Les simulateurs de conduite : évaluation de la validité psychologique sous l'angle de la charge mentale

Vérane Faure

▶ **To cite this version:**

Vérane Faure. Les simulateurs de conduite : évaluation de la validité psychologique sous l'angle de la charge mentale. Informatique. Université Paris Saclay (COmUE), 2017. Français. NNT : 2017SACLS590 . tel-01737541v2

HAL Id: tel-01737541

https://theses.hal.science/tel-01737541v2

Submitted on 19 Mar 2018

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

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

NNT : 2017SACLS590

Les simulateurs de conduite : Evaluation de la validité psychologique sous l'angle de la charge mentale

Thèse de doctorat de l'Université Paris-Saclay
préparée à l'IFSTTAR et Paris Sud

École doctorale n°**566**

ÉCOLE DOCTORALE
Sciences du sport, de la motricité et du mouvement humain (SSMMH)

Spécialité de doctorat: Sciences du Sport et du Mouvement Humain

Thèse présentée et soutenue à Orsay, le 20 décembre 2017, par

Vérane Faure

Composition du Jury :

Jean Claude Martin Professeur, Université Paris Saclay (Limsi)	Président - Examinateur
Christophe Bourdin Professeur, Université Aix-Marseille (ISM)	Rapporteur
Julien Cegarra Professeur, INU Champollion (SCoTE)	Rapporteur
Nicolas Benguigui Professeur, Université Caen-Normandie (CESAMS)	Directeur de thèse
Régis Lobjois Chargé de recherche, IFSTTAR (LEPSIS)	Co-Directeur de thèse

Thèse de doctorat

université PARIS-SACLAY
ÉCOLE DOCTORALE
Sciences du sport, de la motricité et du mouvement humain (SSMMH)

Titre : Simulateur de conduite : Evaluation de la validité psychologique sous l'angle de la charge mentale
Mots clés : simulateur de conduite, validité psychologique, charge mentale, clignements oculaires

Résumé : La validité des simulateurs de conduite est une question essentielle pour étayer et valoriser les travaux visant à mieux comprendre les comportements de conduite. Alors que les dimensions subjective et comportementale de la validité ont été régulièrement étudiées, elles font face à certaines limites. A l'opposé, rares sont les études qui se sont intéressées à la validité psychologique des simulateurs. Cette dimension compare l'implication des mécanismes qui sous-tendent les comportements entre conduite réelle et virtuelle. De plus, très peu d'études ont confronté les différentes dimensions de la validité, alors que cela pourrait contribuer au développement d'une métrologie des environnements virtuels. C'est précisément à ce niveau que se situe ce travail de thèse, au cours duquel des mesures classiques de la validité comportementale (vitesse, contrôle latéral) ont été confrontées à des mesures de la validité psychologique examinée sous l'angle de la charge mentale en prenant notamment comme indicateur les clignements oculaires. L'objectif principal était de déterminer si le niveau de charge mentale diffère entre conduite sur route et conduite sur simulateur dans des cas où les comportements observés ne permettent pas de faire de distinction.
Pour répondre à cette question, ce travail de thèse a été organisé autour de trois expériences réalisées sur simulateur de conduite et d'une étude sur route réelle. Les deux premières expériences visaient à mieux cerner l'effet de certains facteurs inhérents à la conduite sur route ouverte (trafic, environnement) sur les comportements de conduite et la charge mentale. La troisième expérience était quant à elle destinée à comparer la charge mentale induite par la conduite réelle et la conduite sur simulateur « bas coût », en confrontant cette mesure de la validité psychologique aux mesures comportementales classiques. Enfin, la quatrième expérience a porté sur les effets du retour d'effort du volant sur cette même charge mentale.

Les principaux résultats ont mis en évidence un niveau de charge supérieur en conduite simulée par comparaison à la conduite en situation réelle, alors que certaines mesures comportementales (vitesse) n'étaient pas différentes. Cette charge accrue sur simulateur ne semble cependant pas trouver son origine dans le retour d'effort au volant, les modalités de retour testées n'ayant pas eu d'effet sur les indicateurs de la charge. Au final, ce travail confirme que la prise en compte de la validité psychologique, examinée ici sous l'angle de la charge mentale, présente un intérêt dans une démarche d'évaluation, dans le but de mieux cerner le positionnement des utilisateurs face à un dispositif de réalité virtuelle. Il ouvre ainsi des perspectives pour améliorer la validité des simulateurs de conduite.

Title : Driving simulator : evaluation of psychological validity using mental workload
Key words : driving simulator, psychological validity, mental workload, eye blinks

Summary : The validity of driving simulators is an essential subject to support and highlight the works aiming to understand driving behaviours more thoroughly. While the subjective and behavioural dimensions of that validity have often been studied, they encounter a few limits. On the other hand, studies about simulators' validity are fairly rare. This dimension compares the implication of mechanisms inherent in behaviours between real and virtual driving. Furthermore, very few studies have considered the various dimensions of validity at once, whereas it could contribute to the development of a metrology for virtual environments. This thesis is precisely about this, with confrontations between classical measurements of behavioural validity (speed, lateral control) and measurements of psychological validity, examined from the viewpoint of mental workload - using indicators such as eye blinking. The main objective was to ascertain whether the mental workload levels vary between road driving and simulated driving when the observed behaviours aren't relevant to make a clear difference.
To answer this question, this thesis has been organized around three experiences carried out on driving simulators and a comparison between actual road driving and low-cost simulated driving. Two of those experiences were conducted to finely analyse the effect of some factors inherent to open road driving (traffic, environment) on driving behaviours and mental workload. The third experience was made to compare the mental workload induced by real driving and low-cost simulator driving, by putting this psychological validity measurement against classical behavioural measurements. Lastly, the fourth experience focused on the effects of the driving wheel's force-feedback on this same mental workload.
The main results revealed a higher workload level on simulated driving than on real driving, while some behavioural measurements (speed) were not different. This increased workload with the simulator does not seem to stem from the wheel's force-feedback, since the tested feedback methods did not have a repercussion on the workload levels. In the end, this work confirms that taking psychological validity - examined here from a mental workload viewpoint - does have an interest within an evaluation process to analyse in a finer fashion the mental state of users when faced with a virtual reality system. It creates prospects to improve the validity of driving simulators.

Université Paris-Saclay
Espace Technologique / Immeuble Discovery
Route de l'Orme aux Merisiers RD 128 / 91190 Saint-Aubin, France

Remerciements

Je tiens à remercier, en premier lieu, Régis Lobjois et Nicolas Benguigui, pour m'avoir dirigée tout au long de ce travail de thèse. Merci de m'avoir appris ce qui est important dans la préparation et la conduite d'expériences, ainsi que dans le travail de synthèse des connaissances et de rédaction. Merci de m'avoir laissé le temps nécessaire pour entreprendre plusieurs études complexes, impliquant de développer des compétences dans les domaines de la simulation de conduite et de la réalité virtuelle, de l'oculométrie et de l'étude de la conduite automobile en situation réelle. Merci d'avoir été patients, attentifs, exigeants. Merci, enfin, de m'avoir donné confiance en moi.

Ensuite, je souhaite remercier Fabrice Vienne pour avoir été d'une aide considérable pour toutes les expériences réalisées. J'ai apprécié de pouvoir travailler avec quelqu'un qui connaissait parfaitement les simulateurs de conduite du LEPSIS, qui a su se montrer disponible et qui a fait preuve de pédagogie, pour que je puisse travailler dans les meilleures conditions.

Pour ce travail de thèse, j'ai eu la chance de pouvoir réaliser une comparaison entre conduite réelle et conduite virtuelle, au CEREMA de St Brieuc. Parmi toutes les personnes qui ont permis de faire cette expérience, je remercie chaleureusement Lara Désiré, Dominique Bill et Jacky Robouant. Tout le travail effectué ensemble m'a vraiment fait progresser, et c'est avec vous que j'ai passé les moments de doute et de joie les plus forts de ma thèse.

Je remercie également toute l'équipe du LEPSIS pour ce qu'elle m'a apporté, avec une pensée particulière pour Didier Aubert. Ce fut réellement un plaisir de travailler pendant trois ans dans un cadre accueillant, stimulant, avec des personnes bienveillantes et conviviales. Je n'oublie pas non plus Mrs Christian Desmoulins et Thierry Montaut qui m'ont aidé à dépasser quelques obstacles rencontrés à la fin de cette thèse. Un grand merci à mes amis : Sophie, Kevin, Maxime, Héloïse, Ferhat, Lancelot, Matthieu, Nadège, Caroline, Laurent, Raphaël, Mickaël, William et Françoise. Je n'aurais pas réussi sans votre soutien et sans les moments « off » que nous avons passés ensemble. Merci enfin à ma famille, pour tout.

Résumé

La validité des simulateurs de conduite est une question essentielle pour étayer et valoriser les travaux visant à mieux comprendre les comportements de conduite. Alors que les dimensions subjective et comportementale de la validité ont été régulièrement étudiées, elles font face à certaines limites. A l'opposé, rares sont les études qui se sont intéressées à la validité psychologique des simulateurs. Cette dimension compare l'implication des mécanismes qui sous-tendent les comportements entre conduite réelle et virtuelle. De plus, très peu d'études ont confronté les différentes dimensions de la validité, alors que cela pourrait contribuer au développement d'une métrologie des environnements virtuels. C'est précisément à ce niveau que se situe ce travail de thèse, au cours duquel des mesures classiques de la validité comportementale (vitesse, contrôle latéral) ont été confrontées à des mesures de la validité psychologique examinée sous l'angle de la charge mentale en prenant notamment comme indicateur les clignements oculaires. L'objectif principal était de déterminer si le niveau de charge mentale diffère entre conduite sur route et conduite sur simulateur dans des cas où les comportements observés ne permettent pas de faire de distinction.

Pour répondre à cette question, ce travail de thèse a été organisé autour de trois expériences réalisées sur simulateur de conduite et d'une étude sur route réelle. Les deux premières expériences visaient à mieux cerner l'effet de certains facteurs inhérents à la conduite sur route ouverte (trafic, environnement) sur les comportements de conduite et la charge mentale. La troisième expérience était quant à elle destinée à comparer la charge mentale induite par la conduite réelle et la conduite sur simulateur « bas coût », en confrontant cette mesure de la validité psychologique aux mesures comportementales classiques. Enfin, la quatrième expérience a porté sur les effets du retour d'effort du volant sur cette même charge mentale.

Les principaux résultats ont mis en évidence un niveau de charge supérieur en conduite simulée par comparaison à la conduite en situation réelle, alors que certaines mesures comportementales (vitesse) n'étaient pas différentes. Cette charge accrue sur simulateur ne semble cependant pas trouver son origine dans le retour d'effort au volant, les modalités de retour testées n'ayant pas eu d'effet sur les indicateurs de la charge. Au final, ce travail confirme que la prise en compte de la validité psychologique, examinée ici sous l'angle de la charge mentale, présente un intérêt dans une démarche d'évaluation, dans le but de mieux cerner le positionnement des utilisateurs face à un dispositif de réalité virtuelle. Il ouvre ainsi des perspectives pour améliorer la validité des simulateurs de conduite.

Mots clefs : simulateurs de conduite, validité psychologique, charge mentale, clignements oculaires.

Summary

The validity of driving simulators is an essential subject to support and highlight the works aiming to understand driving behaviours more thoroughly. While the subjective and behavioural dimensions of that validity have often been studied, they encounter a few limits. On the other hand, studies about simulators' validity are fairly rare. This dimension compares the implication of mechanisms inherent in behaviours between real and virtual driving. Furthermore, very few studies have considered the various dimensions of validity at once, whereas it could contribute to the development of a metrology for virtual environments. This thesis is precisely about this, with confrontations between classical measurements of behavioural validity (speed, lateral control) and measurements of psychological validity, examined from the viewpoint of mental workload - using indicators such as eye blinking. The main objective was to ascertain whether the mental workload levels vary between road driving and simulated driving when the observed behaviours aren't relevant to make a clear difference.

To answer this question, this thesis has been organised around three experiences carried out on driving simulators and a comparison between actual road driving and low-cost simulated driving. Two of those experiences were conducted to finely analyse the effect of some factors inherent to open road driving (traffic, environment) on driving behaviours and mental workload. The third experience was made to compare the mental workload induced by real driving and low-cost simulator driving, by putting this psychological validity measurement against classical behavioural measurements. Lastly, the fourth experience focused on the effects of the driving wheel's force-feedback on this same mental workload.

The main results revealed a higher workload level on simulated driving than on real driving, while some behavioural measurements (speed) were not different. This increased workload with the simulator does not seem to stem from the wheel's force-feedback, since the tested feedback methods did not have a repercussion on the workload levels. In the end, this work confirms that taking psychological validity - examined here from a mental workload viewpoint - does have an interest within an evaluation process to analyse in a finer fashion the mental state of users when faced with a virtual reality system. It creates prospects to improve the validity of driving simulators.

Keywords : driving simulators, psychological validity, mental workload, eye blinking.

Table des matières

Introduction 13

Chapitre 1 : Revue de littérature 17

1. Réalité virtuelle et simulation de conduite 18

1.1. Considérations générales sur la réalité virtuelle 18
1.2. Conduite automobile et intérêt de la réalité virtuelle 21
1.3. Caractéristiques des principaux simulateurs de conduite 22
1.3.1. Les simulateurs « bas coût » 22
1.3.2. Les simulateurs intermédiaires 25
1.3.3. Les simulateurs de haut niveau 26

2. Validité des simulateurs de conduite 28

2.1. Validité physique 29
2.2. Validité subjective 31
2.3. Validité comportementale 33
2.3.1. Contrôle longitudinal 35
2.3.2. Contrôle latéral de la trajectoire 38
2.4. Confrontation entre dimensions : Les limites des mesures subjectives et comportementales de la validité 40
2.5. Validité psychologique 44
2.5.1. Définition et intérêt de la charge mentale 47
2.5.2. Les mesures de la charge mentale 50
2.5.2.1. Mesures subjectives de la charge mentale 50
2.5.2.2. Mesures comportementales de la charge mentale 51
2.5.2.3. Mesures de performance dans un protocole de double tâche 53
2.5.2.4. Mesures physiologiques de la charge mentale 54
2.5.2.5. Mesures liées aux mouvements oculaires 55
2.5.3. Comparaison entre conduite simulée et réelle en termes de validité comportementale et psychologique 59

Chapitre 2. Problématique 64

Chapitre 3. Contribution expérimentale 70

1. Expérimentation 1 : Effet de l'environnement de conduite, du trafic et de la double tâche sur la charge mentale en conduite simulée 71

1.1. Introduction 71
1.2. Matériel et Méthode 75
1.2.1. Participants 75
1.2.2. Dispositif expérimental 76
1.2.3. Plan expérimental et tâches 79
1.2.4. Procédure 81
1.2.5. Analyse des données 82
1.2.5.1. Clignements oculaires 82

1.2.5.2. Temps de réaction à la tâche secondaire 83
1.2.5.3. Taux de réversion du volant 84
1.2.5.4. Mesure subjective 84
1.3. Résultats 85
1.3.1. Fréquence de clignements 85
1.3.2. Temps de réaction à la tâche secondaire 88
1.3.3. Taux de réversion du volant 88
1.3.4. Score au NASA-TLX 89
1.4. Discussion 91
1.4.1. Environnement de conduite 91
1.4.2. Trafic 93
1.4.3. Double tâche 95
2. Expérimentation 2 : Effet de l'environnement de conduite et de la complexité de la double tâche sur la charge mentale en conduite simulée 97
2.1. Introduction 97
2.2. Matériel et Méthode 98
2.2.1. Participants 98
2.2.2. Dispositifs expérimentaux 98
2.2.3. Plan expérimental et tâches 98
2.2.4. Procédure 99
2.2.5. Analyse des données 100
2.3. Résultats 101
2.3.1. Fréquence de clignements 101
2.3.2. Performance aux tâches secondaires 105
2.3.3. Taux de réversion du volant 106
2.3.4. Score au NASA-TLX 107
2.4. Discussion 108
2.4.1. Environnement de conduite 109
2.4.2. Double tâche 112
2.4.3. Persistance d'un effet de l'environnement de conduite avec l'introduction d'une double tâche 113
3. Expérimentation 3 : Comparaison entre conduite sur route et conduite sur simulateur « bas coût » au niveau de la charge mentale 116
3.1. Introduction 116
3.2. Matériel et Méthode 118
3.2.1. Participants 118
3.2.2. Dispositifs expérimentaux 118
3.2.2.1. Véhicule instrumenté 118
3.2.2.2. Simulateur de conduite 119
3.2.2.3. Oculomètre 121

3.2.3. Environnement de conduite 122
3.2.3.1. Description de l'itinéraire pour la conduite sur route 122
3.2.3.2. Réalisation de la base 3D pour la conduite sur simulateur 124
3.2.4. Plan expérimental et tâches 124
3.2.5. Procédure 126
3.2.5.1. Déroulement de la conduite sur route 126
3.2.5.2. Déroulement de la conduite sur simulateur 127
3.2.6. Analyse des données 127
3.3. Résultats 127
3.3.1. Clignements 127
3.3.2. Performances à la tâche secondaire 129
3.3.3. Comportements de conduite 131
3.3.3.1. Vitesse 131
3.3.3.2. Taux de réversion du volant 133
3.3.4. Score au NASA-TLX 133
3.4. Discussion 134
3.4.1. Condition de conduite 135
3.4.2. Environnement de conduite 138
3.4.3. Effet des caractéristiques du simulateur 140
3.4.4. Confrontation de différents niveaux de validité du simulateur de conduite 141
4. Expérimentation 4 : Effet du retour d'effort du volant sur la charge mentale 142
4.1. Introduction 142
4.2. Matériel et Méthode 144
4.2.1. Participants 144
4.2.2. Dispositifs expérimentaux 145
4.2.3. Plan expérimental et tâche 146
4.2.4. Procédure 147
4.2.5. Analyse des données 147
4.3. Résultats 148
4.3.1. Clignements 148
4.3.2. Comportements de conduite 148
4.3.3. Mesures subjectives 149
4.4. Discussion 151
Chapitre 4 : Discussion générale 155
1. Les indicateurs de la charge mentale : Entre convergence et divergence 158
2. Comparaison réel – virtuel, validité du simulateur « bas coût » et possibilité d'amélioration 164
2.1. Rappels sur la question de la de validité des simulateurs 164
2.2. Synthèse sur la confrontation entre différents niveaux de validité 165
3. Conclusion et perspectives 168

Bibliographie..... 171
Annexes 187

Liste des figures

Figure 1 : Illustration de simulateurs de conduite « bas coût » 24
Figure 2 : Illustration de simulateurs de conduite intermédiaires 26
Figure 3 : Illustration de simulateurs de conduite de haut niveau 27
Figure 4 : Illustration du dispositif expérimental tirée de Morice et al. (2008) 41
Figure 5 : Illustration de l'introduction d'un roulis visuel en simulation de conduite moto 42
Figure 6 : Illustration du dispositif expérimental (Expérience 1) 77
Figure 7 : Illustration du dispositif Pertech pour l'enregistrement des mouvements oculaires .. 78
Figure 8 : Illustration des environnements de conduite 80
Figure 9 : Effet de l'environnement de conduite sur la fréquence moyenne de clignements (nb/min) 86
Figure 10 : Fréquence de clignements (nb/min) pour chaque participant, en fonction de l'environnement de conduite 87
Figure 11 : Interaction entre l'environnement de conduite et le trafic sur le temps de réaction à la tâche secondaire (ms) 89
Figure 12 : Effet de l'environnement de conduite sur le taux de réversion du volant (nb/min) .. 90
Figure 13 : Effet de l'environnement de conduite sur le score moyen au NASA-TLX 90
Figure 14 : Illustration du dispositif expérimental (Expérience 2). 98
Figure 15 : Effet de l'environnement de conduite sur la fréquence moyenne de clignements (nb/min) 101
Figure 16 : Effet de la double tâche sur la fréquence moyenne de clignements (nb/min) 102
Figure 17 : Fréquence de clignements (nb/min) pour chaque participant, en fonction de l'environnement de conduite (panel de gauche) et de la condition de double tâche (panel de droite) 104
Figure 18 : Temps de réaction au son en fonction de l'environnement de conduite 105
Figure 19 : Interaction entre l'environnement de conduite et la condition de double tâche sur le taux de réversion du volant (nb/min) 107
Figure 20 : Effet de l'environnement de conduite (panel de gauche) et de la condition de double tâche (panel de droite) sur le score moyen au NASA-TLX 108
Figure 21 : Illustration de l'instrumentation du véhicule VOICIE utilisé en situation réelle de conduite 120
Figure 22 : Simulateur de conduite de la DTer Ouest du CEREMA dans sa configuration 3 écrans 121
Figure 23 : Itinéraire choisi pour la conduite sur route et illustration des trois environnements 123
Figure 24 : Trafic moyen horaire du mardi 23 mars 2010 sur la RD 786. Relevé effectué par la Direction Territoriale de l'Ouest 123
Figure 25 : Etapes de construction de l'environnement virtuel (urbain) 125
Figure 26 : Interaction entre la condition de conduite et l'environnement de conduite sur la fréquence moyenne de clignements (nb/min) 129
Figure 27 : Fréquence de clignements (nb/min), pour chacun des participants, en fonction de la condition de conduite (panel de gauche) et de l'environnement lors de la conduite sur route (panel de droite) 130
Figure 28 : Temps de réaction moyen (ms) à la tâche secondaire en fonction de la condition de passation 131

Figure 29 : Vitesse moyenne des participants (et écart-type) dans chaque secteur du parcours en fonction des conditions de conduite et des limites de vitesse réglementaires..... 132
Figure 30 : Interaction entre les conditions de conduite et l'environnement sur le taux de réversion du volant (nb/min)..... 134
Figure 31 : Illustration du simulateur de conduite intermédiaire utilisé dans l'expérience 4.... 145
Figure 32 : Interaction entre la catégorie de virage et le gain sur le taux de réversion du volant (nb/min)..... 150
Figure 33 : Interaction entre le gain et le couple sur le taux de réversion du volant (nb/min).. 150

Liste des tableaux

Tableau 1 : Synthèse des effets principaux et des interactions selon les indicateurs de la charge mentale (Expérience 1) 94
Tableau 2 : Synthèse des effets principaux et des interactions selon les indicateurs de la charge mentale (Expérience 2). 111
Tableau 3 : Synthèse des effets principaux et des interactions selon les indicateurs (Expérience 3). 136
Tableau 4 : Valeurs de gain et de couple appliquées au retour d'effort du volant (Expérience 4) 146
Tableau 5 : Moyennes (et écart-type) de la fréquence des clignements, de la vitesse et du score au NASA-TLX en fonction du couple et du gain 151
Tableau 6 : Synthèse des effets sur les différentes variables (Expérience 4) 152
Tableau 7 : Fréquences moyennes de clignements (nb/min) selon la nature de la tâche, extraites de la littérature 162

Liste des annexes

Annexe n°1 : Questionnaire NASA-TLX (Hart & Staveland, 1988)

Annexe n°2 : Algorithme de détection des clignements à partir des données du diamètre pupillaire

Introduction

Un simulateur de conduite est un dispositif de réalité virtuelle permettant d'étudier les comportements et stratégies des automobilistes, au travers des interactions qu'ils entretiennent avec leur véhicule et l'environnement routier. Parmi les différents intérêts de la réalité virtuelle, elle offre la possibilité de mener des recherches dans un environnement contrôlé expérimentalement qui ne présente pas de risque pour les participants. Ces dernières années, les recours à la simulation de conduite se sont multipliés, aussi bien pour évaluer les caractéristiques et limites des conducteurs lorsqu'ils doivent faire face à des conditions dégradées (telles que conduire dans le brouillard, sous la pluie ou de nuit ; e.g., Bernardin, Brémond, Ledoux, Pinto, Lemonnier, Cavallo & Colomb, 2014 ; Caro, Cavallo, Marendaz, Boer & Vienne, 2009 ; Shahar, Brémond & Villa, 2016), que pour développer des systèmes d'aide à la conduite (e.g., Bueno Garcia, Fabrigoule, Ndiaye, & Fort, 2014 ; Navarro, Deniel, Yousfi, Jallais, Bueno & Fort, 2017) ou évaluer de nouveaux aménagements routiers (e.g., Mecheri, Rosey & Lobjois, 2017).

Il existe une grande diversité de simulateurs, allant de dispositifs statiques à « bas coût » jusqu'à des dispositifs à base mobile très évolués et plus onéreux. Quel que soit le degré de sophistication d'un simulateur de conduite et l'usage qui en est fait, il est important que les observations réalisées en réalité virtuelle puissent être exploitables pour des applications en conduite réelle. Les avancées récentes au plan technologique et informatique ainsi que dans le domaine des sciences du comportement humain ont permis de réduire les écarts existants entre situation virtuelle et situation réelle. Néanmoins, la réalité virtuelle et les simulateurs de déplacement ne peuvent pas prétendre à reproduire le réel (voir, par exemple, Pinto, Cavallo & Ohlman, 2008, ou Stoffregen, Bardy, Smart & Pagulayan, 2003). Dans ce contexte, il parait important de développer des méthodologies permettant d'identifier les

différences et similarités entre virtuel et réel pour déterminer la portée des résultats obtenus et leur possible exploitation pour améliorer les conditions de conduite en situation réelle.

Le champ de l'évaluation des dispositifs de réalité virtuelle et des simulateurs de conduite s'est doté, depuis une trentaine d'années, d'un cadre théorique marqué par un foisonnement de méthodes et de critères convoqués pour caractériser les simulateurs du point de vue de leur validité pour l'étude des comportements. S'il est indispensable de préciser que la validité d'un simulateur de conduite ne peut pas être déterminée en tant que telle, mais bien au regard de son domaine d'application (voir Pinto et al., 2008), il ne peut être écarté que ce foisonnement de méthodes et de critères d'évaluation rend difficile la définition de principes communs et consensuels. Certaines études ont ainsi mis en avant la validité physique, qui renvoie au fait qu'une expérience simulée doit être le strict pendant de son équivalent réel au plan des stimulations sensorielles, tant dans le nombre de modalités couvertes que de leur cohérence (Blaauw, 1982). D'autres se sont intéressées à la validité comportementale, c'est à dire à la proximité entre les actions produites en virtuel par rapport aux actions réalisées en situation réelle (e.g., Godley, Triggs & Fildes, 2002). Il apparait néanmoins qu'une majorité de travaux a mesuré les effets des caractéristiques des dispositifs sur le ressenti subjectif des utilisateurs en termes d'immersion, de réalisme ou de présence (e.g., Buttussi & Chittaro, 2017 ; Grechkin, Plumert & Kearney, 2014 ; McMahan, Bowman, Zielinski & Brady, 2012 ; Stanney, Kingdon, Graeber & Kennedy, 2002 ; Witmer & Singer, 1998). Néanmoins, certaines limites aux mesures subjectives ont été mises en évidence, lorsque comparées à des mesures objectives (e.g., Morice, Siegler & Bardy, 2008). De même, certaines études laissent penser que, parmi les mesures objectives, les mesures comportementales peuvent également être confrontées à une moindre sensibilité aux variations des caractéristiques des dispositifs. Pour dépasser ces limites, certains auteurs tels que Malaterre et Fréchaux (2001) proposent de mesurer la demande attentionnelle des utilisateurs. Ces dernières mesures, qui ont montré leur

intérêt pour mettre en évidence le coût cognitif inhérent à la réalité virtuelle (e.g., Chen, Chung, Proffitt, Wade & Winstein, 2015), permettent de poser la question de la validité psychologique des dispositifs de réalité virtuelle. Cette dernière fait référence à l'équivalence, en réel et en virtuel, des processus sous-tendant les comportements adoptés (Malaterre & Fréchaux, 2001). Le développement de nos connaissances sur ce niveau de validité pourrait contribuer à mieux cerner les effets de l'exposition aux dispositifs de réalité virtuelle sur le positionnement sensori-moteur et cognitif des utilisateurs.

Dans le cadre de ce travail de thèse, il est donc proposé de s'intéresser précisément au coût cognitif généré par une tâche de conduite sur simulateur. Ce point d'ancrage de la thèse est aussi motivé par la nécessaire utilisation, au cours de cette dernière décennie, des simulateurs de conduite dans le but d'étudier la dispersion des ressources attentionnelles liée à l'utilisation de systèmes d'aide à la conduite (GPS, régulateur de vitesse par exemple) ou de systèmes de communication (téléphone portable, réseaux de communication).

En se fondant sur une approche comparée de la charge mentale, ce travail de thèse a poursuivi quatre objectifs principaux.

Il s'agissait (i) d'examiner dans quelle mesure la validité psychologique, abordée sous l'angle du coût cognitif, contribue à l'évaluation d'un simulateur de conduite dit « bas coût » comparativement à la validité comportementale. Il s'agissait aussi (ii) d'évaluer la fiabilité et la robustesse des clignements oculaires pour rendre compte de la charge mentale dans le contexte de la conduite automobile, à partir d'une approche comparative de différentes variables la mesurant. A l'aide des éléments dégagés par les deux premiers objectifs, ce travail visait (iii) à déterminer si la conduite sur simulateur (« bas coût ») entraîne un niveau de charge mentale différent comparativement à la conduite sur route. Enfin, si tel est le cas, le dernier objectif était (iv) de tester et de proposer des pistes d'amélioration des simulateurs de conduite« bas coût ».

Au vu de ces objectifs, la première partie de ce manuscrit sera consacrée à la présentation du champ de la simulation de conduite automobile, tant dans ses applications que dans ses caractéristiques techniques, avant d'envisager la question de sa validité ainsi que les critères et dimensions identifiés pour l'évaluer. Cette partie proposera une analyse critique des résultats existants de façon à montrer en quoi la validité psychologique, qui jusqu'à présent a été peu utilisée, peut contribuer à donner un meilleur éclairage à ce champ de recherche. A ce sujet, la charge mentale sera mise en avant avec une présentation de ces différents indicateurs, avec une attention particulière portée aux clignements oculaires qui ont récemment été proposés. Ce panorama des connaissances relatives à la validité des simulateurs de conduite et à la charge mentale sera, dans la seconde partie de ce manuscrit, exploité de façon à élaborer la problématique du coût cognitif associé à la conduite sur simulateur.

Le troisième chapitre sera constitué des différentes expériences qui ont été réalisées pour étayer ce travail de thèse. Les deux premières expériences, sur simulateur de conduite « bas coût », ont eu pour objectif de mesurer la sensibilité des clignements oculaires aux exigences de la tâche de conduite en condition dégradée (double tâche). Elles ont été réalisées dans l'optique de la troisième expérience comparant la charge induite par la conduite sur un simulateur « bas coût » et la conduite en réel. Sur la base des résultats obtenus dans ces trois expérimentations, une dernière étude a été réalisée afin de manipuler le retour d'effort du volant pour en évaluer les effets sur le contrôle de trajectoire et le niveau de charge mentale. Le dernier chapitre sera consacré à la discussion générale des résultats obtenus et permettra de conclure sur l'apport de ce travail et sur les perspectives qui peuvent en être dégagées.

Chapitre 1 : Revue de littérature

1. Réalité virtuelle et simulation de conduite

1.1. Considérations générales sur la réalité virtuelle

La réalité virtuelle est une discipline à l'interface des sciences informatiques, technologiques et humaines. Elle a notamment été développée à partir de 1960 pour répondre aux besoins de formation du personnel de l'aviation militaire (Arnaldi, Fuchs & Tisseau, 2003) avec l'exigence de reproduire artificiellement des situations opérationnelles réalistes. Il existe de nombreuses définitions de la réalité virtuelle. Mais, nous pourrons détailler ses principes et ses enjeux à partir de la description qu'en donne Fuchs en 1996 : *« La finalité de la réalité virtuelle est de permettre à une personne (ou à plusieurs) une activité sensorimotrice et cognitive dans un monde artificiel, créé numériquement, qui peut être imaginaire, symbolique ou une simulation de certains aspects du monde réel. »*.

En gardant à l'esprit cette première définition, nous pouvons envisager la réalité virtuelle comme un ensemble de technologies permettant de créer une expérience numérique. Le participant est alors immergé dans un monde artificiel avec lequel il peut interagir. L'interaction se fait grâce à des métaphores, c'est-à-dire des systèmes de commande qui sont utilisés pour traduire une intention. Par exemple, le participant peut utiliser un joystick pour contrôler ses déplacements dans le monde virtuel. Dans ce cas, la manipulation du joystick peut être perçue comme une métaphore de l'action « marcher ». Et par généralisation, le joystick lui-même est considéré comme une métaphore de la marche.

Le principe d'interaction implique que l'environnement évolue en fonction de l'activité du participant. Les informations provenant des systèmes de commande sont analysées par un ou plusieurs ordinateurs, qui gèrent l'état courant du monde virtuel. Les conséquences d'une action sont rapidement calculées et sont traduites par des modifications appropriées de cet état courant. Il existe cependant un temps de latence dans chaque dispositif, qui sépare une action de sa conséquence. Ce délai dépend d'une part de la quantité

d'informations à traiter et de la complexité des changements à opérer dans l'environnement et d'autre part des limites technologiques, comme la puissance et le temps de calcul du système et la fréquence de rafraîchissement des différents éléments qui sont mis en réseau (systèmes de commande, ordinateurs, systèmes d'affichage). Ce temps de latence doit tendre à ne pas influencer le comportement de l'utilisateur (Arnaldi et al., 2003).

La qualité et la fluidité des interactions que l'individu entretient avec l'environnement virtuel participent à l'immersion. Le concept d'immersion désigne l'ensemble des technologies et des techniques susceptibles de générer les conditions favorables pour qu'un utilisateur transfère son attention du monde réel vers l'environnement virtuel (Burdea & Coiffet, 1993 ; Larrue, 2011). L'immersion repose donc sur les caractéristiques matérielles et logicielles des dispositifs de réalité virtuelle. Elle doit permettre à l'utilisateur de se sentir exister dans l'espace virtuel et de l'accepter comme un espace dans lequel il peut agir.

Parmi de multiples finalités et intérêts, la réalité virtuelle permet de fournir des environnements crédibles, contrôlables et sûrs. Les champs d'application de la réalité virtuelle sont nombreux et il serait sans doute difficile d'en donner une liste exhaustive. Toutefois, il est intéressant de présenter plusieurs exemples qui illustrent la diversité des utilisations qui en sont faites avant de détailler dans la suite de ce cadre théorique, celles qui relèvent de la simulation de la conduite automobile.

Comme indiqué précédemment, la réalité virtuelle a notamment été développée dans le domaine militaire où les systèmes sont principalement employés pour l'entraînement des soldats. Plusieurs études mettent en avant leur utilité pour évaluer les effets de la fatigue ou du stress (Borghini, Astolfi, Vecchiato, Mattia & Babiloni, 2014). En médecine, la réalité virtuelle est utilisée à des fins de formation des personnels soignants, avec l'objectif de réduire les coûts liés aux enseignements pratiques et les risques d'accidents (e.g., Gallagher, McClure, McGuigan, Crothers & Browning, 1999). Il existe aussi des applications pour des

processus de soins aux patients. Plusieurs études ont montré qu'il est efficace d'immerger des personnes ayant subi des brûlures dans des environnements virtuels de glace de façon à réduire la perception de la douleur, notamment pendant les soins (Hoffman, Doctor, Patterson, Carrougher & Furness, 2000).

La réalité virtuelle a également permis de développer des applications dans le but de diagnostiquer des troubles cognitifs liés au vieillissement ou à des traumatismes crâniens (Dejos, Sauzeon & N'Kaoua, 2012). Par rapport à des tests sur papier, la réalité virtuelle permet de confronter les patients à des situations familières, telles que faire les courses dans une épicerie. Cela permet de mieux évaluer les conséquences d'un trouble sur leur quotidien. Lors de processus de remédiation, les environnements virtuels sont aussi perçus comme plus concrets que les exercices d'entraînement qui sont classiquement proposés (Klinger, Kadri, Sorita, Le Guiet, Coignard et al., 2013). Dans le domaine des thérapies cognitivo-comportementales, la réalité virtuelle est utilisée pour évaluer et traiter les troubles de l'anxiété (e.g., Côté & Bouchard, 2008). Des environnements spécifiques ont également été développés pour des traitements de l'hyperactivité (e.g., Bioulac, Lallemand, Rizzo, Philip, Fabrigoule & Bouvard, 2012). Pour ces dernières applications, la réalité virtuelle présente surtout un avantage de sécurité et la possibilité de confronter progressivement le sujet aux situations qui lui posent problème.

Dans le domaine de l'éducation, la réalité virtuelle fait partie des nouveaux outils numériques et trouve sa place dans plusieurs programmes à destination des enfants (e.g., Thomson, Tolmie, Foot, Whelan, Sarvary & Morrison, 2005). Ici, les environnements virtuels se démarquent par leur côté plus interactif, stimulant et attrayant que des supports pédagogiques classiques.

La diversité des applications de la réalité virtuelle montre son importance. Elle peut être à la fois un outil de formation, de prévention, de diagnostic et de remédiation. Elle

possède des avantages en termes de sécurité et de contrôle des situations expérimentales, ainsi qu'une certaine attractivité pour l'utilisateur. Parmi les domaines où la réalité virtuelle s'est également considérablement développée, celui de la conduite automobile est incontournable. Il présente un intérêt particulier dans le cadre de cette thèse et il convient donc de le décrire plus en détails.

1.2. Conduite automobile et intérêt de la réalité virtuelle

La conduite automobile est une activité complexe qui a été très largement étudiée. Les recherches poursuivent en général deux objectifs : l'évaluation des comportements des usagers de la route et le développement de nouveaux équipements, aménagements ou systèmes d'aide à la conduite. Un grand nombre de travaux étudie les capacités perceptivo-motrices et cognitives des automobilistes. Ils cherchent à mieux cerner les effets, sur les comportements de conduite, de certaines caractéristiques individuelles (e.g., âge, genre, niveau d'expertise et apprentissage), de situations (e.g., dépassement ou franchissement d'intersection) ou conditions de conduite (e.g., nuit, brouillard, pluie) connues pour être accidentogènes (e.g., Cantin, 2009 ; Konstantopoulos, Chapman & Crundall, 2010). Le recours à la simulation est aussi fréquent dans l'industrie automobile, pour développer l'ergonomie des habitacles (e.g. Hanson, Sperling & Akselsson, 2006). Au carrefour de ces deux domaines de recherche, de nombreuses études évaluent l'acceptabilité des systèmes d'aide à la conduite et des systèmes d'information qui pénètrent aujourd'hui les véhicules (e.g., Benedetto, Pedrotti, Minin, Baccino & Montanari, 2011 ; Engström, Johansson & Östlund, 2005). Dans ces travaux, l'utilisation des simulateurs permet de tester les limites des capacités attentionnelles d'un usager au regard de ces différents systèmes, sans que ce dernier ne soit mis en danger. Enfin, les simulateurs de conduite trouvent leur place dans des études s'intéressant aux interactions entre conducteurs et infrastructures, dans une démarche de modernisation et/ou d'amélioration du réseau routier (e.g., Jamson, Lai & Jamson, 2010 ;

Rossi, Gastaldi, Biondi & Mulatti, 2013 ; Guattari, De Blasiis & Calvi, 2012 ; Yang, Overon, Han, Yan & Richards, 2013).

Cette thématique s'est fortement développée ces dernières années avec de grands projets tels que celui de la « self explaining road » (Walker, Stanton & Chowdhury, 2013). Par exemple, Jamson et al. (2010) ont étudié la propension d'un aménagement routier (marquage au sol et signalisation verticale) à réduire la vitesse des automobilistes à l'approche d'un virage dangereux ou d'une agglomération. Le recours à la simulation de conduite permet, dans un cas comme celui-là, de diminuer les coûts liés à l'expérience, de préserver la sécurité des participants et de contrôler plus précisément les variables (comme le trafic ou les conditions de visibilité).

En conclusion, les simulateurs de conduite apparaissent comme un outil d'étude privilégié de l'interaction entre conducteur, véhicule et infrastructure. Mais il existe une grande diversité de dispositifs de réalité virtuelle utilisés pour les recherches sur la conduite automobile, et cela interroge sur la portée de chacun des résultats observés. Dans la prochaine partie, nous présenterons les caractéristiques des principaux simulateurs de conduite et nous détaillerons les différents critères qui permettent de les évaluer.

1.3. Caractéristiques des principaux simulateurs de conduite

Alors que tous les simulateurs sont conçus pour restituer à minima les informations visuelles et permettre au conducteur d'interagir avec un environnement routier à partir d'interfaces classiques pour la conduite (volant, pédales, levier de vitesse, etc.), il en existe plusieurs types, basés sur des caractéristiques techniques différentes que l'on peut distinguer ou regrouper en fonction de leur coût (Jamson & Mouta, 2004 ; Weir & Clark, 1995).

1.3.1. Les simulateurs « bas coût »

Les simulateurs dits « bas coût » (« low cost ») sont généralement conçus avec une interface graphique et des systèmes de commande aux capacités limitées. Le support utilisé

pour la diffusion de l'environnement virtuel se compose d'un ou plusieurs écrans avec une résolution souvent équivalente à celle des téléviseurs de gamme moyenne (<1280 x 720 pixels, résolution minimale d'un écran en haute définition), bien que ces dernières années, ce type de simulateurs soit de plus en plus équipé d'écrans 4K (>3840 x 2160 pixels). Les conducteurs sont installés sur une chaise ou un siège automobile et le poste de conduite est fixe. Il ne s'agit pas d'une cabine, ce qui signifie que l'utilisateur n'est pas physiquement coupé de l'environnement du laboratoire. Les dispositifs d'interaction (volant, pédales, levier de vitesse, commodos) sont généralement des systèmes développés initialement pour les jeux vidéo (Figure 1). Cela implique qu'il y a peu de possibilités de les faire évoluer en manipulant leurs caractéristiques techniques telles que leur résolution.

Pour Weinberg et Harsham (2009), les simulateurs « bas coût » présentent surtout l'avantage comme leur nom l'indique d'être moins coûteux pour leur acquisition, leur entretien et leur développement, en comparaison de simulateurs plus évolués. De plus, ils n'impliquent pas de connaissances poussées en ingénierie, ce qui peut réduire les coûts liés à leur exploitation (qui restent cependant non négligeables compte tenu de la nécessité de générer un environnement virtuel et un scénario d'expérience). En dépit des caractéristiques techniques des interfaces qui limitent le réalisme de la simulation, les dispositifs « bas coût » semblent bien adaptés pour certaines études sur la conduite. Par exemple, ils sont capables de rendre compte des effets d'une double tâche sur les performances de conduite (Haigney, Taylor & Westerman, 2000 ; Santos, Merat, Mouta, Brookhuis & De Waard, 2005). De plus, une étude de Lee, Lee, Cameron et Li-Tsang (2003) a mis en évidence qu'ils peuvent être utilisés afin d'évaluer les conséquences de l'âge sur la capacité à conduire un véhicule. Enfin, Park, Allen, Rosenthal et Fiorentino (2005) soulignent que, par rapport à des simulateurs sophistiqués, ils sont relativement faciles à utiliser et que le temps de familiarisation

nécessaire au contrôle du dispositif est moins élevé pour les participants qui n'ont jamais été confrontés à la réalité virtuelle.

Figure 1 : Illustration de simulateurs de conduite « bas coût »

De haut en bas: STISIM driving simulator de l'Université du Dakota, d'après Lee et al., 2003 ; PC-based driving simulator with Microsoft Sidewinder controls, d'après Park et al., 2005 ; Low-cost driving simulator – Mitsubishi electric research lab (repris de Weinberg & Harsham, 2009).

1.3.2. Les simulateurs intermédiaires

Les simulateurs intermédiaires possèdent des caractéristiques techniques plus évoluées que les simulateurs « low cost ». Ils sont généralement équipés de dispositifs d'affichage de grandes dimensions. Cela peut être une caractéristique importante, dans la mesure où les écrans de grande taille sont préconisés pour les études qui portent sur la vitesse et le contrôle de trajectoire (Jamson, 2001). La qualité du support visuel est également améliorée par rapport aux simulateurs « low cost », avec l'utilisation possible d'images 3D et d'écrans haute définition (> 1280 x 720 pixels), qui permettent d'améliorer sensiblement la perception des distances entre les objets (Domini, Shah & Caudek, 2011). Les simulateurs intermédiaires sont souvent munis de cabines ou semi-cabines qui permettent de délimiter l'habitacle (Figure 2), ce qui, d'après l'étude de Burnett, Irune et Mowforth (2007) a un effet positif sur l'immersion. Ils sont majoritairement statiques, mais certains proposent quelques retours haptiques non vestibulaires, comme par exemple des vibrations du siège ou du volant (e.g., De Groot, De Winter, Mulder & Wieringa, 2011), voire de petits mouvements en translation du poste de conduite (e.g., Neimer & Mohellebi, 2009).

