées pour pouvoir davantage l'opérationnaliser. Il a notamment été mis l'accent sur l'implémentation de la question de la valence émotionnelle de l'expérience de présence et de la nécessité de procéder à l'évaluation de la dimension potentiellement ludique de la présence. Dans la suite de notre travail nous avons souhaité évaluer la robustesse de notre approche expérimentale en procédant à la duplication de notre expérience 2, modulo quelques spécificités, sur un simulateur de plus grande immersion. L'idée était que la présence semble être sous tendue par l'immersion, et que si cette dernière n'est pas suffisante pour garantir à coup sûr la présence elle n'en est pas moins nécessaire. C'est la raison pour laquelle nous avons conçu une troisième campagne de test sur simulateur sur la base de ce qui a été déjà fait au cours de l'expérience 2.

X.3 EXPERIMENTATION 3 : CARACTERISATION D'INDICATEURS COMPORTEMENTAUX DE LA PRESENCE SUR SIMULATEUR DYNAMIQUE

L'objectif de cette troisième expérimentation était de montrer que l'immersion est prédicteur de la présence et plus largement de valider la robustesse de notre protocole de mesure.

Les premières considérations à exposer, sans détours, sont que dans cette troisième expérimentation, nous ne sommes pas parvenus à reproduire l'expérimentation 2 sur le simulateur dynamique de PSA. Plusieurs raisons d'ordre méthodologique nous y ont forcé. La première d'entre elles est que le décor 1, constituant le décor avec un rendu visuel le plus élevé en termes de qualité d'image rendait malade les participants sur le simulateur. Les accélérations et vitesses engendrées par la topologie du terrain étaient à l'origine de ce mal du simulateur. En outre le temps de passation pour chaque participant a dû être revu à la baisse, puisqu'indépendamment du premier problème abordé précédemment, il s'est avéré que le temps induit par la réalisation de 6 scénarios de conduite était trop important et capable lui aussi de générer chez des participants un mal du simulateur. Une autre difficulté est que nous n'avons pas pu obtenir le matériel nécessaire pour faire une mesure de la variabilité du rythme cardiaque, réduisant nos variables physiologiques au recueil de l'activité électrodermale et du rythme cardiaque.

Considérant l'ensemble de ces biais, nous nous efforcerons de présenter aussi objectivement que possibles nos résultats tout en restant prudent avec leur possible mise en perspective avec l'expérience 2.

X.3.1 Le questionnaire de présence : baisse de sensibilité possiblement imputable à l'effet de plus grande immersion du simulateur dynamique

De manière générale, on relève que les questionnaires de présence se sont révélés assez peu sensibles aux conditions expérimentales. Aucun effet n'est relaté pour le SPQ, alors que l'on relève un effet de la visibilité sur le réalisme pour l'IPQ. Les participants semblent avoir éprouvé une impression de réalisme plus élevée en condition de visibilité parfaite qu'en condition de visibilité dégradée. La première réflexion que l'on peut avoir quant à ces résultats est que l'expérience sur le simulateur dynamique a peut-être créé un offset de présence masquant par la même

occasion les potentiels effets de nos variables expérimentales. C'est à dire que quelque soit la condition expérimentale dans laquelle elles étaient placées, les personnes sur simulateur dynamique se sont déclarées globalement présentes. Ceci peut s'expliquer par le fait que contrairement au simulateur statique, il est présenté aux participants l'existence de risques inhérents à l'utilisation d'un tel dispositif technique et l'existence d'un bouton poussoir d'arrêt d'urgence accessible depuis le tableau de bord. L'existence de risques liés à l'utilisation du simulateur dynamique est un biais expérimental par rapport au simulateur statique. En effet bon nombre de risques sont présentés aux participants avant de participer à l'expérimentation à savoir par exemple le risque de chute de la hauteur de la nacelle, ou encore que la nacelle se fige au milieu de la fosse rendant impossible au conducteur la possibilité de sortir du simulateur. Une autre question se pose, bien que les scores moyens de présence aient été assez élevés, comment pouvons-nous les interpréter. En effet il n'y a pas de bouton poussoir d'urgence dans nos voitures, les accélérations parfois brutales et intempestives de la cabine liées aux limites du simulateur peuvent nous amener à nous demander si une fois encore la présence avérée par les questionnaires est bien celle que l'on cherchait à mesurer. On pourrait tout aussi bien se dire que finalement l'ensemble de ses biais aurait dû amener les personnes à déclarer des scores de présence relativement plus faibles que ceux observés. Nous pensons que si les sujets ont relaté un certain degré de présence, c'est davantage sur la forme challengeante et stressante de l'expérience virtuelle de conduite, plutôt que sur le fond ou la nature même de la tâche de conduite réalisée. Il apparaîtrait donc que si présence il y a eu sur simulateur dynamique elle ne reposait pas sur les mêmes éléments que dans l'expérience 2. Un paradoxe apparaît donc, puisqu' en voulant utiliser un dispositif de plus forte immersion nous avons créé un biais qui semble avoir changé la nature même de l'expérience virtuelle proposée sur le simulateur la rendant presque incomparable à celle menée sur le simulateur statique au cours de la deuxième expérimentation. Enfin nous constatons qu'une fois encore les liens de causalité du modèle MEC-SPQ sont globalement retrouvés. La littérature semble attester que l'immersion est bien un prédicteur de la présence (Slater & Wilbur, 1997) mais expose aussi qu'il existe des situations paradoxales où des environnements de faible immersion peuvent parvenir à générer une présence accrue (Biocca, 2002). La présence serait donc à appréhender au carrefour de plusieurs composantes que seraient le réel, le virtuel et l'imaginaire. La présence n'est pas une fonction directe de l'immersion mais une fonction indirecte médiatisée par des composantes cognitives qui sous tendent nos représentations mentales.

X.3.2 La présence sous simulateur dynamique : expérience émotionnelle plus marquée

L'utilisation du PANAS dans cette troisième expérimentation a révélé un effet non observé sur le simulateur statique de l'expérience 2. En effet les participants soumis à une tâche de conduite avec une visibilité détériorée se sont révélés avoir moins d'émotions positives que ceux placés avec une condition de visibilité parfaite. Cela souligne le caractère plus anxiogène de l'expérience sur simulateur dynamique. En outre, comme dans l'expérience 2, nous avons retrouvé les corrélations négatives entre les items de la dimension NA du PANAS avec ceux de l'IPQ et du SPQ mais nous obtenons également des corrélations positives entre la dimension PA du PANAS avec les items du SPQ et IPQ. Cela tend à montrer que l'expérience de présence sous simulateur si elle a eu lieu est davantage « sollicitante » sur les émotions, balayant un plus large spectre de valence des émotions. En définitive, on constate que comme dans l'expérience 2 des émotions négatives ont été ressenties mais dans des proportions plus importantes. La présence était davantage caractérisée par une baisse des émotions négatives dans l'expérience 2, alors que cela est plus complexe dans l'expérience 3 puisqu'elle semble reposer également sur une gamme d'émotions positives. L'utilisation du PANAS pour jauger de la valence émotionnel d'une tâche de conduite a déjà été utilisée dans certaines études et s'est révélée être une mesure pertinente pour caractériser la congruence émotionnelle des participants placés dans des situations de conduites virtuelles à risque analogues à celles de la réalité (Kwon et Oh, 2013).

X.3.3 La performance de conduite : indicateur moins sensible à la présence sur le simulateur dynamique

Il est intéressant de relever que contrairement à l'expérience 2 les participants sur le simulateur dynamique ont eu un effet marqué de la visibilité sur l'écart type de la vitesse. Il apparaît que seulement sur le simulateur dynamique, les participants ont eu une fluctuation de la vitesse plus importante en condition de visibilité parfaite qu'en condition de visibilité dégradée. Il apparaît que ceci pourrait avoir été une stratégie des conducteurs propre à l'exercice d'une conduite sur un simulateur qui ne l'oublions pas traduit concrètement les accélérations et décélérations de la voiture par des mouvements bien réels et parfois abruptes de la cabine ce qui n'est pas le cas sur le simulateur statique. Néanmoins on retrouve le même résultat que dans l'expérience 2 concernant la baisse de l'écart type de la position latérale dans la voie en condition de visibilité dégradée. Et de même la stratégie de se positionner davantage à droite

dans la voie en condition de mauvaise visibilité est retrouvée. Une véritable différence apparaît par contre entre les expériences 2 et 3 sur l'existence de corrélations négatives entre les indicateurs de performance de conduite (SDLP et SD vitesse) exclusivement observée au cours de l'expérience 2. Ceci peut s'expliquer encore une fois à cause du biais immersif induit par le simulateur dynamique par rapport au simulateur statique. La performance de conduite n'est pas ici corrélée à la présence puisque cette dernière ne repose pas sur la sémantique de la tâche mais plus sur le côté « parc d'attraction » de l'expérience sur le simulateur dynamique. Les patterns analogues de performance de conduite pourtant observés dans les différentes conditions expérimentales entre les 2 expériences ne doivent pas nous faire oublier que pour un même effet il peut y avoir plusieurs causes. Sur le simulateur dynamique le moindre écart de volant occasionne des vibrations et des secousses de la cabine qui de facto contraignent l'utilisateur à adopter un comportement de conduite nominal, ce qui ne veut pas forcément dire qu'il rentre dans l'environnement virtuel au sens de se comporter comme dans la réalité. La question du mal du simulateur n'est pas le cœur d'étude de notre propos mais il est intéressant de noter que des études se sont intéressées aux liens qui pouvaient y avoir entre la présence et le mal du simulateur (Nichols et al., 2000 ; Lin et al., 2002). Il en ressort que le mal du simulateur pourrait être considéré comme une rupture de la présence liée à une perception de la nature imparfaite du mouvement des informations virtuellement reproduites en environnement virtuel. Toutefois comme pour la présence, le mal du simulateur est multifactoriel, et si les modalités sensorielles au cœur de la perception du mouvement jouent un rôle majeur dans sa propension à se développer, d'autres facteurs comme l'âge et le degré d'implication dans la tâche semblent moduler son intensité (Seay et al., 2001).

X.3.4 La conductance électrodermale : indicateur moins sensible à la présence sur le simulateur dynamique

On ne retrouve pas dans l'expérience 3 tout à fait le même résultat que dans l'expérience 2. En effet si des corrélations négatives avaient été trouvées entre l'activité électrodermale (EDA) et les scores de présence, on relève que dans l'expérience 3 seul le réalisme est négativement corrélé à l'EDA. De manière assez intéressante on retrouve néanmoins les mêmes corrélations positives entre la moyenne du rythme cardiaque et les items de présence du SPQ et IPQ. Encore une fois, ces résultats sur l'EDA tendent à montrer que l'expérience sous simulateur dynamique a rajouté un offset d'éveil physiologique qui semble avoir masqué les fluctuations que devaient induire nos différentes conditions expérimentales. Ce dernier point corrobore l'idée que l'utilisation de l'EDA en psychologie expérimentale reste très contraignante du fait des nombreux biais qui peuvent être induits par l'expérience en elle-même (Prokasy, 2012). De même, l'analyse du rythme cardiaque nous semble à

prendre avec beaucoup de recul sachant d'une part tous les biais induits par l'expérience et d'autre part que la littérature souligne le fait que les modulations de l'activité sympathique et parasympathique ne sont réellement possiblement interrogeables qu'au travers de l'analyse de la variabilité du rythme cardiaque (Appelhans & Luecken, 2006)

Il ressort que l'expérience sous simulateur dynamique n'a pas généré en tout point les mêmes patterns de résultats ou en tout cas semble avoir proposé une expérience de présence avec des effets analogues dans certaines situations mais ne procédant pas de la même façon. Nous concluons que l'étude comparative de la présence entre 2 simulateurs aussi différents que l'étaient ceux de la deuxième et la troisième expérience est compliquée et doit être faite en contrôlant davantage les conditions expérimentales. Il aurait fallu faire passer les mêmes sujets sur les 2 simulateurs et randomiser l'ordre de passage pour s'affranchir de l'ensemble des biais que l'on a pu constater dans cette troisième expérience. Il en ressort tout de même que l'existence du risque de chute ou d'arrêt inopiné de la nacelle dans le simulateur dynamique touchant à l'intégrité des participants au cours du test pose un véritable problème dès lors que l'on souhaite jauger des différences de comportement en termes de présence d'un simulateur à l'autre. Ceci étant dit nous allons tout de même exposée dans cette dernière partie les résultats de notre analyse comparative des 2 simulateurs, puisque si nous l'avons compris elle doit être abordée avec beaucoup de prudence elle pourrait au minimum nous aider à mieux comprendre les spécificités propres à chacun des simulateurs sans forcément statuer sur celui qui est plus à même d'optimiser la présence.

X.4 BILAN DE L'ETUDE COMPARATIVE DE LA PRESENCE ENTRE LES SIMULATEURS STATIQUE ET DYNAMIQUE

X.4.1 L'investigation subjective de la présence : de la symptomatologie au diagnostic

L'étude comparative des données subjectives de présence tend à prouver que la présence du point de vue de l'IPQ a été jugée incontestablement plus importante sur simulateur dynamique que sur simulateur statique. Ceci étant dit aucun effet significatif de l'immersion n'a été relaté sur la rubrique du réalisme de l'IPQ. Cette absence d'effet est révélateur de ce que l'on a exposé auparavant et pose donc clairement la question que si présence accrue il y a sur le simulateur dynamique, sur quoi repose t-elle si ce n'est pas sur une plus forte sensation de réalisme. Il est aussi important de noter qu'aucun effet significatif de l'immersion n'a été rapporté avec le questionnaire de présence SPQ. Une fois encore il apparaît que le questionnaire SPQ bien reposant sur un modèle intéressant échoue à révéler des effets qu'un d'autre questionnaire l'IPQ révèle. La vraie question est donc de savoir à quel questionnaire se fier ? La réponse la plus sage serait de dire à aucun des deux puisque le propre d'une mesure scientifique utilisable repose sur sa fiabilité et sa reproductibilité. On nuancera toutefois notre propos en disant que pour nous ces deux questionnaires ne s'opposent pas mais se complètent. La véritable conclusion selon nous serait de dire que l'IPQ souligne des tendances en termes d'évolution de la présence qui demandent à être vérifiées par le SPQ. La sensibilité du IPQ semble moins élevée que celle du SPQ , toutefois le SPQ possède l'intérêt de pouvoir interroger des rubriques qui sous tendent une vision dynamique de l'établissement de la présence. Le questionnaire SPQ en l'état n'est pas opérationnel et il nécessiterait d'être retravaillé, pour qu'il puisse fournir une mesure complémentaire sensible au côté de l'IPQ. Nous pensons que l'utilisation de ces deux questionnaires est intéressante puisqu'ils n'interrogent pas tout à fait la même chose. L'IPQ est plus focalisé sur la symptomatologie de la présence alors que le SPQ interroge davantage l'origine de ses symptômes. En effet des rubriques comme l'attention, la suspension de discrédit, ou encore l'implication cognitive sont des dimensions qui dans le SPQ interrogent les conditions d'émergence de la présence plutôt que la présence elle même. En outre la littérature insiste sur le fait qu'il faut continuer à développer un modèle de la présence à même d'unifier toutes les visions du concept pour avoir à terme un outil le plus fiable possible (Lessiter et al.,2001 ; Hartmann et al., 2015).

X.4.2 La performance de conduite sur simulateur dynamique : un indicateur de présence ou un effet collatéral des limites de la simulation ?

On a relevé que la performance de conduite a été plus importante sur simulateur dynamique que sur simulateur statique. Ce résultat semble en accord avec les résultats établis par de précédentes études menées sur la question de la validité comportementale des simulateurs de conduite (Kaptein et al., 1996). Cela signifie que les participants ont eu des écarts types de la position latérale (SDLP) et des écarts types de la vitesse (SD vitesse) plus faibles sur simulateur dynamique attestant d'un meilleur maintien de la trajectoire et d'une conduite plus fluide. Toutefois nous l'avons déjà exposé il est possible que ce résultat soit aussi lié au fait que le simulateur dynamique de par sa configuration oblige les participants à réguler leur comportement de conduite dans des marges de régulation qui ne sont pas naturellement les leurs mais celles imposées par l'expérience virtuelle en elle même. Ainsi donc si performance il y a elle n'est peut être pas lié au fait que les participants soient complètement convaincu de se comporter comme dans la réalité. Cela pose donc le problème du crédit à apporter à cet indicateur qu'est la performance de conduite comme prédicteur de présence.

X.4.3 L'éveil physiologique à travers l'activité électrodermale : indicateur de présence ou de sensation forte ?

Une fois encore difficile de conclure sur le résultat d'une plus grande activité électrodermale obtenue dans le simulateur dynamique par rapport au simulateur statique. Dans quelle mesure pouvons nous évaluer que cette hausse d'activité électrodermale est directement imputable à la hausse du sentiment de présence et non pas aussi au caractère plus stressant de l'expérience immersive sous simulateur dynamique. Cette mesure s'est avérée pertinente pour des études évaluant la présence dans des environnements clairement conçus comme anxiogène (Meehan, 2001 ; Armel & Ramachandran, 2003) mais elle ne constitue pas une mesure absolue de la présence. En effet, la hausse de l'activité électrodermale pourrait tout aussi bien être liée aux secousses imprévisibles ou accélérations que subit le corps du participant qui en quelque sorte somatise face à ces événements par une hausse de son rythme cardiaque ou bien par une hausse de la transpiration au bout de son index. Nous concluons en disant que nous ne serons ni les premiers et encore moins les derniers à recommander la plus grande prudence dès lors que l'on utilise et cherche à « faire parler » les mesures physiologiques (Jeong et al., 2012). En définitive, il nous apparaît qu'il aurait plutôt fallu faire des mesures physiologiques en réponses à des événements précisément référencés dans nos scénarios pour s'affranchir d'effets

parasites impossibles à détecter sur des valeurs de différentiels moyennés sur l'ensemble de chaque scénario.

Pour conclure, il nous apparaît que la présence peut être appréhendée par un jeu de mesures indirectes que sont les questionnaires de présence, de valence émotionnelle, les données comportementales de conduite ou encore les mesures physiologiques. Toutefois si ces mesures donnent des résultats prometteurs, il apparaît aussi que bon nombre de biais expérimentaux précédemment exposés sont à prendre en compte et qu'il serait souhaitable de reprendre à la suite de ce travail de thèse une approche méthodologique de la présence plus axée sur une mesure de la présence sur des intervalles de temps plus court et sur des situations de conduite plus écologique. De la même façon que l'on entraîne les pilotes de lignes et de chasse à réagir à des situations imprévues, nous pensons que ce travail de recherche entrepris dans cette thèse n'aura de réel sens que si il est appliqué à l'étude de situations de conduite plus ponctuelles que l'on trouve dans la vie réelle pour pouvoir affiner les tendances à ce jour mises en évidence en termes de patterns de covariance de résultats. Aussi il y a plusieurs façons d'être présent et il nous semble important de souligner que ses fluctuations sont liées au fait que des émotions sous tendent l'établissement de la présence. Nous pensons donc qu'expérimentalement il faut « teinter » en terme de valence positive ou négative chaque situation de conduite pour pouvoir jauger in fine si l'expérience de présence est teintée de la même façon ou pas.

X.4.4 Perspectives de recherche

Une autre façon d'appréhender la simulation automobile pourrait être celle des serious games ou jeux sérieux. Notre parti pris est que la réalité que l'on cherche à approximer en simulation n'est pas celle que l'on pense. La validité physique de la simulation automobile, en termes de caractéristiques technologiques, ne permet pas encore de reproduire exactement la complexité sensori-motrice de l'activité de conduite réelle. Nous avons montré dans ce travail de recherche que la validité psychologique, évaluée par le concept de présence, pouvait être une alternative à la validité physique afin d'influer sur la validité comportementale. L'idée de concevoir la simulation virtuelle automobile sur la base du paradigme des serious games permettrait selon nous de mieux délimiter l'utilisabilité des simulateurs et finalement rendrait plus clair ce que l'on pourrait s'autoriser à attendre d'eux (Schlemminger, Roy, Veit Capobianco, Schmoll, & Noepfel, 2013). Par ailleurs, notre démonstration sur la nécessité d'avoir recours au concept de présence afin d'instruire la question méthodologique de la validité comportementale trouve ici pleinement son sens puisque le concept de présence constitue le concept de choix dès lors que l'on s'intéresse à l'efficacité des serious games (Narayanasamy, Wrong, Fung, & Rai, 2006). Il existe plusieurs approches du serious gaming, et ce n'est pas le propos de notre papier d'exposer de manière exhaustive les questions et les ambiguïtés autour de ce concept. Néanmoins on peut succinctement définir l'approche du serious gaming comme étant l'association d'un contenu utilitaire et d'un contenu vidéo-ludique (Alvarez & Michaud, 2008). Il existe trois grandes typologies de serious game. La première typologie de serious games repose sur l'intention de transmettre un message à visée éducative, informative ou persuasive (advergame et jeux vidéo engagés). La deuxième typologie est celle des serious games d'entraînement qui sont conçus pour améliorer les performances cognitives ou motrices d'un utilisateur. La troisième typologie appelée serious games de simulation (ou serious play) étudie quant à eux un phénomène s'inspirant du réel reproduit virtuellement. Dans notre cas la simulation de conduite étudiée dans le cadre de la recherche, pourrait donc s'insérer dans la catégorie des serious games de simulation et/ou d'entraînement. En outre si la dimension utilitaire (intention «sérieuse» de type pédagogique, informative communicationnelle ou d'entraînement) d'un serious game en simulation automobile se comprend plutôt bien, la dimension vidéo-ludique reste plus complexe à définir et à opérationnaliser en simulation automobile. Cet aspect «vidéo-ludique» n'est pas trivial à aborder dès lors qu'on cherche à reproduire le plus fidèlement possible un environnement de conduite. Plusieurs études ont traité de cette question (Backlund, Engstrom, Johannesson, Lebram, & Sjoden, 2008 ; Squire, Giovanetto, Devane, & Durga, 2005; Narayanasamy, Wrong, Fung, & Rai, 2006). La principale difficulté soulevée par ces auteurs et qui constitue un enjeu majeur à relever, semble être la légitimité à incorporer la dimension vidéo-ludique en simulation automobile sans travestir la visée utilitaire ou sérieuse de l'expérience virtuelle.

XI BIBLIOGRAPHIE

- Allen, R. W., Stein, A. C., Aponso, B.L., Rosenthal, T.J., & Hogue, J.R. (1990). A low cost, part task driving simulator based on microcomputer technology. *Transportation Research Record*, 1270, 107-113.
- Allen, R. W., Mitchell, D. G., Stein, A. C., & Hogue, J. R. (1991). *Validation of real-time man-in-the-loop simulation* (No. VTI Rapport 372A, Part 4).
- Allen, R. W., Rosenthal, T.J., & Aponso, B. L. (2005). Performance measurement paradigms for driving simulator research. *Advances in Transportation Studies An International Journal*.
- Alvarez, J., & Michaud, L. (2008). Serious games. Advergaming, edugaming, training and more. *IDATE, Montpellier*.
- Appelhans, B. M., & Luecken, L. J. (2006). Heart rate variability as an index of regulated emotional responding. *Review of general psychology*, 10(3), 229.
- Armel, K. C., & Ramachandran, V. S. (2003). Projecting sensations to external objects: evidence from skin conductance response. *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 270(1523), 1499-1506.
- Arnaldi, B., Fuchs, P., & Tisseau, J. (2003). Chapitre 1 du volume 1 du traité de la réalité virtuelle. *Les Presses de l'Ecole des Mines de Paris, 1*.
- Backlund, P., Engstrom, H., Johannesson, M., Lebram, M., & Sjoden, B. (2008, July). Designing for self-efficacy in a game based simulator: An experimental study and its implications for serious games design. In *Visualisation, 2008 international conference* (pp. 106-113). IEEE.
- Baños, R. M., Botella, C., Rubió, I., Quero, S., García-Palacios, A., & Alcañiz, M. (2008). Presence and emotions in virtual environments: The influence of stereoscopy. *CyberPsychology & Behavior*, 11(1), 1-8.
- Barfield, W., Zeltzer, D., Sheridan, T., & Slater, M. (1995). Presence and performance within virtual environments. *Virtual environments and advanced interface design*, 473-513.
- Bella, F. (2005). Validation of a driving simulator for work zone design. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1937(1), 136-144.
- Bella, F. (2009). Can driving simulators contribute to solving critical issues in geometric design? *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2138(1), 120-126.
- Bernardi, L., Passino, C., Spadacini, G., Calciati, A., ROBERGS, R., Greene, R., ... & Appenzeller, O. (1998). Cardiovascular autonomic modulation and activity of carotid baroreceptors at altitude. *Clinical Science*, 95(5), 565-573.
- Blaauw, G. J. (1982). Driving experience and task demands in simulator and instrumented car: a validation study. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 24(4), 473-486.