Le champ d'utilisation des simulateurs intermédiaires inclut celui des simulateurs « bas coût », mais ils présentent un intérêt particulier pour les études relatives à l'évaluation des comportements de conduite à dominante sensorimotrice tels que le contrôle de la vitesse, du freinage ou encore de la trajectoire. Les simulateurs proposant de petits mouvements de translation permettent en effet au conducteur d'adopter un comportement de freinage plus proche de celui que l'on peut observer en réel (Pinto, Cavallo, Ohlmann, Espie & Roge, 2004). Les coûts d'acquisition et d'entretien d'équipements technologiques avancés, tels que des écrans de grande dimension, en haute définition, ou des dispositifs permettant d'améliorer la profondeur des images (3D) peuvent être assez élevés. Le développement de plateformes mobiles pour permettre un déplacement de la cabine nécessite des compétences en ingénierie.

Enfin, la puissance de calcul des ordinateurs permettant de gérer des interfaces sophistiquées doit être plus conséquente que pour un simulateur à « bas coût », pour ne pas provoquer une augmentation sensible du temps de latence.

Figure 2 : Illustration de simulateurs de conduite intermédiaires

De haut en bas : « PAVCAS », simulateur à plateforme mobile du CNRS/CEPA (repris de Pinto, 2007), simulateur lacet à plateforme mobile de l'IFSTTAR-LEPSIS.

1.3.3. Les simulateurs de haut niveau

Enfin, les simulateurs de haut niveau, développés dans une proportion bien moins importante que ceux décrits précédemment, disposent d'écrans haute définition, disposés de façon à couvrir l'ensemble du champ visuel du conducteur (Haug, Choi, Kuhl & Wargo, 1995). Ils sont souvent équipés de systèmes de restitution sonore qui permettent de fournir des indices de localisation et de direction du son pour en étudier les effets sur les comportements de conduite (e.g., Tsingos & Warusfel, 2008). Les postes de conduite correspondent à des cabines ou semi-cabines de véhicules (Figure 3) et sont placés sur des plateformes qui

permettent la restitution de mouvements selon plusieurs axes en translation (table XY) et/ou en rotation (plateformes de type hexapode). Les simulateurs de haut niveau sont conçus dans le but de « créer une expérience de conduite crédible, à défaut de pouvoir être fidèle au réel » (Colombet, Dagdelen, Reymond, Pere, Merienne & Kemeny, 2008). Ils présentent un intérêt, par exemple, pour étudier des aspects fins du contrôle de trajectoire. Ils sont utilisés dans le domaine de l'industrie automobile pour tester de nouvelles interfaces de conduite.

Figure 3 : Illustration de simulateurs de conduite de haut niveau

En haut à droite, simulateur ULTIMATE de Renault (repris de Kemeny, 2009) ; en haut à gauche, simulateur de l'Université de Leeds (repris de Jamson et al., 2010) ; en bas, simulateur du VTI (repris de Pinto, 2007).

Les coûts d'acquisition des technologies utilisées pour les simulateurs de haut niveau sont bien plus élevés que pour les autres catégories de simulateurs. D'autre part, le développement de la simulation (environnement virtuel complexe, environnement sonore, modélisation du mouvement du véhicule) nécessite le travail de plusieurs ingénieurs et les coûts d'exploitation de ces dispositifs sont donc élevés. Ils appartiennent généralement aux

centres recherche et développement de l'industrie automobile, même si quelques rares universités ou centres de recherches publics en sont dotés.

L'augmentation constante du nombre de simulateurs de conduite témoigne d'un intérêt particulier des chercheurs pour ces dispositifs, dont les coûts d'acquisition doivent surtout être en adéquation avec les objectifs fixés. Dès lors, il est important que les observations réalisées en réalité virtuelle puissent être transférées au monde réel. Cette problématique est restée au centre des préoccupations depuis les années 1950 et différents critères ont été identifiés pour mesurer la validité des simulateurs.

2. Validité des simulateurs de conduite

La littérature qui traite de la validité des dispositifs de réalité virtuelle et des simulateurs de conduite met en lumière l'existence d'une pluralité de concepts utilisés pour en rendre compte. Blaauw (1982) a ainsi distingué la *validité physique* et la *validité comportementale*. Malaterre et Fréchaux (2001) ont défini les termes de *validité physique*, *expérientielle*, *éthologique* et *psychologique*. Reimer, d'Ambrosio, Coughlin, Kafrissen et Biederman (2006) ont proposé les concepts de *validité externe* et *interne*. Le terme de fidélité a parfois été préféré à celui de validité, pour des raisons de positionnement paradigmatique. Ainsi, Stoffregen et al. (2003) ont utilisé les notions de *fidélité du stimulus*, de *fidélité subjective de l'expérience* et de *fidélité de l'action*. Burkhardt, Bardy et Lourdeaux (2003) ont, quant à eux, recensé les acceptions relatives aux concepts de réalisme, d'immersion et de présence, qui souffrent néanmoins d'un manque de positionnement clair. Il parait d'ailleurs illusoire de définir une seule notion regroupant tous les critères de ce que l'on doit trouver dans un simulateur.

La diversité des concepts reflète très certainement la multitude d'applications possibles de la réalité virtuelle, qui peuvent aller de la simple visualisation d'environnements n'impliquant pas d'interaction avec le contenu simulé à des interactions complexes impliquant

le déplacement propre de l'utilisateur ou la manipulation d'objets (certains dispositifs vont jusqu'à délivrer des indices olfactifs ; e.g., Baus & Bouchard, 2017), une application particulière appelant un critère de validité particulier. Elle peut également trouver son origine dans la multitude de simulateurs de conduite et de plateforme de réalité virtuelle existants aujourd'hui. Chaque simulateur étant unique dans sa conception mécanique, matérielle et logicielle, il est par conséquent difficile d'établir une métrique commune d'évaluation de leur (domaine de) validité afin de capitaliser à partir de comparaisons réel-virtuel ou de comparaisons entre simulateurs.

A partir d'une revue des différentes dimensions de la validité d'un dispositif de réalité virtuelle et de leur définition, cette section s'attachera, dans un premier temps, à dresser un état des lieux synthétique des conceptions de la validité, des mesures et des variables utilisées ainsi que des résultats obtenus. Une seconde partie présentera les études qui ont confronté différentes dimensions de la validité pour en évaluer les limites et les intérêts. Elle permettra de montrer que très peu d'études se sont inscrites dans cette logique, alors que ce type de démarche semble à même de contribuer au « développement à la fois théorique et pratique d'une métrologie des Environnements Virtuels » (Burkhardt et al., 2003, p. 41). Elle soulignera en particulier l'intérêt de la validité psychologique examinée sous l'angle de la charge mentale dans une démarche d'évaluation des dispositifs de réalité virtuelle.

2.1. Validité physique

Le concept de *validité physique* a notamment été défini par Blaauw (1982) puis par Malaterre et Fréchaux (2001). Il renvoie au réalisme des stimuli auxquels l'utilisateur est exposé. Plus précisément, c'est une mesure stricte de la distance entre le monde physique et sa simulation, au travers de critères comme la qualité de l'immersion, les propriétés physiques de l'environnement virtuel ou la pertinence des canaux sensoriels impliqués dans l'interaction.

Elle est définie de cette manière par Stoffregen et al. (2003) sous le terme de *fidélité du stimulus*.

Pour rendre compte de la validité physique, il est nécessaire de s'intéresser aux caractéristiques immersives et interactives des dispositifs (Mestre, Fuchs, Berthoz & Vercher, 2006) et donc d'évaluer la richesse sensorielle (nombre de modalités sensorielles impliquées dans l'interaction), le degré de correspondance entre l'utilisateur et le monde virtuel (la correspondance faisant référence à l'interface sensori-motrice utilisée pour interagir avec l'environnement virtuel) et la cohérence sensorielle de la simulation qui a trait à la synchronisation spatiale et temporelle des stimulations sensorielles. Au plan opérationnel, cela se traduit par le nombre de degrés de liberté impliqués dans l'interaction, la mesure du délai ou temps de latence du système, la fréquence d'image, la taille du champ visuel couvert, le taux de rafraîchissement ou encore la résolution spatiale et temporelle.

Poussé par l'évolution rapide des technologies informatiques et l'amélioration des performances globales des systèmes, le développement de simulateurs de haut niveau montre la volonté des ingénieurs et des chercheurs à réduire au maximum l'écart entre réel et virtuel. Les simulateurs utilisés pour le prototypage de véhicule tentent au maximum de respecter les caractéristiques physiques d'un habitacle de voiture, afin de s'assurer de la transférabilité des résultats à la situation réelle (Kemeny et Panerai, 2003). Les progrès technologiques permettent également l'émergence de modèles complexes pour la restitution des stimuli sonores (Tsingos & Warusfel, 2008), des objets virtuels en 3 dimensions (Raskar, Welch, Cutts, Lake, Stesin & Fuchs, 1998), du retour d'effort du volant (Pan, 2001) ou encore des mouvements du véhicule (Feenstra, Wentink, Roza, Bles & Valente, 2007). Néanmoins, un consensus semble exister sur le fait qu'il n'est pas réaliste de se donner comme objectif d'élaborer des simulateurs ayant une parfaite validité physique (ou alors, uniquement dans des conditions extrêmement limitées, et pour des coûts de mise en œuvre importants). Ce constat

est d'abord lié aux limitations inhérentes à la simulation de conduite ; il est, par exemple, impossible de reproduire des accélérations longitudinales prolongées dans le temps comme c'est le cas en conduite réelle. Et même si la restitution d'un mouvement à l'échelle 1 est possible (par exemple, une manœuvre de changement de voie avec le simulateur Renault ULTIMATE qui dispose d'un débattement suffisant), d'autres modalités sensorielles indiqueront toujours à l'utilisateur qu'il est face à un dispositif de réalité virtuelle (Stoffregen et al., 2003). Pour mieux traduire la validité des simulateurs, une possibilité est donc de se centrer sur l'utilisateur et sa perception subjective de l'environnement virtuel.

2.2. Validité subjective

Plusieurs termes existent dans la littérature pour faire référence à la validité subjective. Dans la nomenclature des différents niveaux de validité des simulateurs proposée par Malaterre et Fréchaux (2001), on la trouve sous le terme de *validité expérientielle*. Elle est définie comme la similitude du ressenti entre l'environnement réel et son équivalent virtuel ou encore comme le degré de crédibilité subjective accordée à la situation simulée. Dans les revues de questions relatives à la validité des environnements virtuels de Burkhardt et al. (2003) et Stoffregen et al. (2003), on la trouve sous le terme de *fidélité subjective de l'expérience (experiential fidelity).* Elle fait référence à la crédibilité perceptive de la simulation en comparaison à la situation réelle. Il s'agit d'une évaluation qui « implique un jugement de ressemblance, sans qu'il y ait doute ou illusion sur la nature artificielle du simulacre » (Burkhardt et al., 2003). Bouvier (2009) distingue, dans ce jugement de ressemblance, les jugements qui porteraient sur la crédibilité de l'environnement de ceux qui auraient trait à la crédibilité de l'expérience (cette dernière émanant d'aspects liés à l'interaction au sein de l'environnement, renvoyant ainsi l'évaluation de cette dimension à des mesures objectives). La crédibilité de l'environnement dépendrait de la satisfaction des attentes intellectuelles et perceptives de l'utilisateur (Bouvier, 2009). Cette crédibilité est à

rapprocher de la validité d'apparence (« face validity »), proposée par Stanton (1996) et reprise par Stedmon, Hasseldine, Rice, Young, Markham et al. (2009), qui se réfère au degré selon lequel l'utilisateur accepte le dispositif comme une représentation de la situation réelle.

Le degré d'acceptation du dispositif pourrait aussi dépendre de la motivation et de l'engagement de l'utilisateur (Stanton, 1996). Le rôle des attentes dans le jugement de ressemblance a été mis en évidence par Wertheim, Mesland et Bles (2001) dans une tâche de perception du mouvement propre. Ces auteurs ont comparé les réponses (description du profil de mouvement ressenti) de deux groupes de sujets à des stimulations purement linéaires obtenues grâce à un dispositif de type rail. Le premier des deux groupes a réalisé la tâche après avoir été complètement isolé au plan sensoriel alors que le second groupe était en mesure de voir le dispositif au cours de la session expérimentale. Les résultats ont montré que le groupe de participants « aveugles », qui n'avaient donc aucune connaissance ou attente préalable quant à la nature exacte des stimulations délivrées par le dispositif expérimental, a rapporté dans presque 50% des cas des sensations d'inclinaison, alors que le second groupe de sujets n'a rapporté que des sensations de translation.

Dans le domaine de la simulation de conduite, un nombre conséquent d'études, motivées par la mise au point des algorithmes de restitution de mouvement des simulateurs à plateforme dynamique, s'est appuyé sur des mesures subjectives relatives à la perception du mouvement propre. Ces études s'appuient sur différentes méthodologies. Dans les études cherchant à identifier les seuils de perception du mouvement selon différents axes afin de paramétrer les stratégies de commande (filtre washout, tilt coordination), les sujets devaient juger des caractéristiques des stimulations et signaler (en appuyant sur un bouton ou en répondant à voix haute) s'ils percevaient une accélération, une rotation ou encore une inclinaison (e.g., Groen & Bles, 2004 ; Groen, Howard & Cheung, 1999 ; Nesti, Masone, Barnett-Cowan, Giordano, Bulthöff & Pretto, 2012). Avec la même volonté de paramétrer au

mieux les mouvements des plateformes dynamiques, d'autres études ont demandé aux participants de déterminer, comparativement à la situation réelle, si les stimulations présentées étaient ou non réalistes pour la situation de conduite à l'étude (e.g., Nesti et al., 2012 ; Valente, Wentink, Van Paassen & Mulder, 2009, pour le cas de la conduite en courbe). Enfin, dans un dernier corpus d'études, il a été demandé aux participants quelle était leur préférence personnelle quant aux différentes stratégies de commande implémentées et testées (e.g., Colombet et al., 2008 ; Reid & Nahon, 1988).

Il apparait en résumé que les évaluations subjectives sont un moyen très fréquemment utilisé pour tester la validité des simulateurs avec une démarche centrée sur l'utilisateur qui parait tout à fait pertinente. Cela peut néanmoins poser la question des biais perceptifs qui peuvent apparaitre puisqu'il est bien connu que la perception subjective ou consciente peut parfois être trompée comme c'est le cas pour les illusions perceptives ou biaisées par des a priori (Hecht, 2001).

2.3. Validité comportementale

Au-delà du ressenti subjectif, les comportements des utilisateurs sont souvent au centre des attentions pour évaluer un simulateur dans une volonté d'objectiver les mesures. *La validité comportementale* suppose que les comportements induits par la simulation doivent correspondre aux comportements dans le monde réel. Elle est définie de manière similaire par Blaauw (1982) et Malaterre et Fréchaux (2001) qui utilisent le terme de *validité éthologique.* Blaauw (1982) précise que la validité comportementale peut être évaluée en termes absolus ou relatifs. La validité absolue fait référence au fait que le comportement en simulation a la même valeur et évolue de la même façon que le comportement réel. Par exemple, la vitesse pratiquée par les conducteurs sera la même en simulateur et en réel. La validité relative indique pour sa part que les comportements en réel et en simulation sont similaires, mais pas identiques. Cela signifie que les effets d'une situation de conduite sur une variable dépendante

vont dans le même sens en réel et en virtuel, mais que l'intensité de cet effet n'est pas forcément le même. Par exemple, la vitesse des conducteurs va diminuer entre une portion de ligne droite et un virage en réel et en virtuel, mais l'amplitude de cette diminution sera différente entre les deux conditions.

Le concept de validité comportementale est repris par d'autres auteurs, comme Burkhardt et al. (2003) ou Leplat (1997), qui utilisent le terme de *fidélité de l'action* pour représenter « la mesure selon laquelle le simulateur produit un comportement semblable à celui exigé dans la situation réelle ». A la différence de la conception de Blaauw (1982), l'évaluation de la validité d'un simulateur au plan des comportements n'implique pas nécessairement une confrontation directe entre un environnement virtuel et son équivalent dans le monde réel. C'est un point qui est défendu par Reimer et al. (2006) qui portent une attention particulière aux comportements de conduite pour définir trois niveaux de validité d'un simulateur : la *validité de la mesure,* la *validité interne* et la *validité externe.* La *validité de la mesure* permet de déterminer si les comportements observés en simulation sont crédibles, compte tenu du profil de l'utilisateur (par exemple, un conducteur qui déclare être imprudent en réel doit reproduire le même type de comportement sur simulateur). Ensuite, la *validité interne* mesure si les comportements observés sont cohérents avec le scénario de la simulation. Enfin, la *validité externe* vise à déterminer à quel degré les résultats d'une expérience simulée sont prédictifs des comportements que l'on pourrait observer dans le monde réel.

De nombreuses études se sont attachées à mesurer la validité comportementale des simulateurs de conduite. Ces études se sont majoritairement intéressées au contrôle longitudinal (contrôle du freinage, contrôle et régulation de la vitesse) et latéral du véhicule.

2.3.1. Contrôle longitudinal

Pour ce qui concerne les études traitant des comportements de freinage, les résultats montrent, de façon générale, que le freinage est initié plus tôt sur simulateur qu'en condition réelle de conduite (Cavallo, 1999 ; Hoffman, Lee, Brown & McGehee, 2002 ; Kaptein, Theeuwes & van der Horst, 1996). Par exemple, Hoffman et al. (2002) ont comparé le comportement de freinage en situation réelle de conduite et sur simulateur de haut niveau (plateforme dynamique de type hexapode). Les participants avaient pour consigne de suivre un véhicule lièvre roulant à la vitesse constante de 48,3 ou 96,5 km/h. Après un temps, ce véhicule freinait avec une intensité de 0,15 g ou 0,40 g et les participants devaient freiner pour éviter la collision. Les données recueillies en simulateur étaient comparées à des données obtenues en réel par Kiefer, Le Blanc, Palmer, Salinger, Deering et al. (1999) avec le même protocole. Bien que les patterns de résultats soient similaires entre les deux conditions de conduite, preuve pour les auteurs de la validité relative du dispositif, les conducteurs ont initié le freinage plus tôt, ont freiné plus fortement et ont maintenu un écart plus grand avec le véhicule qu'ils suivaient sur simulateur comparativement à la situation réelle.

Alors que la capacité à adapter le comportement de freinage en fonction des exigences de la situation et des types de freinage (freinage d'urgence ou progressif pour maintenir une distance ou jusqu'à l'arrêt du véhicule) a clairement été établie en réel, les différences entre ces deux types de freinage sont moins marquées en virtuel. Les auteurs ont suggéré que le manque d'expérience des conducteurs dans l'utilisation d'un simulateur de conduite pourrait avoir un effet sur leur comportement et expliquer pourquoi ces derniers chercheraient à conserver une marge de sécurité plus grande avec le véhicule qui précède. Les raisons possibles de ces résultats pourraient aussi résider dans la qualité du retour sensoriel qui précède et surtout qui suit le déclenchement du freinage. Ceci a été mis en évidence dans une étude de Siegler, Reymond, Kemeny et Berthoz (2001) qui ont comparé les comportements de

freinage entre une condition avec et une condition sans restitution de mouvement. Ils ont pu ainsi montrer que sur simulateur dynamique, l'amplitude des décélérations était relativement conforme aux valeurs connues en situation réelle et que les stratégies de freinage étaient particulièrement stables comparativement à la condition statique. Dans une tâche de freinage jusqu'à un point d'arrêt défini, Suetomi, Kido, Yamamoto et Hata (1995) ont comparé les patrons de décélération sur simulateur dynamique en présentant ou non une composante linéaire dans la restitution de mouvement et montré que la présence de cette composante permettait d'obtenir des profils de décélération constants et similaires à ceux obtenus par Spurr (1965) en condition réelle.

Sur la question de la vitesse, les études ont généralement mis en évidence des résultats assez convergents entre conduite en situation réelle et conduite sur simulateur, amenant les auteurs à conclure à la validité relative voire à la validité absolue des simulateurs utilisés. Néanmoins, des facteurs tels que les caractéristiques des simulateurs ou la géométrie de la route semblent jouer un rôle important dans les résultats obtenus. Bella (2008) a, en effet, montré que la proximité des vitesses adoptées en réel et en virtuel (simulateur statique avec cabine complète) dépendait de la géométrie de la route, et donc de sa difficulté. Sur un parcours de 12 km en environnement rural limité à 90 km/h, Bella a comparé les vitesses pratiquées sur 11 sites d'intérêt se différenciant par leur complexité (portions de ligne droite, virages peu prononcés ayant des rayons de courbure compris entre 400 et 500 m et virages prononcés ayant des rayons de courbure de 265 et 300 m). Les résultats ont montré que sur 9 des 11 sites étudiés, la vitesse sur simulateur n'était pas significativement différente de la vitesse observée en réel. Par contre, sur les deux autres sites, présentant une géométrie de route peu exigeante, les conducteurs ont adopté une vitesse plus élevée en simulateur qu'en réel.

L'effet de la géométrie de la route sur la vitesse a également été mis en évidence par Bittner, Simsek, Levison et Campbell (2002), les conducteurs réduisant leur vitesse dans les portions exigeantes (voir aussi Boer, Girshik, Yamamura & Kuge, 2000). Pour Bella (2008), les vitesses plus élevées enregistrées sur simulateur pourraient provenir d'une différence dans la perception du risque sur simulateur par opposition à la conduite sur route réelle. Pour Boer et al. (2000), il n'est pas exclu que l'absence de différence entre réel et virtuel sur des portions de route exigeantes proviennent d'une charge de travail plus grande sur simulateur, occasionnant ainsi une réduction de la vitesse. Cette charge de travail accrue pourrait être liée à l'absence de restitution de mouvement sur simulateur statique (Bella, 2008). D'autres études ont néanmoins conclu à la validité absolue de simulateurs statiques pour l'étude des vitesses pratiquées. Carsten, Groeger, Blana et Jamson (1997) ont montré que les vitesses adoptées sur le simulateur de l'Université de Leeds ne se différenciaient pas significativement des mesures effectuées en réel, quelle que soit la condition de trafic venant en sens inverse. Blaauw (1982) a comparé, sur simulateur et sur route, sur un tronçon de voie rapide, les vitesses pratiquées par des conducteurs novices et experts pour différentes consignes imposées au contrôle latéral et longitudinal (conduite libre, conduite en conservant une position fixe sur la voie, conduite à 100 km/h et conduite avec position et vitesse fixe). Des effets similaires de l'expérience et des consignes ont été observés sur la vitesse dans les deux conditions de conduite. A l'inverse de ces résultats, plusieurs études de comparaison réalisées sur simulateur dynamique ont mis en évidence une validité relative, mais pas absolue pour le contrôle de la vitesse. Dans une étude réalisée sur simulateur comprenant une cabine complète avec restitution en tangage et roulis, Godley et al. (2002) avaient pour objectif de tester l'efficacité de bandes rugueuses pour inciter les automobilistes à réduire leur vitesse à l'approche de zones dangereuses tout en veillant à valider le simulateur de conduite. Pour cela, ils ont comparé les profils de vitesse, en réel et sur simulateur pour des véhicules en approche de trois conditions (intersections,

courbes à gauche et courbes à droite). Les résultats ont montré que les conducteurs adoptaient des vitesses très similaires en présence des bandes rugueuses comparativement à la condition contrôle, que ce soit en condition réelle de conduite ou sur simulateur, attestant ainsi de la validité relative du simulateur. Cependant, la vitesse était significativement plus élevée dans l'environnement réel.

Törnros (1998) a montré des effets similaires dans le cas de la conduite en tunnel. Alors que l'effet principal de la condition de conduite a confirmé que la vitesse était supérieure sur simulateur (dynamique, avec cabine complète) comparativement à la situation réelle, l'effet des variables indépendantes était identique dans les deux environnements. Point remarquable de cette étude, Törnros a manipulé la présence du compteur de vitesse et montré que sans ce retour d'information, la vitesse baissait de 3 km/h dans les deux environnements de conduite. Enfin, Alm (1995) a quant à lui montré sur le même simulateur que Törnros (1998) que la vitesse moyenne adoptée était identique aux mesures effectuées en situation réelle sur route rurale. Selon Törnros, cette différence s'expliquerait par la spécificité de la conduite en tunnel, et en particulier la suppression d'information de vitesse en vision périphérique (moins de défilement lié à la monotonie visuelle ambiante dans les tunnels).

Pris dans leur ensemble, les résultats sur la vitesse tendent à montrer 1) que l'absence de retour d'information de mouvement n'est pas rédhibitoire pour assurer un bon niveau du contrôle longitudinal, 2) mais que lorsque la difficulté du tracé augmente, les conducteurs ont tendance à réduire leur vitesse sur simulateur.

2.3.2. Contrôle latéral de la trajectoire

Les résultats sur le contrôle de trajectoire laissent suggérer que les effets observés sur la vitesse dans les portions de route exigeante pourraient provenir d'une stratégie d'adaptation de la part des conducteurs pour compenser les difficultés liées au contrôle de la direction. En effet, Blaauw (1982) a montré, sur un tronçon de voie rapide, que les conducteurs avaient

tendance à se positionner plus loin du bord extérieur de leur voie sur simulateur, et que la variabilité de la position latérale y était plus importante. Carsten et al. (1997) ont également mis en évidence des déviations latérales plus importantes sur simulateur qu'en situation réelle de conduite. Blana et Golias (2002) ont, pour leur part, confirmé la plus grande variabilité de la position latérale sur simulateur statique, mais observé que les conducteurs se positionnaient plus près de l'extérieur de la voie sur simulateur alors qu'ils conservaient une position plus centrale sur route réelle. Ces derniers résultats contradictoire avec ceux de Blaauw (1982) peuvent trouver une explication dans le fait que les études ont porté dans l'une (Blaauw, 1982) sur la conduite sur une route à 4 voies avec un seul sens de circulation, et dans l'autre (Blana & Golias, 2002) sur la conduite sur route rurale bidirectionnelle (avec trafic en sens opposé). Il est donc possible d'envisager que dans l'étude de Blaauw (1982), les conducteurs aient cherché à limiter les risques de sortie de voie (en s'éloignant du marquage extérieur) alors que dans l'étude de Blana et Golias (2002), ils aient cherché à limiter les risques de collision (en s'éloignant du trafic opposé, et donc en se rapprochant du marquage extérieur). Dans les deux cas, ces phénomènes pourraient trouver leur origine dans le fait de compenser l'instabilité et les risques de perte du contrôle de trajectoire et restent finalement très cohérents.

Si la validité comportementale parait un bon indicateur, les résultats obtenus semblent dépendants des conditions de simulation, de la difficulté de la tâche et de la finesse des mesures comportementales. Ces précautions prises en compte, il apparait, après cette revue de littérature, un corpus de données assez important pour établir des principes à respecter pour obtenir des comportements similaires entre conduite simulée et conduite réelle au niveau du contrôle longitudinal et latéral du véhicule.

2.4. Confrontation entre dimensions : Les limites des mesures subjectives et comportementales de la validité

Morice et al. (2008) ont étudié la validité d'un environnement permettant de simuler une tâche de rebond de balle. Les participants manipulaient une raquette, masquée par une planche de bois, dans le but de faire rebondir sur un mode cyclique une balle virtuelle à la fréquence d'un métronome (voir la Figure 4). Les expérimentateurs ont fait varier le temps de latence entre les mouvements de la raquette réelle (guidés par le métronome) et les mouvements de la balle et de la raquette reproduits « virtuellement » sur un écran. Le temps de latence variait de 30 à 190 ms, par pas de 20 ms. Ils ont enregistré le pourcentage de détection du délai (mesure subjective) et les effets de ces délais sur les patterns moteurs dédiés au contrôle de la raquette. Les résultats ont montré que les participants percevaient le délai à partir de 90 ms, alors que les patterns moteurs se détérioraient dès 50 ms. Ces résultats illustrent donc le pouvoir discriminant des mesures comportementales, afin d'identifier l'impact des caractéristiques du dispositif de réalité virtuelle sur le positionnement des utilisateurs. D'autre part, les auteurs ont mesuré les effets du délai sur la performance dans la tâche de rebond (mesurée par la différence entre le pic de trajectoire de la balle virtuelle et la cible) ainsi que sur les déterminants de cette performance (accélération de la raquette à l'impact). Si les résultats ont mis en évidence que seule l'accélération de la raquette à l'impact était affectée par toutes les conditions de délais, ils ont également montré que la performance dans la tâche de rebond se dégradait lorsque l'accélération de la raquette s'écartait du régime de stabilité optimal nécessaire à la réussite de la tâche. Sur ce dernier point tout au moins, les mesures comportementales sont bien le reflet des processus impliqués.

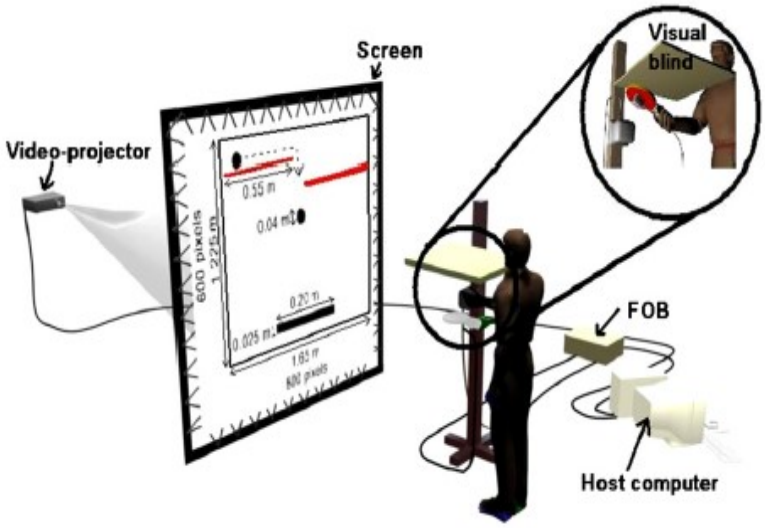


Figure 4 : Illustration du dispositif expérimental tirée de Morice et al. (2008)

Plus récemment, Lobjois, Siegler et Mars (2016) ont étudié, sur simulateur moto, les effets de l'introduction d'un roulis visuel sur le positionnement des utilisateurs, au plan subjectif et comportemental, dans une tâche de prise de virage. Trois conditions ont été testées (voir Figure 5) : absence de restitution visuelle du roulis (i.e., de l'inclinaison), gain de 0.2 (faible inclinaison de l'image) et gain de 0.4 (forte inclinaison de l'image). Les auteurs ont mesuré, dans chaque condition, le sentiment de présence évalué par questionnaire (Witmer & Singer, 1998) et le jugement de préférence, ainsi que les comportements de conduite (position dans la voie, variabilité de cette position et nombre de sorties de voie). Afin de dépasser ces mesures classiques, ils se sont également intéressés aux stratégies visuelles sous-tendant le contrôle de trajectoire comme déterminants des comportements de conduite. L'introduction du roulis visuel modifiant la dynamique de la scène visuelle, et en particulier le point tangent en référence au conducteur (connu pour être une source d'information pour le contrôle de trajectoire en virage), les auteurs ont fait l'hypothèse que la modification des comportements de conduite pourrait s'expliquer par l'altération du couplage naturel existant entre contrôle de trajectoire et contrôle visuel. Au plan subjectif, les résultats ont montré que si le sentiment de présence était comparable dans les trois conditions, les participants ont déclaré une préférence pour la condition de roulis avec un gain de 0.4. Pour ce qui concerne les comportements

adoptés, les résultats ont révélé que l'introduction d'un roulis visuel, quelle que soit son amplitude, entrainait des positions plus proches du bord intérieur de la voie, une plus grande variabilité de ces positions, et un plus grand nombre de sorties de voie. L'analyse des stratégies visuelles a quant à elle mis en évidence une distribution plus large des directions de regard relativement au point tangent en présence de roulis visuel. Pour les auteurs, cette distribution plus large des points de fixation indiquerait que les conducteurs ont eu plus de difficultés à stabiliser les directions de regard dédiées au guidage à une distance qui contient l'information critique pour suivre les changements dans la courbure de la route.

Figure 5 : Illustration de l'introduction d'un roulis visuel en simulation de conduite moto

Panel de gauche : absence de roulis ; panel de droite : roulis de 26°.

Dans une autre étude, Lobjois, Mars, Siegler, Caro, Colombet et al. (2013) se sont intéressés aux modalités de contrôle au guidon de la trajectoire d'une moto en virage sur le contrôle visuel et les comportements de conduite. Ils ont comparé une configuration « braquage » (où il fallait orienter le guidon vers la gauche pour tourner à gauche) et une configuration « contre-braquage », fidèle au comportement dynamique d'un guidon de moto (pour laquelle il était nécessaire d'orienter le guidon temporairement vers la gauche pour tourner à droite). Ils ont analysé, comme dans l'étude précédente, le sentiment de présence et le jugement de préférence, le contrôle de trajectoire et les stratégies visuelles des conducteurs. La configuration du simulateur n'avait pas d'effet sur le sentiment de présence, mais les participants ont majoritairement exprimé leur préférence pour le mode « contre-braquage »

qui possède un meilleur niveau de validité physique. Les résultats ont cependant montré de profondes différences dans le contrôle de trajectoire en fonction de la configuration du simulateur, avec une augmentation de la variabilité de la position latérale et du nombre de sorties de voie en configuration « contre-braquage ». Pour ce qui est des stratégies visuelles, des différences sont également apparues dans la distribution entre les directions de regard dédiées au guidage du véhicule et les directions de regard plus anticipatives, ces dernières étant réduites pour la condition contre-braquage. Sur la base de résultats antérieurs montrant que la distribution des directions de regard dépend de la condition de conduite (e.g., Mars & Navarro, 2012) ou encore de la charge mentale (e.g., Lehtonen, Lappi & Summala, 2012), les auteurs ont proposé que la configuration contre-braquage entraîne davantage de difficultés dans le contrôle de la trajectoire et par conséquent davantage de charge allouée à ce contrôle (la question de la validité psychologique et de la charge mentale non directement abordée dans cette étude, sera abordée dans la section suivante).

Certaines caractéristiques d'un simulateur (validité physique) peuvent donc avoir des effets positifs sur le ressenti des utilisateurs (validité subjective) mais cependant modifier sensiblement le comportement et les processus qui le sous-tendent (validité psychologique). Ces deux études confirment ainsi certaines limites des mesures subjectives liées en particulier aux attentes des participants (validité d'apparence). Tous les participants étaient conducteurs réguliers de deux-roues motorisés. En conséquence, ils ont préféré un dispositif respectant certains principes physiques de la conduite moto, alors que ces mêmes principes ont entraîné des modifications dans le contrôle de trajectoire. Ces résultats illustrent, après ceux de Morice et al. (2008), le pouvoir discriminant des mesures comportementales, utilisées afin d'identifier l'impact des caractéristiques du dispositif de réalité virtuelle sur le positionnement des utilisateurs.

Les résultats montrent aussi que lorsque le comportement est altéré par les caractéristiques de l'environnement virtuel, les processus qui le sous-tendent peuvent également être affectés. Ce constat fait écho à la proposition de Deniaud et Mestre (2015) selon laquelle la validité psychologique (présentée dans la section suivante) conditionnerait la validité comportementale. Il convient cependant de rester prudent sur la force de ce lien, car les études de Lobjois et al. (2013, 2016) se sont intéressées aux effets des caractéristiques du simulateur de conduite sur le contrôle de trajectoire et les stratégies visuelles, connus pour être intimement liés. En effet, plusieurs études ont montré que lorsque les stratégies visuelles sont manipulées, le contrôle de trajectoire est altéré (e.g., Mars, 2008 ; Robertshaw & Wilkie, 2008 ; Wilson, Chattington & Marple-Horvat, 2008). Lorsque la trajectoire à emprunter est manipulée, les stratégies visuelles des conducteurs s'adaptent (e.g., Raw, Kountouriotis, Mon-Williams & Wilkie, 2012 ; Wilkie, Kountouriotis, Merat & Wann, 2010). Il n'est donc pas étonnant que le contrôle de trajectoire et les stratégies visuelles qui le sous-tendent soient affectés conjointement par la manipulation des caractéristiques du simulateur de conduite.

Le principal enseignement qui se dégage des confrontations entre plusieurs dimensions de validité concerne les sensibilités différentes des deux niveaux les plus couramment utilisés : la validité subjective et la validité comportementale. La considération portée à la validité psychologique, examinée sous l'angle de la charge mentale, offre des perspectives intéressantes pour dépasser les critiques formulées à l'encontre de ces deux dimensions.

2.5. Validité psychologique

Le concept de *validité psychologique* a été proposé par Malaterre et Fréchaux (2001). Il est défini comme une mesure de l'équivalence, en réel et en virtuel, des processus psychologiques sous-jacents aux comportements adoptés, coût cognitif inclus. On trouve également la notion de fidélité psychologique chez Leplat (1997) ou encore Patrick (1992). Si pour Leplat (1997), elle se définit comme la mesure selon laquelle le simulateur produit un

comportement semblable à celui exigé dans la situation réelle – ce qui renvoie à la notion de fidélité de l'action ou de validité comportementale – elle correspond, pour Patrick (1992), à la proportion dans laquelle la tâche simulée engendre une activité et des processus psychologiques identiques à ceux de la tâche réelle. Burkhardt et al. (2003) avancent sur ce point que l'évaluation de cette dimension de la validité passe obligatoirement par l'analyse des performances et des comportements des sujets, suggérant ainsi qu'ils seraient une fenêtre sur l'activité et les processus psychologiques impliqués dans la tâche simulée. Adoptant un point de vue similaire quant aux relations entre comportements et processus impliqués, Deniaud et Mestre (2015) considèrent que la validité comportementale dépendrait directement de la validité psychologique.

Dans une tentative de formalisation des processus impliqués dans cette dimension de la validité, on peut citer le modèle hiérarchique de l'activité de conduite de Michon (1985). Michon différencie trois niveaux : 1) un *niveau stratégique*, niveau supérieur du modèle, qui assure les tâches de planification de l'itinéraire et de navigation. Ce niveau exige un investissement cognitif élevé mais requiert de faibles exigences temporelles ; 2) un *niveau tactique*, niveau intermédiaire du modèle, qui prend en charge les prises de décision concernant les actions mises en œuvre dans les instants qui suivent, telles que le dépassement, la décision de s'arrêter pour céder le passage à un piéton hors passage protégé ou encore l'anticipation d'une situation (virage, feu tricolore…). Le coût cognitif est moins élevé qu'au niveau supérieur, mais l'exigence temporelle est relativement forte ; 3) enfin, un *niveau opérationnel,* qui peut être très automatisé et dont l'exigence cognitive peut devenir faible, voire inexistante, et qui assure par exemple les tâches de contrôle longitudinal et latéral du véhicule. Même si les termes de « stratégique » et « tactique » utilisés par Michon (1985) peuvent être interchangeables, on voit bien les processus impliqués et l'intérêt que revêt cette distinction surtout entre les deux premiers niveaux et le troisième. Ce dernier fait intervenir

des processus de bas niveau tels que les processus perceptifs et sensorimoteurs tandis que les niveaux stratégique et tactique impliquent des processus de haut niveau, tels que la mémoire, la prise de décision ou encore la charge mentale. D'ailleurs, pour Paxion (2014), aux deux premiers niveaux (stratégique et tactique), les processus cognitifs de haut niveau s'effectuent avec un traitement contrôlé lent, sériel, conscient et flexible. À l'inverse, le niveau opérationnel fait intervenir les processus cognitifs de bas niveau, avec un traitement qui peut être automatique rapide, non conscient et rigide. Mais il faut ajouter que l'augmentation du niveau de contraintes dans des environnements complexes ou la conduite en simulateur peuvent potentiellement nécessiter l'implication de processus de haut-niveau en termes d'attention (cette idée sera reprise plus loin dans le texte).

Cela nous amène à avancer l'idée que si l'étude de la validité psychologique d'un dispositif porte sur les processus impliqués au niveau opérationnel de la conduite (contrôle longitudinal, contrôle latéral), l'analyse des performances et des comportements des sujets constitue effectivement une fenêtre sur l'activité et les processus psychologiques impliqués dans la tâche simulée. En revanche, si l'étude de la validité psychologique porte sur les processus de plus haut niveau impliqués dans la conduite, des mesures propres à ces processus sont, dans certains cas, nécessaires pour compléter et dépasser les mesures comportementales.

Malgré ces perspectives qui se dessinent ici, comme l'ont fait remarquer Deniaud et Mestre (2015) dans leur revue de questions, très peu d'études ont considéré la question de la validité psychologique. En nous appuyant notamment sur le modèle de De Waard (1996), la section suivante vise à souligner l'intérêt de la charge mentale comme mesure de la validité psychologique. Les différentes mesures de la charge seront ensuite présentées avant de rapporter les études qui ont comparé la charge mentale entre situation réelle et réalité virtuelle.

2.5.1. Définition et intérêt de la charge mentale

Le concept de charge mentale est un concept polysémique. Il est présenté dans des domaines variés tels que la psychologie, l'ergonomie (Spérandio, 1980) ou la santé (Karasek, Baker, Marxer, Ahlbom & Theorell, 1981). De façon générique, la charge mentale est définie comme le coût attentionnel lié à la réalisation d'une tâche (Brookhuis & De Waard, 2001 ; Engström, Markkula Victor & Merat, 2017 ; O'Donnell & Eggemeier, 1986). Suivant les définitions, elle s'accompagne de notions telles que la complexité de la tâche, l'effort, la performance ou les ressources attentionnelles. C'est bien cette dernière notion qui parait la plus appropriée pour approfondir la définition de la charge mentale.

Appliqué à la conduite automobile, l'engagement des ressources attentionnelles ou encore le coût attentionnel dépend à la fois des caractéristiques du conducteur et des caractéristiques de la situation de conduite. Cela apparait notamment dans le modèle de Fuller (2005) selon lequel les caractéristiques de la tâche dépendent i) de sa dangerosité, ii) du nombre d'informations à traiter et, iii) de la présence éventuelle de plusieurs tâches concurrentes, qui nécessitent un partage de l'attention et donc un double processus de perception, traitement de l'information et action. Parmi les capacités du conducteur, il faut inclure i) le niveau de familiarité (ou d'expertise) qu'il a avec la tâche, ii) ses motivations, les objectifs de performance qu'il s'est fixé par rapport à la tâche, iii) la quantité de ressources attentionnelles disponibles, qui varie par exemple en fonction du stress et du niveau d'éveil, et iv) l'existence de connaissances qui lui permettront de réaliser la tâche dans de bonnes conditions.

Il existe de nombreux modèles de l'attention et des ressources attentionnelles (e.g., De Waard, 1996 ; Fuller, 2005 ; Summala, 1988 ; Wickens, 1993 ; Wilde, 1982), dont certains ont été élaborés dans le contexte de la conduite automobile. Pour Summala (1988), le conducteur répondrait aux demandes de la tâche en contrôlant des marges de sécurité. Pour

Fuller (2005), le conducteur appliquerait la loi du moindre effort en ce qui concerne le recrutement des ressources attentionnelles. Il privilégierait ainsi l'utilisation de routines et de moyens lui permettant de réduire la charge mentale lorsqu'elle devient trop complexe. Réduire la vitesse de la voiture est l'un des moyens privilégiés pour diminuer l'effort mental lié à la conduite. Boer et al. (2000) et Bittner et al. (2002) ont ainsi constaté, pour un profil de route exigeant, une diminution de la vitesse sur simulateur par comparaison avec une situation réelle, pendant que d'autres auteurs ont observé une vitesse excessive sur des tracés monotones ou des courbes peu prononcées (Bella, 2008 ; Törnros, 1998).