- Bonnet, M. H., & Arand, D. L. (2005). Impact of motivation on Multiple Sleep Latency Test and Maintenance of Wakefulness Test measurements. *Journal of clinical sleep medicine: JCSM: official publication of the American Academy of Sleep Medicine*, 1(4), 386-390.
- Bouvier, P. (2009). *La présence en réalité virtuelle, une approche centrée utilisateur* (Doctoral dissertation, Université Paris-Est).
- Burkhardt, J. M., Bardy, B., & Lourdeaux, D. (2003). Immersion, Réalisme et Présence dans la conception et l'évaluation des. *Psychologie française*, 48(2), 35-42.
- Bystrom, K. E., Barfield, W., & Hendrix, C. (1999). A conceptual model of the sense of presence in virtual environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 8(2), 241-244.
- Dagonneau, V. (2012). *Etude des liens entre immersion et présence pour la mise au point d'un simulateur de conduite de deux-roues motorisé* (Doctoral dissertation, Université Paris Sud-Paris XI).
- Dasgupta, B., & Mruthyunjaya, T. S. (2000). The Stewart platform manipulator: a review. *Mechanism and machine theory*, 35(1), 15-40.
- Diemer, J., Alpers, G. W., Peperkorn, H. M., Shiban, Y., & Mühlberger, A. (2015). The impact of perception and presence on emotional reactions: a review of research in virtual reality. *Frontiers in psychology*, 6.
- Duncan, J. (1990). Goal weighting and the choice of behaviour in a complex world. *Ergonomics*, 33(10-11), 1265-1279.
- Edwards, W. (1961). Costs and payoffs are instructions. *Psychological Review*, 68(4), 275.
- Farrell, A. (2008). Étude du registre d'immersion et de l'état de présence interne chez les jeunes entre 11 et 15 ans qui socialisent dans les espaces de clavardage et de jeu.
- Fastenmeier, W., & Gstalter, H. (2007). Driving task analysis as a tool in traffic safety research and practice. *Safety Science*, 45(9), 952-979.
- Fisher, D. L., Rizzo, M., Caird, J., & Lee, J. D. (Eds.). (2011). *Handbook of driving simulation for engineering, medicine, and psychology*. CRC Press.
- Freeman, J., Avons, S., Meddis, R., Pearson, D., & IJsselsteijn, W. (2000). Using behavioral realism to estimate presence: A study of the utility of postural responses to motion stimuli. *Presence*, 9(2), 149-164.
- Fuchs, P., & Moreau, G. (2006). *Le traité de la réalité virtuelle: Volume 2, interface, immersion et interaction en environnement virtuel* (Vol. 2). Presses des MINES.
- Garrott, W. R., Mazzae, E. N., & Goodman, M. J. (2005, June). NHTSA'S NATIONAL ADVANCED DRIVING SIMULATOR RESEARCH PROGRAM. In *Proceedings: International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles* (Vol. 2005, pp. 9p-9p). National Highway Traffic Safety Administration.
- Godley, S. T., Triggs, T. J., & Fildes, B. N. (2002). Driving simulator validation for speed research. *Accident analysis & prevention*, 34(5), 589-600.

- Goodman, M., Bents, F. D., Tijerina, L., Wierwille, W. W., Lerner, N., and Benel, D. (November, 1997). *An investigation of the safety implications of wireless communications in vehicles* (Report No. DOT HS 808- 635). Washington, DC: National Highway Traffic Safety Administration.
- Green, P. (2007). Why driving performance measures are sometimes not accurate (and methods to check accuracy). *Proceedings of the fourth international driving symposium on human factors in driver assessment, training, and vehicle design* (pp. 394-400). Iowa City, IA: University of Iowa.Highway Design, Chapel Hill, NC.
- Guillet, L. (2008). Stress, modèles et application. In *Colloque National de la Recherche dans les IUT*.
- Hartmann, T., Wirth, W., Schramm, H., Klimmt, C., Vorderer, P., Gysbers, A., ... & Gouveia, F. (2015). The spatial presence experience scale (SPES). *Journal of Media Psychology*.
- Horrey, W. J., & Wickens, C. D. (2006). Examining the impact of cell phone conversations on driving using meta-analytic techniques. *Human Factors*, 48, 196-205.
- Jamson, A. H. (1999). Curve negotiation in the Leeds Driving Simulator: The role of driver experience. In D. Harris (Ed), *Engineering psychology and cognitive ergonomics* (Vol. 3, pp. 351-358). Ashgate.
- Jeong, E. J., Biocca, F. A., & Bohil, C. J. (2012). Sensory realism and mediated aggression in video games. *Computers in Human Behavior*, 28(5), 1840-1848.
- 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(3), 203-208.
- Kalawsky, R. S. (2000, March). The validity of presence as a reliable human performance metric in immersive environments. In *proceedings of the Presence Workshop'00*.
- Kaptejn, N. A., Theeuwes, J., & Van der Horst, R. (1996). Driving simulator validity: Some considerations. *Transportation Research Record*, 1550, 30-36.
- Kwon, M. J., & Oh, Y. T. (2013). A Study on Effects of the Drivers Emotion on the Driving Behavior. *Journal of Korean Society of Transportation*, 31(6), 34-42.
- Lee, K. M. (2004). Presence, explicated. *Communication theory*, 14(1), 27-50.
- Lemercier, C., & Cellier, J. M. (2008). Les défauts de l'attention en conduite automobile: inattention, distraction et interférence. *Le travail humain*, 71(3), 271-296.
- Lessiter, J., Freeman, J., Keogh, E., & Davidoff, J. (2001). A cross-media presence questionnaire: The ITC-Sense of Presence Inventory. *Presence*, 10(3), 282-297.
- Lin, J. W., Duh, H. B. L., Parker, D. E., Abi-Rached, H., & Furness, T. A. (2002). Effects of field of view on presence, enjoyment, memory, and simulator sickness in a virtual environment. In *Virtual Reality, 2002. Proceedings. IEEE* (pp. 164-171). IEEE.

- Liu, D., Macchiarella, N., & Vincenzi, D. (2009). Simulation fidelity. In Vincenzi, D., Wise, J., Mouloua, M. & Hancock, P., éditeurs: *Human Factors in Simulation and Training*, Chapitre 4, pages 61–73. Taylor and Francis.
- Lombard, M., & Ditton, T. (1997). At the heart of it all: The concept of presence. *Journal of Computer-Mediated Communication*, 3(2), 0-0.
- Lombard, M., Ditton, T. B., & Weinstein, L. (2009). Measuring presence: the temple presence inventory. In *Proceedings of the 12th Annual International Workshop on Presence* (pp. 1-15).
- Malaterre, G., & Fréchaux, J. (2001). Etude de la validité des simulateurs de conduite par comparaison de tâches réalisées en situation réelle et en simulation. *Actes Inrets*, 149-156.
- Malbos, E., Rapee, R. M., & Kavakli, M. (2012). Behavioral presence test in threatening virtual environments. *Presence*, 21(3), 268-280.
- McCartt, A. T., Hellinga, L. A., & Braitman, K. A. (2006). Cell phones and driving: Review or research. *Traffic Injury Prevention*, 7, 89-106.
- McCormick, E. J. (1970). Human factors engineering.
- Meehan, M., Insko, B., Whitton, M., & Brooks Jr, F. P. (2002, July). Physiological measures of presence in stressful virtual environments. In *ACM Transactions on Graphics (TOG)* (Vol. 21, No. 3, pp. 645-652). ACM.
- Moroney, W. & Moroney, B. (1998). Simulation. In Garland, D., Wise, J. et Hopkin, V., éditeurs :*Human Factors in Aviation system*, pages 358–388. Lawrence Erlbaum Associates, Mahwah, NJ.
- Mudd, S. (1968). Assessment of fidelity of dynamic flight simulators. *Human Factors*, 10(4):351–358.
- Nash, E. B., Edwards, G. W., Thompson, J. A., & Barfield, W. (2000). A review of presence and performance in virtual environments. *International Journal of human-computer Interaction*, 12(1), 1-41.
- Narayanasamy, V., Wong, K. W., Fung, C. C., & Rai, S. (2006). Distinguishing games and simulation games from simulators. *Computers in Entertainment (CIE)*, 4(2), 9.
- Nichols, S., Haldane, C., & Wilson, J. R. (2000). Measurement of presence and its consequences in virtual environments. *International Journal of Human-Computer Studies*, 52(3), 471-491.
- Ohmi, M. (1998). Sensation of self-motion induced by realworld stimuli. In Selection and Integration of Visual Information : *Proceedings of the International Workshop on Advances in Research on Visual Cognition*, pages 175–181, Tsukuba, Japon.
- Owsley, C., & McGwin, G. (2010). Vision and driving. *Vision research*, 50(23), 2348-2361.
- Prothero, J. D., & Hoffman, H. G. (1995). Widening the field-of-view increases the sense of presence in immersive virtual environments. *Human Interface Technology Laboratory Technical Report TR-95*, 2.
- Ranney, T., Watson, G. S., Mazzae, E. N., Papelis, Y. E., Ahmad, O., & Wightman, J. R. (2005). *Examination of the Distraction Effects of Wireless Phone Interfaces*

- Using the National Advanced Driving Simulator-Final Report on a Freeway Study* (No. HS-809 787).
- Ratan, R. A., & Hasler, B. (2009). Self-presence standardized: Introducing the self-presence questionnaire (SPQ). In *Proceedings of the 12th annual international workshop on presence*.
- Reeves, B. (1991). Being there: Television as symbolic versus natural experience. *Unpublished manuscript, Institute for Communication Research, Stanford University, Stanford, CA*.
- Riva, G., Davide, F., & IJsselsteijn, W. A. (2003). Being there: The experience of presence in mediated environments. *Being there: Concepts, effects and measurement of user presence in synthetic environments*, 5.
- Riva, G., Waterworth, J. A., & Waterworth, E. L. (2004). The layers of presence: a bio-cultural approach to understanding presence in natural and mediated environments. *CyberPsychology & Behavior*, 7(4), 402-416.
- Rosenthal, T. J., Parseghian, Z., Allen, R. W., & Stein, A. C. (1994). Appendix E: Reward/penalty computations, *STISIM user's guide*. Hawthorne, CA: Systems Technology, Inc.
- Sadowski, W., & Stanney, K. (2002). Presence in virtual environments.
- Saluäär, D. (2000). Driving simulators as a mean of studying the interaction between driver and vehicle. *Internal Volvo Report ER-520034*.
- Santos, J., Meret, 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: Traffic Psychology and Behavior*, 8, 135-146.
- Sargent, R. G. (1998). Verification and validation of simulation models. In D. J. Medeiros, E. F. Watson, J. S. Carson, & M. S. Manivannan (Eds.), *Proceedings of the 30th Winter Simulation Conference*. Washington, DC.
- Schlemminger, G., Roy, M., Veit, M., Capobianco, A., Schmoll, L., & Noepfel, G. (2013). Réalité virtuelle : de nouveaux outils pour des apprentissages plurilingues ?
- Schubert, T., Friedmann, F., & Regenbrecht, H. (2001). The experience of presence: Factor analytic insights. *Presence*, 10(3), 266-281.
- Seay, A. F., Krum, D. M., Hodges, L., & Ribarsky, W. (2001, March). Simulator sickness and presence in a high FOV virtual environment. In *Virtual Reality, 2001. Proceedings. IEEE* (pp. 299-300). IEEE.
- Siegler, I., Reymond, G., Kemeny, A., & Berthoz, A. (2001, September). Sensorimotor integration in a driving simulator: contributions of motion cueing in elementary driving tasks. In *Proceedings of Driving Simulation Conference* (pp. 21-32).
- Slater, M., & Wilbur, S. (1997). A framework for immersive virtual environments (FIVE): Speculations on the role of presence in virtual environments. *Presence: Teleoperators and virtual environments*, 6(6), 603-616.

- Slater, M., Sadagic, A., Usoh, M., & Schroeder, R. (2000). Small-group behavior in virtual and real environments: A comparative study. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 9(1), 37–51.
- Slater, M. (2003). A note on presence terminology. *Presence connect*, 3(3), 1-5.
- Slater, M. (2004). How colorful was your day? Why questionnaires cannot assess presence in virtual environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 13(4), 484-493.
- Slater, M., & Wilbur, S. (1997). A framework for immersive virtual environments (FIVE): Speculations on the role of presence in virtual environments. *Presence: Teleoperators and virtual environments*, 6(6), 603-616.
- Slater, M., Lotto, B., Arnold, M. M., & Sánchez-Vives, M. V. (2009). How we experience immersive virtual environments: the concept of presence and its measurement. *Anuario de Psicología*, 2009, vol. 40, p. 193-210.
- Snowden, R. J., Stimpson, N., & Ruddle, R. A. (1998). Speed perception fogs up as visibility drops. *Nature*, 392, 450.
- Squire, K., Giovanetto, L., Devane, B., & Durga, S. (2005). From users to designers: Building a self-organizing game-based learning environment. *TechTrends*, 49(5), 34-42.
- Stoffregen, T. A., Bardy, B. G., Smart, L. J., & Pagulayan, R. J. (2003). On the nature and evaluation of fidelity in virtual environments. *Virtual and adaptive environments: Applications, implications, and human performance issues*, 111-128.
- Straus, S. H. (2002). New, Improved, Comprehensive, and Automated Driver's License Test and Vision Screening System. *Journal of Experimental Psychology*, 11, 122-132.
- Tichon, J., Wallis, G., & Mildred, T. (2006). Virtual training environments to improve train driver's crisis decision making. *Proceedings of SimTect, Melbourne, Australia, May*.
- Tichon, J. G. (2007). Using presence to improve a virtual training environment. *Cyberpsychology & Behavior*, 10(6), 781-788.
- Usoh, M., Alberto, C., & Slater, M. (1996). Presence: experiments in the psychology of virtual environments. *Department of Computer Science, University College London, UK*.
- Van Baren, J., & IJsselsteijn, W. (2004). *Measuring presence: A guide to current measurement approaches. Deliverable of the OmniPres project IST-2001-39237*.
- Vorderer, P., Wirth, W., Gouveia, F. R., Biocca, F., Saari, T., Jäncke, F., ... & Jäncke, P. (2004). MEC spatial presence questionnaire (MEC-SPQ): Short documentation and instructions for application. *Report to the European Community, Project Presence: MEC (IST-2001-37661), 3*.
- Wade, M. G., & Hammond, C. (1998). Simulation Validation: Evaluating Driver Performance in Simulation and the Real World.

- Witmer, B. G., & Singer, M. J. (1998). Measuring presence in virtual environments: A presence questionnaire. *Presence: Teleoperators and virtual environments*, 7(3), 225-240.
- Youngblut, C. (2003). *Experience of presence in virtual environments* (No. IDA-D-2960). INSTITUTE FOR DEFENSE ANALYSES ALEXANDRIA VA.
- Zahorik, P., & Jenison, R. (1998). Presence as being-in-the-world. *Presence*, 7(1), 78-89.
- Zeitlin, L. R., (1996, January). Vehicle simulation research: What is and is not being simulated. *Paper presented at the Human Factors Workshop at the Annual Meeting of the Transportation*

XII ANNEXES

Annexe 1. MEQ -SPQ

INSTITUT ////////////////
DES SCIENCES ETIENNE
DU MOUVEMENT JULES
////////////////////// MAREY

PSA PEUGEOT CITROËN 

« Conduite sur simulateur de conduite INRETS au CRVM »

- Partie 1 : Questionnaire Pré expérimentation
- Partie 2 : Questionnaire Post expérimentation

N° Dossier

Date

Heure de début

Heure de fin

| | | |
|--|--|--|
| | | |
| | | |

N° Groupe :

| |
|--|
| |
|--|

Partie 1 : Questionnaire Post expérimentation

INFORMATIONS GÉNÉRALES

1. Sexe : Homme Femme

2. Année de naissance :

3. En tant que conducteur, combien de kilomètres avez-vous parcouru ces 12 derniers mois :

- Moins de 3000 km(1)
 Entre 3000 et 8000 km(2)
 Entre 8000 et 13000 km(3)

- Entre 13000 et 18000 km(4)
 Plus de 18000 km(5)

4. Depuis quelle année possédez-vous le permis de conduire :

Partie 1 : Questionnaire Post expérimentation

ACTIVITE DE CONDUITE

5. Selon vous, quelles sont vos principales difficultés lorsque vous conduisez :

5.1 . Vous ne réagissez pas assez rapidement en cas d'urgence :

| Tout à fait en désaccord | Plutôt d'accord pas | Sans opinion | Plutôt d'accord | Tout à fait d'accord |
|--------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |

5.2. Vous êtes facilement distrait(e) et pensez à autre chose que la conduite :

| Tout à fait en désaccord | Plutôt d'accord pas | Sans opinion | Plutôt d'accord | Tout à fait d'accord |
|--------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |

Partie 2 : Questionnaire Post expérimentation

Expérience virtuelle dans le simulateur de conduite

Q1 : J'ai accordé toute mon attention à l'environnement virtuel de conduite.

| Tout à fait en désaccord | Plutôt d'accord pas | Sans opinion | Plutôt d'accord | Tout à fait d'accord |
|--------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |

Q2 : J'étais capable d'imaginer aisément l'agencement des différents espaces traversés dans l'environnement virtuel.

| Tout à fait en désaccord | Plutôt d'accord pas | Sans opinion | Plutôt d'accord | Tout à fait d'accord |
|--------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |

Q3 : Je me suis senti(e) comme si j'avais été réellement là dans l'environnement présenté.

| Tout à fait en désaccord | Plutôt d'accord pas | Sans opinion | Plutôt d'accord | Tout à fait d'accord |
|--------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |

Q4 : Je pensais essentiellement aux choses à faire dans l'environnement présenté.

| Tout à fait en désaccord | Plutôt d'accord pas | Sans opinion | Plutôt d'accord | Tout à fait d'accord |
|--------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |

Q5 : J'étais concentré(e) sur l'environnement proposé malgré quelques incohérences.

| Tout à fait en désaccord | Plutôt d'accord pas | Sans opinion | Plutôt d'accord | Tout à fait d'accord |
|--------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |

Q6 : Quand quelqu'un me montre un plan (ou une carte) d'un environnement, je suis capable, facilement, de me le représenter mentalement.

| Tout à fait en désaccord | Plutôt d'accord pas | Sans opinion | Plutôt d'accord | Tout à fait d'accord |
|--------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |

Q7 : J'étais concentré(e) sur l'environnement virtuel de conduite.

| Tout à fait en désaccord | Plutôt d'accord pas | Sans opinion | Plutôt d'accord | Tout à fait d'accord |
|--------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |

Q8 : J'avais une idée précise du cadre environnant présenté lors de l'expérience virtuelle.

| Tout à fait en désaccord | Plutôt pas d'accord | Sans opinion | Plutôt d'accord | Tout à fait d'accord |
|--------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |

Q9 : C'était comme si ma position réelle était passée dans l'environnement présenté.

| Tout à fait en désaccord | Plutôt pas d'accord | Sans opinion | Plutôt d'accord | Tout à fait d'accord |
|--------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |

Q10 : J'ai porté une réelle attention à la cohérence des différentes choses présentées dans l'environnement.

| Tout à fait en désaccord | Plutôt pas d'accord | Sans opinion | Plutôt d'accord | Tout à fait d'accord |
|--------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |

Q11 : Je n'ai pas vraiment porté attention à la présence d'erreurs ou d'incohérences dans l'environnement proposé.

| Tout à fait en désaccord | Plutôt pas d'accord | Sans opinion | Plutôt d'accord | Tout à fait d'accord |
|--------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |

Q12 : C'est facile pour moi de me représenter un espace dans ma tête sans réellement y être.

| Tout à fait en désaccord | Plutôt d'accord pas | Sans opinion | Plutôt d'accord | Tout à fait d'accord |
|--------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |

Q13 : L'environnement virtuel a mobilisé plusieurs de mes 5 sens.

| Tout à fait en désaccord | Plutôt d'accord pas | Sans opinion | Plutôt d'accord | Tout à fait d'accord |
|--------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |

Q14 : J'étais capable de me faire une bonne estimation de la taille de l'environnement spatial traversé.

| Tout à fait en désaccord | Plutôt d'accord pas | Sans opinion | Plutôt d'accord | Tout à fait d'accord |
|--------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |

Q15 : Je me suis senti(e) comme si j'avais été physiquement présent(e) dans l'environnement proposé.

| Tout à fait en désaccord | Plutôt d'accord pas | Sans opinion | Plutôt d'accord | Tout à fait d'accord |
|--------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |

Q16 : L'environnement virtuel proposé, mobilisa ma réflexion.

| Tout à fait en désaccord | Plutôt d'accord pas | Sans opinion | Plutôt d'accord | Tout à fait d'accord |
|--------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |

Q17 : J'ai adopté un point de vue critique sur l'environnement présenté.

| Tout à fait en désaccord | Plutôt d'accord pas | Sans opinion | Plutôt d'accord | Tout à fait d'accord |
|--------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |

Q18 : Quand je lis un texte, très souvent, je peux imaginer sans difficulté l'agencement des objets décrits.

| Tout à fait en désaccord | Plutôt d'accord pas | Sans opinion | Plutôt d'accord | Tout à fait d'accord |
|--------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |

Q19 : Je me suis dévoué(e) entièrement à l'expérience virtuelle de conduite.

| Tout à fait en désaccord | Plutôt d'accord pas | Sans opinion | Plutôt d'accord | Tout à fait d'accord |
|--------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |

Q20 : Encore maintenant, je garde une image mentale concrète de l'environnement spatial traversé.

| Tout à fait en désaccord | Plutôt d'accord pas | Sans opinion | Plutôt d'accord | Tout à fait d'accord |
|--------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |

Q21 : C'est comme si j'avais réellement pris part à l'action dans l'environnement présenté

| Tout à fait en désaccord | Plutôt d'accord pas | Sans opinion | Plutôt d'accord | Tout à fait d'accord |
|--------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |

Q22 : Je me suis demandé(e) si l'environnement présenté pouvait m'être utile.

| Tout à fait en désaccord | Plutôt d'accord pas | Sans opinion | Plutôt d'accord | Tout à fait d'accord |
|--------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |

Q23 : Le fait que l'environnement proposé puisse contenir des erreurs ou des incohérences importait peu pour moi.

| Tout à fait en désaccord | Plutôt d'accord pas | Sans opinion | Plutôt d'accord | Tout à fait d'accord |
|--------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |

Q24 : Quand quelqu'un me décrit un espace c'est très souvent et avec beaucoup de facilité que je me l'imagine clairement.

| Tout à fait en désaccord | Plutôt pas d'accord | Sans opinion | Plutôt d'accord | Tout à fait d'accord |
|--------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |

Annexe 2. Corrélations r de Bravais-Pearson entre les dimensions du questionnaire de présence (MEC-SPQ) et leurs items

| | Attention | Représentation mentale (SSM) | Implication cognitive | Suspension d'incrédulité | Présence spatiale |
|-----|---------------|------------------------------|-----------------------|--------------------------|-------------------|
| Q1 | 0.98** | | | | |
| Q7 | 0.98 | | | | |
| Q19 | 0.96** | | | | |
| Q2 | | 0.96** | | | |
| Q8 | | 0.93** | | | |
| Q14 | | 0.96** | | | |
| Q10 | | | 0.97** | | |
| Q16 | | | 0.97 | | |
| Q22 | | | 0.96** | | |
| Q6 | | | | | |
| Q12 | | | | | |
| Q18 | | | | | |
| Q24 | | | | | |
| Q5 | | | | 0.96** | |
| Q11 | | | | 0.95** | |
| Q23 | | | | 0.96** | |

| | | | | | |
|-----|--|--|--|--|---------------|
| Q3 | | | | | 0.99** |
| Q9 | | | | | 0.99** |
| Q15 | | | | | 0.97** |
| Q21 | | | | | 0.97** |

Note : **p<.001

Pour le détail des questions pour chacune dimension du questionnaire de présence voir Annexe X.

Voici ci dessous les rubriques générales utilisées et la répartition des questions opérée.