Le modèle de De Waard (1996) rend compte des relations entre les demandes de la tâche et les capacités du conducteur et de leurs effets sur le niveau de charge mentale et les comportements de conduite. Ce modèle formalise plusieurs relations caractéristiques :

- Lorsque les demandes de la tâche sont faibles, le niveau d'engagement et de vigilance de la part du conducteur est également faible et ce manque d'investissement peut se traduire par des conséquences négatives sur le niveau de performance en termes d'erreur d'inattention par exemple.
- Lorsque les demandes de la tâche augmentent, le conducteur mobilise automatiquement une partie de ses ressources attentionnelles, sans qu'il ait besoin de produire un effort. La charge mentale est faible et le conducteur utilise des routines et des stratégies préétablies pour gérer les demandes de tâche.
- Lorsque les demandes de la tâche augmentent à nouveau, le conducteur est contraint de produire un effort, pour allouer volontairement de nouvelles ressources. La charge mentale augmente mais la mobilisation de nouvelles ressources lui permet de répondre aux demandes de la tâche. La performance reste donc inchangée tandis que la charge mentale a augmenté.

- Si les demandes de la tâche s'élèvent encore, le conducteur n'a plus les capacités suffisantes pour maintenir son niveau de performance. Il poursuit son effort et met alors en place une stratégie qui consiste généralement à abandonner des tâches secondaires annexes pour se concentrer sur la tâche principale. Le niveau de charge mentale est élevé. C'est dans ces conditions, dites de « surcharge », que les performances se dégradent et que des erreurs de conduite peuvent à nouveau apparaître.

En nous appuyant sur cette formalisation des relations entre les demandes de la tâche et les capacités du conducteur et de leurs effets sur le niveau de charge mentale et les comportements de conduite, il est possible de formuler plusieurs prédictions quant à l'effet d'un dispositif de réalité virtuelle sur la charge mentale et les performances relevant du niveau opérationnel (contrôle latéral et longitudinal lors de la conduite) tel que décrit par Michon (1985) :

Si le dispositif affecte le niveau opérationnel, les performances se dégraderont lors de la conduite sur simulateur comparativement à la conduite sur route. Des mesures comportementales seules permettront d'attester d'un défaut de la validité (absolue) du dispositif.

En revanche, si le dispositif n'affecte pas le niveau opérationnel, les performances seront similaires, mais deux cas pourront se présenter qui pourront être discriminés par la mesure de la charge mentale :

- Dans un premier cas, si la mesure de la charge mentale ne montre pas de différence entre les deux conditions, cela signifiera que le niveau opérationnel est équivalent entre conduite réelle et conduite virtuelle.
- Dans un second cas, si la mesure de la charge mentale montre une différence, cela signifiera que le niveau opérationnel n'est pas équivalent entre conduite réelle et conduite virtuelle malgré des performances qui restent équivalentes.

Ces prédictions quant à l'effet d'un dispositif de réalité virtuelle sur la charge mentale et la performance offrent ainsi un cadre d'analyse de ces effets mêlant des mesures comportementales et des mesures relatives aux ressources mobilisées. Avant de présenter les études qui se sont intéressées à l'effet d'un dispositif de réalité virtuelle sur la charge mentale, il convient de faire état des différents indicateurs existant pour mesurer la charge ainsi que les intérêts et limites de chacun.

2.5.2. Les mesures de la charge mentale

2.5.2.1. Mesures subjectives de la charge mentale

Les mesures subjectives de la charge mentale consistent en une auto-évaluation de la part de l'opérateur du coût attentionnel de la tâche. Très classiques, elles reposent essentiellement sur des questionnaires administrés au terme de l'activité. Certains d'entre eux sont largement utilisés pour évaluer la conduite automobile, comme le NASA-Task Load IndeX (NASA-TLX ; Hart & Staveland, 1988), le Subjective Workload Assessment Technique (SWAT ; Reid & Nygren, 1988), ou le Driving Activity Load Index (DALI ; Pauzié, 2008).

Le NASA-TLX propose six items, que les participants annotent sur une échelle de Likert (Annexe 1) : les demandes mentales et physiques, la pression temporelle, la performance, l'effort et la frustration. Les trois premières dimensions évaluent les contraintes de la tâche, tandis que les trois dernières portent sur les capacités de l'opérateur et son état général. Ce questionnaire peut être administré en quelques minutes et est de ce fait bien accepté par les participants. Il a été validé dans de nombreuses études (pour une revue, voir Hart, 2006). Par ailleurs, il permet une analyse plus fine que le SWAT, qui ne considère que trois niveaux (demandes mentales, pression temporelle et stress) et que le DALI, qui n'est utilisé que pour décrire la charge mentale lorsqu'un conducteur est amené à interagir avec un dispositif (Pauzié & Manzano, 2007).

Il apparait néanmoins que les mesures subjectives de la charge mentale sont confrontées à plusieurs limites. Tout d'abord, Hart et Staveland (1988) ont noté qu'elles pouvaient être influencées par un biais relevant de l'opérateur, qui repose sur son vécu de l'activité et ses préconceptions. Par exemple, un conducteur pourra ressentir une demande attentionnelle plus importante dans un environnement urbain imposant peu d'interactions comparativement à un environnement rural exigeant du fait de son tracé, alors que la complexité est sensiblement la même dans les deux situations (selon la classification de la complexité de la situation de Paxion, Galy & Berthelon, 2014). En second lieu, pour des raisons culturelles, certains termes utilisés dans les questionnaires ne sont pas nécessairement interprétés de la même façon, en fonction de la langue et du pays dans lequel ils sont utilisés (Cegarra & Morgado, 2009). Ces questionnaires nécessitent donc des procédures de validation. Enfin, la plupart des questionnaires impliquent une évaluation de la charge mentale a posteriori (Lee & Liu, 2003). Cela constitue une limite importante dans la mesure où la chronologie des événements peut avoir un effet important sur le ressenti. Par exemple, un événement stressant intervenant à la fin de la tâche aura plus d'impact sur le ressenti subjectif que s'il était vécu plus tôt. Il faut noter que certains auteurs ont récemment tenté d'évaluer la charge mentale par le biais de mesures subjectives au cours même de l'activité (e.g., Teh, Jamson, Carsten & Jamson, 2014). Mais ce type de procédure est susceptible d'introduire des perturbations dans l'exécution de la tâche principale de conduite.

2.5.2.2. Mesures comportementales de la charge mentale

Comme nous l'avons vu précédemment dans le croisement des modèles de Michon (1985) et De Waard (1996), la modification de certains comportements de conduite peut également servir de révélateur du niveau de charge mentale. Plusieurs indicateurs comme la vitesse (Bella, 2008 ; Bittner et al., 2002 ; Fuller, 2005 ; Godley et al., 2002), la variation de la position latérale du véhicule (Benedetto, 2010 ; Engström et al., 2005 ; Hosking, Young &

Regan, 2009 ; Ingre, Akerstedt, Peters, Anund & Kecklund, 2006) ou encore le taux de réversion du volant (Caro, 2008 ; Marrkula & Engström, 2006) sont clairement identifiés comme étant sensibles à la complexité de la tâche de conduite et constituent une mesure indirecte mais continue de la charge mentale (Cain, 2007 ; Eggemeier, Wilson, Kramer & Damos, 1991).

Il apparait néanmoins que les indicateurs comportementaux sont susceptibles d'être liés à des aspects stratégiques de la conduite (Wickens, 1993). Certains comportements (e.g., diminution de la vitesse, augmentation des variations de la position latérale du véhicule), qui sont observables lorsque la charge mentale augmente, peuvent aussi apparaître sous l'effet de stratégies à l'initiative des conducteurs. Plusieurs études ont ainsi montré que sur une route aménagée (marquage au sol, taille réduite de la chaussée) les conducteurs diminuaient leur vitesse par rapport à une route non aménagée, alors que les exigences en termes de contrôle de la trajectoire du véhicule étaient similaires dans les deux conditions (De Waard, Jessurun, Steyvers, Reggatt & Brookhuis, 1995 ; Godley, Triggs & Fildes, 2004 ; Lewis-Evans & Charlton, 2006). Par ailleurs, les stratégies de contrôle latéral du véhicule lors de la prise de virage ou du franchissement d'un giratoire (action volontaire de couper la ligne médiane pour gagner en efficacité dans la trajectoire) ou encore à l'approche d'une intersection (rapprochement du véhicule vers le centre de la voie pour faciliter la manœuvre de franchissement à venir) conduisent mécaniquement à une augmentation de la variation de la position latérale qui ne révélerait pas uniquement une augmentation de la charge mentale (e.g., Rosey & Auberlet, 2014).

Il apparait en revanche que le taux de réversion du volant (en anglais, Steering Reversal Rate – SRR) peut être plus indépendant des choix stratégiques opérés par les conducteurs (Frissen & Mars, 2014). Le taux de réversions correspond au nombre de changements de direction du volant par minute, quel que soit son angle de rotation, avec un

seuil de détection généralement fixé à 1° (e.g., Engström et al., 2005 ; Jamson & Merat, 2005). Les mouvements de réversion permettent de corriger les erreurs par rapport à la trajectoire recherchée (Donges, 1978) et sont considérés comme traduisant la difficulté de la tâche de conduite (Macdonald & Hoffmann, 1980 ; McLean & Hoffmann, 1975). Ils peuvent donc représenter une mesure plus fiable de la charge mentale lorsque les demandes liées au contrôle du véhicule augmentent (Jamson & Merat, 2005), même s'il faut remarquer que leur augmentation peut correspondre aussi à un choix du conducteur de mieux contrôler sa trajectoire.

2.5.2.3. Mesures de performance dans un protocole de double tâche

Plusieurs études ont utilisé des tâches secondaires basées sur des protocoles de temps de réaction (Cantin, 2009 ; Jahn, Oehme, Krems & Gelau, 2005 ; Olsson & Burns, 2000). Les participants ont pour consigne de répondre le plus rapidement possible (manuellement ou vocalement) à un stimulus visuel ou sonore (allumage d'une diode posée sur le tableau de bord, dans le champ de vision du conducteur, diffusion aléatoire d'un son bref et clairement identifiable) introduit au cours de la tâche primaire de conduite. Pour évaluer le niveau de charge mentale associée à la conduite, l'analyse porte sur le temps de réaction des opérateurs à la tâche secondaire. Au travers de ces protocoles, les chercheurs peuvent comparer le niveau de charge mentale dans des environnements de conduite très différents les uns des autres qui rendent inexploitables les mesures comportementales classiques (vitesse adoptée, variation de la position latérale). Ainsi, lorsque la charge mentale augmente avec la complexité de la situation, le temps de réaction à la tâche secondaire augmente (e.g., Ogden, Levine & Eisner, 1979). Par ailleurs, un autre avantage de ces protocoles repose sur le fait qu'ils permettent de minimiser l'interférence avec la tâche de conduite (Cain, 2007 ; Cantin, 2009). Cela permet d'effectuer des mesures en situation réelle, ce qui n'est pas possible avec certains protocoles de double tâche plus complexes qui exposeraient les conducteurs à des risques d'accident.

Il apparait cependant que les protocoles impliquant une tâche secondaire peuvent se voir adresser quelques critiques. La première d'entre elle repose sur le fait qu'ils vont limiter la portée écologique de la tâche de conduite. Par ailleurs, Williges et Wierwille (1979) soulignent que la réalisation simultanée de deux tâches est susceptible de générer un effort mental, affectant le ressenti du niveau global de difficulté et cela même si elles n'interfèrent pas l'une avec l'autre.

2.5.2.4. Mesures physiologiques de la charge mentale

Un certain nombre d'indicateurs physiologiques ont été utilisés pour rendre compte du niveau de charge mentale. Dans un article de revue, O'Donnell et Eggemeier (1986) ont décrit les plus courants tels que la fréquence cardiaque (Di Domenico & Nussbaum, 2011 ; Jahn et al., 2005), l'activité électrodermale (Engström et al., 2005) ou encore l'activité EEG (Baldwin & Coyne, 2003 ; Borghini et al., 2014 ; Savage, Potter & Tatler, 2013). Le principe est de considérer que les mesures physiologiques traduisent des variations d'état de l'opérateur en réponse aux caractéristiques de la tâche (Meshkati, Hancock, Rahimi & Dawes, 1995). Comme pour les comportements de conduite, ce sont des mesures qui peuvent être prises en continu.

Cependant, l'utilisation d'indicateurs physiologiques présente plusieurs limites. D'abord, les outils de mesures utilisés (électrodes, casque EEG, etc.) peuvent être gênants même s'ils se sont largement améliorés et sont maintenant plus discrets. Malgré ces améliorations, il demeure que le simple fait d'être appareillé crée une différence avec une condition naturelle, qui peut être suffisante pour générer un stress. Cela pose un problème dans la mesure où certains indicateurs physiologiques, comme la fréquence cardiaque ou la conductance cutanée, peuvent évoluer de la même façon en fonction du stress ou de la charge mentale liée aux demandes de la tâche (Boucsein & Backs, 2000 ; Cain, 2007). Par ailleurs, plusieurs études ont observé que les mesures physiologiques variaient beaucoup d'un individu

à un autre et qu'il était difficile de définir un niveau de référence pour tous les individus d'une population donnée (e.g., Mitchell, 2000). Ces différences interindividuelles peuvent être suffisantes pour masquer un éventuel effet des caractéristiques de la tâche sur le niveau de charge mentale. Enfin, il apparaît que toutes les mesures physiologiques n'ont pas la même sensibilité ou la même pertinence, en fonction du type de tâche que l'on veut évaluer (Lysaght, Hill, Dick, Plamondon & Linton, 1989). Pour une tâche de conduite automobile, les mesures de la fréquence cardiaque ne sont pas les plus adaptées car elles sont sensibles à de multiples facteurs comme la respiration ou les émotions (Cain, 2007) et qu'elles ne permettent pas toujours de mesurer des variations de la charge mentale sur de longues périodes (Castor, Hanson, Svensson, Nählinder, Le Blaye et al., 2003 ; Jahn et al., 2005).

L'électroencéphalographie est relativement invasive et limite les mouvements de tête des sujets, ce qui la rend compliquée à utiliser dans un véhicule réel ou un simulateur. On constate pourtant que les technologies d'imagerie cérébrale ont leur place dans plusieurs études récentes (Paxion, 2014 ; Savage et al., 2013) suggérant qu'elles constituent une perspective intéressante dans les prochaines années pour la mesure de la charge mentale.

2.5.2.5. Mesures liées aux mouvements oculaires

Les mouvements oculaires et certaines de leurs caractéristiques sont eux aussi assez largement utilisés pour mesurer la charge mentale (voir O'Donnell & Eggemeier, 1986 pour une revue de question sur le sujet). Parmi ces caractéristiques, on peut citer la durée des fixations (Chapman & Underwood, 1998 ; Di Stasi, Antoli & Cañas, 2013), le diamètre pupillaire (Beatty & Lucero Wagoner, 2000 ; Palinko, Kun, Shyrokov & Heeman, 2010), les patterns visuels (Crundall & Underwood, 1998 ; Engstrom et al., 2005 ; Konstantopoulos et al., 2010 ; Lehtonen, Lappi & Summala, 2012 ; Recarte & Nunes, 2003 ; Underwood, Crundall & Chapman, 2002), le pic de vitesse de saccade (Di Stasi et al., 2013 ; Savage et al., 2013) et les clignements oculaires (Benedetto et al., 2011 ; Benedetto, Lobjois, Faure, Dang,

Pedrotti & Caro, 2014 ; Bentivoglio, Bressman, Cassetta, Carretta, Tonali & Albanese, 1997 ; Holland & Tarlow, 1972 ; Tsai, Viirre, Strychacz, Chase & Jung, 2007).

Si les caractéristiques des mouvements oculaires relevant des stratégies d'exploration et de prélèvement de l'information (durée et nombre de fixations, saccades, patterns) ont montré leur intérêt pour mesurer la charge mentale, ces indicateurs sont néanmoins susceptibles d'être confrontés à certaines limites dans le cadre d'une comparaison entre situation réelle et réalité virtuelle. Les stratégies visuelles, les fixations et les saccades sont en effet dépendantes de l'environnement et du nombre d'informations à traiter, qui ne sont pas parfaitement identiques dans les deux situations (e.g., Giannopulu, Bertin, Kapoula, Brémond & Espié, 2007). L'absence de risque mais aussi le champs visuel inévitablement réduit en réalité virtuelle ont des effets sur les stratégies d'exploration et de prélèvement de l'information (e.g., Foulsham, Walker & Kingstone, 2011). Le diamètre pupillaire est lui influencé par les conditions de luminosité (e.g., Pedrotti, Mirzaei, Tedesco, Chardonnet et al., 2014), qui sont très différentes entre réel et virtuel.

Les clignements oculaires apparaissent comme une possibilité intéressante qui permet de dépasser quelques-unes des limites évoquées pour les patterns visuels, dans l'objectif d'une comparaison entre réel et virtuel. En effet, pour Savage et al. (2013), les clignements ont le potentiel de fournir une signature utile et fiable des variations de la charge mentale des conducteurs. Ce potentiel est fondé sur la nature discrète de cette mesure. De plus, les clignements ne sont pas guidés par des processus descendants ou ascendants d'exploration de la scène, comme c'est le cas pour les fixations (e.g., Tatler, Hayhoe, Land, & Ballard, 2011), ni par les conditions de lumière, comme c'est le cas pour le diamètre pupillaire (e.g., Pedrotti et al., 2014). De plus, ils n'interfèrent pas avec la tâche principale de conduite. Un clignement oculaire est une brève période comprenant la fermeture puis la réouverture de la paupière qui entraîne une occultation de la pupille. Stern, Walrath et Goldstein (1984) ont distingué deux

familles de clignements oculaires : les clignements endogènes, qui sont des mouvements involontaires ayant entre autre fonction de lubrifier la cornée, qui se distinguent des clignements exogènes (réflexes ou volontaires). Les clignements endogènes sont caractérisés par i) une durée de fermeture de la paupière généralement inférieure à 150 ms, ii) une période, en général inférieure à 300 ms, durant laquelle la vision est occultée, et iii) une durée de réouverture de la paupière inférieure à 150 ms. Sur cette base, les auteurs ont établi que la durée maximale des clignements endogènes était de 500 ms. Ils sont décrits dans plusieurs études comme un phénomène complexe, pouvant aussi refléter le niveau de charge mentale (e.g., Benedetto et al., 2011 ; Fogarty & Stern, 1989 ; Hancock, Wulf, Thom & Fassnacht, 1990). L'hypothèse proposée dans ces études est que l'augmentation de la charge mentale, engendrée par une augmentation de la difficulté d'une tâche à réaliser, entraînerait une diminution de la fréquence des clignements.

Dans ce cadre et à titre d'exemple, Hancock et al. (1990) ont étudié le niveau de charge mentale pendant la réalisation de trois manœuvres de conduite d'une difficulté croissante (conduire en ligne droite, tourner à droite à une intersection sans trafic, tourner à gauche à une intersection impliquant des interactions avec du trafic). Ils ont relevé deux indicateurs différents de la charge : la fréquence des clignements et le temps de réaction à une tâche secondaire. Les résultats de l'étude ont révélé une diminution significative du nombre de clignements, accompagnée d'une augmentation du temps de réaction, dans les deux conditions de conduite les plus difficiles par comparaison à la conduite en ligne droite. Pour interpréter cette diminution des clignements oculaires avec l'augmentation de la charge mentale, Fogarty et Stern (1989) ont proposé que l'inhibition des clignements soit un mécanisme visant à préserver le processus de traitement de l'information, lorsque les demandes de la tâche augmentent. Pour Bauer, Strock, Goldstein, Stern et Walrath (1985),

elle traduit donc le fait que les opérateurs portent une attention plus soutenue aux stimuli pertinents pour l'activité en cours.

Il faut cependant apporter plusieurs précisions quant à la relation observée entre la fréquence des clignements et le niveau de charge mentale. Premièrement, le processus d'inhibition semble diminuer sous l'effet du temps passé dans la tâche (Fukuda, Stern, Brown & Russo, 2005) même si Benedetto et al. (2011) ont déterminé que cela affectait principalement les clignements supérieurs à 100 ms. D'autre part, Tsai et al. (2007), dans une situation de conduite automobile, et Benedetto et al. (2014), dans une situation de conduite moto, ont observé une augmentation de la fréquence des clignements avec l'introduction d'une tâche secondaire de calcul mental, cette dernière entraînant pourtant une augmentation des demandes de la tâche. Savage et al. (2013) ont rapporté un résultat similaire lorsqu'une tâche de résolution de problème était ajoutée à une tâche de détection d'événement. Recarte, Perez, Conchillo et Nunes (2008), en comparant la fréquence des clignements dans plusieurs conditions de double tâche (tâche primaire : rechercher un stimulus visuel ; tâches secondaires : écouter un texte, parler ou résoudre un calcul mental), ont également observé que les tâches secondaires entraînaient une augmentation de la fréquence des clignements. Cette augmentation était significativement plus forte dans les tâches secondaires « parler » (+ 12 clignements par minute) et « calculer » (+ 10 clignements par minutes) comparé à la tâche secondaire « écouter un texte » (+ 4 clignements par minute), faisant apparaître que certains processus engagés dans la tâche (e.g., mémoire, production du langage) impactaient eux aussi la fréquence des clignements. Pour expliquer l'augmentation de la fréquence des clignements oculaires en condition de double tâche, Tsai et al. (2007) ont fait l'hypothèse qu'une tâche secondaire serait une source de distraction qui rendrait les opérateurs moins sensibles au niveau de difficulté de la tâche primaire. Selon ces auteurs, cela entraînerait une suppression du mécanisme d'inhibition décrit par Fogarty et Stern (1989).

En résumé, il apparait possible de tirer des conclusions assez claires sur le lien entre charge mentale et clignements oculaires. En premier lieu, il a été montré que l'augmentation du niveau de charge mentale entraîne une diminution de la fréquence de clignements, expliquée par un mécanisme d'inhibition (Fogarty & Stern, 1989). Ce phénomène aurait tendance à disparaître avec le temps passé dans la tâche (Fukuda et al., 2005). En second lieu, la fréquence des clignements serait affectée par l'introduction d'une tâche secondaire, qui induit un mécanisme d'attention partagée. Dans ce cas, on assiste à une augmentation de la fréquence des clignements (e.g., Tsai et al., 2007 : 57 % de clignements en plus en situation de double tâche ; Savage et al., 2013 : 26 % de clignements en plus en situation de double tâche). Dans l'ensemble, ces études récentes permettent donc de penser que la mesure des clignements oculaires présente un potentiel intéressant pour mettre en évidence les variations de la charge mentale. Il reste néanmoins à apporter un corpus de résultats conséquent pour confirmer ce potentiel.

2.5.3. Comparaison entre conduite simulée et réelle en termes de validité comportementale et psychologique

Les études qui se sont intéressées à la comparaison entre condition réelle et simulée en confrontant dimension comportementale et dimension psychologique de la validité examinée sous l'angle de la charge mentale sont relativement peu nombreuses. Certaines, anciennes, se sont appuyées sur des mesures subjectives de la charge en parallèle de mesures comportementales, tandis que d'autres, plus récentes, se sont appuyées sur des mesures subjectives et physiologiques.

Blaauw (1982) a, le premier, confronté des mesures comportementales classiques à des mesures subjectives de la charge. Il a montré que les vitesses pratiquées en réel et en virtuel ne se différenciaient pas significativement, au contraire des variables relatives au contrôle latéral. En complément de ces mesures de la validité comportementale, Blaauw a également

recueilli, par questionnaire, des mesures subjectives qui ont révélé une augmentation significative de la difficulté de la tâche perçue, de l'attention requise et de la monotonie de la conduite sur simulateur comparativement à la situation réelle. Alm (1995) a investigué la validité du simulateur VTI (simulateur de haut niveau, sur plateforme dynamique et avec un large écran), mesurant notamment les comportements de conduite (vitesse et contrôle latéral) et le niveau de charge mentale évalué avec le NASA-TLX. Les résultats n'ont pas mis en évidence de différences entre réel et virtuel pour ce qui concerne les comportements de conduite, mais le NASA-TLX a révélé un niveau de charge mentale significativement plus élevé sur simulateur par rapport à la conduite sur route. Les participants ont en effet clairement exprimé, par le biais des différentes dimensions du questionnaire, que le simulateur était plus exigeant physiquement, nécessitait plus d'effort de concentration et était plus frustrant que la conduite sur route.

Dans une étude plus récente, Engström et al. (2005) ont comparé les effets de trois conditions de conduite différentes (réelle, simulateur dynamique et simulateur statique) sur les stratégies de prise d'information visuelle, sur des mesures comportementales (vitesse pratiquée, variation de la position latérale et actions sur le volant) et sur des mesures physiologiques (fréquence cardiaque et activité électrodermale). La majorité des mesures effectuées en réel étaient cohérentes avec celles réalisées dans les deux conditions simulées, suggérant que la conduite sur simulateur ne modifiait pas fondamentalement les comportements naturels pour ce qui relève du contrôle du véhicule. Cependant, les auteurs ont observée des tendances dans les résultats allant dans le sens d'une augmentation de l'activité électrodermale, de la fréquence cardiaque ainsi que du nombre de mouvement du volant dans la condition réelle. Pour Engström et al. (2005), cela tendrait à montrer une augmentation de la charge mentale en situation réelle, probablement liée aux risques d'accidents que les conducteurs ne ressentent pas en virtuel. Cela fait écho à la conclusion de Deniaud, Honnet,

Jeanne et Mestre (2015) pour qui un moindre engagement sur simulateur de conduite résiderait dans le fait que les participants sont clairement conscients de la dimension artificielle et sans danger de la simulation.

Milleville-Pennel et Charron (2015) ont comparé la charge mentale entre une condition de conduite sur route avec véhicule personnel ou avec un véhicule d'auto-école et sur simulateur de conduite, par l'intermédiaire du NASA-TLX et de la fréquence cardiaque. Les résultats ont montré une augmentation de la fréquence cardiaque avec le véhicule d'auto-école comparativement à la condition de repos et à la conduite sur simulateur. Pour les auteurs, si cette augmentation de la fréquence cardiaque provient d'une augmentation de la charge mentale, les ressources cognitives impliquées dans l'activité ne diffèrent pas entre les conditions testées. Malgré un ressenti supérieur sur les dimensions effort et performance sur simulateur, la dimension charge de travail mentale était semblable entre les deux conditions. Les auteurs ont d'autre part montré que la conduite avec un véhicule d'auto-école était plus stressante que la conduite avec véhicule personnel et sur simulateur, concluant à une validité quasi absolue du simulateur pour ce qui concerne les ressources cognitives mises en jeu. Johnson, Chahal, Stinchcombe, Mullen, Weaver et Bédard (2011) ont, pour leur part, montré que la fréquence cardiaque évoluait de façon similaire entre conduite sur route et sur simulateur, relativement aux mesures réalisées au repos, et proposé la même conclusion que Milleville-Pennel et Charron (2015). Cette conclusion reste cependant conditionnée à l'absence de différence au plan des comportements adoptés.

Pris dans leur ensemble, ces résultats suggèrent d'une part l'absence de consensus quant à l'effet d'un dispositif de réalité virtuelle sur la charge mentale. Blaauw (1982) et Alm (1995) ont conclu que la simulation de conduite induisait davantage de charge. Engström et al. (2005) ont suggéré, à partir de tendances statistiques, que la charge était supérieure en situation réelle. Pour Johnson et al. (2011) et Milleville-Pennel et Charron (2015), les

ressources cognitives impliquées dans l'activité ne diffèreraient pas entre conduite sur route et conduite sur simulateur. Pour compléter cette synthèse des résultats, une autre étude mérite enfin d'être mentionnée quant à l'effet d'un dispositif de réalité virtuelle sur la charge mentale, bien qu'elle ne s'inscrive pas dans une démarche consistant à confronter différentes dimensions de la validité. Chen et al. (2015) ont comparé la demande attentionnelle d'une tâche de pointage réalisée en réel et en réalité virtuelle. Ils se sont, pour cela, appuyés sur un paradigme de double tâche pour comparer la demande d'attention propre à chaque environnement. Les participants ont ainsi effectué la tâche (primaire) de pointage tout en répondant verbalement à un signal auditif imprévu, la demande d'attention de la tâche primaire étant mesurée par le temps de réponse vocale au son. Les résultats ont montré une augmentation de la demande attentionnelle en réalité virtuelle, le temps de réponse vocale étant plus long de 130 ms en virtuel (802 ms en virtuel contre 666 ms en réel). L'absence de consensus quant à l'effet d'un dispositif de réalité virtuelle sur la charge mentale souligne donc l'intérêt de cette mesure de la validité psychologique dans une démarche d'évaluation des dispositifs.

D'autre part, les résultats contradictoires observés sur le niveau de charge entre conduite sur simulateur et conduite sur route peuvent être expliqués par plusieurs facteurs, parmi lesquels figure la nature des indicateurs choisis. Chaque indicateur possédant ses propres limites, comme nous l'avons présenté dans cette revue de littérature, l'effet observé sur les mesures subjectives dans les travaux de Blaauw (1982) et Alm (1995) pourrait être biaisé par les attentes des conducteurs placés face à un simulateur. De la même façon, l'augmentation de la fréquence cardiaque, dans les études d'Engström et al. (2005) et Milleville-Pennel et Charron (2015), laisse penser que les conducteurs pourraient être plus stressés lors de la conduite sur route, la fréquence cardiaque évoluant de la même façon sous l'effet du stress et de la charge mentale (Boucsein & Backs, 2000 ; Cain, 2007). Ces résultats

contradictoires soulignent donc la nécessité de recourir à des indicateurs robustes de la charge mentale.

Sur ce point, plusieurs études ont montré la robustesse des protocoles de double tâche pour mesurer la charge mentale, que ce soit sur simulateur de conduite (e.g., Hancock et al., 1990), sur route (e.g., Verwey, 2000) ou dans le cadre d'une comparaison entre réel et virtuel (Chen et al., 2015). Hancock et al. (1990) ont de plus montré une convergence entre les temps de réponse à une tâche secondaire et la fréquence des clignements oculaires. Benedetto et al. (2014) ont enfin montré une convergence entre les scores au NASA-TLX et la fréquence des clignements oculaires que ce soit en condition de tâche simple ou de double tâche.

Chapitre 2. Problématique

Toute démarche d'évaluation d'un dispositif de réalité virtuelle en vue de questionner sa validité consiste à mesurer les effets de ses caractéristiques immersives et interactives sur le positionnement des utilisateurs. La revue de littérature a permis de mettre en évidence l'étendue de la problématique relative à la validité des simulateurs de conduite. Le nombre et la diversité des mesures utilisées pour qualifier les dispositifs tiennent probablement à la multiplicité des aspects technologiques inhérents à la réalité virtuelle et de ses domaines d'application. L'essentiel des travaux portant sur la validité des simulateurs de conduite s'est appuyé sur des mesures subjectives et comportementales (Bella, 2008 ; Godley et al., 2002 ; Törnros, 1998). Quelques études se sont également intéressées à la validité psychologique, définie par Malaterre et Fréchaux (2001) comme le degré de similitude entre les processus sous-tendant les comportements en situation réelle et simulée, coût cognitif compris. Pourtant, pour Deniaud et Mestre (2015), la validité psychologique constitue un des piliers de la validité comportementale. Pour Pinto et al. (2008), un haut degré de validité physique n'est pas toujours nécessaire pour atteindre de bons niveaux de validité éthologique ou psychologique, qui constituent les deux pierres angulaires de la validité pour la recherche sur les comportements de conduite.

Si ces différentes dimensions de la validité ont été utilisées pour l'évaluation d'un dispositif de réalité virtuelle, très peu d'études se sont par contre inscrites dans une démarche consistant à les confronter, alors que cela pourrait contribuer au développement d'une métrologie des environnements virtuels (Burkhardt et al., 2003). Ce type de démarche permet en effet de mieux rendre compte du positionnement des utilisateurs face au dispositif, en dépassant les limites de certaines mesures.

Plusieurs études ont ainsi mis en évidence que les mesures subjectives peuvent être limitées par un manque de sensibilité aux caractéristiques du dispositif comparativement à des mesures comportementales (e.g., Morice et al., 2008) et qu'elles pourraient être le reflet des

attentes et connaissances a priori des utilisateurs (e.g., Lobjois et al., 2013, 2016 ; Wertheim et al., 2001). A propos des mesures comportementales de la validité, plusieurs auteurs (Burkhardt et al., 2003 ; Deniaud & Mestre, 2015) ont suggéré que les performances et comportements des sujets seraient une fenêtre sur l'activité et les processus psychologiques impliqués dans la tâche simulée. Cela laisse sous-entendre que des mesures comportementales seules permettraient d'inférer la validité psychologique d'un dispositif. En nous référant au modèle de l'activité de conduite de Michon (1985), nous avons à ce sujet avancé l'idée que cette relation entre validité comportementale et validité psychologique ne serait possible que pour ce qui concerne les processus impliqués au niveau opérationnel de la tâche de conduite. Très peu d'évidences existent sur ce point, mais les résultats de Lobjois et al. (2013, 2016), montrant que la dégradation du contrôle de trajectoire sur simulateur moto, lorsque certaines de ses caractéristiques sont manipulées, s'accompagne d'une altération des stratégies visuelles, vont dans ce sens. Par conséquent, confirmer la validité psychologique d'un dispositif implique de s'intéresser également à des processus de plus haut niveau qui ne seraient pas en prise direct avec le contrôle du véhicule (tels que les stratégies visuelles). En se référant à la définition de la validité psychologique, le niveau de charge mentale induit respectivement par la conduite sur route et la conduite sur simulateur semble être un bon candidat.

D'une part, très peu d'études se sont engagées dans une démarche visant à mesurer le degré de similitude entre la charge mentale engendrée par la conduite en réel et celle engendrée par la conduite en virtuel, et les résultats obtenus se révèlent très contrastés. Blaauw (1982) et Alm (1995) ont mis en évidence des comportements similaires entre conduite sur route et sur simulateur mais rapporté, à partir de mesures subjectives, une augmentation de la charge mentale dans cette dernière condition. Chen et al. (2015) ont révélé, à partir d'une tâche de pointage et des mesures de temps de réaction à une tâche

secondaire, que la demande attentionnelle de la tâche réalisée en virtuel était supérieure à son équivalent en réel. A l'opposé, pour Johnson et al. (2011) et Milleville-Pennel et Charron (2015), les ressources cognitives impliquées dans l'activité ne diffèreraient pas entre conduite sur route et conduite sur simulateur, alors que pour Engström et al. (2005), la charge mentale serait supérieure en situation réelle. Ces résultats contradictoires pourraient être expliqués en partie par la diversité des indicateurs utilisés pour rendre compte de la charge mentale. Dans ce contexte, nous proposons d'utiliser plusieurs indicateurs simultanément, dont la fréquence des clignements pour en évaluer la fiabilité dans le contexte de la conduite.

D'autre part, en nous appuyant sur le modèle de De Waard (1996) qui formalise les relations entre les demandes de la tâche et les capacités du conducteur et leurs effets sur le niveau de charge mentale et les comportements de conduite, nous avons formulé des prédictions quant à l'effet d'un dispositif de réalité virtuelle sur ces deux variables :

1) Si le dispositif affecte le niveau opérationnel, les comportements de conduite se dégradent lors de la conduite sur simulateur comparativement à la conduite sur route. Des mesures comportementales seules permettent donc d'attester d'un défaut de la validité (absolue) du dispositif.
2) Si le dispositif n'affecte pas le niveau opérationnel, les performances sont donc similaires entre réel et virtuel. En parallèle, soit le niveau de charge mentale ne diffère pas entre ces deux conditions, et cela atteste de la validité éthologique comme psychologique du dispositif, soit la charge mentale est supérieure dans une des conditions. Le recours à des mesures de cette dimension de la validité psychologique permet donc de dépasser les mesures de la validité comportementale, pour mieux cerner le positionnement de l'utilisateur face au dispositif.

Cette thèse se propose donc de traiter de la question de la validité de la simulation de conduite, en s'intéressant aux liens existants entre plusieurs dimensions (comportementale et

psychologique) et à la capacité de chacune à renseigner les relations entre l'utilisateur et le dispositif. En particulier, nous traiterons d'un aspect de la validité psychologique, la charge mentale, qui est peu documenté.

Considérant l'ensemble des éléments que nous venons de synthétiser, le travail présenté avait pour objectif : (i) d'examiner dans quelle mesure la validité psychologique, abordée sous l'angle du coût cognitif, contribue à l'évaluation d'un simulateur de conduite dit « bas coût » comparativement à la validité comportementale. Il s'agissait aussi (ii) d'évaluer la fiabilité et la robustesse des clignements oculaires pour rendre compte de la charge mentale dans le contexte de la conduite automobile, à partir d'une approche comparative de différentes variables la mesurant. A l'aide des éléments dégagés par les deux premiers objectifs, ce travail visait (iii) à déterminer si la conduite sur simulateur (« bas coût ») entraîne un niveau de charge mentale différent comparativement à la conduite sur route. Enfin, si tel est le cas, le dernier objectif était (iv) de tester et de proposer des pistes d'amélioration des simulateurs de conduite« bas coût ».

La contribution expérimentale de ce travail de thèse s'est articulée autour de la comparaison de la charge mentale induite, respectivement, par la conduite réelle et la conduite simulée (expérience 3). Cette comparaison a, en amont, posé des questions à la fois théoriques et méthodologiques que nous avons traitées. Il a en effet été nécessaire de déterminer si la fréquence des clignements était sensible à différents facteurs tels que le trafic (expérience 1), l'environnement de conduite (expériences 1 et 2) ou encore la nature d'une tâche secondaire introduite en parallèle de la tâche de conduite (expériences 1 et 2).

L'expérience 3 ayant mis en évidence une augmentation de la charge mentale lors de la conduite sur simulateur comparativement à la conduite sur route, nous avons par la suite cherché à identifier des possibilités permettant de réduire le niveau de charge mentale induit par la conduite sur simulateur. A partir de nos résultats et dans le contexte d'une littérature

peu abondante sur le sujet, nous avons identifié que le retour d'information au volant (Mourant & Sadhu, 2002 ; Pinto, 2007) pouvait être à l'origine des différences entre conduite réelle et simulée au plan de la charge mentale propre à la conduite d'un simulateur « bas coût ». La quatrième et dernière expérience a donc été réalisée pour traiter cet aspect.

Chapitre 3. Contribution expérimentale

1. Expérimentation 1 : Effet de l'environnement de conduite, du trafic et de la double tâche sur la charge mentale en conduite simulée

1.1. Introduction

La littérature portant sur la charge mentale dans le contexte de la conduite automobile montre qu'elle peut avoir comme origine aussi bien les caractéristiques de la tâche de conduite que les capacités des opérateurs. La capacité d'un conducteur à répondre aux demandes de la tâche dépend de nombreux facteurs et peut être influencée par son expérience (Lehtonen, Lappi, Korikivi, Summala, 2014 ; Törnros & Bolling, 2006), ses motivations (Fuller, 2005) et son niveau de stress ou de fatigue (Reyner & Horne, 1998). Dans le cadre de cette thèse, nous nous sommes intéressés principalement aux caractéristiques de la tâche de conduite et nous allons donc nous limiter à présenter les études qui portent sur ces aspects.

Parmi les facteurs qui influencent la charge mentale, on peut citer le type de manœuvre à réaliser (e.g., Cantin, Lavallière, Simoneau & Teasdale, 2009 ; Hancock et al., 1990), la complexité de l'environnement de conduite (Patten, Kircher, Östlund, Nilsson & Svenson, 2006 ; Törnros & Bolling, 2006 ; Young, Mahfoud, Stanton, Salmon, Jenkins & Walker, 2009), les caractéristiques du trafic (Baldwin & Coyne, 2003 ; Brookhuis, de Vries & de Waard, 1991 ; De Waard, Kruizinga & Brookhuis, 2008 ; Teh et al., 2014) ou encore la présence de tâches annexes telles qu'interagir avec un système embarqué (Engström et al., 2005). Dans la perspective de l'étude réalisée sur route ouverte en situation réelle, il nous a paru particulièrement intéressant de nous focaliser sur la complexité de l'environnement ainsi que sur les caractéristiques du trafic.

Pour ce qui concerne le trafic, Brookhuis et al. (1991) ont rapporté que l'effort mental subjectif des conducteurs était plus élevé sur route très fréquentée que sur route tranquille. Teh et al. (2014) ont montré que le niveau de charge augmentait principalement avec la dangerosité des interactions. De Waard et al. (2008) ont quant à eux montré que la charge

augmentait avec la présence de poids lourds. Ces études ont néanmoins comme particularité d'avoir étudié le trafic circulant dans le même sens que les sujets. Une seule étude à notre connaissance s'est intéressée à l'influence du trafic circulant en sens inverse en fonction de sa densité (faible ou élevée). Dijksterhuis, Brookhuis et De Waard (2011) ont ainsi montré que la présence de trafic en sens inverse avait des effets importants sur les mesures liées au contrôle de trajectoire, mais aucun effet sur les mesures physiologiques de la charge.

Pour ce qui concerne l'environnement de conduite, Törnros et Bolling (2006) ont montré que la conduite en milieu urbain mettait davantage l'accent sur les ressources attentionnelles que la conduite en milieu rural. Des résultats similaires ont été trouvés par Patten et al. (2006) en situation réelle. En fonction des exigences imposées au traitement de la scène routière et/ou au contrôle du véhicule, les itinéraires ont été classés comme étant de complexité élevée (conduite en milieu urbain), moyenne (négociation d'intersections réglementées) ou faible (conduite libre en milieu urbain, rural ou autoroutier). Les résultats ont révélé une hausse des temps de réaction à la tâche subsidiaire lorsque l'itinéraire devenait plus exigeant (voir également Jahn, et al., 2005, ou Verwey, 2000). Young et al. (2009) ont étudié les effets du type de route (i.e., urbain, rural et voie rapide) sur les performances de conduite, l'évaluation subjective de la charge mentale (NASA-TLX) et les stratégies visuelles. Les résultats ont révélé que les scores au NASA-TLX ne différaient pas selon l'environnement. En revanche, comparé à l'environnement urbain qui était pris comme référence, le nombre de sortie de voie et le temps total passé en dehors de la voie de circulation étaient plus faibles sur voie rapide et plus élevés sur route rurale. Les stratégies visuelles ont également suggéré que la charge mentale était plus élevée en rural que dans les autres environnements, avec un nombre de fixations en dehors de la route plus faible. Les résultats vont dans le sens de ceux obtenus par Victor, Harbluk et Engström (2005), qui ont montré que conduire sur une portion de route sinueuse incitait les conducteurs à concentrer

leur prise d'information vers le centre de la voie, alors qu'il y avait une dispersion plus grande du regard sur des portions de ligne droite. A l'opposé de ces résultats, De Waard et al. (1995) ont comparé deux environnements routiers différents (route courbe et section de ligne droite), mais aucune différence significative n'a été constatée sur les performances de conduite ou les mesures physiologiques de la charge.

L'ensemble de ces études s'est appuyé, pour rendre compte des effets du trafic et de l'environnement de conduite, sur des mesures subjectives (e.g., NASA-TLX), comportementales (e.g., vitesse et contrôle de trajectoire) et physiologiques (e.g., réponse électrodermale, fréquence cardiaque) de la charge mentale. L'intérêt de la fréquence des clignements oculaires comme mesure de la charge mentale dans le contexte de la conduite reste donc pleinement posé. Quelques études ont néanmoins fait un lien entre la fréquence des clignements et la difficulté de la tâche de conduite.

Hancock et al. (1990) ont été les premiers à montrer que la fréquence des clignements diminue lorsque la difficulté de la manœuvre à réaliser augmente. Par la suite, Benedetto et al. (2014) ont révélé que la fréquence des clignements diminue lorsque le contrôle de trajectoire devient plus exigeant. Il est bien établi par ailleurs que la fréquence des clignements évolue différemment lorsque la charge augmente soit par la manipulation de la difficulté de la tâche primaire, soit par l'introduction d'une tâche secondaire. En condition de tâche simple, la fréquence des clignements diminue lorsque la difficulté de la tâche augmente (Holland & Tarlow, 1972 ; Van Orden, Limbert, Makeig & Jung, 2001). En revanche, la fréquence des clignements augmente lorsqu'une tâche cognitive concurrente doit être réalisée (Benedetto et al., 2011, 2014 ; Recarte et al., 2008 ; Savage et al., 2013).

Dans ce cadre, l'objectif de cette première étude était de déterminer 1) si la fréquence des clignements est sensible ou non à la complexité de l'environnement de conduite et à la présence de trafic en sens inverse, et 2) si le mécanisme d'inhibition des clignements, connu

pour révéler une augmentation de la difficulté de la tâche primaire, est préservé ou non avec l'introduction d'une tâche secondaire.

Pour répondre à cet objectif, les participants ont conduit dans trois environnements différents (voie rapide, rural et urbain), avec deux conditions de trafic (présence ou absence de véhicules circulant en sens opposé). La conduite était réalisée seule ou associée à une tâche audio-vocale de temps de réaction. Les trois environnements se distinguaient sur deux aspects principaux : les exigences de contrôle du véhicule et la richesse de la scène routière. Ces deux critères ont été identifiés par Patten et al. (2006) et Young et al. (2009) comme des facteurs importants du niveau de charge mentale mesuré pendant la conduite. La voie rapide présentait une faible exigence de contrôle du véhicule, une pauvreté du contexte environnant et une absence d'interaction avec le trafic présent en sens opposé (présence d'un terre-plein central). Il devrait donc être associé à un niveau faible de charge mentale. L'environnement rural était plus exigeant en termes de contrôle du véhicule, en particulier latéral. Il était assez pauvre visuellement, mais les interactions avec le trafic venant en sens inverse étaient possibles, pouvant aller jusqu'à une collision ou une sortie de voie en cas d'erreur de guidage. L'ensemble de ces éléments devrait induire un niveau modéré de charge mentale. Enfin, l'environnement urbain se caractérisait par une exigence plus forte de contrôles latéral et longitudinal du véhicule (présence d'intersection et de ronds-points), dans un contexte visuel riche, intégrant le trafic en sens opposé. Cet environnement devrait donc être associé à un niveau élevé de charge mentale.

Considérant l'ensemble de ces éléments, un effet de l'environnement de conduite était attendu sur les mesures subjective et comportementale de la charge ainsi que sur la fréquence des clignements. L'introduction du trafic en sens opposé devait avoir un effet significatif sur les différentes mesures de la charge dans l'environnement rural et urbain. Enfin, la présence

d'une double tâche devait entraîner une augmentation de la fréquence des clignements, une augmentation de la difficulté perçue, et une dégradation du contrôle de trajectoire.

1.2. Matériel et Méthode

1.2.1. Participants

Pour cette première expérience, 20 participants (17 hommes et 3 femmes) âgés de 24 à 47 ans ont été recrutés après avoir accepté les modalités de participation à l'étude en signant un consentement libre et éclairé. Chacun d'entre eux avait une vue normale ou corrigée, et n'était pas informé des objectifs de l'étude. Tous étaient titulaires du permis de conduire, avec une ancienneté minimum de 2 ans.

Ces critères ont été fixés afin de limiter les effets pouvant provenir d'une trop grande variabilité entre les différents conducteurs. En effet, il a été montré que le niveau d'expérience (Konstantopoulos et al., 2010 ; Törnros & Bolling, 2006), l'âge et le niveau de stress ou de fatigue (Reyner & Horne, 1998) pouvaient influencer la conduite et les variations de la charge mentale en fonction des conditions de la tâche. Par exemple, une diminution des performances de conduite liée au facteur âge a été observée dans plusieurs études, ciblant les conducteurs de plus de 60 ans (Cantin, 2009). Les études de Crundall et Underwood (1998) ou encore Patten et al. (2006) ont également montré une différence sensible des performances de conduite entre les conducteurs novices, avec moins d'un an d'expérience, et les conducteurs plus expérimentés. Ces différents éléments ont justifié, dans nos expériences, d'exclure les participants de plus de 60 ans et ceux qui étaient titulaires d'un permis de conduire probatoire. Nous avons ciblé des conducteurs pratiquant régulièrement l'activité, mais qui n'avaient jamais eu l'occasion de conduire en simulateur. Aucun d'eux n'avait non plus d'expertise de conduite sportive sur circuit ou en rallye.

1.2.2. Dispositif expérimental

Un simulateur de conduite statique dit « bas coût » a été utilisé pour cette expérience. Le dispositif se composait de plusieurs éléments (Figure 6). Le poste de conduite comprenait un siège ajustable horizontalement et verticalement, un volant Logitech G25 avec retour d'effort, un levier de vitesse et les pédales d'embrayage, de frein et d'accélérateur. Le dispositif de restitution visuelle était constitué d'un écran de 2 m de large sur 2 m de haut sur lequel était projetée une image de 1,80 m de large sur 1,30 m de haut, correspondant à un champ de vision horizontal et vertical respectivement de 48 et 36° avec le participant placé à 2 m de l'écran de projection. La résolution du vidéoprojecteur était de 1280 x 900 pixels. La fréquence de rafraîchissement de l'image était de 30 Hz. Le système de restitution sonore était composé de deux enceintes placées en avant de la cabine, et de part et d'autre de celle-ci. Un ordinateur central était connecté aux différents éléments précités pour contrôler le déroulement de la simulation grâce à plusieurs applications développées au LEPSiS (Espié, Mohellebi & Kheddar, 2003). Un logiciel enregistrait et traitait les informations provenant du poste de conduite. Il transmettait ces informations à un module qui gérait la partie visuelle de la simulation. Ce module calculait l'état de l'environnement virtuel, en tenant compte des informations issues des données du simulateur et du scénario de l'expérience. Le temps de latence du système, qui correspondait à la durée de la chaîne de traitement, était d'environ 33 ms. Il était donc inférieur au délai identifié comme perturbant l'interaction avec l'environnement virtuel (Morice et al., 2008).

Les données oculaires étaient enregistrées au moyen d'un oculomètre monoculaire de marque « Pertech ». Le dispositif, dit tête portée et d'un poids de 80 g, se composait d'une monture type paire de lunette sur laquelle étaient fixées deux caméras. La première enregistrait les mouvements de l'œil gauche et était placée au bout d'un bras articulé permettant d'adapter sa position à chaque participant en vue d'optimiser la calibration du

système. La seconde, positionnée au centre de la monture, capturait les images de la scène grâce à une focale de 2.2 mm. L'oculomètre était connecté à une unité centrale enregistrant les données vidéo et les données d'œil (en particulier le diamètre pupillaire qui a été utilisé pour détecter les clignements). Les mouvements de tête étaient également enregistrés grâce à la présence, dans la scène, d'une série de trois marqueurs alignés.

Figure 6 : Illustration du dispositif expérimental (Expérience 1)

De haut en bas : poste de conduite (volant à retour d'effort Logitech-G25, pédalier, siège ajustable) ; participant équipé de l'oculomètre (modèle monoculaire Pertech, 50 Hz) ; écran de projection (taille de l'image = 1.80 x 1.30m, résolution = 1280 x 900 pixels, fréquence de rafraîchissement = 30Hz).

La détection de ces trois marqueurs par un système de traitement d'image a posteriori permettait de prendre en compte les mouvements de tête (en relatif par rapport à la position 0 en début d'enregistrement des données) et de les intégrer aux données de coordonnées oculaires. Pour la calibration, une grille en 7 points était utilisée. Ce dispositif a été mis en place dans la perspective d'exploiter des données relatives aux stratégies visuelles, même si cela ne fait pas partie de ce travail de thèse. La solution logicielle permettant une analyse propre des temps de regard dans des zones d'intérêt n'était pas suffisamment aboutie pour pouvoir être utilisée. Les données étaient enregistrées à une fréquence de 50 Hz. Des illustrations du dispositif sont présentées dans la Figure 7.

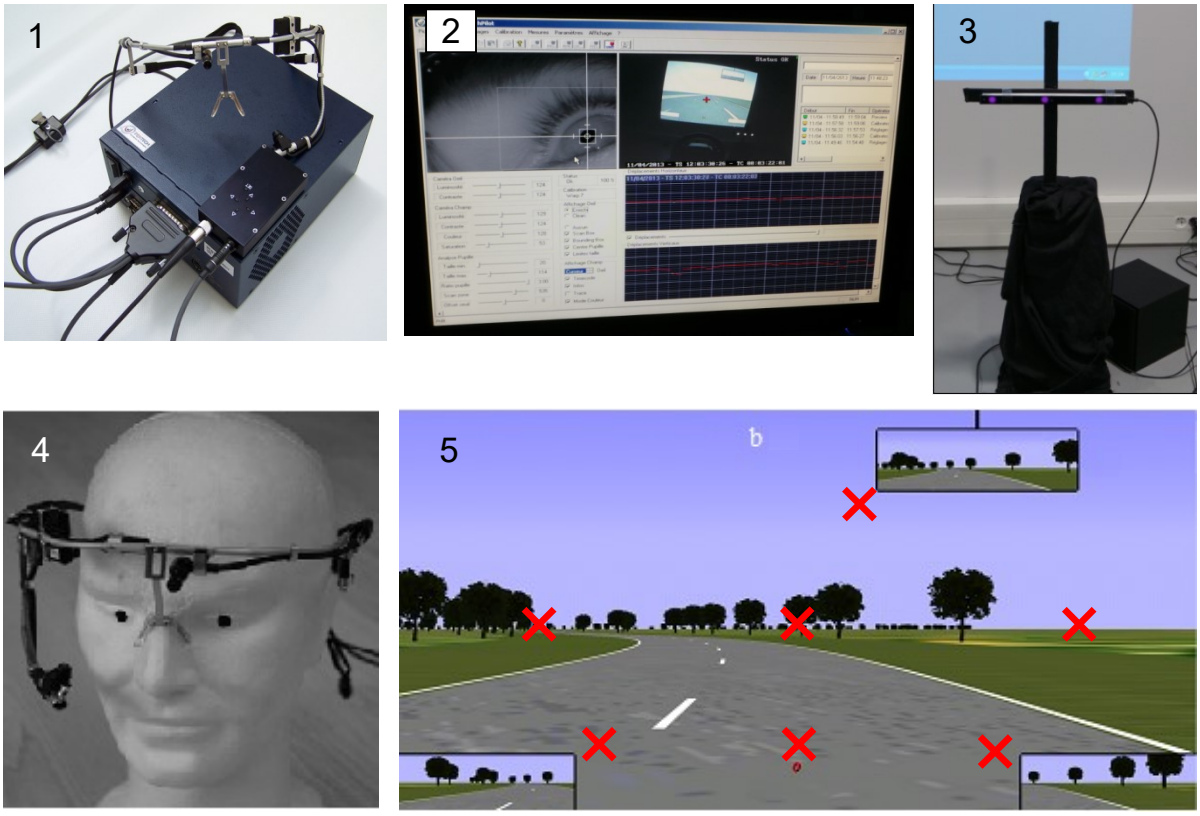


Figure 7 : Illustration du dispositif Pertech pour l'enregistrement des mouvements oculaires

(1) unité centrale ;(2) interface de contrôle (retour de la caméra d'œil, retour de la camera de scène, interface de contrôle des paramètres d'acquisition des données) ; (3) mires infrarouges pour le calcul des mouvements de tête ;(4) capteur (monture paire de lunette, camera de scène, camera d'œil) ; (5) scène visuelle avec 7 points de calibration.

1.2.3. Plan expérimental et tâches

Au cours de cette expérience, l'environnement de conduite (voie rapide, route rurale et environnement urbain), les conditions de trafic (avec ou sans trafic en sens opposé) ainsi que les conditions de double tâche (avec ou sans tâche secondaire) ont été manipulés, donnant lieu à un plan 3 x 2 x 2, soit 12 conditions expérimentales. Chaque participant a réalisé une session de conduite, d'une durée de 3 minutes, dans chacune des conditions, présentées dans un ordre aléatoire.

L'environnement « voie rapide » comportait 2 x 2 voies de circulation (de 3,5 m de large chacune) séparées par un terre-plein central et bordées de champs. Conformément au réseau routier auquel cet environnement se réfère, la vitesse était limitée à 110 km/h. L'environnement rural consistait en une route sinueuse à double sens de circulation. Les deux voies (également de 3,5 m de large) étaient délimitées par un marquage blanc standard et étaient bordées d'arbres répartis aléatoirement sur le bas-côté à une distance minimum de 8 m par rapport à la voie. Les virages avaient deux rayons de courbure (150 et 300 m) et quatre longueurs possibles (78,5, 157, 214 ou 471 m). Ils étaient séparés par une section de ligne droite de 100 m de long. La vitesse était, ici, limitée à 90 km/h. Enfin, l'environnement urbain correspondait à la reconstitution d'un quartier de la ville de Vanves. Il était visuellement riche, du fait de la présence d'immeubles, de panneaux de signalisation et d'orientation, de feux de circulation et de mobilier urbain. En outre, le trajet emprunté par les conducteurs, et balisé par des flèches blanches au sol, comportait plusieurs difficultés. Il impliquait le passage successif d'un petit giratoire (changement de direction à droite), d'une voie de dégagement en « S » (changement de direction à droite, régime prioritaire), d'une intersection en « T » (changement de direction à droite, régime prioritaire), d'une intersection en « Y » (changement de direction à gauche, régime prioritaire), et d'un grand giratoire (changement de direction à droite). Chaque intersection était séparée par des portions de route droites ou de

longues courbes peu prononcées. La vitesse des automobilistes était limitée à 50 km/h. Une illustration de chacun des trois environnements est présentée dans la Figure 8.

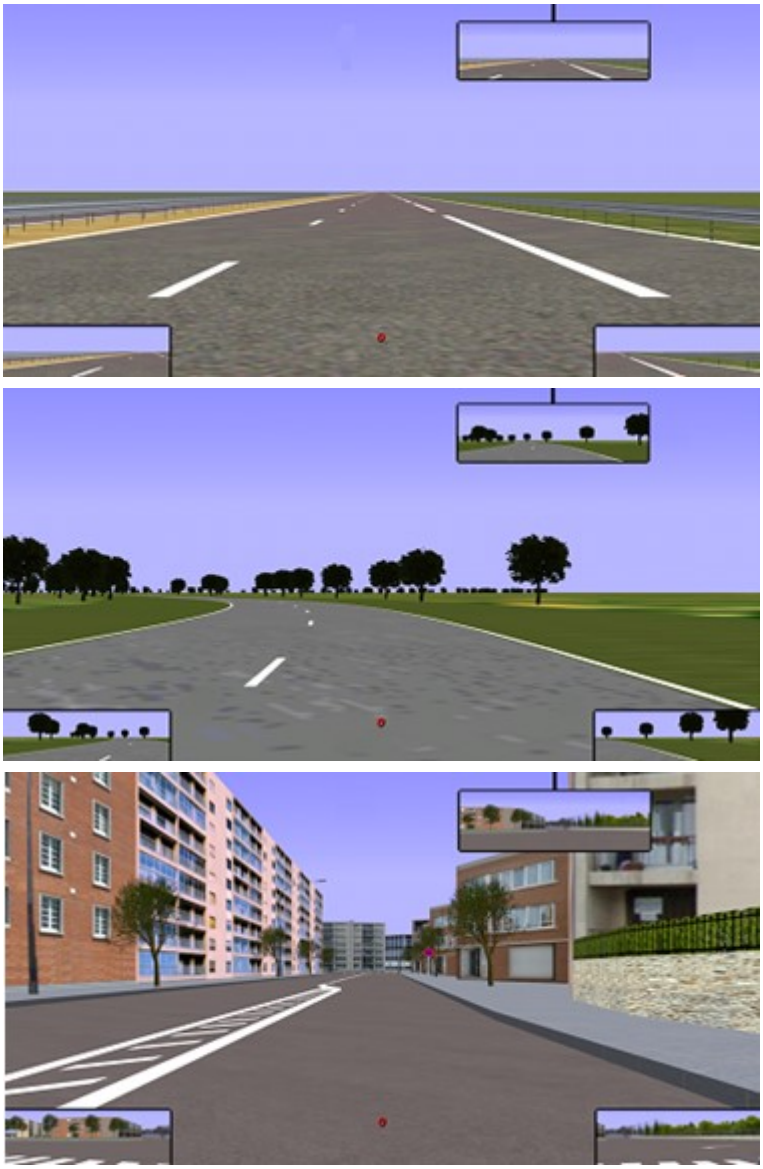


Figure 8 : Illustration des environnements de conduite

De haut en bas : environnement voie rapide ; environnement rural ; environnement urbain.

Le trafic était constitué de voitures de tourisme légères qui se déplaçaient à la vitesse limite autorisée dans chaque environnement. Les véhicules étaient introduits uniquement en sens opposé à celui du participant, et après les 300 premiers mètres de conduite. La distance entre deux véhicules était de 300 m dans les environnements « voie rapide » et « rural ». Afin de maintenir le même nombre de véhicules présents à l'écran (et donc, de maintenir la charge

liée au trafic), la distance inter-véhiculaire était réduite à 150 m dans l'environnement urbain du fait d'une distance de visibilité moins grande liée aux intersections.

Enfin, les participants devaient conduire avec ou sans tâche secondaire. La tâche secondaire consistait à répondre à voix haute (« Top ») et le plus rapidement possible à un stimulus sonore (« Bip ») d'une durée de 100 ms et d'une amplitude égale à 1.5 kHz. La durée entre chaque stimulus variait de façon aléatoire entre 3 et 6 secondes pour prévenir toute anticipation de la part des participants. La tâche secondaire a été développée et validée par Cantin (2009) pour mesurer la charge mentale pendant une tâche de conduite sur simulateur. Dans cette expérience, elle a été présentée de manière continue de façon à maintenir en permanence les participants en situation de double tâche. Les stimuli étaient préenregistrés et intégrés à l'environnement sonore de la simulation (régime moteur du véhicule). Une épreuve de référence a été réalisée, durant laquelle la tâche de temps de réaction était présentée sans la tâche de conduite afin de permettre une comparaison avec la condition de double tâche.

1.2.4. Procédure

Après avoir reçu des explications sur le principe de l'expérience, les participants ont signé un formulaire de consentement et rempli une fiche de renseignements. Ils ont ensuite effectué une phase de familiarisation à la tâche de temps de réaction et à la conduite sur simulateur. Pour cette dernière, les participants ont conduit dans un environnement exigeant du point de vue du contrôle longitudinal et latéral. Cet environnement était visuellement différent des trois autres utilisés dans l'expérience. Il consistait en un circuit de 6,4 km, que les participants complétaient en 7 minutes à la vitesse de 90 km/h. Enfin, l'expérimentateur a procédé à l'installation puis à la calibration de l'oculomètre. La calibration, qui permet de déterminer avec précision la position du regard dans la scène, a été effectuée systématiquement en prévision d'analyse des stratégies visuelles qui comme indiqué plus haut n'ont pas été exploitées pour ce travail de thèse. Après cette première phase, les participants

ont réalisé les 12 sessions de conduite qui composaient la phase expérimentale. Une pause de quelques minutes a été observée entre chaque session de conduite et la passation complète avoisinait environ 1 h.

Pour chaque session de conduite, les participants avaient pour consigne de se comporter le plus naturellement possible, comme ils le feraient dans l'environnement réel. Ils devaient respecter le code de la route, et en particulier les limites de vitesse. Ils avaient à leur disposition un compteur de vitesse (affiché en bas et au centre de l'image), un rétroviseur central et deux rétroviseurs latéraux incrustés dans la scène visuelle (voir la Figure 8). En double tâche, aucune indication de priorité entre les deux tâches n'était donnée aux participants. Il leur était précisé qu'ils devaient faire de leur mieux pour la tâche de conduite comme pour la tâche de temps de réaction. Cette règle était conforme à celle utilisée dans d'autres études, en particulier celle de Cantin (2009).

Les 12 sessions de conduite étaient présentées dans un ordre aléatoire. Avant chaque essai, l'expérimentateur précisait oralement le type d'environnement, la vitesse de consigne, la présence éventuelle de trafic et les tâches à réaliser (exemple : « *Pour cette session, vous allez conduire dans l'environnement urbain. La vitesse sera limitée à 50 km/h et il n'y aura pas de trafic. Vous n'aurez que la tâche de conduite à réaliser*. »).

Le questionnaire d'évaluation subjective de la charge mentale (NASA-TLX) a été administré immédiatement à la suite de chaque session de conduite. Enfin, les mesures de contrôle pour la tâche de temps de réaction seule ont été réalisées avant (50% des participants) ou après (50% des participants) les 12 sessions de conduite.

1.2.5. Analyse des données

1.2.5.1. Clignements oculaires

Les études qui ont défini la durée des clignements sont assez rares. Stern et al. (1984) ont distingué les clignements endogènes (involontaires) des clignements volontaires ou

provoqués par la fatigue. Les clignements endogènes sont caractérisés par i) une durée de fermeture de la paupière généralement inférieure à 150 ms, ii) une période durant laquelle la vision est occultée inférieure à 300 ms et, iii) une durée de réouverture de la paupière inférieure à 150 ms. Sur cette base, les auteurs ont établi que la durée maximale d'un clignement endogène était de 500 ms. En conséquence et parce que nous avons focalisé notre étude sur les clignements involontaires comme indicateurs de la charge mentale, les clignements d'une durée supérieure à 500 ms n'ont pas été pris en compte.

Concernant la durée minimale des clignements endogènes, nous n'avons pas identifié dans la littérature d'études permettant de la définir précisément. Le seuil est généralement fixé arbitrairement. Par exemple, la durée minimale était fixée à 70 ms dans l'étude de Benedetto et al. (2011), 80 ms dans l'étude de Benedetto et al. (2014) et 90 ms dans l'étude de McIntire, McKinley, Goodyear et McIntire (2014). En nous basant sur la fréquence d'échantillonnage de l'oculomètre (50 Hz) et en considérant les études citées précédemment, nous avons fixé à 80 ms la durée minimale d'un clignement.

Les clignements ont été extraits à partir de données sur le diamètre pupillaire, grâce à une application développée dans le cadre de ce travail de thèse et présentée en Annexe 2. Elle est basée en partie sur un algorithme proposé par Pedrotti, Lei, Dzaack et Rötting (2011). Comme l'avaient fait précédemment Stern, Boyer et Schroeder (1994), nous avons considéré le nombre total de clignement sur un enregistrement de 3 minutes (i.e. une session de conduite), que nous avons ensuite traduit en fréquence (nombre de clignement par minute).

1.2.5.2. Temps de réaction à la tâche secondaire

Le temps de réaction à la tâche secondaire était mesuré entre le début du stimulus et le début de la réponse verbale. Afin de filtrer les résultats pour supprimer les données aberrantes, il a été appliqué une procédure similaire à celle proposée par Cantin et al. (2009).

Les aberrations correspondaient aux temps de réponses inférieurs à 150 ms, ou supérieurs au temps de réponse individuel moyen plus deux écart-types.

1.2.5.3. Taux de réversion du volant

Les trois environnements de conduite sélectionnés ont conduit à des limitations de vitesse et des largeurs de route différentes. Par conséquent, il était attendu (et confirmé) que la vitesse de conduite varie d'un environnement à l'autre et que la position latérale soit également influencée par les caractéristiques routières (e.g., Rosey, Auberlet, Moisan, & Dupré, 2009), induisant des stratégies particulières dans les courbes, intersections et ronds-points (e.g., Kountouriotis, Floyd, Gardner, Merat, & Wilkie, 2012). La comparaison de ces données pour rendre compte de l'effet de l'environnement était donc à exclure. Afin de disposer d'une mesure plus adéquate pour comparer les performances de conduite dans les trois environnements, le taux de réversion du volant a été calculé car il permet de mieux surmonter les aspects tactiques de la conduite (e.g., Frissen & Mars, 2014). Pour le calculer, nous avons suivi les pratiques habituelles en comptabilisant le nombre de changements de direction du volant par minute, quel que soit son angle de rotation, avec un seuil de détection fixé à 1° (e.g., Engström et al., 2005 ; Jamson & Merat, 2005). Pour extraire les données relatives au taux de réversion du volant, une application développée précédemment au LEPSIS a été utilisée. Nous nous attendions à observer plus de régulations de la trajectoire et donc de réversions du volant avec l'augmentation des demandes liées au contrôle du véhicule dans les environnements rural et urbain.

1.2.5.4. Mesure subjective

Le NASA-TLX, questionnaire répandu et validé par plusieurs études (Hart, 2006), est composé de six dimensions (notées de 1 à 10) : la demande mentale, la demande physique, l'effort, la performance, la pression temporelle et la frustration. Pour tous les questionnaires

recueillis, un score global correspondant à la somme des notes données dans chaque dimension a été calculé, sans procéder à une comparaison entre ces dernières.

1.3. Résultats

Des analyses de variance (ANOVA) à mesures répétées ont été réalisées sur les différentes variables dépendantes. Bien qu'il ait été observé que la distribution de certaines variables dépendantes ne suivait pas la loi normale (tests de normalité de Shapiro-Wilk, $p < 0.05$), l'ANOVA, test résistant au non-respect de cette condition, a été préférée à un test non paramétrique (Glass, Peckham & Sanders, 1972; Howell, 2010; Schmider, Ziegler, Danay, Beyer, & Bühner, 2010). La sphéricité des données a également été contrôlée et lorsque nécessaire, une correction de Greenhouse-Geisser a été appliquée (Greenhouse & Geisser, 1959) pour ajuster la p-valeur du résultat de l'ANOVA. Dans ces cas, epsilon (ε), qui représente le degré de violation de la règle de sphéricité, est donné pour information (au plus la valeur de ε décroît par rapport à 1, au plus la violation de la règle de sphéricité augmente). Le seuil de significativité de 5% a été choisi pour l'ensemble des analyses statistiques. La taille des effets (η^2) a été rapportée. Enfin, lorsque l'ANOVA a révélé une différence significative entre plusieurs modalités, il a été recherché l'origine de cette différence grâce au test post-hoc du LSD de Fischer.

1.3.1. Fréquence de clignements

L'ANOVA à mesures répétées 3 environnements de conduite x 2 conditions de trafic x 2 conditions de double tâche sur la fréquence des clignements a révélé un effet principal de l'environnement de conduite, $F(2,38) = 6.01$, $p < .05$, $\varepsilon = .69$, $\eta^2 = .24$ (Figure 9). Le test post hoc a mis en évidence une augmentation de la fréquence des clignements sur voie rapide (M = 9,1 clignements par minute ; SD = 8,5) par rapport à l'environnement rural (M = 6,9 clignements par minute ; SD = 8,1) et à l'environnement urbain (M = 7,3 clignements par minute ; SD = 7,1) qui ne se distinguaient pas l'un de l'autre. L'ANOVA n'a pas révélé

d'effet du trafic, $F(1,19) = 0.09$, $p = .77$, ou de la double tâche, $F(1,19) = 0.00$, $p = .97$, sur la fréquence des clignements ni d'interaction significative.

Il est à noter que la fréquence des clignements semble être très hétérogène, compte tenu des écart-types rapportés pour chaque moyenne. Malgré cette très forte variabilité interindividuelle, l'effet de l'environnement de conduite sur la fréquence des clignements a néanmoins été mis en évidence, suggérant un effet robuste de cette variable. Pour illustration de cette variabilité interindividuelle, la Figure 10 représente la fréquence de clignements pour chacun des participants, en fonction de l'environnement de conduite.

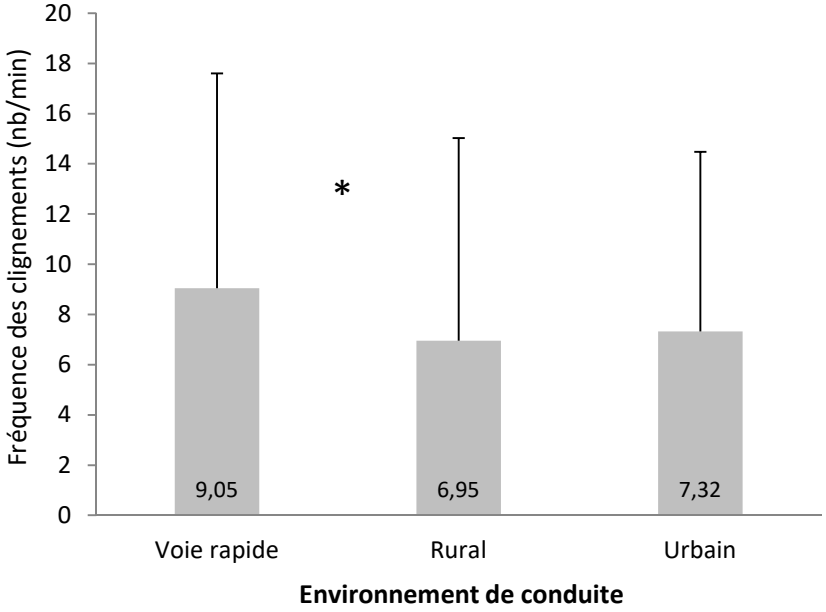


Figure 9 : Effet de l'environnement de conduite sur la fréquence moyenne de clignements (nb/min)

Les barres d'erreur représentent l'écart type (inter-sujet). Un astérix indique la(les) condition(s) qui se distingue(nt) significativement des autres.

Les travaux de Benedetto et al. (2011) ont montré que la charge mentale peut affecter les clignements de manière spécifique en fonction de leur durée. Dans leur étude, la charge mentale engendrée par les caractéristiques de la tâche de conduite entraînait une augmentation du nombre de clignements courts (70 – 100 ms). A l'opposé, les clignements longs (> 170 ms) étaient affectés par le temps passé dans la tâche. Sur la base de ces résultats, dans le cadre de notre étude, il a été réalisé une analyse complémentaire de la fréquence des clignements en

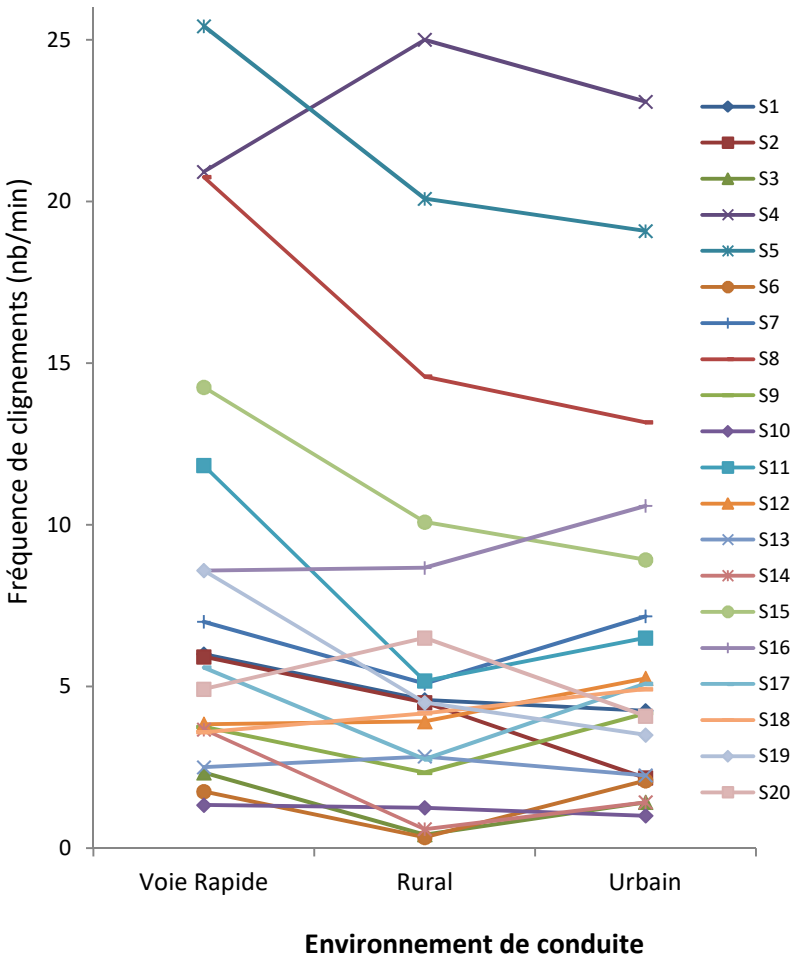


Figure 10 : Fréquence de clignements (nb/min) pour chaque participant, en fonction de l'environnement de conduite

fonction de leur durée. Il a été décidé de séparer les données en 22 classes de de 80 à 500 ms avec un pas de 20 ms avant de réaliser une analyse en k-moyennes, qui permettait de différencier les classes en fonction du nombre de clignements. Cela a permis de dégager deux catégories de clignements. La première catégorie était composée des classes de clignements compris entre 80 et 120 ms (clignements courts) et la seconde catégorie des clignements compris entre 140 et 500 ms (clignements longs). Afin de déterminer si l'effet de l'environnement observé sur l'ensemble des clignements concernait uniquement la catégorie des clignements courts, une ANOVA 3 environnements x 2 catégories de clignement a été réalisée. Les résultats ont révélé, comme attendu, un effet principal de l'environnement ($F(2,38) = 6.01$, $p < .05$, $\varepsilon = .69$, $\eta^2 = .24$) ainsi qu'un effet de la catégorie de clignement

($F(1,19) = 10.7$, $p < .001$, $\eta^2 = .21$). Le nombre de clignements courts était significativement plus élevé (15,79 clignements) que le nombre de clignement longs (7,52 clignements). L'absence d'interaction entre la durée des clignements et l'environnement de conduite indique que ce dernier affecte aussi bien les clignements longs que les clignements courts.

1.3.2. Temps de réaction à la tâche secondaire

Une première analyse a été réalisée afin de comparer, pour confirmation, le temps de réaction à la tâche secondaire entre la condition contrôle (hors conduite) et la conduite. Ce dernier correspondait au temps de réaction moyen calculé sur l'ensemble des sessions de conduite. Cette analyse a mis en évidence une augmentation significative du temps de réaction moyen ($t(19) = -3.22$, $p < .001$) lors de la conduite (M = 408 ms ; SD = 80) par rapport à la condition de base (M = 358 ms ; SD = 55).

Une seconde analyse (ANOVA) a comparé le temps de réaction moyen pendant la conduite en fonction de l'environnement de conduite et du trafic. L'ANOVA a révélé un effet significatif de l'environnement, $F(2,38) = 5.4$, $p < .01$, $\eta^2 = .25$, le temps de réaction étant supérieur lors de la conduite en urbain (M = 428 ms ; SD = 83) comparativement à la voie rapide (M = 399 ms ; SD = 78) et à la route rurale (M = 398 ms ; SD = 79) qui ne se différenciaient pas, ainsi qu'une interaction significative entre l'environnement et le trafic, $F(2,46) = 6.9$, $p < .05$, $\eta^2 = .34$. Le test a posteriori a montré que le temps de réaction dans l'environnement urbain était supérieur en présence de trafic. Cette interaction est illustrée dans la Figure 11.

1.3.3. Taux de réversion du volant

L'ANOVA à mesures répétées 3 environnements de conduite x 2 conditions de trafic x 2 conditions de double tâche sur le taux de réversion du volant a révélé un effet principal de l'environnement, $F(2,38) = 85.53$, $p < .0001$, $\varepsilon = .71$, $\eta^2 = .82$, et un effet du trafic, $F(1,19) = 8.7$, $p < .01$, $\eta^2 = .31$. Les mouvements de correction au volant étaient plus

nombreux dans l'environnement rural (M = 26,6 réversions par minute ; SD = 10) que dans l'environnement urbain (M = 17,2 réversions par minute ; SD = 5,7) et dans l'environnement voie rapide (M = 10,9 réversions par minute ; SD = 4,3), lesquels différaient significativement l'un de l'autre (Figure 12). Il est apparu également que le taux de réversion était plus important dans la condition sans trafic (M = 18,9 réversions par minute ; SD = 10,4) que dans la condition avec trafic (M = 17,6 réversions par minute ; SD = 8,8). Par ailleurs, il n'a pas été relevé d'effet principal de la condition de double tâche ni d'interaction.

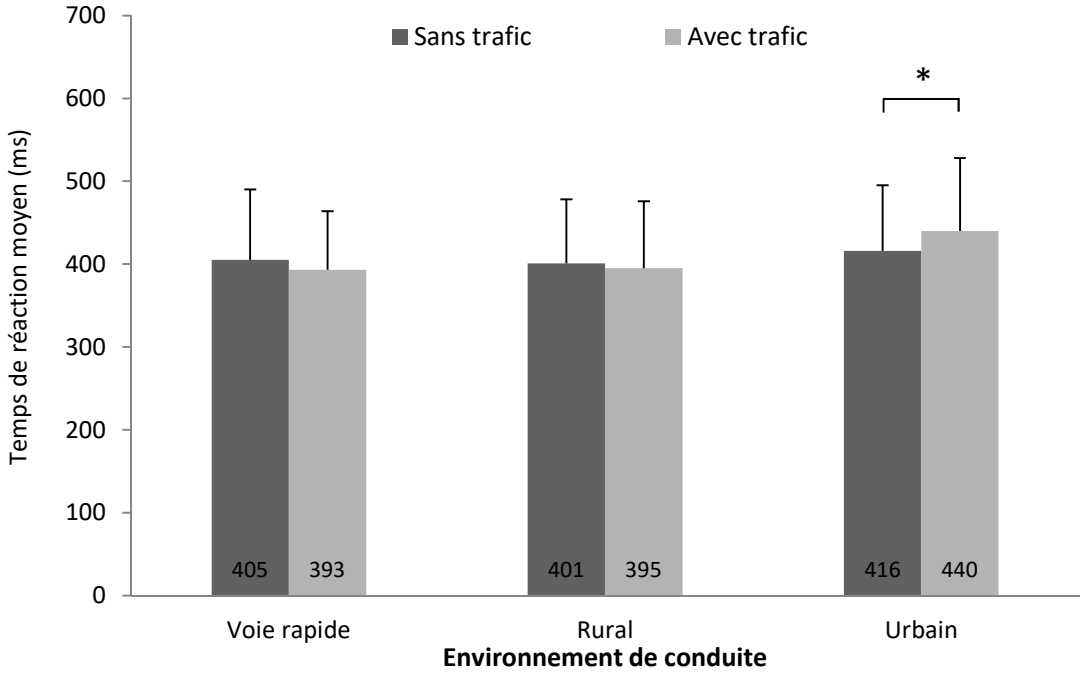


Figure 11 : Interaction entre l'environnement de conduite et le trafic sur le temps de réaction à la tâche secondaire (ms)

Les barres d'erreur représentent l'écart type. Un astérix indique la(les) condition(s) qui se distingue(nt) significativement des autres.

1.3.4. Score au NASA-TLX

L'ANOVA à mesures répétées 3 environnements de conduite x 2 conditions de trafic x 2 conditions de double tâche sur le score au NASA-TLX a révélé un effet principal de l'environnement, $F(2,38) = 9.2$, $p < .001$, $\eta^2 = .33$, ainsi qu'un effet de la condition de double tâche, $F(1,19) = 45,63$, $p < .0001$, $\eta^2 = .71$. Le test post hoc sur l'effet de l'environnement a mis en évidence une augmentation significative du score au NASA-TLX dans

l'environnement urbain (M = 37,2) par rapport aux deux autres environnements (rural, M = 32,9, et voie rapide, M = 29,9) qui ne se distinguaient pas l'un de l'autre (Figure 13). Pour l'effet de la double tâche, le score au NASA-TLX était significativement plus élevé pour les sessions de conduite avec double tâche (M = 37,9) comparé aux sessions de conduite seules (M = 28,7). Enfin, il n'a pas été observé d'impact du trafic sur le score au NASA-TLX.

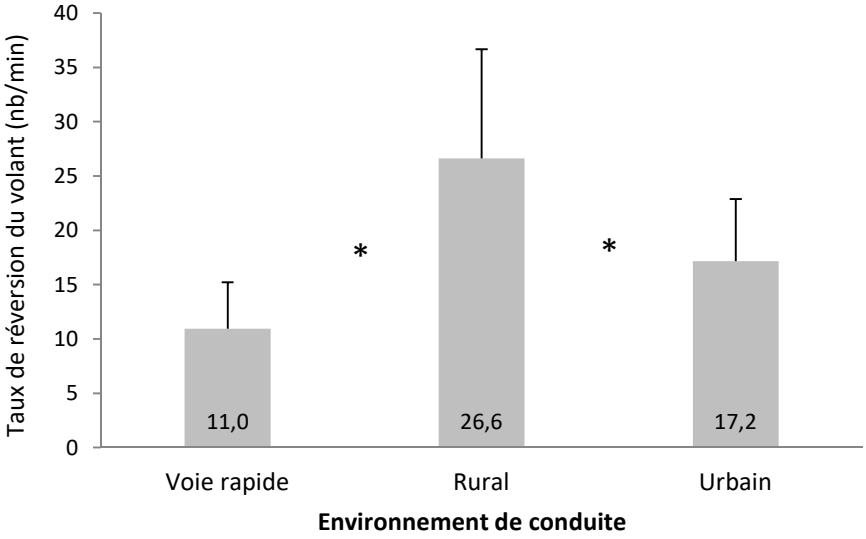


Figure 12 : Effet de l'environnement de conduite sur le taux de réversion du volant (nb/min)

Les barres d'erreur représentent l'écart type. Un astérix indique la(les) condition(s) qui se distingue(nt) significativement des autres.

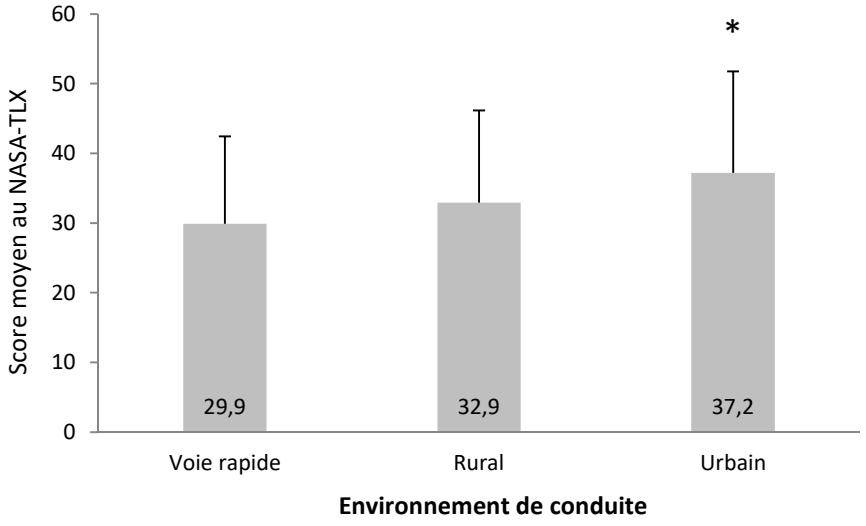


Figure 13 : Effet de l'environnement de conduite sur le score moyen au NASA-TLX

Les barres d'erreur représentent l'écart type. Un astérix indique la(les) condition(s) qui se distingue(nt) significativement des autres.

1.4. Discussion

L'objectif de cette étude était double. Premièrement, il s'agissait de s'intéresser à l'impact de l'environnement de conduite et du trafic sur la charge mentale évaluée par l'intermédiaire de la fréquence des clignements. Dans cette perspective, les clignements étaient comparés à d'autres indicateurs : le score au NASA-TLX (subjectif) et le taux de réversion du volant (comportemental). Deuxièmement, nous voulions vérifier si le mécanisme d'inhibition des clignements, qui pourrait correspondre à une augmentation de la charge mentale pour une tâche primaire plus exigeante (Fogarty & Stern, 1989), était conservé en présence d'une tâche secondaire.

1.4.1. Environnement de conduite

En accord avec plusieurs études (Ariën, Jongen, Brijs, Brijs, Daniels & Wets, 2013 ; Jahn et al., 2005 ; Jamson & Merat, 2005 ; Patten et al., 2006 ; Törnros et Bolling, 2006 ; Verwey, 2000 ; Victor et al., 2005 ; Young et al., 2009), nos résultats ont confirmé que la complexité de l'environnement avait un effet sur différents indicateurs de la charge mentale.