1° Rubrique : Allocation de l'attention : (q1,q7,q13,q19)

2° Rubrique : Construction d'une représentation spatiale de l'environnement virtuel : (q2,q8,q14,q20)

3° Rubrique : Présence spatiale ressentie (q3,q9,q15,q21)

4° Rubrique : Forte implication cognitive (q4,q10,q16,q22)

5° Rubrique : Suspension d'incrédulité (q5,q11,q17,q23)

Annexe 3. Régressions MEC-SPQ pour chaque groupe (seuil de significativité fixé à $p < 0.05$)

| Groupe | Variable prédictive | Variable dépendante | Beta | p |
|--------|---------------------|----------------------|-------------|----------------|
| 1 | Attention | SSM | -0.57 | 0.32 |
| 1 | SSM | Self-location | -0.39 | 0.52 |
| 1 | SOD | SSM | -0.01 | 0.98 |
| 1 | SOD | Self-location | 0.17 | 0.78 |
| 1 | Involvement | SSM | -0.58 | 0.31 |
| 1 | Involvement | Self-location | 0.80 | 0.10 |
| 2 | Attention | SSM | -0.61 | 0.28 |
| 2 | SSM | Self-location | -0.22 | 0.73 |
| 2 | SOD | SSM | 0.38 | 0.53 |
| 2 | SOD | Self-location | 0.62 | 0.27 |
| 2 | Involvement | SSM | -0.80 | 0.11 |
| 2 | Involvement | Self-location | 0.73 | 0.16 |
| 3 | Attention | SSM | 0.44 | 0.45 |
| 3 | SSM | Self-location | 0.98 | 0.004** |
| 3 | SOD | SSM | 0.82 | 0.09 |
| 3 | SOD | Self-location | 0.90 | 0.04* |
| 3 | Involvement | SSM | 0.83 | 0.08 |
| 3 | Involvement | Self-location | 0.87 | 0.05 |
| 4 | Attention | SSM | 0.56 | 0.33 |
| 4 | SSM | Self-location | 0.76 | 0.14 |
| 4 | SOD | SSM | 0.92 | 0.03* |
| 4 | SOD | Self-location | 0.44 | 0.45 |
| 4 | Involvement | SSM | 0.36 | 0.55 |
| 4 | Involvement | Self-location | 0.16 | 0.80 |

Annexe 4. Corrélations subjectif/objectif Groupe 1
(seuil de significativité fixé à $p < 0.05$)

| | Attention | SSM | SPSL | Involvement | SOD |
|----------------------------|-----------|-------|-------|-------------|-------|
| Vitesse | 0.40 | 0.11 | 0.56 | 0.40 | -0.20 |
| SD Vitesse | -0.40 | -0.33 | -0.33 | 0.00 | 0.60 |
| Position latérale | -0.20 | -0.56 | -0.11 | 0.20 | 0.40 |
| SD Position latérale | 0.00 | 0.33 | -0.11 | -0.40 | -0.60 |

Annexe 5. Corrélations subjectif/objectif Groupe 2
(seuil de significativité fixé à $p < 0.05$)

| | Attention | SSM | SPSL | Involvement | SOD |
|----------------------------|-----------|-------|-------|-------------|-------|
| Vitesse | 0.50 | -0.25 | 0.14 | 0.40 | 0.20 |
| SD Vitesse | 0.00 | 0.50 | 0.43 | -0.20 | 0.40 |
| Position latérale | -0.25 | -0.25 | 0.71 | 0.20 | 0.40 |
| SD Position latérale | 0.50 | 0.00 | -0.43 | 0.00 | -0.60 |

Annexe 6. Corrélations subjectif/objectif Groupe 3
(seuil de significativité fixé à $p < 0.05$)

| | Attention | SSM | SPSL | Involvement | SOD |
|----------------------------|-----------|-------|-------|-------------|-------|
| Vitesse | -0.20 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| SD Vitesse | -0.40 | -0.20 | -0.20 | -0.60 | -0.60 |
| Position latérale | 0.00 | -0.20 | -0.20 | -0.20 | -0.20 |
| SD Position latérale | -0.20 | 0.40 | 0.40 | 0.00 | 0.00 |

Annexe 7. Corrélations subjectif/objectif Groupe 4
(seuil de significativité fixé à $p < 0.05$)

| | Attention | SSM | SPSL | Involvement | SOD |
|----------------------------|-----------|-------|-------|-------------|-------|
| Vitesse | -0.78 | -0.78 | -0.60 | -0.20 | -0.71 |
| SD Vitesse | -0.33 | -0.33 | -0.80 | -0.40 | -0.14 |
| Position latérale | -0.11 | 0.33 | 0.40 | 0.40 | 0.43 |
| SD Position latérale | 0.11 | 0.11 | 0.20 | -0.60 | -0.14 |

Annexe 8. Corrélations r de Bravais-Pearson entre les dimensions du questionnaire de présence (MEC-SPQ) et leurs items

| | Attention | Représentation mentale (SSM) | Implication cognitive | Suspension d'incrédulité | Présence spatiale |
|-----|---------------|------------------------------|-----------------------|--------------------------|-------------------|
| Q1 | 0.96** | | | | |
| Q7 | 0.95** | | | | |
| Q12 | 0.84** | | | | |
| Q19 | 0.94** | | | | |
| Q2 | | 0.94** | | | |
| Q8 | | 0.93** | | | |
| Q14 | | 0.90** | | | |
| Q20 | | 0.87** | | | |
| Q10 | | | 0.94** | | |
| Q16 | | | 0.94 | | |
| Q22 | | | 0.96** | | |
| Q28 | | | 0.87** | | |
| Q6 | | | | | |
| Q12 | | | | | |
| Q18 | | | | | |
| Q24 | | | | | |

| | | | | | |
|-----|--|--|--|---------------|---------------|
| Q5 | | | | 0.98** | |
| Q11 | | | | 0.99** | |
| Q23 | | | | 0.95** | |
| Q29 | | | | 0.75** | |
| Q3 | | | | | 0.96** |
| Q9 | | | | | 0.94** |
| Q15 | | | | | 0.96** |
| Q21 | | | | | 0.97** |

Annexe9. Corrélations r de Bravais-Pearson entre les dimensions du questionnaire de présence (MEC-SPQ) et leurs items

| | Sensation d'être là (G) | Présence spatiale (SP) | Engagement (INV) | Réalisme(Real) |
|-------|-------------------------|------------------------|------------------|----------------|
| G1 | 0.88** | | | |
| SP1 | | 0.87** | | |
| SP2 | | 0.90** | | |
| SP3 | | 0.94** | | |
| SP4 | | 0.86** | | |
| SP5 | | 0.70** | | |
| INV1 | | | 0.80** | |
| INV2 | | | 0.76** | |
| INV3 | | | 0.87** | |
| INV4 | | | 0.88** | |
| REAL1 | | | | 0.93** |
| REAL2 | | | | 0.86** |
| REAL3 | | | | 0.73** |
| REAL4 | | | | 0.76** |

Note: *p<0.05; **p<0.001

Annexe 10. Corrélations r de Bravais-Pearson entre les dimensions du questionnaire PANAS et leurs items

| | PA (Positive affect) | NA (Negative Affect) |
|---------------------|----------------------|----------------------|
| Interested | 0.81** | |
| Alert | 0.71** | |
| Attentive | 0.72** | |
| Excited | 0.63** | |
| Enthusiastic | 0.90** | |
| Inspired | 0.69** | |
| Proud | 0.62** | |
| Determined | 0.75** | |
| Strong | 0.73** | |
| Active | 0.77** | |
| Distressed | | 0.93** |
| Upset | | 0.72** |
| Guilty | | 0.85** |
| Ashamed | | 0.78** |
| Hostile | | 0.72** |
| Irritable | | 0.77** |

| | | |
|----------------|--|---------------|
| Nervous | | 0.78** |
| Jittery | | 0.81** |
| Scared | | 0.67** |
| Afraid | | 0.71** |

Note: *p<0.05; **p<0.001

Annexe 11. Régressions MEC-SPQ pour chaque groupe (seuil de significativité fixé à $p < 0.05$)

| Décor | visibilité | Variable prédictive | Variable dépendante | Beta | p |
|-------|------------|---------------------|---------------------|------|--------|
| 1 | 1 | Attention | SSM | 0.48 | 0.04* |
| 1 | 1 | SSM | SPPA | 0.56 | 0.02* |
| 1 | 1 | SSM | Self-location | 0.75 | 0.00** |
| 1 | 1 | SOD | SSM | 0.79 | 0.00** |
| 1 | 1 | SOD | Self-location | 0.73 | 0.00** |
| 1 | 1 | SOD | SPPA | 0.55 | 0.02* |
| 1 | 1 | Involvement | SSM | 0.34 | 0.16 |
| 1 | 1 | Involvement | Self-location | 0.33 | 0.19 |
| 1 | 1 | Involvement | SPPA | 0.29 | 0.24 |
| 1 | 0 | Attention | SSM | 0.27 | 0.27 |
| 1 | 0 | SSM | SPPA | 0.39 | 0.11 |
| 1 | 0 | SSM | Self-location | 0.70 | 0.00** |
| 1 | 0 | SOD | SSM | 0.39 | 0.11 |
| 1 | 0 | SOD | Self-location | 0.53 | 0.02* |
| 1 | 0 | SOD | SPPA | 0.46 | 0.06 |
| 1 | 0 | Involvement | SSM | 0.38 | 0.12 |
| 1 | 0 | Involvement | Self-location | 0.35 | 0.15 |
| 1 | 0 | Involvement | SPPA | 0.43 | 0.06 |
| 2 | 1 | Attention | SSM | 0.63 | 0.00** |
| 2 | 1 | SSM | SPPA | 0.38 | 0.12 |
| 2 | 1 | SSM | Self-location | 0.68 | 0.00** |
| 2 | 1 | SOD | SSM | 0.69 | 0.00** |
| 2 | 1 | SOD | Self-location | 0.70 | 0.00** |
| 2 | 1 | SOD | SPPA | 0.35 | 0.15 |
| 2 | 1 | Involvement | SSM | 0.27 | 0.28 |
| 2 | 1 | Involvement | Self-location | 0.06 | 0.80 |
| 2 | 1 | Involvement | SPPA | 0.19 | 0.46 |
| 2 | 0 | Attention | SSM | 0.20 | 0.43 |
| 2 | 0 | SSM | SPPA | 0.66 | 0.00** |
| 2 | 0 | SSM | Self-location | 0.69 | 0.00** |
| 2 | 0 | SOD | SSM | 0.33 | 0.18 |

| | | | | | |
|---|---|-------------|---------------|-------|--------|
| 2 | 0 | SOD | Self-location | 0.54 | 0.02* |
| 2 | 0 | SOD | SPPA | 0.42 | 0.08 |
| 2 | 0 | Involvement | SSM | 0.42 | 0.08 |
| 2 | 0 | Involvement | Self-location | 0.38 | 0.11 |
| 2 | 0 | Involvement | SPPA | 0.47 | 0.04* |
| 3 | 1 | Attention | SSM | 0.37 | 0.13 |
| 3 | 1 | SSM | SPPA | 0.72 | 0.00** |
| 3 | 1 | SSM | Self-location | 0.58 | 0.01* |
| 3 | 1 | SOD | SSM | 0.54 | 0.02* |
| 3 | 1 | SOD | Self-location | 0.49 | 0.04* |
| 3 | 1 | SOD | SPPA | 0.33 | 0.18 |
| 3 | 1 | Involvement | SSM | 0.21 | 0.40 |
| 3 | 1 | Involvement | Self-location | 0.33 | 0.18 |
| 3 | 1 | Involvement | SPPA | 0.42 | 0.23 |
| 3 | 0 | Attention | SSM | -0.02 | 0.94 |
| 3 | 0 | SSM | SPPA | 0.26 | 0.30 |
| 3 | 0 | SSM | Self-location | 0.49 | 0.04* |
| 3 | 0 | SOD | SSM | 0.21 | 0.39 |
| 3 | 0 | SOD | Self-location | 0.40 | 0.09 |
| 3 | 0 | SOD | SPPA | 0.42 | 0.09 |
| 3 | 0 | Involvement | SSM | 0.05 | 0.84 |
| 3 | 0 | Involvement | Self-location | 0.19 | 0.24 |
| 3 | 0 | Involvement | SPPA | 0.47 | 0.05 |

Annexe 12. Corrélations IPQ pour chaque situation expérimentale (seuil de significativité fixé à $p < 0.05$)

| Décor 1; Visibilité parfaite | INV | REAL | G |
|---------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| SP | 0.41 (p=0.00**) | 0.42 (p=0.00**) | 0.85 (p=0.00**) |
| INV | | 0.25 (p=0.00**) | 0.44 (p=0.00**) |
| REAL | | | 0.47 (p=0.00**) |
| Décor 1; Visibilité détériorée | | | |
| SP | 0.56 (p=0.00**) | 0.46 (p=0.01*) | 0.87 (p=0.00**) |
| INV | | 0.39 (p=0.03*) | 0.56 (p=0.00**) |
| REAL | | | 0.54 (p=0.00**) |
| Décor 2; Visibilité parfaite | | | |
| SP | 0.21 (p=0.24) | 0.50 (p=0.00**) | 0.95 (p=0.00**) |
| INV | | 0.19 (p=0.30) | 0.16 (p=0.41) |
| REAL | | | 0.47 (p=0.02*) |
| Décor 2; Visibilité détériorée | | | |
| SP | 0.28 (p=0.13) | 0.25 (p=0.19) | 0.91 (p=0.00**) |
| INV | | 0.16 (p=0.39) | 0.47 (p=0.02*) |
| REAL | | | 0.37 (p=0.08) |
| Décor 3; Visibilité parfaite | | | |
| SP | 0.43 (p=0.02*) | 0.48 (p=0.00**) | 0.90 (p=0.00*) |
| INV | | 0.10 (p=0.57) | 0.46 (p=0.02*) |
| REAL | | | 0.50 |

| | | | |
|---------------------------------------|---------------------------|------------------|---------------------------|
| | | | (p=0.01*) |
| Décor 3; Visibilité détériorée | | | |
| SP | 0.64 (p=0.00**) | 0.27 (p=0.14) | 0.58 (p=0.00**) |
| INV | | 0.31 (p=0.09) | 0.47 (p=0.02*) |
| REAL | | | 0.43 (p=0.04*) |