En ce qui concerne les clignements, Bauer et al. (1985) ou Veltman et Gaillard (1996) ont montré que plus un sujet apportait d'attention à la tâche, moins il en effectuait. Sur la base de ces travaux et en accord avec nos hypothèses, la présente expérience a permis de confirmer de manière logique que conduire librement sur une voie rapide était le scénario qui demandait le moins d'attention avec un nombre de clignements plus important. Dans les environnements rural et urbain, il est apparu une diminution de la fréquence des clignements conforme à l'augmentation supposée de la charge mentale. En revanche, contrairement à ce qui avait été montré dans les travaux de Benedetto et al. (2011), l'augmentation de la charge mentale sous l'effet d'une hausse des exigences de la tâche primaire a affecté l'ensemble des clignements et pas uniquement les clignements courts (entre 80 et 120 ms). Ce résultat est cependant à

prendre avec précaution, étant donné la grande variabilité interindividuelle et le faible nombre de clignements longs (entre 140 et 500 ms).

D'autre part, alors qu'aucune différence n'est apparue entre l'environnement urbain et l'environnement rural sur la fréquence des clignements, d'autres indicateurs ont au contraire mis en évidence un niveau de charge différent entre ces deux environnements (pour une synthèse des effets de l'environnement de conduite sur chacun des indicateurs, voir le Tableau 1). Ainsi, le score au NASA-TLX était supérieur pour l'environnement urbain par rapport à l'environnement rural tandis que le taux de réversion du volant était plus élevé dans l'environnement rural que dans l'environnement urbain. Les résultats observés sur les mesures subjectives et comportementales sont donc contradictoires, mais peuvent être expliquées au regard de la littérature. Même si dans de nombreuses études, les mesures subjectives sont présentées comme étant des mesures directes du niveau de charge, avec une bonne validité (e.g., Cain, 2007), Hart et Staveland (1988) ont néanmoins fait remarquer que ces échelles pouvaient être influencées par un biais propre à chaque opérateur reposant sur son vécu de l'activité et ses préconceptions. Dans ces conditions, l'effet observé de l'environnement de conduite peut s'expliquer par les attentes des conducteurs et leurs représentations selon lesquelles conduire en ville est plus exigeant. Les participants estimeraient ainsi être plus en difficulté dans l'environnement urbain que dans l'environnement rural.

Les mouvements de réversion du volant ont quant à eux été identifiés dans plusieurs études comme un indicateur des demandes de la tâche de conduite en termes de contrôle de trajectoire (e.g., Marrkula & Engström, 2006). La complexité des virages était importante en rural comme en urbain, mais leur fréquence était moins élevée dans ce dernier environnement. Cependant, la vitesse de conduite est beaucoup plus élevée en milieu rural. Cela rend plus

difficile le contrôle de trajectoire et peut donc expliquer le nombre plus important de réversions du volant.

Au vu de ces résultats, il semble qu'il y ait, dans l'environnement urbain et dans l'environnement rural, deux sources distinctes de charge mentale. La première serait liée à la représentation de la difficulté de la tâche de conduite et affecte le score au NASA-TLX. La seconde serait liée aux exigences du contrôle de trajectoire et affecte le taux de réversion du volant. Il est intéressant de remarquer que ces deux sources de charge semblent affecter indifféremment la fréquence des clignements.

Au-delà de ces considérations portant sur les limites de ces indicateurs pour mesurer la charge mentale, il est intéressant de noter que seuls deux indicateurs ont montré la même sensibilité à la manipulation de l'environnement de conduite (Tableau 1). En effet, les analyses ont mis en évidence des différences significatives entre l'environnement urbain et les deux autres environnements sur le temps de réaction à la tâche secondaire et le score au NASA-TLX, contrairement à la fréquence des clignements et mouvements de réversion du volant. Dans ces deux cas, le niveau de charge mentale a augmenté en urbain conformément aux hypothèses (mais aucune différence entre rural et voie rapide). Cela tend à confirmer l'idée que le nombre de réversion du volant serait très lié aux exigences du contrôle de trajectoire. D'autre part, le pattern de résultats obtenu pour la fréquence de clignements en fait une mesure intéressante, mais elle semble limitée par une forte variabilité interindividuelle.

1.4.2. Trafic

Les résultats concernant l'effet du trafic ont montré que seul le taux de réversion du volant a été influencé par ce facteur. Le taux de réversion était en effet supérieur en l'absence de trafic. Ce résultat peut sembler surprenant dans la mesure où l'augmentation de la charge mentale liée aux demandes de contrôle de trajectoire, que devrait induire la présence du trafic, est associée dans la littérature à une augmentation du taux de réversion du volant (e.g. Jamson

Tableau 1 : Synthèse des effets principaux et des interactions selon les indicateurs de la charge mentale (Expérience 1)

	Fréquence de clignements	TR à la tâche secondaire	Taux de réversion	NASA-TLX
Environnement de conduite	☑ Urbain-Rural > Voie rapide	☑ Urbain > Rural-Voie rapide	☑ Rural > Urbain > Voie rapide	☑ Urbain > Rural-Voie rapide
Trafic	n.s.	n.s.	☑ Sans trafic > Avec trafic	n.s.
Double tâche	n.s.	-	n.s.	☑ Double tâche > Conduite seule
Environnement x Trafic	n.s.	☑ Urbain avec trafic > Urbain sans trafic	n.s.	n.s.
Environnement x Double tâche	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
Trafic x Double tâche	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
Environnement x Trafic x Double tâche	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.

Note : Le sens des effets pour la variable fréquence de clignements est exprimé en termes de charge. En urbain et rural, la charge est supérieure comparativement à la voie rapide.

& Merat, 2005). Cependant, l'absence d'effet du trafic sur la fréquence des clignements, la performance à la tâche secondaire et le score au NASA-TLX suggère d'une part que cette variable n'a pas d'incidence forte sur le niveau de charge mentale lié à la tâche de conduite. D'autre part, ce résultat pourrait trouver son origine dans les effets que le trafic venant en sens inverse a sur les stratégies de positionnement latéral. En effet, les études de Dijksterhuis et al. (2011) et Mecheri et al. (2017) ont montré que la présence de trafic dans le sens de circulation opposé entraine des positions latérales plus excentrée en direction du marquage de rive. Ce repositionnement s'accompagne de plus d'une diminution de la variabilité de la position latérale. Cette diminution a été interprétée comme un effort supplémentaire investi dans le contrôle de la trajectoire pour limiter le risque de sortie de voie (du fait de la proximité avec le marquage de rive). Dans notre étude, il n'est pas exclu qu'un phénomène similaire se produise, les conducteurs ayant par conséquent moins oscillé dans leur voie en présence de trafic.

1.4.3. Double tâche

Les résultats ont montré que les conditions de double tâche entraînaient une augmentation du score au NASA-TLX. Cela confirme de nombreux travaux dont ceux de Williges et Wirewille (1979) et Cain (2007) qui ont montré que la réalisation de deux tâches simultanées, même si elles n'interfèrent pas l'une avec l'autre, avaient un effet significatif sur l'évaluation subjective de la difficulté de la tâche. Cependant, l'absence d'effet de la tâche secondaire sur le taux de réversion du volant et la fréquence des clignements suggère à nouveau l'existence de biais possible dans l'évaluation subjective (Hart & Staveland, 1988). Il est néanmoins possible que le caractère discret et court de la double tâche n'affecte pas réellement les ressources attentionnelles des conducteurs, les conducteurs étant en mesure de réaliser la tâche secondaire sans altérer la réalisation de la tâche primaire. Cela pourrait expliquer l'absence d'effet de la double tâche sur les clignements. Afin de pousser plus loin

nos connaissances quant à l'effet d'une tâche secondaire sur les clignements, une seconde expérience a été réalisée au cours de laquelle une tâche secondaire cognitive plus sollicitante a été introduite.

2. Expérimentation 2 : Effet de l'environnement de conduite et de la complexité de la double tâche sur la charge mentale en conduite simulée[1]

2.1. Introduction

L'expérience précédente a mis en évidence que les clignements, utilisés comme un marqueur de la charge, sont sensibles à la complexité de l'environnement routier, la charge étant supérieure dans les environnements urbain et rural. Les résultats ont de plus montré que l'introduction d'une tâche secondaire de temps de réaction simple n'avait pas l'effet attendu sur les différents marqueurs de la charge puisque seule une augmentation du score au NASA-TLX a été observée. Il a pourtant été montré que si la fréquence des clignements diminue lorsque la difficulté de la tâche primaire augmente (Holland & Tarlow, 1972 ; Van Orden et al., 2001), elle augmente lorsqu'une tâche cognitive supplémentaire est ajoutée (Benedetto et al., 2011, 2014 ; Recarte et al., 2008 ; Savage et al., 2013). L'absence d'effet de la double tâche dans l'expérience précédente pourrait donc s'expliquer par l'utilisation d'une tâche secondaire de temps de réaction, peu sollicitante et discrète, n'affectant pas suffisamment les ressources attentionnelles. Sur cette base, la seconde expérience avait pour but de mesurer les effets conjoints de différentes sources de la charge sur les clignements, en manipulant la complexité de l'environnement de conduite ainsi que la difficulté de la tâche secondaire. A partir de l'hypothèse selon laquelle l'effet d'une tâche secondaire sur la fréquence des clignements dépend de sa difficulté (en termes de processus cognitif), nous avons comparé une tâche secondaire simple et discrète (TR au son) à une tâche secondaire plus complexe et nécessitant un traitement plus continu (tâche audio-vocale de calcul mental).

[1] Etude publiée : Faure, V., Lobjois, R., & Benguigui, N. (2016). The effects of driving environment complexity and dual tasking on drivers' mental workload and eye blink behavior. *Transportation Research Part F : Traffic Psychology and Behavior, 40,* 78-90.

2.2. Matériel et Méthode

2.2.1. Participants

Vingt-quatre participants (20 hommes et 4 femmes) âgés de 20 à 57 ans (M = 33,5 ans ; SD = 10) ont pris part à cette expérience. Chacun d'entre eux avait une vue normale ou corrigée et n'était pas informé des objectifs de l'étude. Tous étaient titulaires du permis de conduire, avec une ancienneté minimum de 2 ans. En moyenne, ils détenaient leur permis depuis 14 ans (SD = 9,5), ont roulé 92 000 km depuis son obtention (SD = 127 000) et 9 500 km (SD = 5 300) l'année précédant le déroulement de l'étude. Enfin, ils ont accepté les modalités de participation à l'étude et les données qui allaient être enregistrées en signant un document de consentement libre et éclairé. Aucun n'avait participé à la première expérience.

2.2.2. Dispositifs expérimentaux

Le dispositif expérimental présenté dans l'expérience 1 a été réutilisé (simulateur de conduite « bas coût » et oculomètre Pertech). La seule différence résidait dans le fait que l'image, mesurant toujours 1.80 m x 1.30 m (résolution = 1280 x 900 pixels, fréquence de rafraîchissement = 30Hz), était projetée sur un mur blanc (Figure 14).

Figure 14 : Illustration du dispositif expérimental (Expérience 2).

2.2.3. Plan expérimental et tâches

Au cours de cette expérience, l'environnement de conduite (voie rapide ; rural ; environnement urbain) et les conditions de double-tâche (sans tâche secondaire ; tâche

secondaire de temps de réaction ; tâche secondaire de calcul mental) ont été manipulées, donnant lieu à un plan 3 x 3, soit un total de 9 conditions expérimentales.

Les trois environnements de conduite ainsi que la tâche de temps de réaction au son utilisés dans l'expérience précédente ont été conservés. La tâche de calcul mental consistait en une série d'additions de deux nombres que les participants devaient effectuer le plus rapidement possible en répondant à haute voix. Les opérations étaient préenregistrées sur une bande son et intégrées au retour sonore de la simulation (régime moteur). L'intervalle de temps entre la fin de la présentation d'une addition et la suivante était de 6 secondes. Malgré ce temps constant, l'intervalle entre la fin de réponse des participants et le début du calcul suivant était variable du fait de durées d'énonciation du calcul différentes (9+2 était énoncé plus rapidement que 37+9) ainsi que de la variabilité du temps de réponse des participants et de la durée de cette réponse.

2.2.4. Procédure

Une procédure similaire à celle que nous avons mise en place pour l'expérience précédente a été appliquée. Les participants ont pris connaissance du déroulement de l'étude, remplis une feuille de renseignements et signé un formulaire de consentement. Il s'ensuivait une phase de familiarisation à la conduite (de même nature que celle décrite dans l'expérience n°1), ainsi qu'aux tâches audio-vocales de temps de réaction et de calcul mental. Enfin, l'expérimentateur procédait à l'installation et à la calibration de l'oculomètre. Après cette phase de préparation, les participants effectuaient les neuf sessions de conduite de trois minutes qui correspondaient aux neuf conditions expérimentales. Comme précédemment, elles étaient présentées dans un ordre aléatoire. Les deux tâches secondaires (calcul mental et temps de réaction aux sons) ont également été réalisées seules afin d'obtenir des temps de référence (condition contrôle). Elles étaient présentées, pour la moitié des participants, avant les sessions de conduite et pour l'autre moitié après les sessions de conduite. Leur ordre de

présentation était contrebalancé. En double tâche, il était indiqué aux participants qu'ils devaient faire du mieux possible, sans qu'il soit précisé qu'une tâche était prioritaire (voir Benedetto et al., 2011, 2014, et Tsai et al., 2007, pour des procédures analogues). Une pause était réalisée entre chacune des sessions, au cours de laquelle les participants complétaient le NASA-TLX. L'expérimentation durait environ 1h30.

2.2.5. Analyse des données

Comme dans l'expérience précédente, le nombre de clignements d'une durée comprise entre 80 et 500 ms a été extrait dans un premier temps afin de déterminer la fréquence de clignements dans chacune des sessions de conduite. Dans un second temps, le nombre de clignements en fonction de leur durée (par pas de 20 ms) a également été déterminé, afin d'étudier les effets de la charge mentale sur les différentes catégories de clignements qui auront été mise en évidence à la suite d'une analyse en k-moyenne. Pour rappel, celle-ci permet de distinguer les classes de 20 ms où les clignements sont les plus nombreux et les classes de 20 ms où les clignements sont les moins nombreux. Concernant la conduite, le taux de réversion du volant a été calculé, rendant compte de la difficulté de la tâche et de la charge mentale (Jamson & Merat, 2005). Pour évaluer les performances aux tâches secondaires, le temps de réaction au son et le temps de réponse à la tâche de calcul mental (en ms) ont été mesurés. Le temps de réaction au son était calculé de la même façon que dans l'expérience 1. Pour la tâche de calcul, le temps de réponse correspondait au temps écoulé entre la fin de l'énoncé des deux nombres à additionner et le début de la réponse (du fait de durées d'énonciation du calcul différentes). Enfin, le score global au NASA-TLX, correspondant à la somme des notes dans chaque dimension, a été calculé. L'ensemble de ces données a fait l'objet d'analyses statistiques telles que réalisées dans la première expérience.

2.3. Résultats

2.3.1. Fréquence de clignements

L'ANOVA à mesures répétées 3 environnements de conduite (voie rapide, route rurale et environnement urbain) x 3 conditions de double tâche (tâche de conduite seule, tâche de conduite et temps de réaction au son, tâche de conduite et de calcul mental) sur la fréquence des clignements a révélé un effet principal de l'environnement, $F(2,46) = 8.77$, $p < .01$, $\varepsilon = .69$, $\eta^2 = .27$, et de la double-tâche, $F(2,46) = 9.18$, $p < .01$, $\varepsilon = .81$ $\eta^2 = .28$. Le test post hoc sur l'effet principal de l'environnement (Figure 15) a mis en évidence une diminution de la fréquence des clignements dans l'environnement rural (M = 8,6 clignements par minute ; SD = 10,2) par rapport à l'environnement urbain (M = 10,2 clignements par minute ; SD = 10) qui se distinguait lui-même significativement de l'environnement voie rapide (M = 11,8 clignements par minute ; SD = 11).

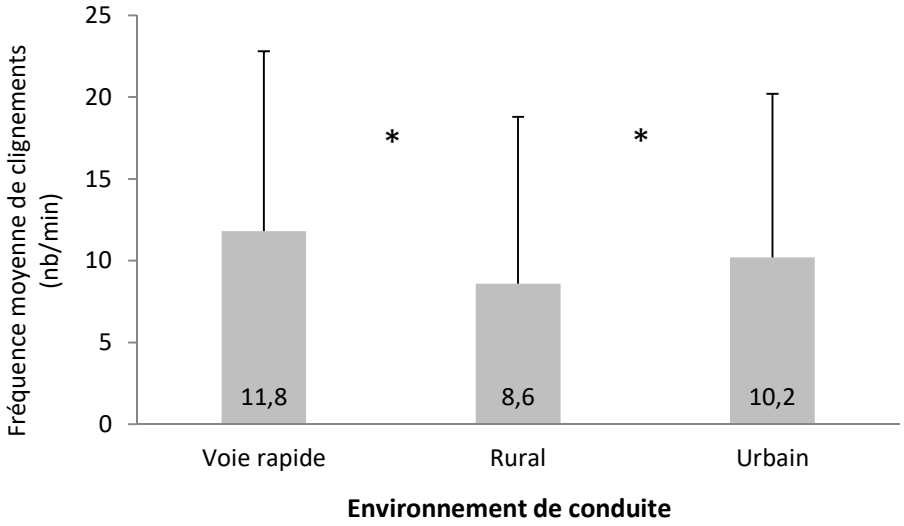


Figure 15 : Effet de l'environnement de conduite sur la fréquence moyenne de clignements (nb/min)

Les barres d'erreur représentent l'écart type. Un astérix indique la(les) condition(s) qui se distingue(nt) significativement des autres.

Concernant l'effet de la double tâche (Figure 16), le test post hoc a révélé davantage de clignements dans la condition de conduite avec la tâche de calcul mental (M = 13,3 clignements par minute ; SD = 11,6) que dans les deux autres conditions qui ne se

différenciaient pas significativement (8,6 clignements par minute en condition de conduite seule et 8,7 clignements par minute en condition de conduite avec tâche de temps de réaction au son ; SD = 9,6 et 10,1 pour ces deux conditions, respectivement). A noter que l'interaction entre les deux facteurs environnement et condition de double tâche n'est pas significative.

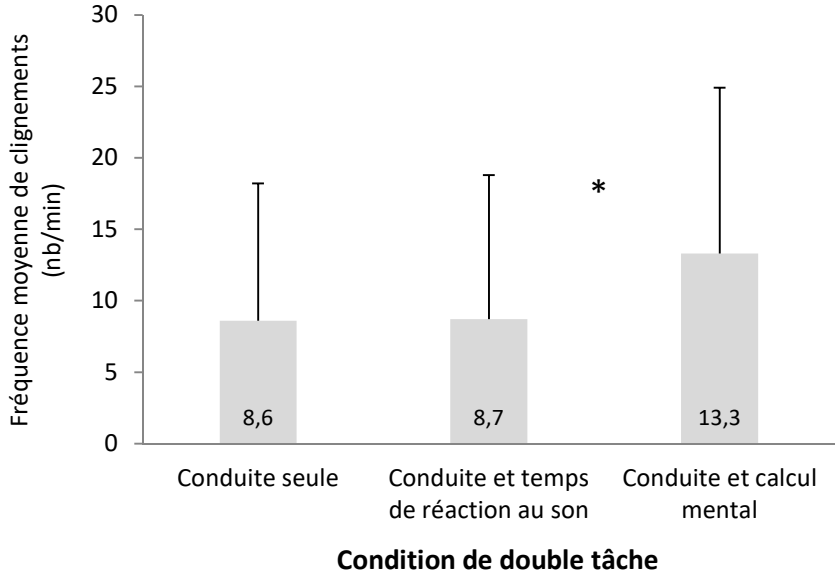


Figure 16 : Effet de la double tâche sur la fréquence moyenne de clignements (nb/min)

Les barres d'erreur représentent l'écart type. Un astérix indique la(les) condition(s) qui se distingue(nt) significativement des autres.

Afin d'affiner ces résultats et explorer si les effets de la charge ont porté sur une catégorie particulière de clignements, ces derniers ont été triés, pour chaque participant, selon leur durée, par classe de 20 ms, allant de 80 à 500 ms et donnant lieu, comme précédemment, à un total de 22 durées de clignement différentes. Il a ensuite été appliqué une classification en k-moyenne pour différencier les classes en fonction du nombre de clignements. La classification a permis de dégager deux catégories de clignements. La première catégorie, dite clignements courts, était composée des classes de clignements de 80, 100 et 120 ms et regroupait toutes les conditions expérimentales. La seconde catégorie, dite clignements longs, se composait de toutes les classes de clignements entre 140 et 500 ms. Ce résultat est identique à celui que nous avions obtenu pour la première expérience.

Pour étudier si les différentes variables manipulées ont eu un effet spécifique sur l'une de ces deux catégories, une ANOVA 3 environnements de conduite x 3 conditions de double tâche x 2 catégories de clignements (courts vs longs), avec des mesures répétées sur les trois facteurs, a été réalisée sur le nombre de clignements. Cette analyse a révélé, comme attendu, un effet de l'environnement, $F(2,46) = 8.77$, $p < .01$, $\varepsilon = .69$, $\eta^2 = .27$, et un effet de la double tâche, $F(2,46) = 9.18$, $p < .01$, $\varepsilon = .81$, $\eta^2 = .28$, sur le nombre de clignements (réplication des effets de ces facteurs sur la fréquence). Elle a également mis en évidence un effet de la catégorie de clignements, $F(1,23) = 6.6$, $p < 0.05$, $\eta^2 = 0.22$, le nombre moyen de clignements courts (M = 20,9 clignements) étant plus élevé que le nombre de clignements longs (M = 9,8 clignements). L'ANOVA n'a cependant pas révélé d'effet d'interaction impliquant la catégorie de clignement. Cela indique que l'environnement de conduite (comme dans l'expérience 1), mais également la nature de la tâche affecte aussi bien la fréquence des clignements courts que des clignements longs.

Les résultats sur la fréquence des clignements ont une nouvelle fois mis en évidence une variabilité interindividuelle importante. Les données individuelles sont fournies en Figure 17 pour illustration, en fonction de l'environnement de conduite et de la double tâche. Afin d'explorer l'origine de cette variabilité, nous avons réalisé des analyses de corrélation entre les clignements (fréquence moyenne pour chaque sujet, dans les trois conditions de tâche simple) d'une part, et l'âge et l'expérience de conduite d'autre part. Pour l'expérience de conduite, nous avons préféré le nombre total de kilomètres parcourus depuis l'obtention du permis de conduire au nombre d'années de permis, car plus révélateur de l'expérience de conduite. Avec l'expérience, la charge mentale pour une situation donnée baisse (e.g., Lehtonen et al., 2014), une telle diminution s'accompagnant d'une augmentation de la fréquence de clignements (en condition de tâche simple). Si l'expérience de conduite est un facteur explicatif de la fréquence des clignements, cette dernière devrait être corrélée

positivement avec l'expérience. L'âge étant un facteur corrélé avec l'expérience, une relation similaire expliquerait la variabilité interindividuelle importante de la fréquence des clignements.

Les résultats de ces analyses n'ont pas révélé de corrélation significative entre les clignements d'une part, et l'âge ($F(1,22) = 2.13$, $p = .16$, $r^2 = .09$) ou l'expérience de conduite ($F(1,22) = 0.08$, $p = .77$, $r^2 = .01$) d'autre part.

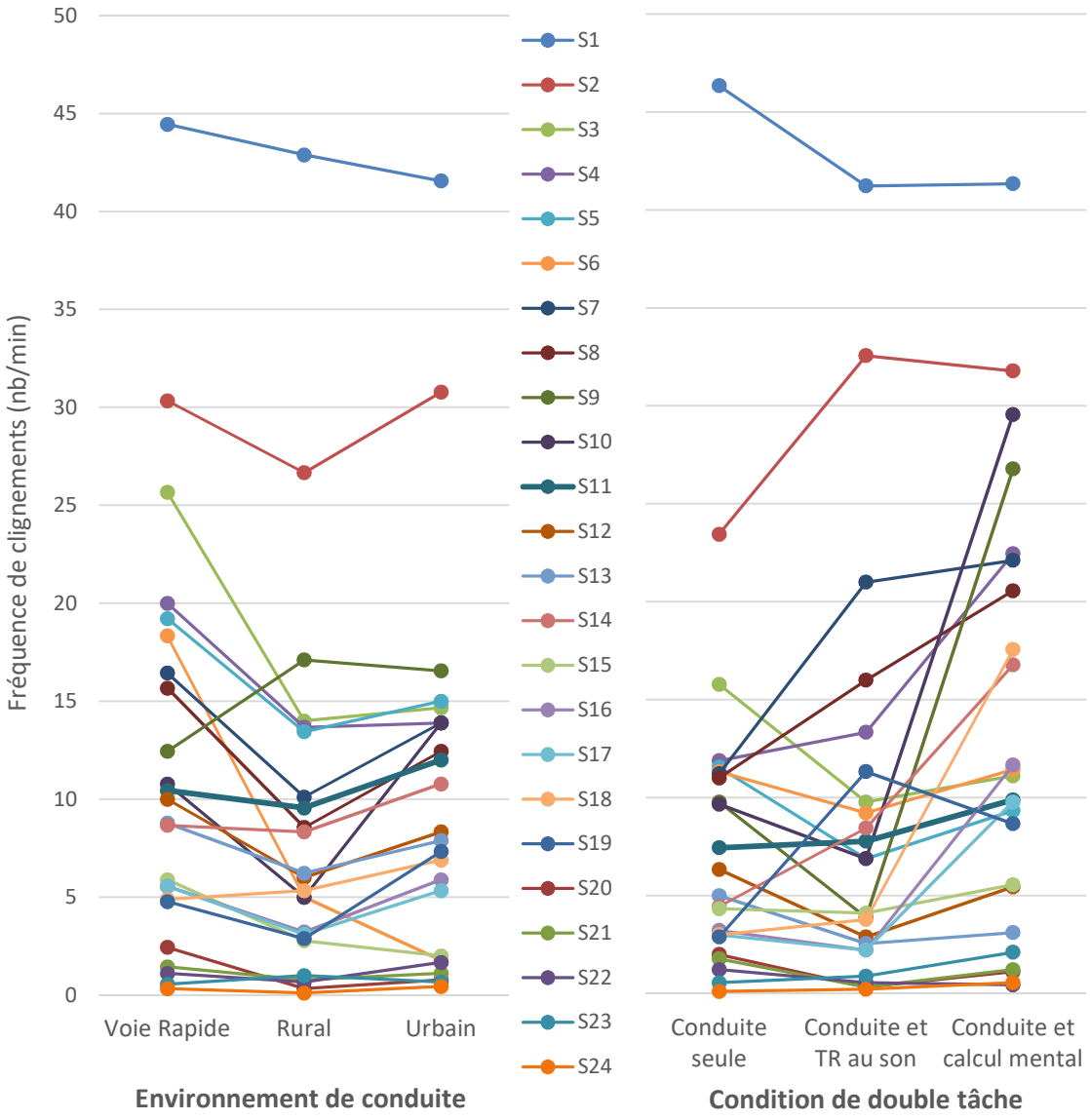


Figure 17 : Fréquence de clignements (nb/min) pour chaque participant, en fonction de l'environnement de conduite (panel de gauche) et de la condition de double tâche (panel de droite)

2.3.2. Performance aux tâches secondaires

Pour la tâche de temps de réaction au son, une première analyse a été réalisée afin de comparer, pour confirmation, le temps de réaction à la tâche secondaire entre la condition contrôle (hors conduite) et la conduite. Ce dernier correspondait au temps de réaction moyen calculé sur l'ensemble des sessions de conduite. Cette analyse a mis en évidence une augmentation significative du temps de réaction moyen ($t(24) = -5.25$, $p < .001$) lors de la conduite (M = 418 ms ; SD = 33) par rapport à la condition contrôle (M = 365 ms ; SD = 83).

Une seconde analyse (ANOVA) a comparé le temps de réaction moyen pendant la conduite en fonction de l'environnement de conduite. L'ANOVA a révélé un effet significatif de l'environnement, $F(2,46) = 10.9$, $p < .01$, $\eta^2 = .32$, le temps de réaction étant supérieur lors de la conduite en urbain (M = 449 ms ; SD = 112) comparativement à la voie rapide (M = 406 ms ; SD = 94) et à la route rurale (M = 399 ms ; SD = 90) qui ne se différenciaient pas. Ce résultat est illustré dans la Figure 18.

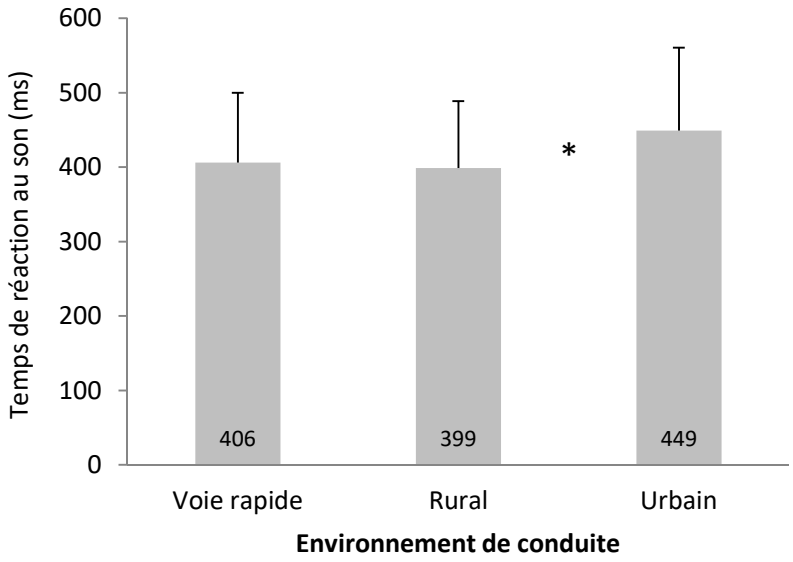


Figure 18 : Temps de réaction au son en fonction de l'environnement de conduite

Les barres d'erreur représentent l'écart type. Un astérix indique la(les) condition(s) qui se distingue(nt) significativement des autres.

Pour le temps de réponse au calcul mental, la comparaison entre la condition contrôle (M = 722 ms ; SD = 282) et la valeur moyenne de toutes les conditions de conduite

(M = 811 ms ; SD = 336) s'est révélée significative ($t(24) = -2.38$, $p < .05$). Une seconde analyse (ANOVA), qui a comparé le temps de réponse moyen pendant la conduite en fonction de l'environnement de conduite, n'a pas révélé d'effet significatif ($F(2,46) = 2.28$, $p = .11$). Les temps de réponse dans l'environnement voie rapide, rural et urbain étaient respectivement de 766 (SD = 296), 811 (SD = 356) et 856 ms (SD = 357). Les pourcentages de réponses incorrectes dans la tâche étaient respectivement de 5,6 %, 5,3 %, 7,6 % et 5 % pour la condition contrôle et les trois environnements de conduite. Ces scores n'étaient pas significativement différents.

2.3.3. Taux de réversion du volant

L'ANOVA, à mesures répétées, 3 environnements de conduite x 3 conditions de double tâche réalisée sur le taux de réversion du volant a révélé un effet principal de l'environnement, $F(2,46) = 84.72$, $p < .0001$, $\varepsilon = .76$, $\eta^2 = .79$, un effet de la condition de double tâche, $F(2,46) = 6.95$, $p < .01$, $\varepsilon = .79$, $\eta^2 = .23$, ainsi qu'une interaction entre ces deux facteurs, $F(4,92) = 3.35$, $p < .05$, $\varepsilon = .68$, $\eta^2 = .13$. Les mouvements de réversion de la direction étaient plus nombreux dans l'environnement rural (M = 25,9 réversions par minute) que dans l'environnement urbain (M = 16,5 réversions par minute) et dans l'environnement voie rapide (M = 9,8 réversions par minute), lesquels différaient significativement l'un de l'autre. Le contrôle de la direction nécessitait plus de mouvements de réversion dans la condition de conduite avec calcul mental (M = 19,1 réversions par minute) que dans la condition de conduite seule (M = 15,8 réversions par minute) et la condition avec temps de réaction au son (M = 17,4 réversions par minute), ces deux conditions ne se différenciant pas l'une de l'autre. L'interaction entre l'environnement de conduite et la condition de double tâche (Figure 19) a montré que, dans l'environnement rural, le taux de réversion de la direction était significativement différent entre les trois conditions de double tâche, ce taux augmentant entre la condition avec temps de réaction et la condition avec calcul mental. Dans

les environnements voie rapide et urbain, seule la différence entre la conduite seule et la conduite avec calcul mental était significative.

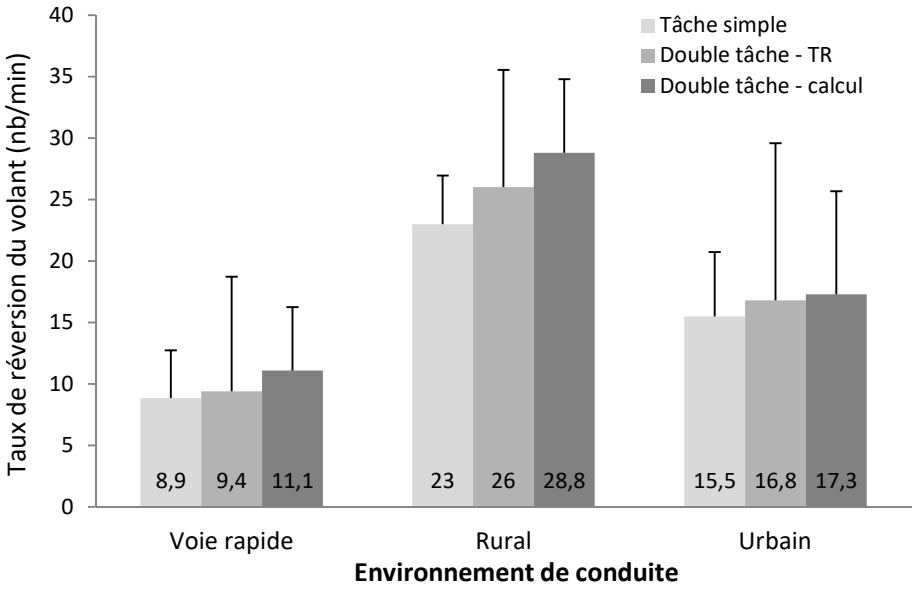


Figure 19 : Interaction entre l'environnement de conduite et la condition de double tâche sur le taux de réversion du volant (nb/min)

Les barres d'erreur représentent l'écart type.

2.3.4. Score au NASA-TLX

L'ANOVA à mesures répétées 3 environnements de conduite x 3 conditions de double-tâche sur le score au NASA-TLX a révélé un effet principal de l'environnement, $F(2,46) = 10.68$, $p < .001$, $\eta^2 = .32$, ainsi qu'un effet des conditions de double tâche, $F(2,46) = 26.13$, $p < .0001$, $\eta^2 = .53$. Le test post hoc a mis en évidence une augmentation significative du score au NASA-TLX dans l'environnement urbain par rapport aux autres environnements, qui ne se distinguaient pas l'un de l'autre (Figure 20). Pour l'effet des conditions de double tâche, le score au NASA-TLX était significativement différent entre les trois conditions (Figure 20). L'interaction entre l'environnement et la condition de double tâche n'était pas significative.

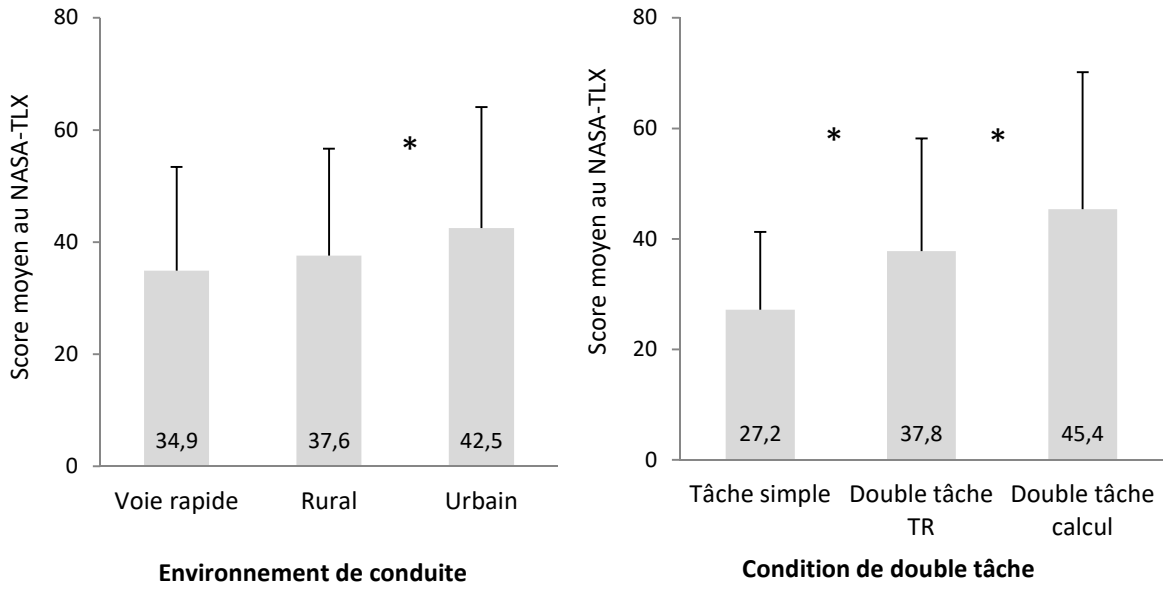


Figure 20 : Effet de l'environnement de conduite (panel de gauche) et de la condition de double tâche (panel de droite) sur le score moyen au NASA-TLX

Les barres d'erreur représentent l'écart type. Un astérix indique la(les) condition(s) qui se distingue(nt) significativement des autres.

2.4. Discussion

L'objectif de cette étude était de faire varier à la fois les demandes de la tâche primaire (en manipulant l'environnement de conduite) et les demandes de la tâche secondaire, pour évaluer leurs effets combinés sur la fréquence des clignements. L'utilisation supplémentaire d'indicateurs comportementaux et subjectifs pour mesurer la charge mentale devait permettre d'évaluer l'intérêt des clignements comme une mesure susceptible d'identifier si les conducteurs restaient sensibles à la charge liée à l'environnement de conduite lorsque la charge cognitive augmentait. Comme attendu, nos résultats confirment que le niveau de charge mentale augmente avec la complexité de l'environnement de conduite d'une part, et avec l'introduction d'une tâche secondaire complexe d'autre part. Néanmoins, la fréquence des clignements semble indiquer que les conducteurs ne restent pas tout à fait sensibles à leur environnement en condition dégradée par l'introduction du calcul mental. Pour ce qui concerne la comparaison entre différentes mesures de la charge, il est apparu que la fréquence des clignements et le taux de réversion du volant évoluaient dans le même sens en fonction du

niveau de charge mentale. Cela distingue ces deux mesures des performances aux tâches secondaires et du score au NASA-TLX, qui conduisent toutes deux à des résultats différents. Chacun de ces points est discuté dans les sections suivantes.

2.4.1. Environnement de conduite

En accord avec plusieurs études (Ariën et al., 2013 ; Jahn et al., 2005 ; Jamson & Merat, 2005 ; Patten et al., 2006 ; Törnros et Bolling, 2006 ; Verwey & Zaidel, 2000 ; Victor et al., 2005 ; Young et al., 2009), les résultats confirment que la complexité de l'environnement a un impact sur le niveau de charge mentale requis par la tâche de conduite.

Comme précédemment, les résultats ont confirmé que conduire librement sur une voie rapide était le scénario le moins sollicitant au plan attentionnel. Ce résultat est cohérent avec les études de Patten et al. (2006), Victor et al. (2005) ou encore Young et al. (2009). D'autre part, les résultats sur la fréquence de clignements et le taux de réversion du volant indiquent que l'environnement rural génère davantage de charge mentale que l'environnement urbain. Ce résultat est en contradiction avec nos hypothèses. Pourtant, les résultats sur le temps de réaction au son et le ressenti des participants ont montré que le niveau de charge dans l'environnement urbain était significativement plus élevé qu'en rural, ce dernier environnement ne se distinguant pas de l'environnement voie rapide. Le temps de réaction à la tâche de calcul ne se distinguait pas significativement selon l'environnement de conduite. Cette absence d'effet au plan statistique, au demeurant étonnante, pourrait provenir de la variabilité importante observée sur ce temps de réaction. Le Tableau 2 présente une synthèse des effets de chacune des variables manipulées sur les différents indicateurs.

Des conclusions divergentes sur le niveau de charge mentale en rural et en urbain sont déjà apparues dans la littérature. Törnros et Bolling (2006) ont montré que les performances à une tâche secondaire subsidiaire étaient moins bonnes dans un environnement urbain que dans un environnement rural, signifiant que la charge mentale était plus élevée en urbain. C'est ce

que nous avons observé dans notre étude. Au contraire, Young et al. (2009) ont montré que les mouvements de correction au volant étaient plus nombreux dans un environnement rural, qui provoquaient par ailleurs un phénomène de « vision en tunnel » observé dans d'autres études (Tsai et al., 2007; Victor et al., 2005), et qui traduit une augmentation de la charge mentale. Ce résultat est cohérent avec celui que nous avons observé dans les deux expériences sur le taux de réversion du volant, résultat qui converge avec la fréquence de clignements. Pour rappel, nous avions suggéré précédemment que les demandes en termes de contrôle de trajectoire étaient plus fortes dans l'environnement rural, principalement à cause de la vitesse élevée des automobilistes (90 km/h).

Selon la littérature, les interactions avec du trafic ou des piétons (Brookhuis et al., 1991 ; Hao, Wang, Yang, Wang, Guo & Zhang, 2007 ; Teh et al., 2014), la géométrie de la route ou encore la richesse visuelle de l'environnement (Patten et al., 2006) seraient autant de sources de variation de la charge mentale en conduite. Dans cette étude, les participants n'avaient à interagir avec aucun autre usager. La géométrie de la route et ses influences sur le contrôle du véhicule étaient différentes entre la voie rapide et les deux autres environnements, la répétition de virages étant néanmoins plus importante dans l'environnement rural qu'en urbain. Enfin, la richesse visuelle se distinguait particulièrement dans l'environnement urbain. Sur la base des résultats obtenus et des convergences et divergences entre mesures de la charge, nous posons l'hypothèse que certaines de ces mesures seraient plus sensibles à certaines sources. Ainsi, la fréquence des clignements ainsi que le taux de réversion du volant seraient sensibles aux exigences au plan opérationnel de la tâche de conduite tandis que le temps de réaction au son et le ressenti subjectif seraient sensibles à la richesse de l'environnement. Cette hypothèse trouve un écho dans les travaux de Mestre, Deniaud et Honnet (2017) qui ont fait varier la richesse visuelle de la scène, à circuit et événements de conduite constants, en manipulant la quantité d'objets présents ainsi que leur texture. Ils ont

Tableau 2 : Synthèse des effets principaux et des interactions selon les indicateurs de la charge mentale (Expérience 2).

	Fréquence de clignements	TR à la tâche secondaire	Taux de réversion	NASA-TLX
Environnement de conduite	☑ Rural > Urbain > Voie rapide	☑ TR au son Urbain > Rural-Voie rapide (TR Calcul : n.s.)	☑ Rural > Urbain > Voie rapide	☑ Urbain > Rural-Voie rapide
Double tâche	☑ Calcul > TR son – Conduite seule	-	☑ Calcul > TR son – Conduite seule	☑ Calcul > TR son > Conduite seule
Environnement x Double tâche	n.s.	-	☑ Rural Calcul > Rural TR son > Rural Conduite seule	n.s.

Note : Le sens des effets pour la variable fréquence de clignements est exprimé en termes de charge. En rural, la charge est supérieure comparativement à l'environnement urbain et à la voie rapide.

montré que la variabilité de la position latérale était inférieure dans l'environnement le plus pauvre. Ils ont proposé que cet effet provienne de l'absence de distracteurs dans la scène, les conducteurs pouvant se focaliser sur le guidage du véhicule. Dans notre étude, les environnements voie rapide et route rurale se caractérisaient également par l'absence de distracteurs. Les conducteurs ont donc pu se concentrer sur le contrôle du véhicule. En urbain, au contraire, la présence d'éléments dans la scène peut avoir imposé aux conducteurs un partage de l'attention entre le contrôle du véhicule et la prise en compte de ces éléments. Cela affecterait le temps de réaction au son, qui viendrait se surajouter à ce premier partage, et la perception de la situation au plan subjectif. Cette hypothèse, qui reste à confirmer en manipulant la géométrie de la route et la richesse visuelle de façon plus contrôlée (mais qui imposerait de s'éloigner de la réalité du réseau routier tel que les conducteurs l'expérimentent en situation réelle), argumente en faveur de l'utilisation d'une approche multi-mesures de la charge mentale pour mieux en rendre compte.

2.4.2. Double tâche

Les résultats montrent que la fréquence des clignements était plus élevée dans la condition double tâche « conduite et calcul mental », alors que les deux autres conditions (« conduite seule » et double tâche « conduite et temps de réaction aux sons ») ne se distinguaient pas l'une de l'autre. Cette augmentation de la fréquence des clignements s'accompagnait également d'une instabilité du contrôle de trajectoire, comme le révèle le nombre plus élevé de mouvements correctifs du volant.

L'introduction d'une tâche secondaire de temps de réaction n'a pas eu d'effet additif sur la fréquence des clignements, ce qui est cohérent avec les résultats obtenus lors de la 1ere expérience. Par ailleurs, elle n'a pas eu d'effet significatif sur le contrôle de trajectoire. L'ensemble de ces résultats laisse donc penser que, dans les conditions de cette expérience, les conducteurs sont capables de réaliser les deux tâches simultanément. L'augmentation du

temps de réaction entre la condition contrôle et les conditions de double tâche suggère que les participants donnaient la priorité à la tâche de conduite.

L'augmentation des clignements au cours de la double tâche « conduite + calcul » concorde avec les résultats observés dans plusieurs études (Benedetto et al., 2014; Recarte et al., 2008; Savage et al., 2013; Tsai et al., 2007). A propos de l'effet spécifique de la charge sur les clignements courts, nos résultats ne confirment pas les précédents (Ahlstrom & Friedman-Berg, 2006; Benedetto et al., 2011). Il apparaît en effet que l'environnement (expérience 1 et 2) et l'introduction d'une tâche secondaire de calcul mental (expérience 2) affectent indifféremment les clignements courts ([80ms-120ms]) et les clignements longs ([140ms-500ms]). Dans ces conditions, il semble intéressant de prendre en compte, dans les prochaines expériences de la thèse, l'ensemble des clignements entre 80 et 500 ms indépendamment de leur durée.

2.4.3. Persistance d'un effet de l'environnement de conduite avec l'introduction d'une double tâche

Nos résultats ont confirmé que la fréquence des clignements était affectée différemment en fonction des sources de variation de la charge mentale. Lorsque l'environnement de conduite est plus exigeant, la fréquence des clignements diminue, alors qu'elle augmente avec l'introduction d'une double tâche de calcul mental. Une des questions qui a motivé cette étude était de savoir si l'inhibition des clignements résisterait à l'introduction d'une tâche secondaire cognitive. En d'autres termes, il n'a pas été établi, dans la littérature, si la fréquence des clignements est une mesure fiable du niveau de charge mentale lorsque la difficulté de la tâche principale et de la double tâche varient simultanément.

Tout d'abord, l'interaction significative entre l'environnement de conduite et la condition de double tâche sur le taux de réversion du volant semble montrer que ces deux sources de la charge mentale ont un effet cumulatif. Lorsque l'environnement était plus exigeant, le taux de réversion du volant a augmenté, et cette augmentation était d'autant plus

importante que le conducteur avait à effectuer en parallèle une tâche secondaire cognitive. Une tendance à la baisse de la fréquence des clignements a pu être observée dans la condition de double tâche calcul mental lorsque l'environnement de conduite était plus exigeant (M = 15,2, 13,7 et 11,2 clignements par minute pour respectivement la voie rapide, l'environnement rural et l'environnement urbain), ce qui suggère que l'inhibition des clignements n'a pas été complètement éliminée sous l'effet de l'augmentation de la charge cognitive. Cependant, l'interaction entre l'environnement de conduite et les conditions de double tâche sur la fréquence des clignements n'était pas significative. Combiné aux résultats sur le taux de réversion du volant, cela confirme les études antérieures montrant que les conducteurs n'ont pas été pleinement en mesure de prioriser la conduite sur la tâche cognitive secondaire (e.g., Jamson & Merat, 2005). Alors que la fréquence des clignements semblait être une mesure robuste pour mesurer la charge de travail mentale des conducteurs lorsqu'elle est due soit aux exigences de la tâche de conduite, soit à la présence d'une tâche cognitive secondaire concomitante (Benedetto et al., 2014; Recarte et al., 2008; Savage et al., 2013; Tsai et al., 2007), ces résultats soulignent leur limite lorsqu'il s'agit de distinguer ces sources de charge mentale lorsqu'elles varient simultanément. Cela conduit, par exemple, à une fréquence de clignement qui ne différait pas entre conduire dans un environnement exigeant tout en réalisant une tâche secondaire et conduire librement dans un environnement peu exigeant.

En conclusion et en synthèse de ces deux études, il apparait que la fréquence des clignements est une mesure sensible aux variations de la charge mentale, qu'elle soit liée à la complexité de l'environnement de conduite ou à la réalisation d'une tâche secondaire cognitive. Point intéressant dans la perspective d'une comparaison du niveau de charge entre conduite sur route et conduite sur simulateur, cette mesure n'est pas affectée par l'introduction d'une tâche secondaire dite subsidiaire (temps de réaction à un stimulus

simple). Néanmoins, des limites peuvent être soulignées pour cette variable. Il est d'abord apparu que les clignements ne permettaient pas de dissocier les facteurs influençant la charge lorsque ceux-ci variaient simultanément. Il ensuite apparu que si cet indicateur convergeait avec le taux de réversion du volant, des points de divergence avec des mesures telles que le temps de réaction à un stimulus simple ou le ressenti subjectif ont été mis en évidence. A partir des effets de l'environnement de conduite sur les différents indicateurs de la charge, nous avons formulé l'hypothèse que certains de ces indicateurs seraient plus sensibles à certaines sources, argumentant en faveur de l'utilisation d'une approche multi-mesures de la charge mentale pour mieux en rendre compte.

3. Expérimentation 3 : Comparaison entre conduite sur route et conduite sur simulateur « bas coût » au niveau de la charge mentale

3.1. Introduction

La meilleure façon de tester la validité des simulateurs de conduite est très certainement de les comparer à des situations réelles de conduite. Bien que cela soit rendu difficile par la nécessité de reproduire en virtuel des itinéraires et des situations réelles, quelques études se sont néanmoins engagées dans cette voie. La plupart se sont inscrites dans une tentative de validation de la composante comportementale, au travers de mesures portant sur la vitesse et/ou du contrôle latéral. Alors que certaines de ces études ont montré des différences entre conduite réelle et conduite sur simulateur (Bella, 2008 ; Bittner et al., 2002 ; Godley et al., 2002 ; Törnros, 1998), d'autres, au contraire, n'en ont pas montré (Alm, 1995 ; Blaauw, 1982). Néanmoins, conclure à la validité d'un simulateur de conduite sur la seule base des mesures comportementales peut être erroné. D'une part, ces mesures font face à certaines limites. En effet, une modification de la vitesse peut aussi bien provenir d'un ajustement liée à l'augmentation de la charge comme être appelée par la situation elle-même. D'autre part, le modèle de la charge mentale en conduite de De Waard (1996) avance en particulier que les conducteurs pourraient, en certaines circonstances, allouer davantage de ressources attentionnelles à la tâche de conduite pour maintenir leur niveau de performance. Dit autrement, pour un même comportement, les conducteurs pourraient allouer plus ou moins de ressources. Cette relation particulière nous a amené à formuler des prédictions précises quant à l'effet d'un dispositif de réalité virtuelle sur le niveau de charge mentale et les comportements de conduite. Si le dispositif affecte le niveau opérationnel, les comportements de conduite devraient se dégrader lors de la conduite sur simulateur comparativement à la conduite sur route. Des mesures comportementales seules permettraient donc d'attester d'un défaut de la validité (absolue) du dispositif. Si le dispositif n'affecte pas le niveau opérationnel, les comportements devraient donc être similaires entre réel et virtuel. En

parallèle, soit le niveau de charge mentale ne diffère pas entre ces deux conditions, et cela attesterait de la validité comportementale comme psychologique du dispositif, soit la charge mentale est supérieure dans une des conditions. Le recours à des mesures de cette dimension de la validité psychologique permettrait ainsi de dépasser les mesures de la validité comportementale. Nous avons ainsi défendu l'idée qu'une approche multidimensionnelle de la validité, intégrant en particulier des mesures relatives à la dimension psychologique, permettrait de mieux rendre compte du positionnement de l'utilisateur face à un dispositif de réalité virtuelle.

D'autre part, et comme nous l'avons pointé dans la revue de littérature, très peu d'études se sont engagées dans une démarche visant à comparer la charge mentale engendrée par la conduite en réel et celle engendrée par la conduite en virtuel, et les résultats obtenus se sont révélés très contrastés. Blaauw (1982) et Alm (1995) ont mis en évidence des comportements similaires entre conduite sur route et sur simulateur mais montré, à partir de mesures subjectives, une augmentation de la charge mentale dans cette dernière condition. Chen et al. (2015) ont révélé, à partir d'une tâche de pointage et des mesures de temps de réaction à une tâche secondaire, que la demande attentionnelle de la tâche réalisée en virtuel était supérieure à son équivalent en réel. A l'opposé, pour Johnson et al. (2011) et Milleville-Pennel et Charron (2015), les ressources cognitives impliquées dans l'activité ne diffèreraient pas entre conduite sur route et conduite sur simulateur, alors que pour Engström et al. (2005), la charge mentale serait supérieure en situation réelle. Ces résultats contradictoires suggèrent donc que la question de la charge mentale induite par l'utilisation d'un dispositif de réalité virtuelle reste pleinement posée.

L'objectif de cette troisième étude était donc de comparer conduite réelle et conduite virtuelle au plan de la charge mentale, en s'appuyant sur une approche confrontant validité comportementale et validité psychologique. Comme dans les expériences précédentes, nous

avons utilisé différents indicateurs de la charge mentale (NASA-TLX, tâche secondaire subsidiaire et fréquence des clignements). Cette expérience avait également comme objectif, dans une démarche plus exploratoire, de déterminer si les caractéristiques de la restitution visuelle en termes de taille d'écran influaient sur la charge mentale inhérente à la conduite simulée. Nous avons fait l'hypothèse générale que la charge mentale serait supérieure dans la conduite sur un simulateur « bas coût » tout en cherchant à montrer quels seraient les meilleurs indicateurs de cette différence.

3.2. Matériel et Méthode

3.2.1. Participants

Vingt-quatre participants (16 hommes et 8 femmes) âgés de 27 à 56 ans (M = 43,5 ans ; SD = 8,9) ont pris part à cette expérience. Chacun d'entre eux avait une vue normale ou corrigée et n'était pas informé des objectifs de l'étude. Tous étaient titulaires du permis de conduire, avec une ancienneté minimum de 2 ans. En moyenne, ils détenaient leur permis depuis 23 ans (SD = 9,6) et ont roulé 300 000 km depuis son obtention (SD = 196 000). Enfin, ils ont accepté les modalités de participation à l'étude et les données qui allaient être enregistrées en signant un document de consentement libre et éclairé. Aucun n'avait participé à la première expérience.

3.2.2. Dispositifs expérimentaux

3.2.2.1. Véhicule instrumenté

La conduite en milieu réel a été réalisée avec le véhicule instrumenté VOICIE (Véhicule d'Observation de l'Interaction du Conducteur avec l'Infrastructure et l'Environnement de la route) du CEREMA (Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement) de la DTer-Ouest (Département Laboratoire de Saint-Brieuc, implantation bretonne de la direction territoriale de l'ouest). Il s'agissait d'un véhicule Renault Clio III (5 portes) à transmission manuelle (Figure 21) équipé d'un système

DIRCO (Dispositif de Recueil de données Conducteur), développé conjointement par le LIVIC (Laboratoire sur les Interactions Véhicule-Infrastructure-Conducteur) et le LOLITECH (LOgiciel LIbre et TECHnologie). Ce système enregistrait les données issues de différents périphériques dont 1) le bus CAN, situé dans le moteur, ce dispositif enregistrant plusieurs données comme la vitesse longitudinale (en km/h), l'orientation du volant (en degré), la position du levier de vitesse et la pression exercée sur les pédales (en pourcentage), l'activation des feux d'éclairage et de freinage et la température extérieure ; 2) la centrale inertielle, située dans l'habitacle, enregistrant la vitesse angulaire (en degrés/s) et l'accélération angulaire (en degrés/s²) du véhicule ; 3) le GPS, situé dans le coffre, enregistrant la position du véhicule avec une précision estimée à plus ou moins 20 m. Le DIRCO avait une fréquence d'acquisition de 100 Hz. Les données étaient enregistrées sur un PC portable situé dans l'habitacle. Leur fiabilité a été contrôlée à l'occasion d'une opération de recherche sur la métrologie du trafic et des trajectoires (Vrel, Doucet & Subirats, 2010).

3.2.2.2. Simulateur de conduite

La conduite sur simulateur a été réalisée avec le simulateur « bas coût » (base fixe) équipant la DTer-Ouest du CEREMA (Figure 22). Les caractéristiques de ce simulateur étaient identiques à celui utilisé lors des deux premières expériences. Le siège provenait d'une Renault Clio tandis que le volant (avec retour d'effort), le levier de vitesse et les pédales correspondaient à un ensemble Logitech G25 et étaient fixés comme les enceintes pour la restitution sonore sur un support métallique.

Deux configurations différentes de restitution visuelle ont été utilisées. Une première configuration dite *1 écran* était constituée d'un écran de 2 m de large sur 2 m de haut, sur lequel était projeté l'environnement virtuel. La taille de l'image était de 1,75 m de large x 1,18 m de haut. La résolution du vidéo projecteur était de 1280 x 900 pixels et la fréquence de

rafraîchissement de l'image de 30 Hz. Avec le siège du conducteur placé à 2 m de l'écran, la taille du champ visuel était de 47,2 x 32,8 degrés.

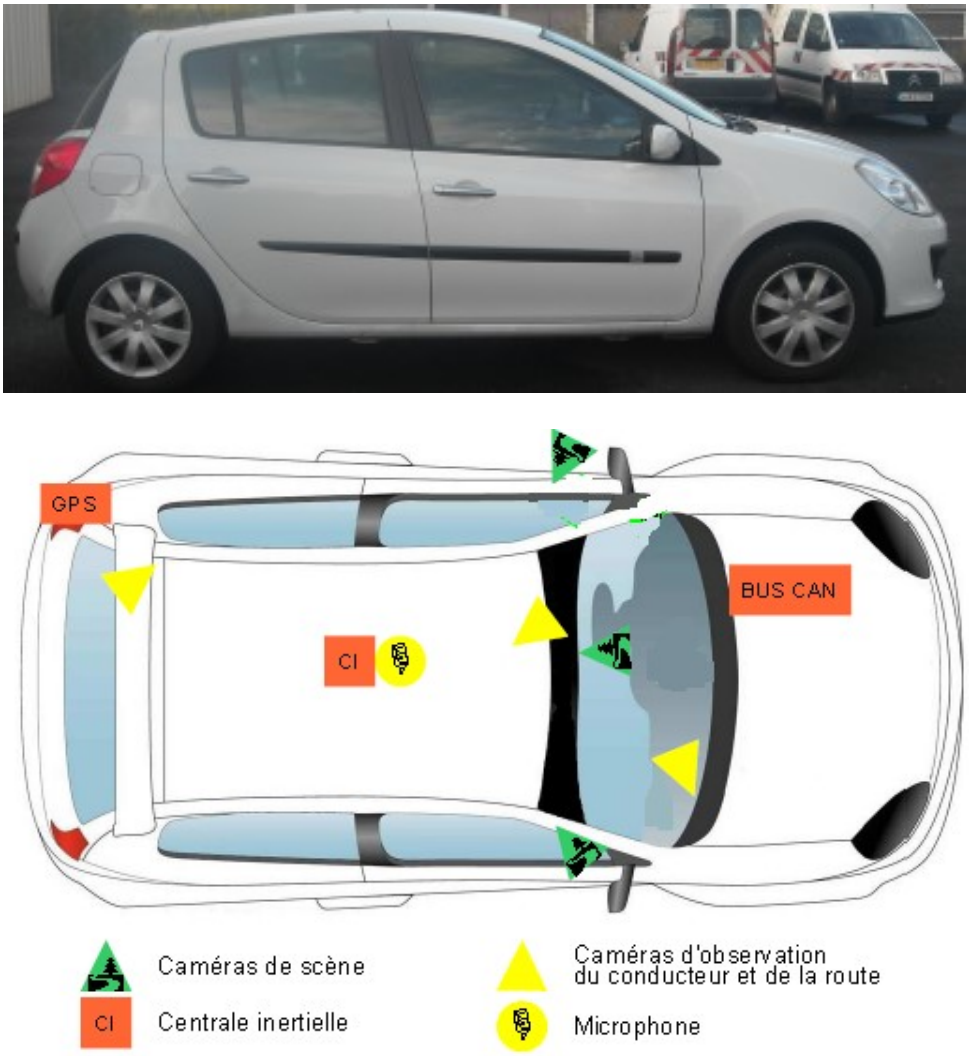


Figure 21 : Illustration de l'instrumentation du véhicule VOICIE utilisé en situation réelle de conduite

La seconde configuration dite *3 écrans* était obtenue par l'intermédiaire de trois écrans de 24 pouces (Samsung SyncMaster P2450), fixés à trois supports d'écran plat. La taille de l'image comprenant les trois écrans était de 1,56 m de large x 0,3 m de haut. La résolution de l'image était égale à 1280 x 1024 pixels (pour 1 écran). La fréquence de rafraîchissement de l'image était de 30 Hz. Les écrans étaient disposés en demi-cercle, de telle sorte que le centre de chaque écran était situé à 1 m des yeux du participant. Dans ces conditions, la taille du champ visuel était de 97 x 30 degrés.

La configuration 3 écrans correspondait à celle installée initialement au CEREMA. Le simulateur était un équipement nouveau pour le laboratoire, et l'équipe de recherche souhaitait l'évaluer dans cette configuration. Nous avons ajouté la configuration 1 écran à des fins de cohérence avec les expériences précédentes de la thèse. Cela permettait par ailleurs de comparer les deux configurations pour dessiner des pistes d'amélioration du dispositif. Dans ces deux configurations, la vitesse instantanée était affichée au centre de l'image.

Figure 22 : Simulateur de conduite de la DTer Ouest du CEREMA dans sa configuration 3 écrans

3.2.2.3. Oculomètre

Comme précédemment, un oculomètre « Pertech » tête portée a été utilisé. Il était constitué d'une monture de lunette équipée de caméras filmant la scène visuelle et l'œil du participant, reliée à une unité centrale pour l'enregistrement des données. Pour cette expérience, deux unités centrales ont été utilisées. La première unité était installée à l'intérieur du véhicule instrumenté, la seconde dans la salle de réalité virtuelle. Grâce à plusieurs développements logiciels, le système du VOICIE enregistrait les données issues du DIRCO en même temps que les données oculaires, à une fréquence de 50 Hz. Nous avons utilisé deux focales pour la caméra de scène du capteur. La première (1,5 mm) était utilisée en réel et pour la condition 3 écrans. La seconde (2,2 mm) était utilisée pour la condition 1 écran. Le choix de ces deux focales a été dicté d'une part, par la nécessité de détecter les marqueurs

permettant le calcul des mouvements de têtes et d'autre part, par la nécessité de capturer la scène routière pour un angle horizontal plus élevé en situation réelle et dans la condition 3 écrans. Le changement de focale n'a eu d'effet que sur la résolution de l'image de scène. Le capteur œil était lui inchangé dans les 3 conditions de conduite. La calibration du système a été réalisée en réel sur le parking du CEREMA, point de départ des participants et en virtuel, au début de chaque session de conduite.

3.2.3. Environnement de conduite

3.2.3.1. Description de l'itinéraire pour la conduite sur route

L'environnement sélectionné pour la conduite en réel était une portion de 7,5 km de la Route Départementale 786, entre Saint-Brieuc et Binic dans les Côtes d'Armor. Le parcours se divisait en plusieurs sections, qui se distinguaient par leurs caractéristiques (Figure 23). La première section était une voie rapide de 4,2 km avec 2 x 2 voies de circulation, séparées par un terre-plein central, limitée à 110 km/h à l'exception de quelques tronçons de transition. Cette première section se divisait en deux parties séparées par un rond-point. La seconde section était une route sinueuse à double sens de circulation, longue de 1,8 km, limitée, dans un premier tronçon, à 90 km/h puis, dans un second, à 70 km/h en raison de l'enchaînement de virages. La dernière section, d'une longueur de 1,5 km, traversait le village de Binic par sa route principale et était limitée à 50 km/h.

Afin de réduire les incertitudes liées au trafic et les risques de congestion potentielle, nous avons consulté les relevés de trafic réalisés par le CEREMA sur plusieurs portions de la RD 786 (Figure 24). Deux plages horaires (9h45 – 11h et 14h30 – 16h) ont été identifiées pendant lesquelles la densité du trafic était la plus basse, l'objectif étant de minimiser le risque d'incidence du trafic sur la tâche de conduite et sur le temps de parcours.

Les sessions de conduite dans l'environnement réel étant susceptibles de donner lieu à des événements particuliers que nous ne pouvions pas reproduire en virtuel (feu de circulation

rouge, travaux, piétons, dépassement d'un véhicule etc.), les séquences correspondant à ces événements ont toutes été relevées afin de les exclure des données traitées. L'ensemble des séquences coupées représentait moins de 5% du temps total des enregistrements.

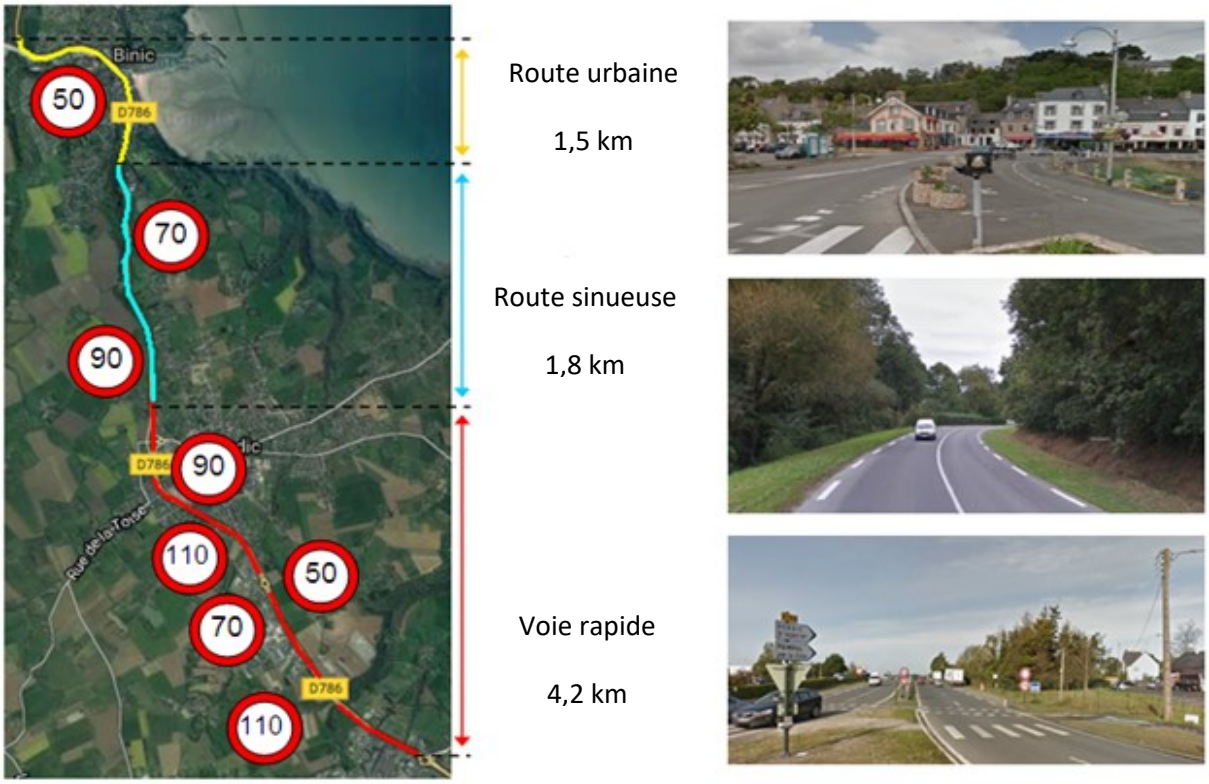


Figure 23 : Itinéraire choisi pour la conduite sur route et illustration des trois environnements

Panel de gauche : les limitations de vitesse en vigueur tout au long de l'itinéraire sont données pour information. Panel de droite, de haut en bas : environnement urbain (ligne jaune sur la carte), environnement rural (ligne bleu sur la carte) et environnement voie rapide (ligne rouge sur la carte).

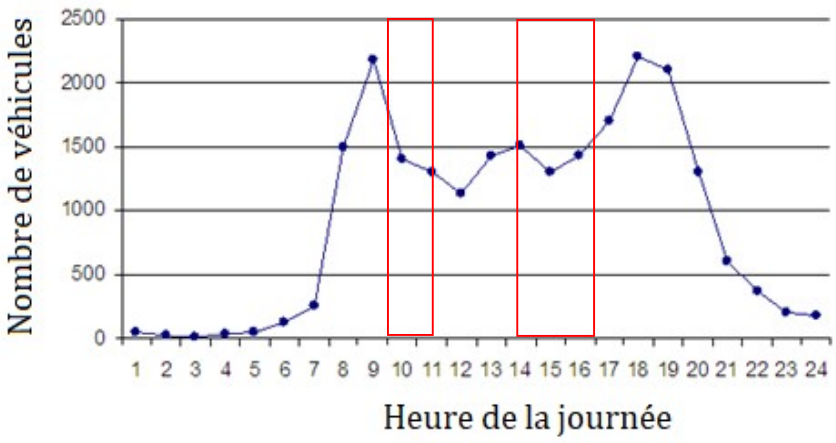


Figure 24 : Trafic moyen horaire du mardi 23 mars 2010 sur la RD 786. Relevé effectué par la Direction Territoriale de l'Ouest

3.2.3.2. Réalisation de la base 3D pour la conduite sur simulateur

Le travail de construction de l'environnement virtuel a duré environ 6 mois. La démarche générale a consisté en plusieurs étapes successives incluant la prise de photos et de relevés topographiques (constitution d'une base de données terrain), la modélisation de la route et l'habillage de l'environnement par des images de synthèse (travail d'infographie), ainsi qu'un processus de correction et d'ajustement (Figure 25). Par ailleurs, un trafic a été introduit dans l'environnement virtuel, pour circuler en sens inverse de la voiture du participant. La densité de ce trafic correspondait aux relevés effectués par la DTerOuest (Figure 24). Les véhicules étaient de plusieurs types (véhicules de tourisme, utilitaires, camions) et de plusieurs couleurs, afin de créer une diversité que l'on rencontre en situation réelle.

3.2.4. Plan expérimental et tâches

Les participants ont effectué trois sessions de conduite différentes, correspondant aux conditions de conduite en milieu réel et sur simulateur dans une configuration 1 écran ou dans une configuration 3 écrans. Compte tenu des effets de l'environnement de conduite observés au cours des deux premières expériences, les trois environnements différents (voie rapide, route rurale et environnement urbain) dans lesquels les participants étaient amenés à circuler ont été considérés comme seconde variable du plan expérimental. Ainsi, un plan 3 conditions de conduite x 3 environnements de conduite a été utilisé. Pour chacune des conditions de conduite, il était demandé aux participants de conduire comme ils le font habituellement en respectant le code de la route et les limitations de vitesse.

En parallèle de la tâche de conduite, les participants ont réalisé une tâche secondaire de temps de réaction au son. Comme lors des expériences précédentes, ils devaient répondre à voix haute (« Top ») et le plus rapidement possible à un stimulus sonore (« Bip ») d'une durée de 100 ms et d'une amplitude égale à 1,5 kHz. La durée entre chaque stimulus variait

aléatoirement entre 6 et 12 secondes. Une mesure de référence, hors conduite, a également été effectuée (les stimuli sonores étaient diffusés seuls pendant 2 minutes).

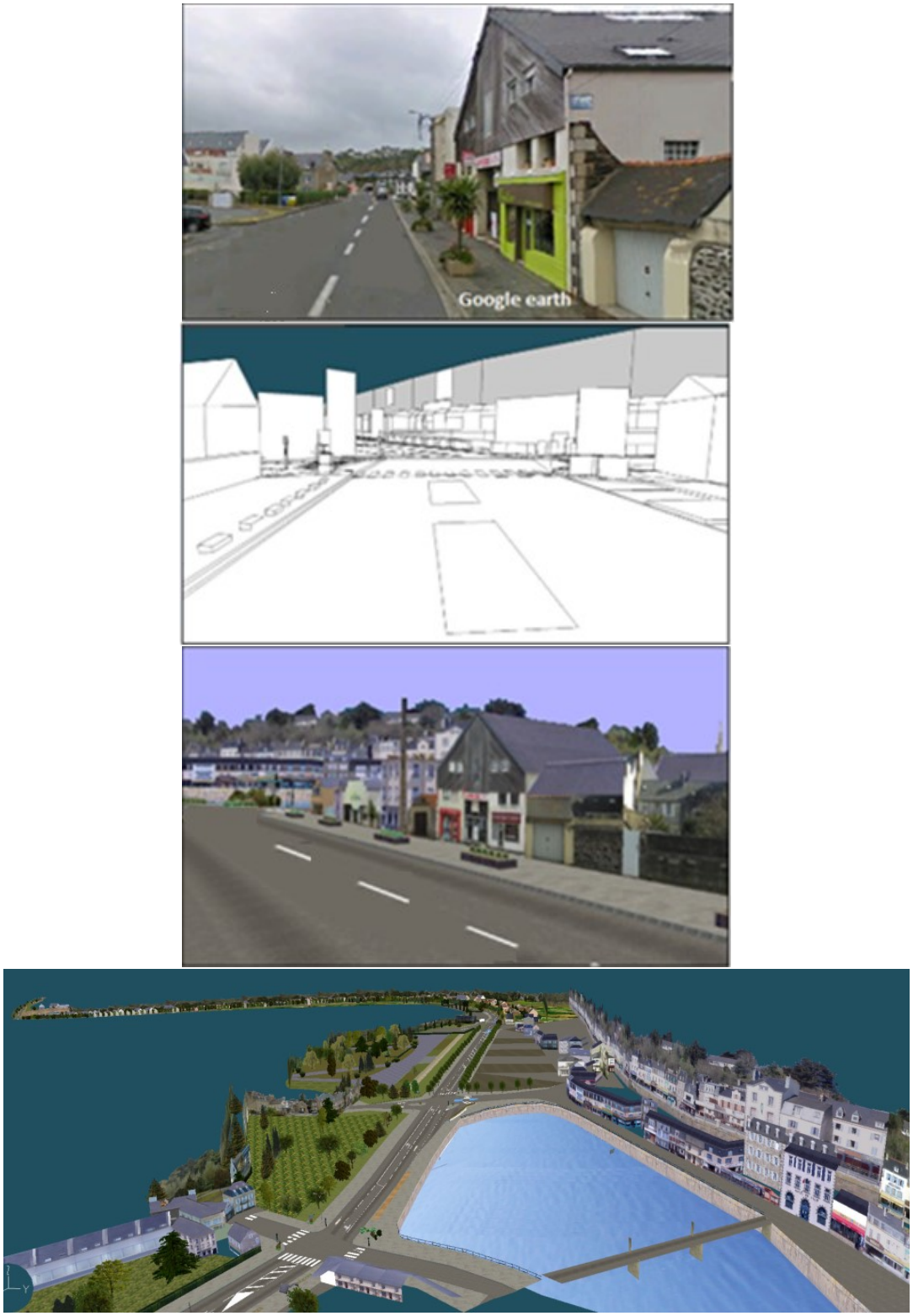


Figure 25 : Etapes de construction de l'environnement virtuel (urbain)

De haut en bas : environnement réel ; création du squelette de l'environnement virtuel ; mise en place de surfaces ; environnement virtuel finalisé.

3.2.5. Procédure

Les participants ont été accueillis dans un bureau du CEREMA. Ils étaient, dans un premier temps, informés du déroulement de l'étude, avant de donner leur consentement. Ils ont ensuite rempli une feuille de renseignements, ainsi qu'une autorisation d'utilisation de l'image, obligatoire pour toutes les expériences réalisées au laboratoire de Saint-Brieuc.

3.2.5.1. Déroulement de la conduite sur route

Les participants s'installaient à la place du conducteur dans le VOICIE et réglaient la position du siège, du volant et des rétroviseurs avant que l'oculomètre soit installé. Après l'ajustement de la position des caméras d'œil et de scène, il était procédé à la calibration du dispositif. Deux expérimentateurs prenaient place dans le véhicule. Le premier était installé à l'avant pour guider le participant et noter les événements relatifs au trafic. Le second était à l'arrière pour superviser l'enregistrement des données. Le participant conduisait le véhicule jusqu'à un stationnement à l'entrée du parcours, situé à 15 km, ce trajet servant de phase de prise en main du véhicule expérimental. Le premier expérimentateur vérifiait la calibration de l'oculomètre puis demandait au conducteur de rester assis dans le véhicule, sans toucher aux commandes, pendant 2 minutes. Pendant ce temps, il réalisait un premier enregistrement de données oculaires, servant de mesure de contrôle pour s'assurer que les différences possibles au niveau des clignements oculaires puissent être attribués à la charge mentale liée à la conduite et non à la luminosité qui différait entre conduite sur route et conduite sur simulateur (Benedetto, 2010). A la fin de ce premier enregistrement, l'expérimentateur assis à l'avant rappelait les consignes de la session de conduite. Ensuite, les participants conduisaient sur le parcours expérimental et réalisaient en parallèle la tâche de temps de réaction. Une fois le trajet terminé, ils stationnaient sur un parking et remplissaient le questionnaire d'évaluation de la charge mentale (NASA-TLX) avant de retirer l'oculomètre. Enfin, ils échangeaient leur place avec l'expérimentateur installé à l'avant, qui ramenait le véhicule à son point de départ.

3.2.5.2. Déroulement de la conduite sur simulateur

Une procédure similaire à celle mise en place pour la conduite en milieu réel a été utilisée. Les participants s'installaient sur le siège du simulateur, en veillant à trouver une position confortable. Ensuite, l'un des expérimentateurs installait et calibrait l'oculomètre, avant d'enregistrer les données oculaires servant de mesure de contrôle pour les raisons indiquées précédemment. Enfin, il rappelait les consignes de la session de conduite et de la tâche de temps de réaction qui devait être réalisée en parallèle. A la fin de la session de conduite, les participants remplissaient le questionnaire d'évaluation de la charge mentale (NASA-TLX) avant de retirer l'oculomètre.

Les trois conditions de conduite (réel, simulateur 1 écran, simulateur 3 écrans) ont été présentées de façon contrebalancée. La mesure de référence effectuée pour la tâche de temps de réaction au son a également été présentée de manière contrebalancée, avec la moitié de l'échantillon ayant réalisé cette mesure avant les sessions de conduite, l'autre moitié après.

3.2.6. Analyse des données

Comme dans les expériences précédentes, la fréquence des clignements, le score au NASA-TLX, les performances à la tâche de temps de réaction et le taux de réversion du volant ont été analysés afin de rendre compte de la charge mentale en fonction des variables manipulées. La vitesse des conducteurs (exprimée en km/h) a également été ajoutée comme mesure de la validité comportementale.

3.3. Résultats

3.3.1. Clignements

Une première ANOVA de contrôle a été réalisée sur la fréquence de clignements au repos en fonction de la condition expérimentale (milieu réel ou simulateur 1 écran et 3 écrans) afin de vérifier si les luminosités propres à chacune des trois conditions influent sur la fréquence des clignements. L'analyse n'a pas révélé d'effet significatif ($F(2,46) = 2.9$,

$p = .07$, $\varepsilon = .87$), suggérant que les luminosités différentes en réel (M = 8,9 clignements par minute ; SD = 7,9), sur simulateur 1 écran (M = 7,1 clignements par minute ; SD = 7) et sur simulateur 3 écrans (M = 5,8 clignements par minute ; SD = 6,4) n'ont pas influencé les clignements endogènes.

L'ANOVA à mesures répétées 3 conditions de conduite x 3 environnements réalisée sur la fréquence des clignements au cours de la conduite a révélé un effet principal des conditions de conduite, $F(2,46) = 15.08$, $p < 0.001$, $\varepsilon = 0.69$, $\eta^2 = 0.39$, de l'environnement de conduite, $F(2,46) = 4.88$, $p < 0.05$, $\varepsilon = 0.79$, $\eta^2 = 0.17$, ainsi qu'une interaction entre ces deux facteurs, $F(4,92) = 6.38$, $p < 0.001$, $\varepsilon = 0.43$, $\eta^2 = 0.22$. La fréquence des clignements était plus élevée lors de la conduite sur route (M = 11 clignements par minute ; SD = 9,7) que lors de la conduite sur simulateur 1 écran (M = 4 clignements par minute ; SD = 5,7) et 3 écrans (M = 4,1 clignements par minute ; SD = 5), les deux conditions sur simulateur ne se différenciant pas significativement. Pour l'effet de l'environnement, le test post hoc a révélé que la fréquence des clignements était plus élevée lors de la conduite sur voie rapide (M = 7,2 clignements par minute ; SD = 7,5) comparativement à la conduite sur route rurale (M = 6,1 clignements par minute ; SD = 6,8) et urbaine (M = 5,8 clignements par minute ; SD = 6) qui ne se différenciaient pas. Enfin, le test post hoc réalisé sur l'interaction entre les conditions de conduite et l'environnement a montré que la diminution de la fréquence de clignements de la voie rapide aux conditions rurale et urbaine n'était présente que dans la condition réelle. Sur simulateur de conduite, la fréquence des clignements n'était pas affectée par l'environnement. Enfin, les différences entre la conduite sur route et les deux conditions de conduite sur simulateur étaient significatives, quel que soit l'environnement (Figure 26).

Les données individuelles sont fournies, pour illustration, dans la Figure 27 en fonction de la condition de conduite (graphe de gauche) et de l'environnement lors de la conduite sur route (graphe de droite). Comme précédemment, nous avons réalisé des analyses

de corrélation entre la fréquence de clignements d'une part, et l'âge et l'expérience de conduite, mais ces analyses n'ont révélé aucun lien de corrélation entre ces facteurs.

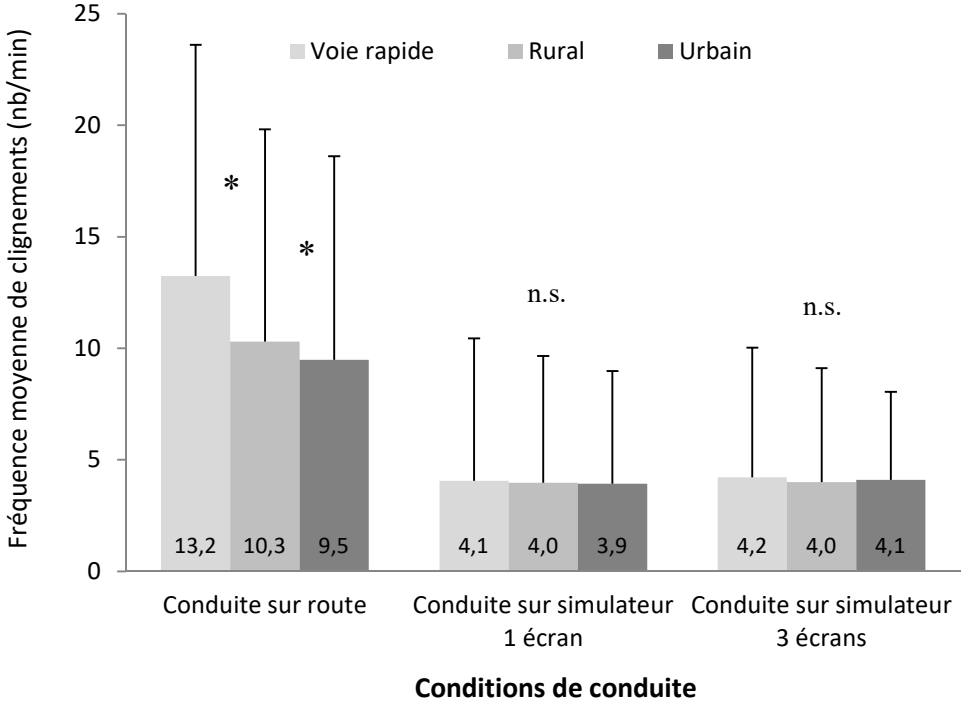


Figure 26 : Interaction entre la condition de conduite et l'environnement de conduite sur la fréquence moyenne de clignements (nb/min)

Les barres d'erreur représentent l'écart type. Un astérix indique la(les) condition(s) qui se distingue(nt) significativement des autres.

3.3.2. Performances à la tâche secondaire

Une première analyse (réalisée sur 21 participants suite à des problèmes techniques lors de la conduite sur route) a été réalisée afin de comparer le temps de réaction à la tâche secondaire entre la condition contrôle (hors conduite) et la conduite. Ce dernier correspondait au temps de réaction moyen calculé sur l'ensemble des sessions de conduite. Cette analyse a mis en évidence une augmentation significative du temps de réaction moyen ($t(20) = -8.22$, $p < .0001$) lors de la conduite (M = 408 ms ; SD = 70) par rapport à la condition de base (M = 336 ms ; SD = 64).

Une seconde analyse (ANOVA) a comparé le temps de réaction moyen en fonction de la condition de conduite et révélé un effet significatif de ce facteur, $F(2,40) = 11.9$, $p < .0001$, $\eta^2 = .37$. Le temps de réaction était significativement inférieur lors de la conduite sur route

(M = 380 ms ; SD = 59) comparativement aux deux conditions sur simulateur (M = 424 ms ; SD = 79 pour la condition simulateur 1 écran et M = 419 ms ; SD = 64 pour la condition simulateur 3 écrans) qui ne se différenciaient pas (Figure 28).