Annexe 13. Corrélations SPQ-PANAS pour chaque situation expérimentale (seuil de significativité fixé à p<0.05)

| <i>Décor 1; Visibilité parfaite</i> | PA | NA |
|--|-------|------------------------|
| Attention | 0.25 | -0.14 |
| Spatial Situation Model (SSM) | 0.02 | 0.07 |
| Cognitive Involvement (CogInv) | 0.02 | 0.07 |
| Suspension Of Disbelief (Sod) | -0.22 | 0.04 |
| Spatial presence possible actions (SPPA) | -0.07 | 0.13 |
| Self-Location (SPSL) | 0.12 | 0.00 |
| <i>Décor 1; Visibilité détériorée</i> | | |
| Attention | 0.25 | -0.42 (p=0.04*) |
| Spatial Situation Model (SSM) | 0.06 | -0.37 |
| Cognitive Involvement (CogInv) | -0.16 | -0.11 |
| Suspension Of Disbelief (Sod) | 0.14 | -0.28 |
| Spatial presence possible actions (SPPA) | 0.03 | -0.08 |
| Self-Location (SPSL) | -0.03 | -0.02 |
| <i>Décor 2; Visibilité parfaite</i> | | |

| | | |
|---|----------------|-----------------|
| Attention | 0.29 | 0.00 |
| Spatial Situation Model (SSM) | -0.15 | -0.19 |
| Cognitive Involvement (CogInv) | -0.12 | -0.18 |
| Suspension Of Disbelief (Sod) | -0.07 | -0.40 (p=0.04*) |
| Spatial presence possible actions (SPPA) | 0.13 | 0.02 |
| Self-Location (SPSL) | 0.20 | -0.19 |
| <i>Décor 2; Visibilité détériorée</i> | | |
| Attention | 0.44 (p=0.03*) | -0.16 |
| Spatial Situation Model (SSM) | 0.03 | -0.32 |
| Cognitive Involvement (CogInv) | -0.14 | 0.00 |
| Suspension Of Disbelief (Sod) | 0.00 | -0.11 |
| Spatial presence possible actions (SPPA) | -0.10 | -0.03 |
| Self-Location (SPSL) | 0.01 | 0.08 |
| <i>Décor 3; Visibilité parfaite</i> | | |
| Attention | 0.39 | -0.46 (p=0.02*) |
| Spatial Situation Model (SSM) | -0.31 | -0.23 |
| Cognitive Involvement (CogInv) | -0.09 | -0.08 |
| Suspension Of Disbelief (Sod) | 0.34 | -0.32 |
| Spatial presence possible actions (SPPA) | -0.11 | -0.09 |
| Self-Location (SPSL) | 0.21 | -0.10 |
| <i>Décor 3; Visibilité détériorée</i> | | |
| Attention | 0.41 (p=0.04*) | -0.20 |
| Spatial Situation Model (SSM) | -0.06 | -0.24 |
| Cognitive Involvement (CogInv) | -0.20 | -0.04 |
| Suspension Of Disbelief (Sod) | -0.06 | -0.13 |
| Spatial presence possible actions (SPPA) | 0.02 | 0.09 |

| | | |
|---------------------------------|------|------|
| Self-Location (SPSL) | 0.08 | 0.08 |
|---------------------------------|------|------|

**Annexe 14. Corrélations SPQ-Vitesse moyenne-SD
Vitesse-IPQ pour chaque situation expérimentale
(seuil de significativité fixé à $p < 0.05$)**

| <i>Décor 1; Visibilité parfaite</i> | Vitesse | SD Vitesse |
|--|---------|----------------|
| Attention | -0.20 | -0.05 |
| Spatial Situation Model (SSM) | -0.02 | 0.33 |
| Cognitive Involvement (CogInv) | -0.02 | 0.32 |
| Suspension Of Disbelief (Sod) | 0.03 | 0.36 (p=0.04*) |
| Spatial presence possible actions (SPPA) | -0.13 | 0.13 |
| Self-Location (SPSL) | -0.15 | 0.29 |
| G | -0.05 | 0.25 |
| Realism | -0.06 | 0.28 |
| Spatial presence | -0.03 | 0.16 |
| Involvement | -0.28 | -0.04 |
| <i>Décor 1; Visibilité détériorée</i> | | |
| Attention | -0.38 | 0.00 |
| Spatial Situation Model (SSM) | -0.04 | 0.22 |
| Cognitive Involvement (CogInv) | 0.20 | 0.04 |
| Suspension Of Disbelief (Sod) | -0.12 | 0.12 |
| Spatial presence possible actions (SPPA) | -0.095 | 0.14 |
| Self-Location (SPSL) | 0.18 | 0.38(p=0.03*) |
| G | 0.28 | 0.43 (p=0.02*) |
| Realism | 0.12 | 0.24 |
| Spatial presence | 0.19 | 0.36 (p=0.04*) |
| Involvement | 0.06 | 0.11 |
| <i>Décor 2; Visibilité parfaite</i> | | |
| Attention | 0.08 | 0.02 |

| | | |
|---|-------|-----------------|
| Spatial Situation Model (SSM) | 0.24 | -0.014 |
| Cognitive Involvement (CogInv) | -0.03 | -0.04 |
| Suspension Of Disbelief (Sod) | 0.29 | 0.04 |
| Spatial presence possible actions (SPPA) | 0.18 | 0.17 |
| Self-Location (SPSL) | 0.22 | 0.19 |
| G | 0.25 | 0.17 |
| Realism | 0.23 | 0.08 |
| Spatial presence Involvement | 0.17 | -0.01 |
| | 0.03 | -0.34 |
| <i>Décor 2; Visibilité détériorée</i> | | |
| Attention | -0.22 | -0.07 |
| Spatial Situation Model (SSM) | -0.1 | -0.04 |
| Cognitive Involvement (CogInv) | -0.27 | 0.08 |
| Suspension Of Disbelief (Sod) | -0.17 | -0.02 |
| Spatial presence possible actions (SPPA) | -0.02 | 0.18 |
| Self-Location (SPSL) | -0.06 | 1.14 |
| G | -0.14 | 0.19 |
| Realism | -0.07 | 0.17 |
| Spatial presence Involvement | -0.13 | 0.06 |
| | -0.18 | 0.12 |
| <i>Décor 3; Visibilité parfaite</i> | | |
| Attention | -0.23 | -0.43 (p=0.03*) |
| Spatial Situation Model (SSM) | 0.02 | -0.09 |
| Cognitive Involvement (CogInv) | -0.13 | -0.19 |
| Suspension Of Disbelief (Sod) | -0.16 | -0.28 |
| Spatial presence possible actions (SPPA) | 0.17 | -0.06 |
| Self-Location (SPSL) | 0.13 | -0.07 |
| G | 0.24 | 0.09 |

| | | |
|---|-------|-------|
| Realism | 0.23 | 0.09 |
| Spatial presence | 0.27 | 0.07 |
| Involvement | 0.06 | -0.02 |
| <i>Décor 3; Visibilité détériorée</i> | | |
| Attention | -0.36 | -0.36 |
| Spatial Situation Model (SSM) | -0.10 | -0.03 |
| Cognitive Involvement (CogInv) | 0.07 | -0.06 |
| Suspension Of Disbelief (Sod) | -0.04 | -0.10 |
| Spatial presence possible actions (SPPA) | -0.02 | -0.20 |
| Self-Location (SPSL) | 0.16 | 0.16 |
| G | 0.29 | 1.44 |
| Realism | 0.17 | 0.41 |

**Annexe 15. Correlations IPQ- HRV paramètres
temporels- SPQ(seuil de significativité fixé à p<0.05)**

| | Max R-R (ms) | Min Max RRDiff | Mean HR | SD HR | Min R-R | Mean R-R | SD NN | SDANN | SDNNindex | RMS SD | SDSD | NN50 | PN N50 |
|------------------|--------------|----------------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|--------------|---------------|--------------|--------------|---------------|--------|
| Attention | 0.08 | -0.13 | 0.14 | -0.05 | 0.15* | -0.11 | -0.07 | -0.13 | -0.08 | -0.05 | -0.05 | -0.16* | -0.13 |
| SSM | 0.16* | 0.03 | -0.08 | -0.07 | 0.07 | 0.11 | -0.02 | 0.08 | -0.03 | 0.11 | 0.10 | 0.11 | 0.02 |
| CosIn V | 0.04 | 0.02 | 0.01 | 0.16* | -0.11 | 0.00 | 0.09 | 0.14* | 0.04 | 0.15* | 0.14* | 0.12 | 0.05 |
| SOD | 0.04 | 0.00 | 0.16* | -0.11 | -0.04 | -0.14* | -0.14* | 0.06 | -0.14* | -0.05 | -0.05 | 0.02 | -0.03 |
| SPPA | -0.08 | -0.04 | 0.04 | -0.02 | -0.09 | -0.01 | 0.12 | 0.20* | -0.13 | -0.07 | -0.07 | 0.03 | -0.06 |
| SPSL | 0.11 | 0.12 | 0.11 | 0.06 | -0.12 | -0.07 | 0.04 | 0.03 | 0.03 | 0.13* | 0.13 | 0.09 | 0.02 |
| G | 0.07 | 0.08 | -0.03 | 0.12 | -0.09 | 0.06 | 0.11 | 0.14 | 0.07 | 0.24* | 0.23* | 0.16* | 0.13 |
| Real | 0.19* | 0.25* | 0.03 | 0.13 | -0.16* | 0.01 | 0.14* | 0.22* | 0.10 | 0.25* | 0.25* | 0.080 | 0.00 |
| SP | 0.00 | -0.03 | 0.00 | 0.01 | -0.01 | 0.02 | 0.02 | 0.07 | 0.00 | 0.11 | 0.10 | 0.13 | 0.06 |
| Invol | -0.02 | 0.03 | 0.17* | 0.23* | -0.12 | -0.09 | 0.26* | -0.01 | 0.28* | 0.12 | 0.11 | 0.09 | 0.11 |

**Annexe 16. Corrélations IPQ- HRV paramètres
fréquentiels- SPQ(seuil de significativité fixé à p<0.05)**

| | TP (msec2) | VLF (msec2) | LF (msec2) | HF (msec2) | LFnorm (n,u) | HFnorm (n,u) | LF/HF |
|------------------|---------------|----------------|---------------|---------------|-----------------|-----------------|---------------|
| Attention | -0.12 | -0.06 | 0.03 | -0.14 | 0.27* | -0.28* | 0.19* |
| SSM | -0.03 | 0.11 | -0.01 | 0.03 | -0.02 | 0.00 | -0.027 |
| CosInV | 0.14 | 0.27* | 0.13 | 0.26* | -0.18 | 0.16 | -0.19* |
| SOD | -0.17* | -0.04 | -0.16* | -0.16* | 0.09 | -0.10 | 0.07 |
| SPPA | -0.11 | -0.09 | 0.03 | -0.10 | 0.07 | -0.09 | 0.07 |
| SPSL | -0.01 | 0.06 | 0.05 | 0.06 | 0.09 | -0.09 | 0.09 |
| G | 0.15 | 0.09 | 0.19* | 0.23* | 0.01 | -0.01 | -0.01 |
| Real | 0.18* | 0.21* | 0.14* | 0.23* | -0.08 | 0.07 | -0.12 |
| SP | 0.03 | 0.03 | 0.04 | 0.07 | 0.02 | -0.04 | 0.02 |
| Invol | 0.20* | 0.05 | 0.29* | 0.12 | 0.18* | -0.18* | 0.12 |

Annexe 17. Régressions MEC-SPQ pour chaque groupe (seuil de significativité fixé à $p < 0.05$)

| Décor | visibilité | Variable prédictive | Variable dépendante | Beta | p |
|-------|------------|---------------------|---------------------|-------|--------|
| 2 | 1 | Attention | SSM | 0.60 | 0.00** |
| 2 | 1 | SSM | SPPA | 0.68 | 0.00** |
| 2 | 1 | SSM | Self-location | 0.78 | 0.00** |
| 2 | 1 | SOD | SSM | 0.09 | 0.70 |
| 2 | 1 | SOD | Self-location | 0.35 | 0.14 |
| 2 | 1 | SOD | SPPA | 0.25 | 0.31 |
| 2 | 1 | Involvement | SSM | 0.39 | 0.09 |
| 2 | 1 | Involvement | Self-location | 0.34 | 0.15 |
| 2 | 1 | Involvement | SPPA | 0.16 | 0.52 |
| 2 | 0 | Attention | SSM | 0.11 | 0.66 |
| 2 | 0 | SSM | SPPA | 0.60 | 0.01* |
| 2 | 0 | SSM | Self-location | 0.54 | 0.02* |
| 2 | 0 | SOD | SSM | 0.59 | 0.00** |
| 2 | 0 | SOD | Self-location | 0.61 | 0.00** |
| 2 | 0 | SOD | SPPA | 0.40 | 0.08 |
| 2 | 0 | Involvement | SSM | 0.18 | 0.47 |
| 2 | 0 | Involvement | Self-location | 0.06 | 0.79 |
| 2 | 0 | Involvement | SPPA | 0.39 | 0.10 |
| 3 | 1 | Attention | SSM | 0.41 | 0.08 |
| 3 | 1 | SSM | SPPA | 0.82 | 0.00** |
| 3 | 1 | SSM | Self-location | 0.82 | 0.00** |
| 3 | 1 | SOD | SSM | 0.81 | 0.00** |
| 3 | 1 | SOD | Self-location | 0.83 | 0.00** |
| 3 | 1 | SOD | SPPA | 0.70 | 0.00** |
| 3 | 1 | Involvement | SSM | 0.20 | 0.43 |
| 3 | 1 | Involvement | Self-location | 0.26 | 0.28 |
| 3 | 1 | Involvement | SPPA | 0.30 | 0.19 |
| 3 | 0 | Attention | SSM | -0.16 | 0.52 |
| 3 | 0 | SSM | SPPA | 0.54 | 0.02* |
| 3 | 0 | SSM | Self-location | 0.64 | 0.03* |
| 3 | 0 | SOD | SSM | 0.58 | 0.00** |
| 3 | 0 | SOD | Self-location | 0.77 | 0.00* |

| | | | | | |
|---|---|-------------|---------------|-------|------|
| 3 | 0 | SOD | SPPA | 0.41 | 0.08 |
| 3 | 0 | Involvement | SSM | -0.02 | 0.92 |
| 3 | 0 | Involvement | Self-location | 0.05 | 0.84 |
| 3 | 0 | Involvement | SPPA | 0.30 | 0.21 |

Annexe 18. Corrélations IPQ pour chaque situation expérimentale (seuil de significativité fixé à $p < 0.05$)

| | | | |
|---------------------------------------|------------|-------------|----------|
| Décor 2; Visibilité parfaite | INV | REAL | G |
| SP | 0.60* | 0.32 | 0.84* |
| INV | | 0.21 | 0.67* |
| REAL | | | 0.32 |
| Décor 2; Visibilité détériorée | | | |
| SP | 0.56* | 0.64* | 0.69* |
| INV | | 0.50* | 0.65 |
| REAL | | | 0.61* |
| Décor 3; Visibilité parfaite | | | |
| SP | 0.52* | 0.47* | 0.88* |
| INV | | 0.45* | 0.72* |
| REAL | | | 0.46* |
| Décor 3; Visibilité détériorée | | | |
| SP | 0.63* | 0.44* | 1** |
| INV | | 0.70* | 0.72* |
| REAL | | | 0.50* |

Annexe 19. Corrélations SPQ-PANAS pour chaque situation expérimentale (seuil de significativité fixé à $p < 0.05$)

| <i>Décor2; Visibilité parfaite</i> | PA | NA |
|--|-------|-------|
| Attention | 0.50* | -0.09 |
| Spatial Situation Model (SSM) | 0.35 | -0.80 |
| Cognitive Involvement (CogInv) | 0.53* | 0.10 |
| Suspension Of Disbelief (Sod) | 0.24 | 0.06 |
| Spatial presence possible actions (SPPA) | 0.46* | -0.20 |
| Self-Location (SPSL) | 0.43* | -0.08 |
| G | 0.47* | -0.03 |
| SP | 0.34 | -0.21 |
| INV | 0.25 | -0.23 |
| REAL | 0.05 | 0.09 |
| <i>Décor 2; Visibilité détériorée</i> | | |
| Attention | 0.38* | -0.18 |
| Spatial Situation Model (SSM) | 0.37* | -0.08 |
| Cognitive Involvement (CogInv) | 0.42* | 0.05 |
| Suspension Of Disbelief (Sod) | 0.29 | -0.27 |
| Spatial presence possible actions (SPPA) | 0.41* | -0.21 |
| Self-Location (SPSL) | 0.36 | -0.29 |
| G | 0.47* | -0.25 |
| SP | 0.42* | -0.31 |
| INV | 0.41* | 0.04 |

| | | |
|---|--------------|---------------|
| REAL | 0.27 | -0.33 |
| <i>Décor 3; Visibilité parfaite</i> | | |
| Attention | 0.56* | -0.30 |
| Spatial Situation Model (SSM) | 0.47* | 0.11 |
| Cognitive Involvement (CogInv) | 0.40* | 0.01 |
| Suspension Of Disbelief (Sod) | 0.42* | -0.18 |
| Spatial presence possible actions (SPPA) | 0.55* | 0.15* |
| Self-Location (SPSL) | 0.46* | 0.05 |
| G | 0.51* | 0.02 |
| SP | 0.42* | -0.04 |
| INV | 0.34 | 0.00 |
| REAL | 0.29 | 0.04 |
| <i>Décor 3; Visibilité détériorée</i> | | |
| Attention | 0.59* | -0.30 |
| Spatial Situation Model (SSM) | 0.05 | -0.33 |
| Cognitive Involvement (CogInv) | 0.52* | -0.16 |
| Suspension Of Disbelief (Sod) | 0.15 | -0.10 |
| Spatial presence possible actions (SPPA) | 0.29 | -0.04 |
| Self-Location (SPSL) | 0.17 | -0.28 |
| G | 0.54* | -0.56* |
| SP | 0.33 | -0.42* |
| INV | 0.30 | -0.14 |
| REAL | 0.05 | -0.07 |

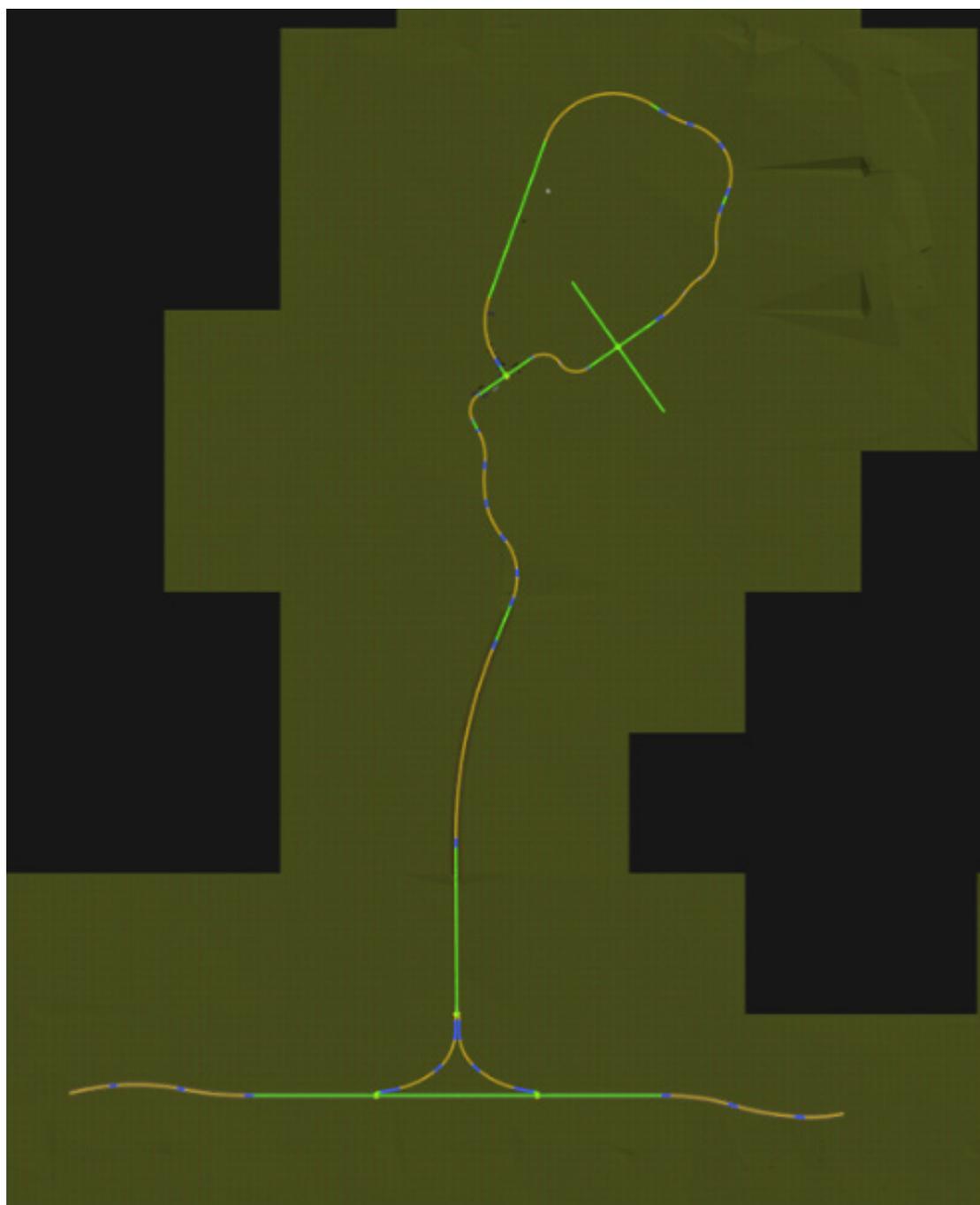
Annexe 20. Questionnaire de présence IPQ

French IPQ Items

| Number | IPQ item name | French question | French anchors |
|--------|---------------|---|---|
| 1 | G1 | Dans le monde généré par l'ordinateur, j'ai eu le sentiment "d'y être". | Pas du tout--Beaucoup |
| 2 | SP1 | D'une certaine façon, j'ai eu l'impression que le monde virtuel m'entourait. | Pas du tout d'accord--Tout à fait d'accord |
| 3 | SP2 | J'avais l'impression que j'étais juste en train de percevoir des images. | Pas du tout d'accord--Tout à fait d'accord |
| 4 | SP3 | Je ne me suis pas senti présent dans l'espace virtuel. | Pas senti présent--Senti présent |
| 5 | SP4 | J'ai eu la sensation d'agir dans l'espace virtuel plutôt que d'agir sur un quelconque mécanisme à l'extérieur de celui-ci. | Pas du tout d'accord--Complètement d'accord |
| 6 | SP5 | Je me suis senti présent dans l'espace virtuel. | Pas du tout d'accord--Tout à fait d'accord |
| 7 | INV1 | A quel point étiez-vous conscient du monde réel environnant alors que vous étiez en train de naviguer dans le monde virtuel ? (par exemple : sons, température de la pièce, présence d'autres gens, etc.) ? | Extrêmement conscient-Modérément conscient-Pas conscient du tout |
| 8 | INV2 | Je n'étais pas conscient de mon environnement réel. | Pas du tout d'accord--Tout à fait d'accord |
| 9 | INV3 | Je faisais toujours attention à l'environnement réel. | Pas du tout d'accord--Tout à fait d'accord |
| 10 | INV4 | J'étais complètement captivé par le monde virtuel. | Pas du tout d'accord--Tout à fait d'accord |
| 11 | REAL1 | Comment le monde virtuel vous a-t-il semblé? | Complètement réel--Pas du tout réel |
| 12 | REAL2 | A quel point votre expérience dans l'environnement virtuel vous a-t-elle semblée cohérente avec votre expérience dans le monde réel? | Pas cohérente-Modérément cohérente-Très cohérente |
| 13 | REAL3 | A quel point le monde virtuel vous a-t-il semblé réel? | A peu près aussi réel qu'un monde imaginé--Indistinguable du monde réel |
| 14 | REAL4 | Le monde virtuel semblait plus réaliste que le monde réel. | Pas du tout d'accord--Tout à fait d'accord |

Annexe 21. Circuits Décor 1, Décor 2, Décor 3

Décor 2 :



Décor 3 :