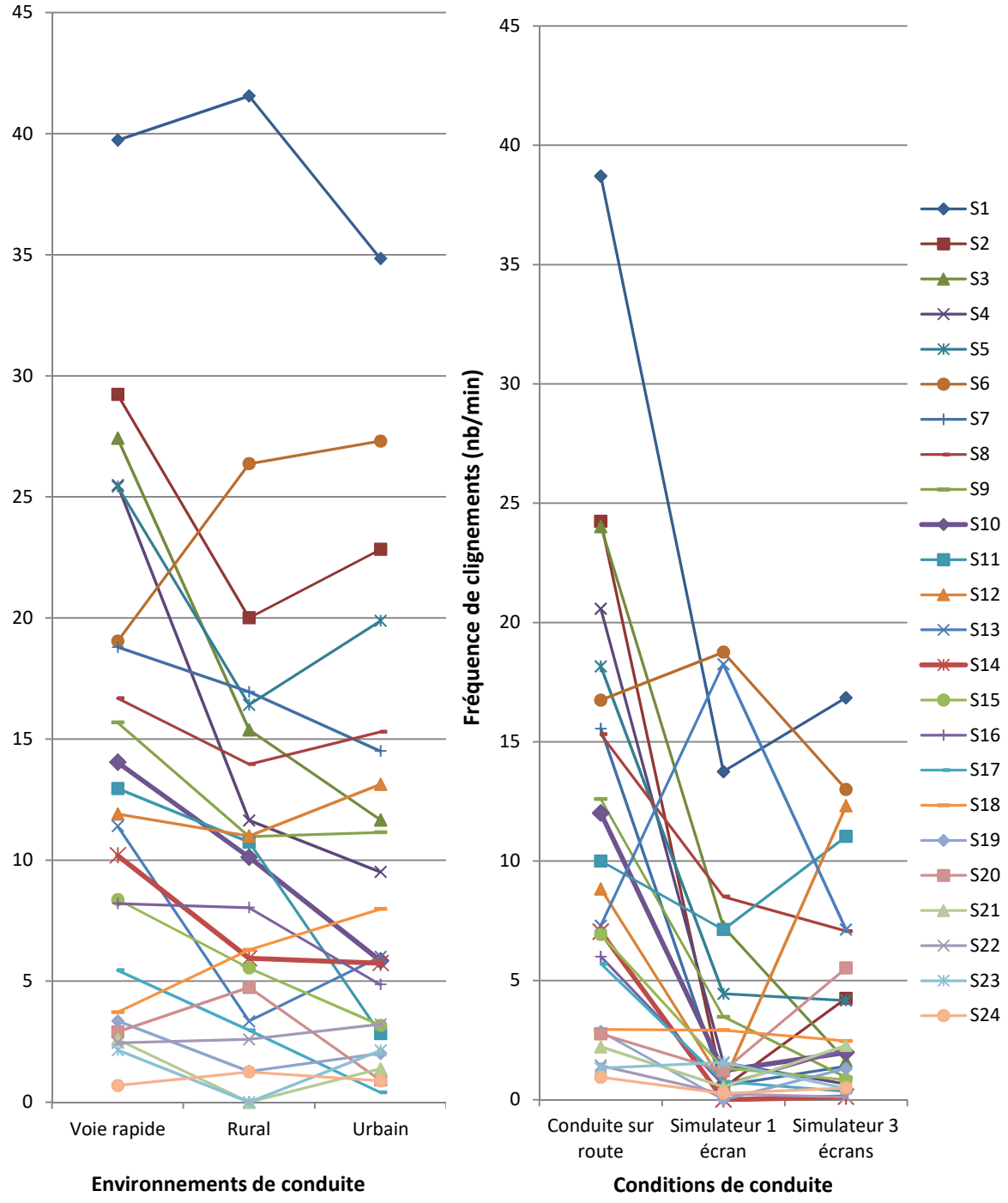


Figure 27 : Fréquence de clignements (nb/min), pour chacun des participants, en fonction de la condition de conduite (panel de droite) et de l'environnement lors de la conduite sur route (panel de gauche)

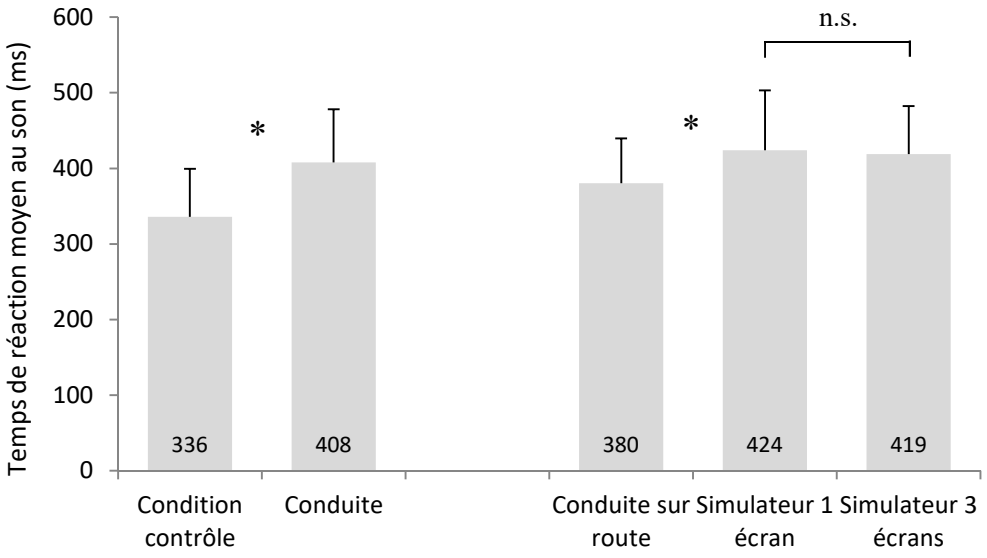


Figure 28 : Temps de réaction moyen (ms) à la tâche secondaire en fonction de la condition de passation

Les barres d'erreur représentent l'écart type. Un astérix indique la(les) condition(s) qui se distingue(nt) significativement des autres.

3.3.3. Comportements de conduite

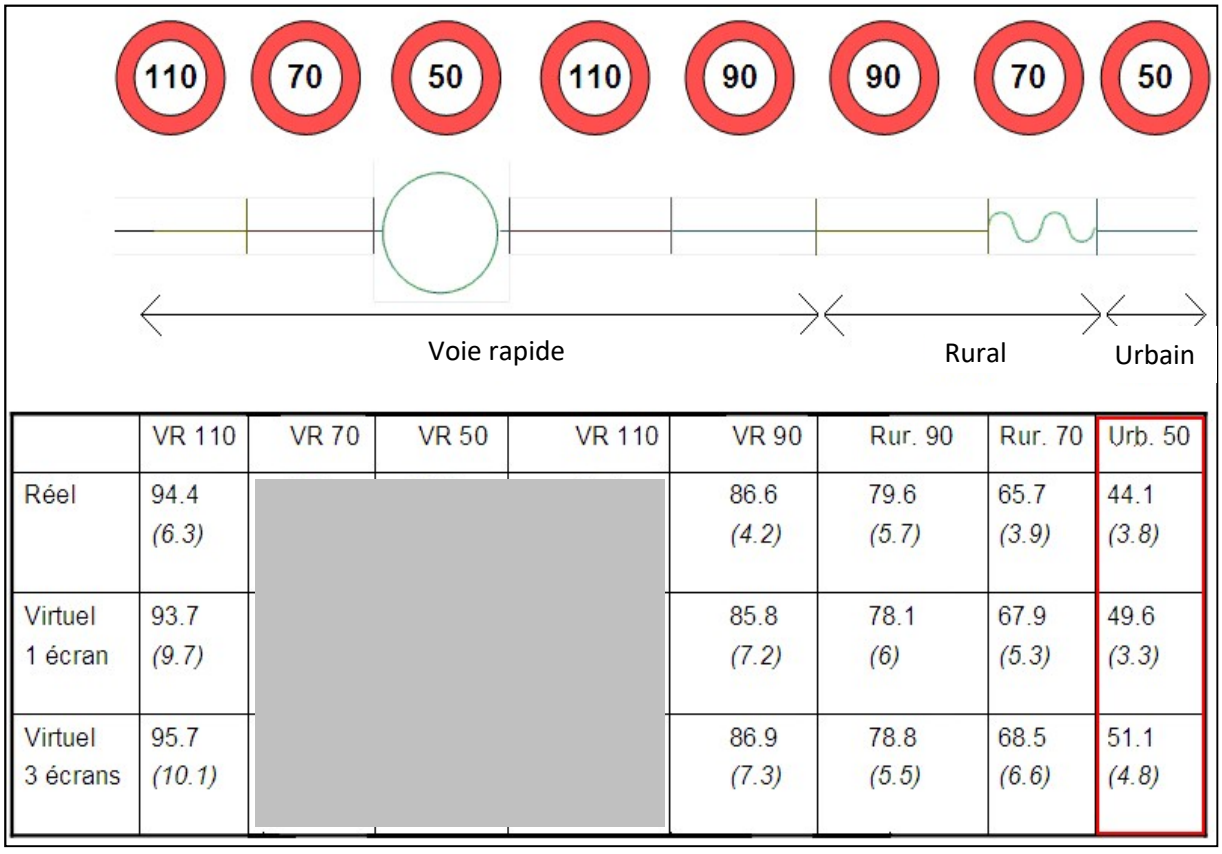
3.3.3.1. Vitesse

Une première ANOVA à un facteur (condition de conduite) a été réalisée pour comparer la vitesse moyenne adoptée par les participants sur l'ensemble du tronçon entre la condition réelle, la condition sur simulateur 1 écran et la condition sur simulateur 3 écrans. Les résultats n'ont pas montré d'effet significatif de ce facteur ($F(2,40) = 1.9$, $p = .16$). La vitesse moyenne était de 69,4 km/h en réel, 70,4 km/h dans la condition 1 écran et 71,3 km/h dans la condition 3 écrans.

Dans un second temps et pour affiner cette première analyse, nous avons réalisé 5 ANOVA afin de rechercher un effet de la condition de conduite sur les vitesses pratiquées dans 5 secteurs particuliers : la première et la dernière portion de voie rapide (limitées respectivement à 110 et 90 km/h), la première et la deuxième portion de l'environnement rural (limitées respectivement à 90 et 70 km/h) et l'environnement urbain limité à 50 km/h. Ces secteurs ont été sélectionnés car ils présentaient, au vu de la littérature, des caractéristiques

pouvant entraîner un niveau de charge différent en réel et en virtuel (e.g. Bella, 2008 ; Bittner et al., 2002 ; Godley et al., 2002).

Lors de la conduite sur voie rapide, la vitesse moyenne dans le tronçon limité à 110 km/h n'était pas différente entre les trois conditions de conduite ($F(2,40) = 0.47$, $p = .60$). Aucune différence n'est apparue dans la dernière portion limitée à 90 km/h ($F(2,40) = 0.20$, $p = .80$). Dans l'environnement rural, aucune différence n'est apparue entre les conditions de conduite que ce soit dans la portion limitée à 90 km/h ($F(2,40) = 0.62$, $p = .51$) ou dans la partie sinueuse limitée à 70 km/h ($F(2,40) = 3.14$, $p = .06$). Enfin, dans l'environnement urbain, limité à 50 km/h, l'effet de la condition de conduite était significatif ($F(2,40) = 43.24$, $p < .0001$, $\varepsilon = .94$, $\eta^2 = .68$), la vitesse moyenne étant moins élevée lors de la conduite sur route que sur simulateur 1 écran qui, elle-même, se distinguait de la condition simulateur 3 écrans. L'ensemble de ces résultats est présenté dans la Figure 29.



	VR 110	VR 70	VR 50	VR 110	VR 90	Rur. 90	Rur. 70	Urb. 50
Réel	94.4 *(6.3)*				86.6 *(4.2)*	79.6 *(5.7)*	65.7 *(3.9)*	44.1 *(3.8)*
Virtuel 1 écran	93.7 *(9.7)*				85.8 *(7.2)*	78.1 *(6)*	67.9 *(5.3)*	49.6 *(3.3)*
Virtuel 3 écrans	95.7 *(10.1)*				86.9 *(7.3)*	78.8 *(5.5)*	68.5 *(6.6)*	51.1 *(4.8)*

Figure 29 : Vitesse moyenne des participants (et écart-type) dans chaque secteur du parcours en fonction des conditions de conduite et des limites de vitesse réglementaires

3.3.3.2. Taux de réversion du volant

L'ANOVA à mesures répétées 3 conditions de conduite x 3 environnements réalisée sur le taux de réversion du volant a révélé un effet principal des conditions de conduite, $F(2,40) = 25.76$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 0.56$, de l'environnement de conduite, $F(2,40) = 61.81$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 0.75$, ainsi qu'une interaction entre ces deux facteurs, $F(4,80) = 22.97$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 0.53$. Le taux de réversion du volant était significativement plus faible en conduite sur simulateur 1 écran (M = 16 réversions par minute) par rapport à la conduite sur simulateur 3 écrans (M = 18 réversions par minute) qui se distinguait elle-même de la conduite en milieu réel (M = 22 réversions par minute). Pour l'effet de l'environnement, le test post hoc a mis en évidence une augmentation du taux de réversion du volant en environnement rural (M = 25 réversions par minute) par rapport à l'environnement voie rapide (M = 16 réversions par minute) et urbain (M = 15 réversions par minute) qui ne se distinguaient pas l'un de l'autre. Enfin, le test post hoc réalisé sur l'interaction entre les conditions de conduite et l'environnement (Figure 30) a montré que l'effet de l'environnement que nous venons de décrire s'observait dans les deux conditions sur simulateur. Dans la condition réelle, le taux de réversion était significativement plus faible dans l'environnement voie rapide (M = 20 réversions par minute) par rapport à l'environnement rural (M = 24 réversions par minute) et à l'environnement urbain (M = 23 réversions par minute) qui ne se distinguaient pas l'un de l'autre.

3.3.4. Score au NASA-TLX

L'ANOVA 3 conditions de conduite réalisée sur le score au NASA-TLX a révélé un effet significatif de cette variable, $F(2,46) = 10.27$, $p < .001$, $\eta^2 = .31$, correspondant à un score moins élevé dans la condition réelle (M = 35) par rapport à la condition simulateur 1 écran (M = 47) et à la condition simulateur 3 écrans (M = 50) qui ne se distinguaient pas l'une de l'autre.

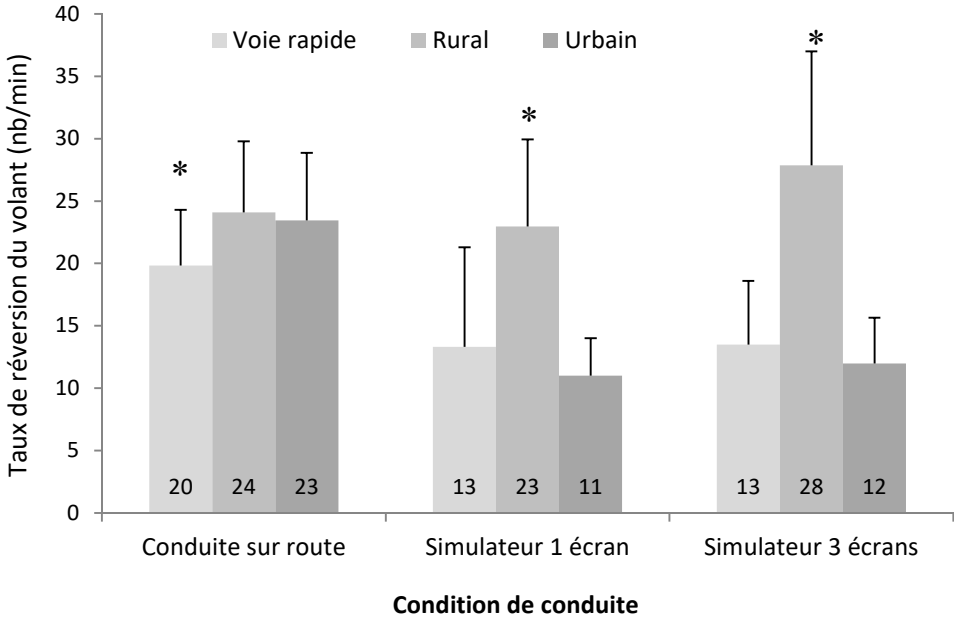


Figure 30 : Interaction entre les conditions de conduite et l'environnement sur le taux de réversion du volant (nb/min)

Les barres d'erreur représentent l'écart type. Un astérix indique la(les) condition(s) qui se distingue(nt) significativement des autres.

3.4. Discussion

L'objectif de cette troisième expérience était de comparer la conduite sur route et la conduite sur un simulateur « bas coût », en confrontant des mesures comportementales classiques et des mesures de la validité psychologique examinée sous l'angle de la charge mentale. Cette étude était motivée par deux constats fondés sur la littérature. D'une part, très peu d'études se sont intéressées à l'effet d'un dispositif de réalité virtuelle sur la charge mentale et les résultats contradictoires obtenus par ces études en font un sujet d'intérêt. D'autre part, la relation entre niveau de charge et comportement met en avant l'existence possible de deux états pour lesquels le comportement serait identique mais le niveau de charge mentale différent. Nous avons, sur cette base, formulé des prédictions précises quant à l'effet d'un dispositif de réalité virtuelle sur le niveau de charge mentale et les comportements de conduite. En particulier, si le dispositif n'affecte pas le niveau opérationnel de la tâche de conduite, les comportements devraient être similaires entre réel et virtuel. En parallèle, soit le niveau de charge mentale ne diffère pas entre ces deux conditions, et cela attesterait de la

validité comportementale comme psychologique du dispositif, soit la charge mentale est supérieure dans une des conditions. Le recours à des mesures de cette dimension de la validité permettrait donc de dépasser ou de compléter les mesures de la validité comportementale. A partir des quelques propositions relevées dans la littérature, nous avons avancé l'hypothèse que le niveau de charge mentale serait plus élevé en virtuel qu'en réel, en lien avec l'absence de restitution de mouvement et la difficulté à contrôler le véhicule sur simulateur « bas coût ». De manière synthétique, nos résultats ont révélé que 1) la vitesse moyenne sur le parcours analysé ne diffère pas entre conduite sur route et conduite sur simulateur (à l'exception de l'environnement urbain), alors que 2) le niveau de charge mentale est supérieur en conduite simulée, comparativement à la conduite sur route, tels que l'ont attesté la fréquence des clignements, le temps de réaction à la tâche secondaire et le score au NASA-TLX, 3) l'effet de l'environnement s'observe principalement lors de la conduite sur route, et enfin 4) la fréquence des clignements, le temps de réaction à la tâche secondaire et le score au NASA-TLX convergent pour rendre compte de la charge mentale, au contraire du taux de réversion du volant. Chacun de ces points est discuté dans les sections suivantes. Le Tableau 3 présente une synthèse des effets sur les différents indicateurs.

3.4.1. Condition de conduite

Les résultats ont révélé une diminution de la fréquence des clignements dans les deux conditions de conduite sur simulateur par rapport à la condition de conduite sur route. En considérant les études de Benedetto et al. (2011 ; 2014) ou Hancock et al. (1990), cette diminution traduirait une augmentation de la charge mentale lors de la conduite sur simulateur. Le score au NASA-TLX et la performance à la tâche secondaire convergent dans le sens des clignements et confirment par la même cette interprétation d'une augmentation de la charge mentale sur simulateur de conduite par rapport à la conduite en situation réelle. Les résultats ont de plus montré que la vitesse moyenne des conducteurs sur l'ensemble du

Tableau 3 : Synthèse des effets principaux et des interactions selon les indicateurs (Expérience 3).

	Fréquence de clignements	TR à la tâche secondaire	Vitesse	Taux de réversion	NASA-TLX
Condition de conduite	☑ Simu 1 – Simu 3 > Route	☑ Simu 1 – Simu 3 > Route	Parcours : n.s. Voie rapide : n.s. Route rurale : n.s. Urbain : Simu 3 > Simu 1 > Route	☑ Route > Simu 3 > Simu 1	☑ Simu 1 – Simu 3 > Route
Environnement de conduite	☑ Urbain - Rural > Voie rapide	-	-	☑ Rural > Urbain - Voie rapide	-
Condition de conduite x Environnement	☑ Réel : Urb. – Rur. > Voie rapide Simu 1 et Simu 3 : n.s.	-	-	☑ Réel : Urb – Rur > Voie rapide Simu 1 et Simu 3 : Rur > Urb - Voie rapide	-

Note : Le sens des effets pour la variable fréquence de clignements est exprimé en termes de charge. Sur simulateur, le niveau de charge est donc supérieur comparativement à la conduite sur route.

parcours, à l'exception de l'environnement urbain, était comparable entre les trois conditions expérimentales. Ainsi, il apparaît que l'augmentation de la charge mentale dans la condition simulée affecte les clignements, le temps de réaction à une tâche secondaire et le ressenti des participants, alors que la vitesse du véhicule est inchangée. Ce résultat confirme donc la prédiction que nous avons formulée à partir du modèle de la charge mentale et de la performance décrit par De Waard (1996) quant aux effets possibles de la simulation de conduite sur différentes dimensions de la validité. Alors que le dispositif n'affecte pas le niveau opérationnel de la tâche de conduite, la charge mentale est supérieure sur simulateur.

Ces résultats permettent donc de contribuer aux quelques éléments de connaissances disponibles sur la question des effets d'un dispositif de réalité virtuelle sur la charge mentale. A partir d'une approche multi-mesures de la charge, ils confirment ainsi les conclusions de Blaauw (1982) et Alm (1995) dans le domaine de la simulation de conduite ainsi que ceux de Chen et al. (2015) dans le domaine des dispositifs de réhabilitation et de ré-entraînement. Ils confirment également la sensibilité des différentes mesures utilisées aux variations de la charge, comparativement aux mesures physiologiques (e.g., Engström et al., 2005, ou Johnson et al., 2011) qui peuvent être difficiles à interpréter puisqu'elles évoluent de la même façon en fonction du stress ou de la charge mentale liée aux demandes de la tâche (Boucsein & Backs, 2000 ; Cain, 2007 ; voir également Milleville-Pennel & Charron, 2015).

Il est à noter enfin que les résultats ont mis en évidence des effets de la condition de conduite sur le taux de réversion du volant radicalement opposés à ceux obtenus sur les autres indicateurs de la charge. En effet, ce taux était significativement plus élevé sur route que sur simulateur, les deux conditions simulées se différenciant l'une de l'autre. Ce résultat, au demeurant étonnant, pourrait trouver une explication dans les effets de la condition de conduite sur les exigences de précision des trajectoires et de leur contrôle, en lien d'une part avec l'absence de représentation du véhicule sur simulateur « bas coût », et d'autre part avec

le trafic en sens inverse. En effet, Mecheri et Lobjois (soumis) ont montré que sur simulateur « bas coût », les conducteurs avaient tendance à se positionner à droite de la voie lorsqu'ils conduisaient sans capot représenté comparativement à la condition dans laquelle une représentation 3D d'un véhicule était fournie. De plus, et comme évoquées précédemment, les études de Dijksterhuis et al. (2011) et Mecheri et al. (2017) ont montré que la présence de trafic dans le sens de circulation opposé entraine des positions latérales plus excentrées en direction du marquage de rive, ce repositionnement s'accompagnant d'une diminution de la variabilité de la position latérale. Il est ainsi possible d'envisager que sur simulateur, les participants se soient positionnés sur la partie extérieure de la voie de façon à s'éloigner du trafic et qu'ils aient conservé cette position, entraînant par conséquent une réduction des mouvements de correction de la trajectoire. Pour Dijksterhuis et al. (2011), la recherche d'une telle stabilité entraînerait un effort important pour contrôler le véhicule. A l'opposé, en situation réelle, les participants auraient régulé leur position selon le trafic, amenant cette fois un besoin de régulation de la trajectoire. Cette interprétation est cohérente avec le fait que, sur route, les participants ont eu à interagir avec le trafic en sens opposé sur route rurale et en urbain (sur la voie rapide, un terre-plein central séparait les deux sens de circulation) et que ces deux environnements se distinguent significativement de la voie rapide. Cela nous amène donc, pour conclure sur ce point, à relativiser l'intérêt du taux de réversion du volant dans le cadre d'une comparaison entre conduite sur route et conduite sur simulateur.

3.4.2. Environnement de conduite

De nombreuses études ont montré que les caractéristiques de l'environnement de conduite avaient un impact sur le niveau de charge mentale du conducteur (e.g. Young et al., 2009). Dans la présente expérience, la tâche de conduite amenait les participants à emprunter une voie rapide, une portion de route rurale incluant une succession de virages et pour finir, une route traversant le village de Binic. Les résultats ont montré que l'environnement de

conduite avait bien un effet sur le niveau de charge mentale, mesurée par la fréquence de clignements et le taux de réversion du volant, mais que cela semble dépendre de la condition de conduite.

Dans la condition réelle, l'environnement voie rapide semble être celui qui génère le moins de charge, comme l'atteste la fréquence de clignements (plus élevée que dans l'environnement rural et dans l'environnement urbain) et le taux de réversion du volant (plus faible que dans l'environnement rural et dans l'environnement urbain).

Dans les deux conditions simulées, les résultats ont révélé une absence d'effet de l'environnement sur la fréquence des clignements. Une tentative d'explication pourrait tenir au trop faible nombre de clignements réalisés par les participants (3,9 clignements par minute dans la condition 1 écran et 4,1 clignements par minute dans la condition 3 écrans). Les résultats ont, par ailleurs, mis en évidence une augmentation du taux de réversion du volant dans l'environnement rural, ce qui est cohérent avec les observations faites lors des deux premières expériences et dans l'étude de Marrkula et Engström (2006). L'augmentation du taux de réversion du volant met en évidence l'augmentation sensible des demandes de contrôle de la trajectoire du véhicule dans l'environnement rural. Il est raisonnable de penser, sans avoir de comparaison avec un simulateur de plus haut niveau de fidélité, que l'absence de certaines informations, en particulier inertielles, sur les simulateurs « bas coût », pourrait accentuer les difficultés dans le contrôle de trajectoire. Considérant d'autre part que le retour d'effort du volant peut avoir une influence sur le nombre de mouvements de réversion (Park et al., 2005) et sur les variations de la position latérale du véhicule (Grant, Karimi & Mann, 2006), cette caractéristique des simulateurs « bas coût » pourrait faire l'objet d'études spécifiques dans le but de réduire les difficultés de contrôle de trajectoire et le niveau de charge mentale sur ces dispositifs.

3.4.3. Effet des caractéristiques du simulateur

Le simulateur de conduite du CEREMA étant en développement au moment de l'étude, l'intérêt de comparer, dans une perspective plus applicative, deux configurations visuelles différentes était double : i) d'abord, de donner au laboratoire de St-Brieuc des pistes d'évolution possible du dispositif et ii) pour ce travail de thèse, de valider plusieurs des marqueurs de la charge mentale dans des conditions de simulation différentes de celles qui ont été utilisées jusqu'ici.

La fréquence des clignements, le temps de réaction à une tâche secondaire et l'évaluation subjective de la charge (NASA-TLX) étaient comparables dans les deux configurations du simulateur. Cependant, l'effet de la condition simulée (1 écran vs. 3 écrans) sur les mesures comportementales est équivoque. Le premier résultat concerne le taux de réversion du volant qui est plus élevé dans la condition 3 écrans que dans la condition 1 écran. Il peut amener à penser, à partir des travaux de Marrkula et Engström (2006), que le contrôle de la trajectoire du véhicule serait plus difficile dans la condition 3 écrans.

Le second résultat concerne la vitesse des conducteurs dans l'environnement urbain, qui est plus élevée dans la condition 3 écrans (51,1 km/h) que dans la condition 1 écran (49,6 km/h). La taille du champ visuel horizontal étant plus importante dans la condition 3 écrans (97°) que dans la condition 1 écran (47,2°), le nombre d'informations disponibles y était, par conséquent, plus important. Cette différence était, de plus, particulièrement marquée dans l'environnement urbain car plus riche visuellement. Il n'est donc pas exclu que les participants aient privilégié l'exploration de cet environnement, réduisant ainsi la fréquence de consultation du compteur de vitesse et le temps total accordé à cette zone d'intérêt. Cette hypothèse, qui pourrait expliquer le phénomène de survitesse dans la condition 3 écrans, pourrait être vérifiée ultérieurement en examinant les stratégies visuelles.

3.4.4. Confrontation de différents niveaux de validité du simulateur de conduite

Les mesures réalisées au cours de cette expérience permettaient à la fois d'évaluer la validité psychologique du simulateur sous l'angle de la charge mentale et la validité comportementale au travers du contrôle longitudinal et latéral du véhicule. Pour rappel, Malaterre et Fréchaux (2001) ont défini la validité psychologique comme le degré de similitude entre les processus sous-tendant les comportements en situation de conduite réelle et simulée, coût cognitif compris. Le fait que le niveau de charge mentale soit plus élevé en virtuel par rapport au réel met en lumière une limite évidente quant à la validité psychologique du simulateur « bas coût » que nous avons utilisé. Cependant, il est intéressant de noter que cette augmentation de la charge ne se traduit pas par une modification de la vitesse pratiquée par les conducteurs lorsqu'elle est mesurée sur l'ensemble du parcours. Par ailleurs, nous avons observé en réel comme en virtuel une augmentation du taux de réversion du volant lorsque les demandes de corrections étaient plus nombreuses (environnement rural). L'ensemble de ces éléments argumente donc en faveur de la validité comportementale relative du simulateur « bas coût » au sens défini par Blaauw (1982).

Néanmoins, ces résultats mettent en lumière l'insuffisance de validité psychologique d'un simulateur « bas coût » tel que celui utilisé dans cette expérience. Il convient donc de trouver des moyens d'amélioration de ce niveau de validité. Comme évoqués dans la revue de littérature, l'augmentation de la charge mentale pourrait provenir notamment de l'absence d'informations inertielles ou de retour d'effort du volant. Les effets de l'absence d'information inertielle étant relativement bien documentés (Siegler et al., 2001 ; Suetomi et al., 1995), nous nous sommes focalisés dans la dernière expérience de cette thèse sur l'effet du retour d'effort en conduite simulée sur le contrôle du véhicule en vue d'influer sur le niveau de charge mentale.

4. Expérimentation 4 : Effet du retour d'effort du volant sur la charge mentale

4.1. Introduction

Les résultats de la troisième étude ont mis en évidence une augmentation de la charge mentale pour la conduite sur simulateur « bas coût » par rapport à la conduite sur route. Il est néanmoins apparu un résultat surprenant avec des mouvements de réversion du volant plus fréquents en conduite réelle qu'en conduite virtuelle. Ce résultat pourrait être lié à une régulation plus importante, sur route, de la trajectoire et de la position dans la voie. A partir de la proposition de Dijksterhuis et al. (2011) ou de Engström et al. (2017) selon laquelle l'augmentation de la charge peut entraîner une amélioration du contrôle de trajectoire, ce résultat pourrait également provenir d'un effort supplémentaire alloué au contrôle latéral sur simulateur « bas coût » qui serait lié à la pauvreté du retour d'informations sur les actions de régulation produite.

Les expériences précédentes ont néanmoins montré que sur simulateur, le taux de réversion du volant augmentait de manière importante sur route rurale. Cette augmentation n'est pas anormale, si l'on considère que c'est un environnement où les exigences en termes de contrôle de trajectoire sont élevées et induisent par conséquent un nombre plus important de mouvements de correction (Young et al., 2009). Il apparaît également que les tracés de route sinueux peuvent être particulièrement problématiques en condition simulée par rapport au réel, impactant notamment les aspects liés au contrôle longitudinal et latéral du véhicule (Bittner et al., 2002 ; Godley, 2002). Cet élément nous a amené à nous intéresser aux caractéristiques du simulateur qui pourraient influencer le contrôle de trajectoire. Plusieurs études ont ainsi mis en évidence un effet de la restitution de mouvement sur le contrôle latéral, les simulateurs de bas niveau entraînant une augmentation de la variabilité de la position latérale et du nombre de mouvements de correction au volant comparativement aux simulateurs de plus haut niveau (e.g., Jamson & Jamson, 2010 ; Klüver, Herrigel, Heinrich,

Schöner & Hecht, 2016 ; Rosey & Auberlet, 2014 ; Siegler et al., 2001 ; Suetomi et al., 1995). Les caractéristiques du support visuel ont également fait l'objet de travaux montrant en particulier que la taille du champ visuel influence la vitesse adoptée (Jamson, 2000, 2001 ; Kappé, van Erp, & Korteling, 1999 ; mais voir aussi Chatziastros, Wallis, & Bülthoff, 1999). Il a enfin été envisagé que les difficultés du contrôle de trajectoire sur simulateur trouvent leur origine dans le retour d'effort au volant des simulateurs « bas coût » (Jamson & Jamson, 2010 ; Park et al., 2005). Ce domaine étant moins documenté, nous nous y sommes plus particulièrement intéressés.

La modélisation du retour d'effort du volant comporte plusieurs dimensions, parmi lesquelles le gain, correspondant au rapport entre l'angle de rotation du volant et celui de la voiture (plus le gain est élevé, plus le changement de cap du véhicule augmente pour une variation angulaire donnée du volant) et le couple, correspondant quant à lui à la résistance du volant au mouvement qui lui est appliqué (plus le couple est élevé, plus l'inertie du volant augmente).

Mourant et Sadhu (2002) ont ainsi étudié l'effet du couple sur le comportement des conducteurs dans un tracé sinueux, sur un simulateur à base fixe. Le simulateur était modifié pour permettre l'installation successive de deux volants. Le premier volant disposait d'un système qui le ramenait à sa position initiale quand aucune force ne lui était appliquée. Le second volant disposait d'un couple géré dynamiquement. Les résultats de l'étude ont montré que la présence de couple dans le volant augmentait la validité subjective du dispositif. Mais les effets sur la trajectoire du véhicule se sont révélés assez limités : meilleur positionnement des conducteurs dans certaines courbes, mais pas de diminution des variations de la position latérale. Ce dernier résultat a également été observé dans d'autres études (Liu & Chang, 1995; Park et al., 2005 ; Toffin, Reymond, Kemeny & Droulez, 2003).

Il apparait néanmoins qu'aucune étude n'a, à notre connaissance, manipulé simultanément les deux paramètres de contrôle du volant que sont le couple et le gain. Il paraît donc intéressant de traiter précisément cette question pour déterminer comment ces deux aspects pourraient, ensemble, permettre de réduire les difficultés de contrôle de trajectoire et la charge mentale en vue d'améliorer la validité des simulateurs de conduite statique.

L'objectif de cette dernière expérience était donc de mesurer l'effet du gain (faible ; élevé) et du couple (résistant ; peu résistant) sur le contrôle de la trajectoire et la charge mentale des conducteurs. Nous avons fait l'hypothèse que l'association d'un gain faible et d'un couple élevé aurait un effet bénéfique sur le contrôle de trajectoire, avec une diminution des variations de la position latérale et une diminution du taux de réversion du volant. En effet, cette combinaison devrait permettre de minimiser les erreurs ou les changements de trajectoire de trop grande amplitude et donner des retours d'information mieux exploitables par le conducteur.

4.2. Matériel et Méthode

4.2.1. Participants

Douze participants (8 hommes et 4 femmes) âgés de 21 à 38 ans ont pris part à cette expérience (âge moyen = 29 ans ; SD = 5). Chacun d'entre eux avait une vue normale ou corrigée. Aucun des participants n'a été informé des objectifs précis de l'étude. Tous étaient titulaires du permis de conduire depuis plus de deux ans. Ils détenaient, en moyenne, leur permis de conduire depuis 9,3 ans (SD = 5,5) et ont parcouru un total de 84 000 km en moyenne (SD = 80 000) depuis son obtention. Enfin, ils ont accepté les modalités de participation à l'étude et les données qui allaient être enregistrées en signant un consentement libre et éclairé.

4.2.2. Dispositifs expérimentaux

Un simulateur dit « intermédiaire » à base fixe (Figure 31) a été utilisé pour cette expérience. Ce simulateur était composé d'un poste de conduite mono-place équipé de deux portières, d'un siège avec ceinture de sécurité, d'un tableau de bord avec compteur de vitesse et compte-tour et de commandes fonctionnelles (frein à main, pédales d'embrayage, de frein et d'accélérateur, boîte de vitesse et volant équipé d'un servomoteur) et d'un système de restitution visuelle par rétroprojection composé de trois écrans. Chaque écran mesurait 1,85 m de large x 2,50 m de haut. Les écrans étaient disposés en triptyque de telle sorte que le centre de chaque écran était situé à 2,80 m des yeux du participant. Dans ces conditions, la taille du champ visuel horizontal et vertical était respectivement de 108 et 48 degrés. La résolution de l'image était de 1024 x 1280 pixels. La fréquence de rafraîchissement de l'image était de 30 Hz. Enfin, le système de restitution sonore était composé de deux enceintes, situées en arrière et de part et d'autre du siège. Pour l'enregistrement des données oculaires, nous avons utilisé le même oculomètre de marque Pertech que dans les expériences n°1 et 2.

Figure 31 : Illustration du simulateur de conduite intermédiaire utilisé dans l'expérience 4

4.2.3. Plan expérimental et tâche

Au cours de cette expérience, le gain (élevé ; faible) et le couple du volant (résistant ; peu résistant) ont été manipulés, donnant lieu à un plan 2 x 2, soit un total de 4 conditions expérimentales.

Un travail préparatoire a permis de déterminer les deux valeurs de gain et de couple. L'association « gain faible ; couple résistant » a été testée empiriquement pour permettre aux conducteurs d'aborder les virages les plus prononcés (rayon de courbure = 150 m) à une vitesse de 100 km/h sans sortir de la voie (en considérant que le véhicule se trouve au centre de sa voie avant d'entrer dans la courbe). Le couple peu résistant correspondait au couple minimal permis par le dispositif. La valeur du gain élevé a été fixée de manière subjective par les expérimentateurs, avec la participation de personnels internes au LEPSIS et qualifiés dans le développement des simulateurs de conduite. L'objectif était de proposer une valeur de gain cohérente avec ce qui existe sur un véhicule en réel. Les valeurs de gain et de couple choisies sont présentées dans le Tableau 4.

Tableau 4 : Valeurs de gain et de couple appliquées au retour d'effort du volant (Expérience 4)

Gain (facteur multiplicatif pour 1° volant)		Couple (Nm)	
Faible	Elevé	Peu résistant	Résistant
4	16	0,0001	0,1

Les participants ont conduit dans l'environnement rural utilisé lors des deux premières expériences. Pour mémoire, cet environnement consistait en un circuit de 6,4 km de long, composé d'un enchaînement de virages et de lignes droites. Les lignes droites, d'une longueur de 100 m, étaient présentes entre chaque virage. Les virages, au nombre de 20, avec 12 virages à gauche et 8 virages à droite, étaient de longueur variable et avaient deux rayons de

courbure différents (150 et 300 m). La vitesse pour l'ensemble du parcours était limitée à 90 km/h.

4.2.4. Procédure

A leur arrivée, les participants étaient informés du déroulement de l'étude avant de remplir une fiche de renseignement et de signer un formulaire de consentement libre et éclairé. Ils étaient ensuite invités à s'installer dans le simulateur afin de régler la position du siège, avant d'être équipé de l'oculomètre. Après une phase de calibration du dispositif, ils réalisaient successivement les quatre sessions de conduite, présentées de manière contrebalancée entre les participants. Aucune phase de familiarisation au dispositif n'a été prévue, puisque le sujet de cette expérience portait sur l'une des commandes principales du simulateur. A chaque session, les participants devaient effectuer un tour complet du circuit, soit un temps de conduite d'environ 5 minutes. Ils recevaient pour consigne de respecter la limitation de vitesse et de se comporter comme ils le feraient en situation réelle de conduite. A la fin de chaque session, ils remplissaient le NASA-TLX. A la fin de l'épreuve, après avoir quitté le simulateur, les conducteurs indiquaient la configuration qu'ils ont préférée. Au total, la durée de l'expérience était environ égale à 45 minutes.

4.2.5. Analyse des données

Comme dans les expériences précédentes, la fréquence des clignements, le score au NASA-TLX et le taux de réversion du volant ont été analysés afin de rendre compte de la charge mentale. La vitesse moyenne (en km/h) ainsi que la variabilité de la position latérale du véhicule (en mètre) ont également été comparées entre les différentes conditions expérimentales.

4.3. Résultats

4.3.1. Clignements

Une ANOVA à mesures répétées 2 valeurs de gain x 2 valeurs de couple a été réalisée sur la fréquence des clignements. Les résultats de l'analyse n'ont pas révélé d'effet du gain ($F(1,11) = 0.1$, $p = .72$), du couple ($F(1,11) = 0.1$, $p = .71$), ni d'interaction entre les deux facteurs ($F(1,11) = 2.9$, $p = .12$). Pour information, la fréquence des clignements en fonction des configurations du retour d'effort du volant est donnée dans le Tableau 5.

4.3.2. Comportements de conduite

L'ANOVA à mesures répétées réalisée sur la vitesse moyenne n'a pas révélé d'effet du gain ($F(1,11) = 0.3$, $p = .57$), du couple ($F(1,11) = 0.6$, $p = .45$), ni d'interaction entre les deux facteurs ($F(1,11) = 0.3$, $p = .62$). La vitesse des conducteurs en fonction des configurations du retour d'effort du volant est donnée dans le Tableau 5.

La variation de la position latérale du véhicule et le taux de réversion du volant rendant compte de la stabilité du contrôle de trajectoire lors de la négociation de virage, ces deux variables ont été analysées en fonction du rayon de courbure des virages. Nous avons ainsi distingué les virages plus prononcés (avec un rayon de courbure de 150 m) des virages moins prononcés (avec un rayon de courbure de 300 m). Il était en effet possible que le gain et le couple aient des effets sur la stabilité du contrôle de trajectoire uniquement lorsque les exigences en matière de contrôle augmentent.

L'ANOVA à mesures répétées 2 catégories de virage x 2 valeurs de gain x 2 valeurs de couple sur la variabilité de la position latérale du véhicule a mis en évidence un effet principal de la catégorie de virage, $F(1,11) = 9.2$, $p < .05$, $\eta^2 = .45$, et un effet principal de la valeur du gain, $F(1,11) = 19.29$, $p < .05$, $\eta^2 = .64$. La variabilité de la position latérale du véhicule était plus élevée dans les virages prononcés (M = 0,26 m) que dans les virages moins prononcés (M = 0,23 m). Par ailleurs, la position latérale du véhicule était plus variable

lorsque le retour d'effort du volant proposait un gain faible (M = 0,27 m) comparée aux conditions avec un gain élevé (M = 0,22 m).

L'ANOVA à mesures répétées 2 catégories de virage x 2 valeurs de gain x 2 valeurs de couple sur le taux de réversion du volant a mis en évidence un effet principal de la catégorie de virage, $F(1,11) = 10.68$, $p < .01$, $\eta^2 = .49$, une interaction entre la catégorie de virage et la valeur du gain, $F(1,11) = 16.73$, $p < .01$, $\eta^2 = .60$, et une interaction entre la valeur du gain et la valeur du couple, $F(1,11) = 8.21$, $p < .05$, $\eta^2 = .43$.

Le taux de réversion du volant était significativement plus faible dans les virages prononcés (M = 42 réversions par minute) en comparaison aux virages moins prononcés (M = 49 réversions par minute). Sur l'interaction entre la catégorie de virage et la valeur du gain, le test post-hoc a révélé que dans les virages prononcés, le taux de réversions était plus élevé quand les propriétés du volant proposaient un gain élevé comparé aux configurations qui proposaient un gain faible. Pour les virages moins prononcés, la valeur du gain n'avait pas d'effet sur le taux de réversion du volant (Figure 32). Enfin, sur l'interaction entre le gain et le couple, le test post hoc a révélé que, lorsque le gain était faible, la configuration proposant un couple plus élevé dans le volant entrainait plus de réversion que la configuration qui en proposait un plus faible. Lorsque le gain était élevé, la valeur du couple n'avait pas d'effet sur le taux de réversion du volant (Figure 33).

4.3.3. Mesures subjectives

L'ANOVA réalisée sur le score au NASA-TLX n'a pas révélé d'effet principal ou d'interaction significative. Le score au NASA-TLX en fonction des configurations du retour d'effort du volant est donné dans le Tableau 5.

Enfin, parmi les douze conducteurs interrogés, six ont déclaré préférer la configuration « gain élevé, couple résistant », trois la configuration « gain faible, couple peu résistant »,

deux ont préféré la configuration « gain élevé, couple peu résistant » et un seul a mentionné la configuration « gain faible, couple résistant ».

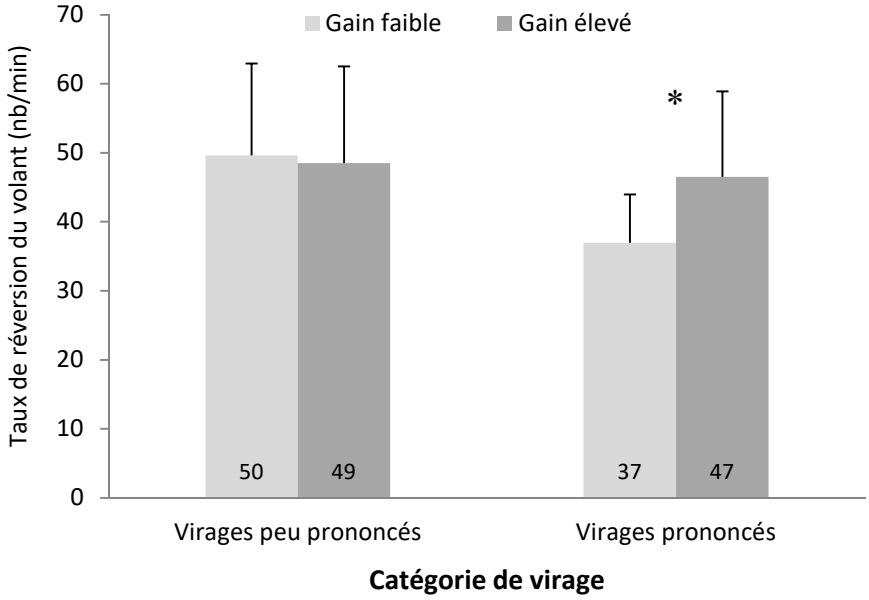


Figure 32 : Interaction entre la catégorie de virage et le gain sur le taux de réversion du volant (nb/min)

Les barres d'erreur représentent l'écart type. Un astérix indique la(les) condition(s) qui se distingue(nt) significativement des autres.