XIII

LISTE DES ANNEXES

| | |
|---|-----|
| Annexe 1. MEQ -SPQ | 185 |
| Annexe 2. Corrélations r de Bravais-Pearson entre les dimensions du questionnaire de présence (MEC-SPQ) et leurs items | 195 |
| Annexe 3. Régressions MEC-SPQ pour chaque groupe (seuil de significativité fixé à $p<0.05$)..... | 197 |
| Annexe 4. Corrélations subjectif/objectif Groupe 1 (seuil de significativité fixé à $p<0.05$)..... | 198 |
| Annexe 5. Corrélations subjectif/objectif Groupe 2 (seuil de significativité fixé à $p<0.05$)..... | 199 |
| Annexe 6. Corrélations subjectif/objectif Groupe 3 (seuil de significativité fixé à $p<0.05$)..... | 200 |
| Annexe 7. Corrélations subjectif/objectif Groupe 4 (seuil de significativité fixé à $p<0.05$)..... | 201 |
| Annexe 8. Corrélations r de Bravais-Pearson entre les dimensions du questionnaire de présence (MEC-SPQ) et leurs items | 202 |
| Annexe 9. Corrélations r de Bravais-Pearson entre les dimensions du questionnaire de présence (MEC-SPQ) et leurs items | 204 |
| Annexe 10. Corrélations r de Bravais-Pearson entre les dimensions du questionnaire PANAS et leurs items | 205 |
| Annexe 11. Régressions MEC-SPQ pour chaque groupe (seuil de significativité fixé à $p<0.05$)..... | 207 |
| Annexe 12. Corrélations IPQ pour chaque situation expérimentale (seuil de significativité fixé à $p<0.05$)..... | 209 |
| Annexe 13. Corrélations SPQ-PANAS pour chaque situation expérimentale (seuil de significativité fixé à $p<0.05$)..... | 210 |
| Annexe 14. Corrélations SPQ-Vitesse moyenne-SD Vitesse-IPQ pour chaque situation expérimentale (seuil de significativité fixé à $p<0.05$)..... | 213 |
| Annexe 15. Correlations IPQ- HRV paramètres temporels- SPQ(seuil de significativité fixé à $p<0.05$)..... | 216 |
| Annexe 16. Corrélations IPQ- HRV paramètres fréquentiels- SPQ(seuil de significativité fixé à $p<0.05$)..... | 217 |
| Annexe 17. Régressions MEC-SPQ pour chaque groupe (seuil de significativité fixé à $p<0.05$)..... | 218 |
| Annexe 18. Corrélations IPQ pour chaque situation expérimentale (seuil de significativité fixé à $p<0.05$)..... | 220 |
| Annexe 19. Corrélations SPQ-PANAS pour chaque situation expérimentale (seuil de significativité fixé à $p<0.05$)..... | 221 |

| | |
|---|-----|
| Annexe 20. Questionnaire de présence IPQ | 223 |
| Annexe 21. Circuits Décor 1, Décor 2, Décor 3 | 224 |

| | |
|---|-----|
| Figure 1. Modèle de la présence spatiale de Wirth et al (2007) | 38 |
| Figure 2. Simulateur statique (INRETS) de conduite..... | 41 |
| Figure 3. Représentation graphique en rouge de la piste d'essai 2 x 1 voie d'une longueur de 2km Versailles Satory | 42 |
| Figure 5 : Les rubriques du MEC-SPQ..... | 44 |
| Figure 6. Simulateur Oktal de conduite | 62 |
| Figure 7. Environnement virtuel avec le décor le plus riche | 63 |
| Figure 8. Environnement virtuel avec le décor moyennement riche | 64 |
| Figure 9. Environnement virtuel avec le décor le moins riche | 64 |
| Figure 10. Exemple de condition de visibilité parfaite..... | 64 |
| Figure 11. Exemple de condition de visibilité réduite | 65 |
| Figure 12. Boîtier Biopac MP150..... | 67 |
| Figure 13. Ceinture d'acquisition et connectique (électrodes ECG en haut à droite ; électrodes EDA en bas à droite) | 68 |
| Figure 14. Dispositif de mesure EDA..... | 68 |
| Figure 15. Dispositif de mesure ECG..... | 69 |
| Figure 16. Procédure de l'expérimentation 2 (exemple de succession des scenarios)..... | 70 |
| Figure 17. Variabilité cardiaque | 73 |
| Figure 18. La vitesse en fonction du degré de la richesse du décor | 82 |
| Figure 19. Position latérale moyenne en fonction du degré de richesse du décor | 85 |
| Figure 20. Simulateur de conduite..... | 109 |
| Figure 21. Environnement virtuel avec le décor le moins réaliste | 111 |
| Figure 22. Environnement virtuel avec le décor moyennement réaliste | 111 |
| Figure 23. Exemple de condition de visibilité parfaite..... | 112 |
| Figure 24. Exemple de condition de visibilité réduite | 112 |
| Figure 25. Boîtier Biopac MP150 et dispositifs de mesures EDA PPG | 113 |
| Figure 26. dispositifs de mesures EDA PPG | 114 |
| Figure 27. Dispositif de mesure PPG | 114 |
| Figure 28. Onde PPG (composante pulsatile)..... | 115 |
| Figure 29. Procédure de l'expérimentation 3. | 116 |
| Figure 30. Ecart type moyen de la vitesse en fonction de la richesse du décor et de la visibilité | 123 |
| Figure 31. Position latérale dans la voie en fonction de la visibilité et de la richesse du décor | 125 |
| Figure 32. Conductance électrodermale moyenne (EDA) en fonction de la visibilité et de la richesse du décor | 127 |
| Figure 33. Implication cognitive en fonction du degré d'immersion | 144 |

| | |
|---|-----|
| Figure34. La présence spatiale en fonction du degré d'immersion | 145 |
| Figure35. L'engagement en fonction du degré d'immersion | 146 |
| Figure36. PA (positive Affect) en fonction du degré d'immersion | 147 |
| Figure37. Ecart type de la vitesse en fonction du degré d'immersion..... | 149 |
| Figure38. Position latérale dans la voie en fonction du degré d'immersion | 150 |
| Figure39. Ecart type de la position latérale dans la voie en fonction du degré d'immersion | 151 |
| Figure40. Conductance électrodermale moyenne en fonction du degré d'immersion | 152 |
| Figure41. Ecart type de la conductance électrodermale en fonction du degré d'immersion | 153 |
| Figure42. Fréquence cardiaque moyenne en fonction du degré d'immersion..... | 154 |
| Figure43. Ecart type de la fréquence cardiaque en fonction du degré d'immersion . | 155 |

XV LISTE DES TABLES

| | |
|--|----|
| Tableau 1. Avantages et désavantages des simulateurs de conduite | 21 |
| Tableau 2. Moyenne et écart type pour les différents scores obtenus au MEC Spatial Presence Questionnaire..... | 47 |
| Tableau 3. Résultats ANOVA (seuil de significativité fixé à $p<0.05$) | 47 |
| Tableau 5. Moyenne et écart type pour les différentes données comportementales ... | 48 |
| Tableau 6. Résultats ANOVA Variables comportementales (seuil de significativité fixé à $p<0.05$)..... | 49 |
| Tableau 7. Moyenne et écart type pour des temps de réaction | 51 |
| Tableau 8. Résultats ANOVA Temps de réaction double tâche (seuil de significativité fixé à $p<0.05$)..... | 51 |
| Tableau 9. Résultats Régressions MEC-SPQ global (seuil de significativité fixé à $p<0.05$)..... | 52 |
| Tableau 10. Moyenne et écart type pour les différents scores obtenus au MEC Spatial Presence Questionnaire..... | 76 |
| Tableau 11. Résultats ANOVA (seuil de significativité fixé à $p<0.05$) | 77 |
| Tableau 12. Moyenne et écart type pour les différents scores obtenus au MEC Spatial Presence Questionnaire..... | 78 |
| Tableau 13. Résultats ANOVA (seuil de significativité fixé à $p<0.05$) | 78 |
| Tableau 14. Moyenne et écart type pour les différents scores obtenus au PANAS | 79 |
| Tableau 15. Résultats ANOVA PANAS (seuil de significativité fixé à $p<0.05$) | 80 |
| Tableau 16. Moyenne et écart type pour la vitesse moyenne et l'écart type moyen de la vitesse..... | 81 |
| Tableau 17. Résultats ANOVA Vitesse moyenne et écart type de la vitesse (seuil de significativité fixé à $p<0.05$)..... | 81 |
| Tableau 18. Moyenne et écart type pour la position latérale moyenne et l'écart type moyen de la position latérale | 83 |
| Tableau 19. Résultats ANOVA moyenne de la position latérale dans la voie et écart type de la position latérale dans la voie (seuil de significativité fixé à $p<0.05$).. | 84 |
| Tableau 20. Moyenne et écart type pour les paramètres temporels de la HRV | 86 |
| Tableau 21. Résultats ANOVA HRV domaine temporel (seuil de significativité fixé à $p<0.05$)..... | 88 |
| Tableau 22. Résultats ANOVA HRV domaine fréquentiel (seuil de significativité fixé à $p<0.05$) | 90 |
| Tableau 23. Moyenne et écart type pour la conductance électrodermale | 91 |
| Tableau 24. Résultats ANOVA EDA (seuil de significativité fixé à $p<0.05$) | 91 |
| Tableau 25. Résultats Régressions MEC-SPQ global (seuil de significativité fixé à $p<0.05$)..... | 92 |

| | |
|--|-----|
| Tableau 26. Résultats corrélations gamma IPQ global (seuil de significativité fixé à $p<0.05$)..... | 93 |
| Tableau 27. Résultats corrélations IPQ- PANAS- SPQ(seuil de significativité fixé à $p<0.05$)..... | 94 |
| Tableau 28. Résultats corrélations IPQ/SPQ avec la vitesse moyenne/écart type de la vitesse (SD Vitesse)(seuil de significativité fixé à $p<0.05$)..... | 96 |
| Tableau 29. Résultats corrélations IPQ/SPQ avec la moyenne de la position latérale dans la voie/écart type de la position latérale (SDLP)(seuil de significativité fixé à $p<0.05$) | 97 |
| Tableau 30. Résultats corrélations IPQ- SPQ-PANAS-EDA (seuil de significativité fixé à $p<0.05$)..... | 99 |
| Tableau 31. Moyenne et écart type pour les différents scores obtenus au MEC Spatial Presence Questionnaire..... | 117 |
| Tableau 32. Résultats ANOVA (seuil de significativité fixé à $p<0.05$) | 118 |
| Tableau 33. Moyenne et écart type pour les différents scores obtenus au IPQ | 119 |
| Tableau 34. Résultats ANOVA (seuil de significativité fixé à $p<0.05$) | 119 |
| Tableau 35. Moyenne et écart type pour les différents scores obtenus au PANAS .. | 120 |
| Tableau 36. Résultats ANOVA PANAS (seuil de significativité fixé à $p<0.05$) | 120 |
| Tableau 37. Moyenne et écart type pour la vitesse moyenne et l'écart type moyen de la vitesse..... | 121 |
| Tableau 38. Résultats ANOVA vitesse moyenne et écart type de la vitesse (seuil de significativité fixé à $p<0.05$)..... | 122 |
| Tableau 39. Moyenne et écart type pour la position latérale moyenne et l'écart type moyen de la position latérale | 123 |
| Tableau 40. Résultats ANOVA moyenne de la position latérale dans la voie et écart type de la position latérale dans la voie (seuil de significativité fixé à $p<0.05$) | 124 |
| Tableau 41. Moyenne et écart type pour la conductance électrodermale | 126 |
| Tableau 42 Résultats ANOVA EDA (seuil de significativité fixé à $p<0.05$)..... | 126 |
| Tableau 43. Moyenne et écart type du rythme cardiaque | 128 |
| Tableau 44 Résultats ANOVA Rythme Cardiaque (seuil de significativité fixé à $p<0.05$)..... | 128 |
| Tableau 45. Résultats Régressions MEC-SPQ global (seuil de significativité fixé à $p<0.05$)..... | 129 |
| Tableau 46. Résultats corrélations gamma IPQ global (seuil de significativité fixé à $p<0.05$)..... | 130 |
| Tableau 47. Résultats corrélations IPQ- PANAS- SPQ(seuil de significativité fixé à $p<0.05$)..... | 131 |
| Tableau 48. Résultats corrélations IPQ- EDA-SD EDA- SPQ(seuil de significativité fixé à $p<0.05$)..... | 133 |
| Tableau 49. Résultats corrélations IPQ- SD Rythme cardiaque-Moyenne rythme cardiaque- SPQ(seuil de significativité fixé à $p<0.05$)..... | 134 |
| Tableau 50 Résultats ANOVA (seuil de significativité fixé à $p<0.05$) | 143 |
| Tableau 51 Résultats ANOVA (seuil de significativité fixé à $p<0.05$) | 145 |
| Tableau 52 Résultats ANOVA PANAS (seuil de significativité fixé à $p<0.05$) | 146 |

| | |
|--|-----|
| Tableau 53 Résultats ANOVA (seuil de significativité fixé à $p < 0.05$) | 148 |
| Tableau 54 Résultats ANOVA (seuil de significativité fixé à $p < 0.05$) | 149 |
| Tableau 55 Résultats ANOVA (seuil de significativité fixé à $p < 0.05$) | 151 |
| Tableau 56 Résultats ANOVA (seuil de significativité fixé à $p < 0.05$) | 153 |