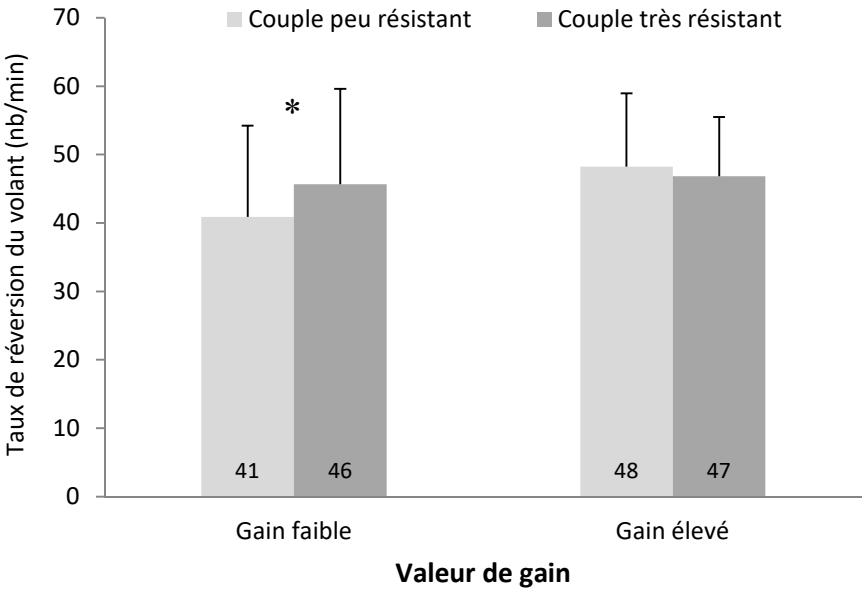


Figure 33 : Interaction entre le gain et le couple sur le taux de réversion du volant (nb/min)

Les barres d'erreur représentent l'écart type. Un astérix indique la(les) condition(s) qui se distingue(nt) significativement des autres.

Tableau 5 : Moyennes (et écart-type) de la fréquence des clignements, de la vitesse et du score au NASA-TLX en fonction du couple et du gain

	Gain faible		Gain élevé	
	Couple peu résistant	Couple résistant	Couple peu résistant	Couple résistant
Fréquence des clignements	3,1 (3,3)	2,5 (2,2)	2,6 (2,9)	3,6 (3,3)
Vitesse pratiquée (km/h)	87,4 (11)	87,6 (14)	86 (14)	87,6(13)
Score moyen au NASA-TLX	29 (13)	40 (22)	31 (13)	29 (12)
Préférence	3	1	2	6

4.4. Discussion

A partir des résultats obtenus dans les expériences précédentes et en nous appuyant sur la littérature, nous avons suggéré que le retour d'effort au volant pouvait constituer un levier intéressant pour réduire le niveau de charge mentale sur simulateur et par la même améliorer la validité. Dans ce cadre, l'objectif de notre expérience était de mesurer l'effet combiné du gain (faible ; élevé) et du couple (résistant ; peu résistant) sur le comportement et la charge mentale des conducteurs. Notre hypothèse était que l'association d'un gain faible avec un couple élevé aurait un effet bénéfique sur le contrôle de trajectoire, avec une diminution des variations de la position latérale des véhicules et une diminution du taux de réversion du volant. Il était de plus attendu que cet effet bénéfique sur le contrôle de trajectoire réduise le niveau de charge.

Les résultats obtenus ne confirment que très partiellement ces hypothèses. Il est d'abord apparu une absence d'effet des variables de retour d'effort sur la fréquence des clignements, le score du NASA-TLX et la vitesse lorsque les données ont été traitées de manière globale. Le Tableau 6 présente une synthèse des effets sur les différentes variables.

Tableau 6 : Synthèse des effets sur les différentes variables (Expérience 4)

	Fréquence de clignements	Vitesse	Variation de la position latérale	Taux de réversion	NASA-TLX
Catégorie de virage	-	-	☑ virage 150 > virage 300	☑ virage 300 > virage 150	-
Gain	n.s.	n.s.	☑ gain faible > gain élevé	n.s.	n.s.
Couple	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
Catégorie de virage x Gain	-	-	n.s.	☑ virage 150 gain élevé > virage 150 gain faible	-
Catégorie de virage x Couple	-	-	n.s.	n.s.	-
Gain x couple	n.s.	n.s.	n.s.	☑ gain faible couple élevé > gain faible coupe faible	n.s.
Catégorie de virage x Gain x Couple	-	-	n.s.	n.s.	-

Si la distinction entre virages prononcés et virage moins prononcés a donné des résultats cohérents au niveau de la variabilité de la position dans le virage (position plus variable en virages prononcés qu'en virages moins prononcés), cela n'a pas été le cas pour le taux de réversion qui était plus élevé dans les virages les moins prononcés. Ce résultat interroge à nouveau sur la signification de cet indicateur qui peut varier sous l'effet de différents facteurs tels que la difficulté de la tâche et par exemple la courbure du virage, mais aussi l'implication dans la conduite et la volonté de conserver une trajectoire la plus contrôlée possible. Ceci est confirmé par des interactions observées avec les variables gain et couple qui paraissent difficiles à interpréter.

La fréquence des clignements n'a pas montré de différence en fonction des variations des propriétés du volant. Cela montre peut être aussi la limite de cette variable comme indicateur de la charge mentale, même si les scores de NASA TLX ne montrent pas non plus de différence et qu'il est possible que les variations des propriétés du volant n'aient que peu affecté la charge induite par la conduite. A ce niveau, nous pouvons regretter de ne pas avoir utilisé de double tâche qui aurait pu confirmer cette interprétation.

Il faut noter aussi au niveau des clignements leur taux très faible (au maximum égal à 3,6 clignements par minute) et bien inférieure à celle que nous avions pu relever, par exemple, dans la première expérience (7,9 clignements par minute dans l'environnement rural, en condition de tâche simple et sans trafic). Cela montre à nouveau une variable très sensible aux différences interindividuelles.

Enfin, il n'apparait pas de convergence entre les préférences déclarées par les participants pour un gain élevé et un couple résistant et les résultats obtenus au niveau des différentes variables. L'absence de cohérence dans ces derniers ne permet malheureusement pas de conclure à une indépendance entre perception subjective et analyse objective.

En conclusion, les résultats de cette expérience sont assez décevants dans le sens où ils ne permettent pas véritablement d'apporter des données alimentant la problématique de la validité des simulateurs. Ceci n'est pas totalement surprenant par rapport aux travaux antérieurs. En effet, les études de Mourant et Sadhu (2002) et de Park et al. (2005) n'ont pas montré que la présence d'un couple dans le volant permettait d'améliorer la position latérale du véhicule. Un seul résultat de la littérature fait état d'un effet significatif de la valeur du couple sur la variation de la position latérale du véhicule (Grant et al., 2006). Cette étude portait sur l'évaluation d'un simulateur de tracteur agricole et les valeurs de couple (2,5 Nm et 10 Nm) étaient bien plus importantes que celles que nous avons utilisées.

Cela peut laisser penser que le choix de nos valeurs de gain et de couple ne se soit pas situé dans des gammes permettant de fournir un vrai avantage dans la conduite. Il est aussi possible que les conducteurs soient capables de s'adapter très vite à de nouvelles propriétés du volant, ou bien à l'inverse, qu'il faille des temps de pratique plus importante pour que des différences apparaissent. La question du retour d'effort dans le contrôle de la trajectoire reste donc largement ouverte et doit être approfondie très certainement de manière combinée avec la restitution de mouvement appliquée à l'habitacle du véhicule.

Chapitre 4 : Discussion générale

Depuis une quinzaine d'années et avec l'intensification des politiques de sécurité routière, on observe un recours de plus en plus fréquent à la réalité virtuelle et aux simulateurs de conduite afin de mieux comprendre les comportements des conducteurs. Dans cette perspective, la validité de ces dispositifs revêt une grande importance pour évaluer la portée des résultats obtenus et leur application aux situations réelles. Cette question essentielle, posée dès l'apparition des premiers simulateurs, reste néanmoins toujours d'actualité. Il apparait notamment que les avancées permanentes au plan technologique et informatique font progresser les possibilités d'utilisation des systèmes de réalité virtuelle avec des caractéristiques mécaniques, matérielles et logicielles de plus en plus nombreuses. Il apparait aussi que la diversité des domaines d'application doit aussi être prise en compte (Pinto et al., 2008).

C'est sans doute pour ces raisons que les recherches traitant de la validité des dispositifs de réalité virtuelle et des simulateurs de conduite utilisent une pluralité de concepts pour en rendre compte. S'il est probablement illusoire de définir une seule notion regroupant tous les critères de ce que l'on doit trouver dans un simulateur, nous avons souligné que très peu d'études se sont inscrites dans une démarche d'évaluation consistant à confronter différentes dimensions de la validité. Ce type de démarche pourrait contribuer comme le proposent Burkhardt et al., (2003) et comme nous l'avions indiqué dans l'introduction de ce travail, au développement à la fois théorique et pratique d'une métrologie des Environnements Virtuels.

Dans ce contexte, ce travail de thèse avait pour objectif de traiter la question de la validité des simulateurs, au travers de la confrontation entre différentes dimensions de la validité. Ainsi, pour compléter l'approche classique de la validité comportementale, nous nous sommes intéressés à la charge mentale, cette dernière étant une dimension particulière de la validité psychologique définie par Malaterre et Fréchaux (2001). En nous appuyant sur une

approche comparée de la charge mentale, ce travail de thèse a poursuivi quatre objectifs principaux. Il s'agissait (i) d'examiner dans quelle mesure la validité psychologique, abordée sous l'angle de la charge mentale, contribue à l'évaluation d'un simulateur de conduite dit « bas coût » comparativement à la validité comportementale. Il s'agissait aussi (ii) d'évaluer la fiabilité et la robustesse des clignements oculaires comme indicateur de la charge mentale dans le contexte de la conduite automobile, à partir d'une approche comparative de différentes variables la mesurant. A l'aide des éléments dégagés par les deux premiers objectifs, ce travail visait (iii) à déterminer si la conduite sur simulateur (« bas coût ») entraîne un niveau de charge mentale supérieur à la conduite sur route. Enfin, si tel était le cas, le dernier objectif était (iv) de tester et de proposer des pistes d'amélioration des simulateurs de conduite« bas coût ».

Dans les trois premières expériences, la manipulation de facteurs pouvant affecter la charge mentale tels que l'environnement de conduite, la présence ou non de trafic en sens inverse, la présence ou non d'une tâche secondaire ainsi que sa difficulté ou encore la condition de conduite (sur route ou en simulation), n'a pas produit les mêmes effets en fonction des différents indicateurs de la charge utilisés.

Dans une première partie de cette discussion, nous chercherons à montrer à partir des convergences et divergences mises en évidence entre les différents indicateurs que cet effet différentiel peut être un point-clé permettant de mieux comprendre la relation entre facteurs et mesures de la charge. Cela nous amènera également à considérer les intérêts et les limites des clignements oculaires comme mesures de la charge dans le contexte de la conduite automobile.

Dans une seconde partie, nous défendrons l'idée, principalement à partir de la comparaison entre conduite virtuelle et conduite réelle, que l'évaluation d'un simulateur de

conduite ne peut se passer d'une approche multidimensionnelle de la validité pour mieux en comprendre les effets sur les utilisateurs.

1. Les indicateurs de la charge mentale : Entre convergence et divergence

Au cours de ce travail, différentes mesures de la charge mentale ont été utilisées, allant des mesures subjective (score au NASA-TLX) et comportementale (temps de réponse à une tâche subsidiaire, comportements de conduite) relativement bien connues à la mesure de la fréquence de clignements moins fréquemment utilisée. Chacune de ces mesures possède ses avantages et ses limites, comme cela a été présenté dans la revue de littérature, et comme nous avons également pu le confirmer au cours de ce travail. Afin de mettre en évidence les phénomènes de convergence et de divergence entre ces différentes mesures, l'analyse comparative a porté sur trois niveaux. D'abord, nous avons examiné si les différentes mesures produisaient des résultats similaires d'une expérience à l'autre notamment sous l'effet de la complexité de l'environnement de conduite. Ensuite, nous avons évalué si les résultats amenés par une mesure donnée étaient similaires à celles amenés par d'autres mesures et aux résultats observés dans la littérature. Enfin, nous avons cherché à vérifier si une mesure était sensible à une source de charge en particulier, ou si elle répondait indifféremment à plusieurs sources (e.g., la complexité de l'environnement et le trafic).

En ce qui concerne les scores au NASA-TLX, les résultats ont montré une cohérence forte d'une expérience à une autre. Il est d'abord apparu dans les deux premières expériences que le score au NASA-TLX augmentait pour les sessions de conduite dans l'environnement urbain, par rapport à l'environnement rural et à l'environnement voie rapide. Il est également apparu dans les trois premières expériences que ces scores augmentaient systématiquement avec l'introduction d'une tâche secondaire. Le NASA-TLX a permis, par ailleurs, de

distinguer comme attendu, dans l'expérience 2, les trois tâches en fonction de leur complexité (conduite seule, double tâche TR et double tâche calcul), au contraire d'autres indicateurs.

Bien que l'on ne puisse pas déterminer avec certitude, à partir de mesures subjectives telles que celles du NASA-TLX, que les réponses soient données par rapport à l'engagement des ressources et non par rapport à des représentations fluctuant d'un participant à l'autre (Cain, 2007 ; Hart & Staveland, 1988), il faut relever une certaine cohérence à travers les expérimentations notamment avec le temps de réaction à la tâche secondaire. Cette convergence a pu par exemple être observée dans la troisième expérience, avec des effets similaires de la condition de conduite et dans la seconde expérience, avec des effets similaires de la complexité de l'environnement.

En ce qui concerne le taux de réversion du volant et la fréquence des clignements, ces deux indicateurs ont démontré des convergences importantes, modulées cependant par une cohérence relative quant à l'effet de l'environnement de conduite. Le taux de réversion du volant a en effet permis de suggérer une augmentation de la charge mentale lorsque les demandes en termes de contrôle du véhicule augmentent en lien avec la géométrie de la route (c'est-à-dire dans l'environnement rural pour les expériences 1, 2 et 3). Cet indicateur était également sensible à l'augmentation de la charge mentale liée à l'introduction d'une tâche secondaire cognitive. Ce résultat est cohérent d'une part avec ceux rapportés par exemple par Jamson & Merat (2005) et d'autre part avec ceux observés sur la fréquence des clignements.

Pour ce dernier indicateur, les trois premières expériences ont mis en évidence la sensibilité des clignements à l'évolution de la charge mentale sous l'effet de la complexité de l'environnement de conduite. Dans chaque expérience, il est apparu que les deux environnements a priori les plus sollicitant en termes attentionnels (rural et urbain) faisaient baisser le nombre de clignements par rapport à l'environnement le moins sollicitant (voie rapide). Ce résultat va dans le sens des travaux antérieurs montrant une diminution de la

fréquence de clignements lorsque la difficulté de la tâche (primaire) augmente (Benedetto et al., 2014 ; Hancock et al., 1990 ; Holland & Tarlow, 1972 ; Van Orden et al., 2001). Ce phénomène d'inhibition des clignements viserait à préserver le processus de traitement de l'information lorsque les demandes de la tâche augmentent (Fogarty & Stern, 1989). La baisse de la fréquence des clignements lors de la conduite sur simulateur comparativement à la conduite sur route a ainsi constitué l'un des éléments qui nous a amené à conclure à l'augmentation de la charge mentale en virtuel. La seconde expérience de la thèse a, d'autre part, permis de confirmer que la réalisation d'une tâche secondaire cognitive entraînait une augmentation de la fréquence des clignements, ce qui est cohérent avec la littérature (e.g., Benedetto et al., 2014 ; Savage et al., 2013 ; Tsai et al., 2007). Ces résultats confirment ainsi que la fréquence de clignements est sensible à la complexité de la tâche, que cette complexité provienne de facteurs environnementaux ou liés à la nature de la tâche (simple ou double tâche).

Le taux de réversion du volant et la fréquence des clignements présentent néanmoins certaines limites. Les résultats de la troisième expérience ont montré que le taux de réversion du volant était significativement plus élevé en réel, comparé aux deux conditions simulées. Selon la littérature, ce pattern de résultats signifierait une hausse du niveau de charge en conduite réelle, alors que les autres indicateurs (NASA-TLX, TR au son et fréquence de clignements) suggèrent au contraire un niveau de charge plus élevé lors de la conduite sur simulateur. Cela nous a amené à considérer que la baisse du taux de réversion du volant en virtuel pourrait en définitive provenir d'aspects stratégiques. A partir des résultats de Dijksterhuis et al. (2011), Mecheri et al. (2017) et Mecheri et Lobjois (soumis), il est en effet possible que sur simulateur « bas coût », les participants se soient positionnés sur la partie extérieure de la voie de façon à s'éloigner du trafic et qu'ils aient conservé cette position, entraînant par conséquent une réduction des mouvements de correction de la trajectoire. Les

résultats de la quatrième expérience suggèrent également l'existence d'une dimension stratégique dans le taux de réversion du volant. Alors que la variabilité de la position latérale augmentait avec la courbure du virage, le taux de réversion du volant diminuait. Ce pattern de résultats va dans le sens d'une stratégie bien connue dans le contrôle de trajectoire consistant à couper les virages, à savoir se positionner vers l'extérieur de la voie avant d'entrer dans le virage puis se diriger vers l'intérieur du virage au niveau de l'apex (Mars, 2008 ; Robertshaw & Wilkie, 2008). Couper les virages permet de réduire les actions de correction de la trajectoire et de minimiser les décélérations (Kandil, Rotter & Lappe, 2009 ; Raw et al., 2012). De plus, cette stratégie est d'autant plus marquée que la courbure du virage augmente (e.g., Mecheri & Lobjois, soumis). Les résultats obtenus dans la dernière expérience vont dans le sens de cette stratégie, avec une variabilité de la position latérale qui augmente avec la courbure et un nombre de réversion de l'angle au volant qui diminue.

En ce qui concerne les clignements, les résultats de la seconde expérience ont montré que lorsque la charge mentale variait sous l'effet de l'augmentation conjointe de la difficulté de la tâche primaire et de la tâche secondaire, les clignements n'étaient pas en mesure de dissocier l'origine de la charge. Bien qu'une tendance à la baisse de la fréquence des clignements ait été observée dans la condition de double tâche calcul mental lorsque l'environnement de conduite était plus exigeant (M = 15,2, 13,7 et 11,2 clignements par minute pour respectivement la voie rapide, l'environnement rural et l'environnement urbain), ce qui suggère que l'inhibition des clignements n'a pas été complètement éliminée sous l'effet de l'augmentation de la charge cognitive, l'interaction entre l'environnement de conduite et les conditions de double tâche sur la fréquence des clignements n'était pas significative. Ce résultat souligne la limite des clignements lorsqu'il s'agit de distinguer les sources de la charge lorsqu'elles varient simultanément. Cela conduit, par exemple, à une fréquence de clignements

qui ne différait pas entre conduire dans un environnement exigeant tout en réalisant une tâche secondaire cognitive et conduire librement dans un environnement peu exigeant.

Il faut aussi souligner que les résultats obtenus dans les quatre expériences montrent une variabilité interindividuelle très importante de cet indicateur. Nous avons tenté d'expliquer une partie de cette variabilité en réalisant des analyses de corrélation entre la fréquence de clignements d'une part, et l'âge et l'expérience de conduite, mais ces analyses n'ont révélé aucun lien de corrélation entre ces facteurs. Enfin, si les expériences 3 et 4 ont révélé des fréquences de clignements particulièrement faibles par rapport aux deux premières, les données que l'on peut retrouver dans la littérature montrent également des fréquences très variables d'une étude à une autre (Tableau 7), sans qu'il soit possible pour le moment de donner une autre explication que les particularités des participants testés et des tâches utilisées. A ce niveau, la cohérence relative des variations de la fréquence des clignements pour une même tâche et avec les mêmes participants doit prévaloir.

Tableau 7 : Fréquences moyennes de clignements (nb/min) selon la nature de la tâche, extraites de la littérature.

Référence	Nature de la tâche	Fréquence des clignements (nb/min)
Bentivoglio et al., 1997	Attendre Lire un texte court Parler librement	M = 17 M = 4,5 M = 26
Fukuda et al., 2005	Tâche de mémoire	M = 4,92
Tsai et al., 2007	Conduite automobile Conduite + calcul	M = 6,3 M = 9,9
Savage et al., 2013	Détection visuelle Détection visuelle + résolution de problème	M = 17 M = 26,4
Recarte et al., 2008	Détection visuelle Détection visuelle + écouter un texte Détection visuelle + parler Détection visuelle + calcul mental	M = 4 M = 8 M = 16 M = 14

Sur la base des convergences et divergences entre mesures de la charge observées à l'issue des deux premières expérimentations, nous avons envisagé l'éventualité que certaines de ces mesures seraient plus sensibles à certaines sources de variation de la charge. Si la question de la convergence entre mesures de la charge n'est pas nouvelle (e.g., Paxion, 2014 ; Paxion et al., 2014), celle de la sensibilité de certaines mesures à des facteurs spécifiques de la charge n'a, à notre connaissance, jamais été proposée. Ainsi, la fréquence des clignements ainsi que le taux de réversion du volant pourraient être sensibles aux exigences au plan opérationnel de la tâche de conduite tandis que le temps de réaction au son et le ressenti subjectif seraient sensibles à la richesse de l'environnement. Cette hypothèse trouve, en effet, un écho dans les travaux de Mestre, Deniaud et Honnet (2017) qui ont fait varier la richesse visuelle de la scène en manipulant la quantité d'objets présents ainsi que leur texture. Ils ont montré que la variabilité de la position latérale était inférieure dans l'environnement le plus pauvre et ont proposé que cet effet provienne de l'absence de distracteurs dans la scène, les conducteurs pouvant se focaliser sur le guidage du véhicule. Dans le présent travail, les environnements voie rapide et route rurale se caractérisaient également par l'absence de distracteurs. Les conducteurs ont donc pu se concentrer sur le contrôle du véhicule. En urbain, au contraire, la présence d'éléments dans la scène peut avoir imposé aux conducteurs un partage de l'attention entre le contrôle du véhicule et la prise en compte de ces éléments. Cela affecterait le temps de réaction au son, qui viendrait se surajouter à ce premier partage, et la perception de la situation au plan subjectif. Cette hypothèse reste néanmoins à confirmer en manipulant, par exemple, la géométrie de la route et la richesse visuelle de la scène de façon plus contrôlée. De manière générale, ces résultats soutiennent le principe de l'utilisation d'une approche multi-mesures de la charge mentale pour mieux en rendre compte.

2. Comparaison réel – virtuel, validité du simulateur « bas coût » et possibilité d'amélioration

2.1. Rappels sur la question de la validité des simulateurs

La validité des simulateurs de conduite est traditionnellement évaluée suivant plusieurs dimensions : physique, subjective, comportementale ou encore psychologique. Un consensus existe cependant sur le fait qu'il n'est pas réaliste d'élaborer des simulateurs ayant une parfaite validité physique. Ce consensus a probablement façonné la démarche générale de l'évaluation des dispositifs de réalité virtuelle qui consiste à mesurer les effets de ses caractéristiques immersives et interactives sur le positionnement des utilisateurs. L'essentiel des travaux portant sur la validité des simulateurs de conduite s'est appuyé sur des mesures subjectives et comportementales (Bella, 2008 ; Godley et al., 2002 ; Törnros, 1998). Pourtant, les quelques études qui ont confronté plusieurs dimensions de la validité ont montré que ces deux niveaux avaient une sensibilité très différente aux paramètres d'une simulation. Par exemple, Lobjois et al. (2013, 2016) ont montré que certaines caractéristiques d'un simulateur (validité physique) peuvent avoir des effets positifs sur le ressenti des utilisateurs (validité subjective) mais cependant modifier sensiblement le comportement et les processus qui le sous-tendent (validité psychologique). En considérant la question de la charge mentale utilisée comme un indicateur de validité psychologique, nous avons proposé que le coût cognitif d'une tâche réalisée en simulateur pouvait être différent de celui mesuré en réel, sans pour autant que cela affecte significativement le comportement des opérateurs (Alm, 1995 ; Engström et al., 2005). A partir du modèle de la conduite de Michon (1985) et du modèle de la charge attentionnelle de De Waard (1996) nous avons donc formulé des hypothèses précises quant à l'effet d'un dispositif de réalité virtuelle à la fois sur le niveau comportemental et psychologique :

1. si le dispositif affecte le niveau opérationnel, les comportements de conduite se dégradent lors de la conduite sur simulateur comparativement à la conduite sur route. Des mesures comportementales seules permettent donc d'attester d'un défaut de la validité du dispositif (y compris au niveau psychologique) ;
2. si le dispositif n'affecte pas le niveau opérationnel, les performances sont similaires entre réel et virtuel. En parallèle, soit le niveau de charge mentale ne diffère pas entre ces deux conditions, et cela atteste de la validité comportementale comme psychologique du dispositif, soit la charge mentale est supérieure dans une des conditions. Le recours à des mesures de cette dimension de la validité psychologique permet donc de dépasser les mesures de la validité comportementale, pour mieux cerner le positionnement de l'utilisateur face au dispositif.

Dans ce contexte, l'un des éléments marquant de cette thèse a reposé sur une comparaison entre conduite réelle et conduite sur simulateur. Cette étude a été réalisée au CEREMA de la DTerOuest, avec un véhicule instrumenté et un simulateur « bas coût » à base fixe. L'objectif était de comparer la conduite sur route et la conduite sur un simulateur « bas coût », en confrontant des mesures comportementales classiques et des mesures de la validité psychologique examinée sous l'angle de la charge mentale.

2.2. Synthèse sur la confrontation entre différents niveaux de validité

Les résultats de la comparaison entre réel et virtuel à partir de différents indicateurs ont mis en évidence que la fréquence des clignements était plus faible, le temps de réaction à une tâche secondaire (réponse vocale à un stimulus sonore) était plus long et le score du NASA-TLX était plus élevé lors des sessions de conduite avec le simulateur « bas coût » que lors des sessions de conduite avec le véhicule instrumenté. Ces résultats indiquent une augmentation du niveau de charge mentale lorsque la tâche de conduite est réalisée en virtuel

en comparaison avec la condition en réel. Dans le même temps, nous avons observé, au niveau des mesures comportementales, que la vitesse était similaire en réel et en virtuel sur la plus grande partie du parcours et que le taux de réversion du volant évoluait bien sous l'effet des demandes de l'environnement en termes de contrôle du véhicule, que la tâche soit réalisée en réel ou en virtuel.

Si la vitesse des conducteurs et le taux de réversion du volant permettent de conclure à la validité comportementale relative du simulateur « bas coût » au sens défini par Blaauw (1982), les résultats obtenus laissent apparaître que le dispositif de réalité virtuelle que nous avons utilisé est limité du point de vue de la validité psychologique puisqu'il engendre un niveau de charge mentale plus élevé qu'en conduite réelle. Ces résultats vont ainsi dans le sens des travaux de Blaauw (1982) et Alm (1995) qui ont mis en évidence des comportements similaires entre conduite sur route et sur simulateur mais montré, à partir de mesures subjectives, une augmentation de la charge mentale dans cette dernière condition. Elles renforcent aussi les observations de Chen et al. (2015) qui ont révélé, pour une tâche de pointage et grâce à des mesures de temps de réaction à une tâche secondaire, que la demande attentionnelle de la tâche réalisée en virtuel était supérieure à son équivalent en réel.

Le fait que les conducteurs parviennent à maintenir un bon niveau de performance pour le contrôle longitudinal du véhicule malgré une augmentation du niveau de charge mentale en simulateur peut être interprété au regard du modèle de la conduite de Michon (1985) et du modèle de la charge mentale et de la performance décrit par De Waard (1996). On peut ainsi faire l'hypothèse que les demandes de la tâche en réel évoluent entre un niveau « moyen » de sollicitation attentionnelle dans l'environnement voie rapide et un niveau « assez élevé » dans les environnements rural et urbain. Dans l'environnement voie rapide, il y a un équilibre entre les exigences de la tâche et les capacités des conducteurs, ce qui induit théoriquement un faible niveau de charge mentale. On peut supposer que la charge mentale

augmente sensiblement dans le reste du parcours, en lien avec des demandes de la tâche de conduite plus élevées en termes de contrôle de trajectoire ou à cause des interactions possibles avec d'autres usagers. Les conducteurs doivent mobiliser davantage de ressources pour maintenir un bon niveau de performance dans le contrôle de trajectoire. C'est ce qui semble se vérifier dans notre expérience, puisque l'on observe à la fois une diminution de la fréquence des clignements et une augmentation des mouvements de correction (à travers le taux de réversion du volant).

Le faible nombre de clignements, le score du NASA-TLX et la dégradation de performance à la tâche secondaire relevés en virtuel par rapport à la condition sur route laissent penser que les demandes de la tâche de conduite se situent à un niveau élevé. Dans le modèle de De Waard (1996), ce type de situation provoque la mise en place de stratégies d'adaptation. Le conducteur va focaliser la plus grande partie de ses ressources attentionnelles sur la conduite (contrôle latéral et longitudinal du véhicule), en particulier au détriment de la tâche secondaire de temps de réaction. Le fait d'allouer davantage de ressources attentionnelles pour maintenir, à un niveau acceptable, les performances de conduite renvoie directement aux limites des mesures comportementales et s'inscrit parfaitement dans la logique des hypothèses formulées dans le cadre de la combinaison des modèles de De Waard (199) et Michon (1985). Ce résultat souligne en définitive l'intérêt des indicateurs de la charge vis-à-vis des indicateurs comportementaux.

Enfin, pour tenter d'améliorer la validité du simulateur « bas coût », nous avons identifié le manque de réalisme du retour d'effort du volant, alors même que cette interface est essentielle au contrôle de trajectoire (Donges, 1978). Dans l'expérience de comparaison réel/virtuel, le volant du simulateur correspondait classiquement à ceux utilisé pour les jeux vidéo (Logitech G25) avec des propriétés en termes de gain et de couple très éloignées d'un volant réel. Nous avons cherché, dans la quatrième expérience, à mesurer l'effet combiné du

gain (faible ; élevé) et du couple (peu résistant ; très résistant) sur la charge mentale des conducteurs, et sur leur capacité à maîtriser la trajectoire d'un véhicule simulé dans une session de conduite sur un tracé sinueux. Nos résultats ont finalement révélé très peu d'effet du retour d'effort sur la conduite. Plusieurs hypothèses ont été formulées pour expliquer cette absence d'effet du retour d'effort dans les conditions que nous avons manipulées au niveau des indicateurs comportementaux et psychologiques sans que cela ne remette en cause l'intérêt de cette piste de recherche.

3. Conclusion et perspectives

Au cours de ce travail de thèse, et grâce à la confrontation de différents niveaux de validité, nous avons pu souligner l'intérêt de la prise en compte de la charge mentale pour évaluer la validité des simulateurs de conduite. La troisième expérience a mis en évidence une augmentation de la charge mentale pour une tâche de conduite sur un simulateur « bas-coût », ce qui témoigne d'un manque de la validité psychologique, alors même que ce dernier possédait un bon niveau de validité comportementale. Cependant, il est également apparu que la charge mentale liée à une tâche de conduite est un paramètre qui est difficile à mesurer. Il y a un manque de convergence entre plusieurs indicateurs. Les clignements oculaires apparaissent comme un indicateur intéressant de la charge mentale en conduite, même si nous avons identifié plusieurs de ses limites (comme par exemple un effet planché important et une forte variabilité inter-individuelle).

Pour finir, ces travaux de recherche ont permis d'identifier certaines limites des simulateur « bas coût » qui peuvent constituer des pistes de travail à explorer pour améliorer ce type de dispositif et notamment la validité psychologique au niveau de charge mentale.

1. La question du retour d'effort du volant dans le contrôle de trajectoire, posée lors de la quatrième expérience, reste, nous l'avons dit, largement ouverte. Elle doit être

approfondie en travaillant par exemple de manière simultanée sur d'autres aspects du simulateur comme la restitution de mouvements de tout le poste de pilotage (translation longitudinale et latérale, ou inclinaison). Cet aspect de la validité physique a montré des effets positifs dans plusieurs études (e.g. Pinto et al., 2004 ; Siegler et al., 2001). Il pourrait avoir une influence sur la validité subjective de l'expérience de conduite, un tel effet ayant déjà été rapporté dans une étude de Valente et al. (2009). Mais il pourrait également améliorer le niveau opérationnel de la tâche de conduite, avec des effets à la fois sur la validité comportementale et psychologique du dispositif.

2. La question du temps de familiarisation peut également être posée. Lors de la comparaison réel/virtuel, les participants étaient des conducteurs confirmés, qui possédaient leurs permis depuis au moins de deux ans. Mais ils n'avaient jamais été confrontés à une tâche de conduite sur simulateur. Sahami et Sayed (2013) ont souligné que lorsqu'un conducteur commence à utiliser un simulateur, il se familiarise progressivement avec les interfaces pour adapter son style de conduite et ses stratégies. En conséquence, il a besoin de temps pour transférer ses connaissances de la conduite vers la condition simulée (Sahami & Sayed, 2010). Cette phase d'adaptation génèrerait une charge mentale supplémentaire, qui s'atténuerait et tendrait à disparaître lorsque la conduite du simulateur devient plus automatique (Ronen & Yair, 2013 ; Sahami & Sayed, 2013). Ce domaine constitue très certainement une piste intéressante pour déterminer, à partir de la mesure de la charge mentale, quel temps de pratique pourrait être nécessaire pour supprimer des différences entre réel et virtuel qui ne seraient lié qu'à une absence de familiarisation suffisante.

3. Une attention particulière pourrait aussi être portée sur l'effet potentiel de l'expérience de conduite et des différences interindividuelles sur différents marqueurs de la charge mentale. Même si, au cours des études réalisées, nous n'avons pas pu mettre en évidence de corrélation entre l'expérience de conduite et la fréquence des clignements, il a été

montré que ce facteur peut avoir une influence sur les ressources attentionnelles mobilisées dans la tâche de conduite (e.g. Blaaw, 1982 ; Konstantopoulos et al., 2010 ; Lehtonen et al., 2014). Il serait donc particulièrement intéressant de mesurer de quelle manière l'expérience de conduite peut affecter, par exemple, le temps de familiarisation au dispositif ou les réactions des conducteurs faces aux limites du simulateur afin de formuler des recommandations pour s'assurer du niveau de validité des simulateurs par rapport aux utilisateurs. L'utilisation d'un indicateur tel que les clignements oculaires pourraient par exemple nécessiter de déterminer un profil de participant répondant à certains critères de sensibilité.

Bibliographie

Ahlstrom, U., & Friedman-Berg, F. J. (2006). Using eye movement activity as a correlate of cognitive workload. *International Journal of Industrial Ergonomics*, *36*(7), 623-636.

Alm, H. (1995). Driving simulators as research tools – Effects of kinesthetic feedback on driver behaviour. Part of DRIVE project V2065 GEM, Generic Evaluation Methodology for Integrated Driver Support Applications (1995).

Ariën, C., Jongen, E. M., Brijs, K., Brijs, T., Daniels, S., & Wets, G. (2013). A simulator study on the impact of traffic calming measures in urban areas on driving behavior and workload. *Accident Analysis & Prevention*, *61*, 43-53.

Arnaldi, B., Fuchs, P., & Tisseau, J. (2003). Introduction à la réalité virtuelle. In P. Fuchs & G. Moreau (eds.), *Traité de la réalité virtuelle* (volume 1). Les Presses de l'Ecole des Mines de Paris.

Baldwin, C. L., & Coyne, J. T. (2003). Mental workload as a function of traffic density: Comparison of physiological, behavioral, and subjective indices. In *Proceedings of the Second International Driving Symposium on Human Factors* (pp. 19-24). Park City, Utah.

Bauer, L. O., Strock, B. D., Goldstein, R., Stern, J. A., & Walrath, L. C. (1985). Auditory discrimination and the eye blink. *Psychophysiology, 22*, 629–635.

Baus, O., & Bouchard, S. (2017). Exposure to an unpleasant odour increases the sense of presence in virtual reality. *Virtual Reality*, *21*(2), 59-74.

Beatty, J., & Lucero-Wagoner, B. (2000). The pupillary system. In J. T. Cacioppo, L. G. Tassinary, & G. G. Berntson (eds.), *Handbook of Psychophysiology* (p. 142-162). New York, NY, US: Cambridge University Press.

Bella, F. (2008). Driving simulator for speed research on two-lane rural roads. *Accident Analysis & Prevention*, *40*(3), 1078-1087.

Benedetto, S. (2010). *A multidimensional model for evaluating drivers' mental workload*. Thèse de Doctorat, Université de Turin.

Benedetto, S., Lobjois, R., Faure, V., Dang, N. T., Pedrotti, M., & Caro, S. (2014). A comparison of immersive and interactive motorcycle simulator configurations. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, *23*, 88-100.

Benedetto, S., Pedrotti, M., Minin, L., Baccino, T., Re, A., & Montanari, R. (2011). Driver workload and eye blink duration. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, *14*(3), 199-208.

Bentivoglio, A. R., Bressman, S. B., Cassetta, E., Carretta, D., Tonali, P., & Albanese, A. (1997). Analysis of blink rate patterns in normal subjects. *Movement Disorders*, *12*(6), 1028-1034.

Bernardin, F., Bremond, R., Ledoux, V., Pinto, M., Lemonnier, S., Cavallo, V., & Colomb, M. (2014). Measuring the effect of the rainfall on the windshield in terms of visual performance. *Accident Analysis & Prevention*, *63*, 83-88.

Bioulac, S., Lallemand, S., Rizzo, A., Philip, P., Fabrigoule, C., & Bouvard, M. P. (2012). Impact of time on task on ADHD patient's performances in a virtual classroom. *European Journal of Paediatric Neurology*, *16*(5), 514-521.

Bittner, A., Simsek Jr, O., Levison, W., & Campbell, J. (2002). On-road versus simulator data in driver model development driver performance model experience. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1803, 38-44.

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.

Blana, E., & Golias, J. (2002). Differences between vehicle lateral displacement on the road and in a fixed-base simulator. *Human Factors: Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, *44*(2), 303–313.

Boer, E. R., Girshik, A. R., Yamamura, T., & Kuge, N. (2000). Experiencing the Same Road Twice: A Driver centered Comparison between Simulation and Reality. In *Proceedings of the Driving Simulation Conference*, September 6-7, Paris, France.

Borghini, G., Astolfi, L., Vecchiato, G., Mattia, D., & Babiloni, F. (2014). Measuring neurophysiological signals in aircraft pilots and car drivers for the assessment of mental workload, fatigue and drowsiness. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *44*, 58-75.

Boucsein, W., & Backs, R. W. (2000). Engineering psychophysiology as a discipline: Historical and theoretical aspects. *Engineering Psychophysiology. Issues and Applications*, 3-30.

Bouvier, P. (2009). La présence en réalité virtuelle, une approche centrée utilisateur. Thèse de Doctorat, Université Paris-Est.

Brookhuis, K. A., & de Waard, D. (2001). Assessment of drivers' workload: Performance, subjective and physiological indexes. *Stress, Workload and Fatigue*, 321-333.

Brookhuis, K. A., de Vries, G., & de Waard, D. (1991). The effects of mobile telephoning on driving performance. *Accident Analysis & Prevention*, *23*(4), 309-316.

Bueno, M., Fabrigoule, C., Ndiaye, D., & Fort, A. (2014). Behavioural adaptation and effectiveness of a Forward Collision Warning System depending on a secondary cognitive task. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, *24*, 158-168.

Burdea, G., & Coiffet, P. (1993). *La réalité Virtuelle*. Hermès.

Burkhardt, J. M., Bardy, B., & Lourdeaux, D. (2003). Immersion, Réalisme et Présence dans la conception et l'évaluation des environnements virtuels. *Psychologie Française*, *48*(2), 35-42.

Burnett, G. E., Irune, A., & Mowforth, A. (2007). Driving simulator sickness and validity: How important is it to use real car cabins? *Advances in Transportation Studies*, *13*, 33-42.

Buttussi, F., & Chittaro, L. (2017). Effects of different types of virtual reality display on presence and learning in a safety training scenario. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, *99*. https://doi.org/10.1109/TVCG.2017.

Cain, B. (2007). *A review of the mental workload literature*. Defence Research And Development, Toronto (Canada).

Cantin, V. (2009). *Comportements oculaires et charge cognitive des conducteurs jeunes et âgés.* Thèse de doctorat, Université de Laval.

Cantin, V., Lavallière, M., Simoneau, M., & Teasdale, N. (2009). Mental workload when driving in a simulator: Effects of age and driving complexity. *Accident Analysis & Prevention*, *41*(4), 763-771.

Caro, S. (2008). *Perception et contrôle de la distance intervéhiculaire en condition de brouillard: Etude sur simulateur*. Thèse de doctorat, Université Pierre Mendès-France-Grenoble II.

Caro, S., Cavallo, V., Marendaz, C., Boer, E. R., & Vienne, F. (2009). Can headway reduction in fog be explained by impaired perception of relative motion? *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, *51*(3), 378-392.

Carsten, O. M. J., Groeger, J. A., Blana, E., & Jamson, A. H. (1997). Driver performance in the EPSRC driving simulator: a validation study. *Final report to EPSRC Contract No. GR K*, *56162*.

Castor, M., Hanson, E., Svensson, E., Nählinder, S., LeBlaye, P., MacLeod, I., Wright, N., Alfredson, J., Ågren, L., Berggren, P. & Juppet, V. (2003). GARTEUR Handbook of mental workload measurement. *GARTEUR, Group for Aeronautical Research and Technology in Europe,* Flight Mechanics Action Group FM AG13, 164.

Cavallo, V. (1999). Speed and environmental characteristics in estimates of Time-to-Collision and braking initiation. In *Vision in Vehicles VIII*, Brisbane, Australia.

Cegarra, J., & Morgado, N. (2009). Étude des propriétés de la version francophone du NASA-TLX. In B. Cahour, F. Anceaux, A. Giboins (Eds.), *EPIQUE 2009 : 5ème Colloque de Psychologie Ergonomique*, 233-239. Nice, France.

Chapman, P. R., & Underwood, G. (1998). Visual search of driving situations: Danger and experience. *Perception*, *27*(8), 951-964.

Chatziastros, A., Wallis, G. M., & Bülthoff, H. H. (1999). The effect of field of view and surface texture on driver steering performance. In A. G. Gale (Ed.), *Vision in Vehicles* VII, Elsevier, Amsterdam (1999), pp. 253-259.

Chen, Y. A., Chung, Y. C., Proffitt, R., Wade, E., & Winstein, C. (2015). Attentional demand of a virtual reality-based reaching task in nondisabled older adults. *Journal of Motor Learning and Development*, *3*(2), 91-109.

Colombet, F., Dagdelen, M., Reymond, G., Pere, C., Merienne, F., & Kemeny, A. (2008). Motion cueing: What is the impact on the driver's behavior? In *Proceedings of the Driving Simulation Conference* (pp. 171-181), Monaco, Monaco.

Côté, S., & Bouchard, S. (2008). Virtual reality exposure for phobias: A critical review. *Journal of CyberTherapy & Rehabilitation*, *1*(1), 75-91.

Crundall, D. E., & Underwood, G. (1998). Effects of experience and processing demands on visual information acquisition in drivers. *Ergonomics*, *41*(4), 448-458.

De Groot, S., De Winter, J. C., García, J. M. L., Mulder, M., & Wieringa, P. A. (2011). The effect of concurrent bandwidth feedback on learning the lane-keeping task in a driving simulator. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, *53*(1), 50-62.

Déjos, M., Sauzéon, H., & N'kaoua, B. (2012). Virtual reality for clinical assessment of elderly people: early screening for dementia. *Revue neurologique*, *168*(5), 404-414.

Deniaud, C., & Mestre, D. (2015). La sensation de présence comme condition nécessaire de la validité comportementale des simulateurs de conduite. *Le Travail Humain*, *78*(4), 285-306.

Deniaud, C., Honnet, V., Jeanne, B., & Mestre, D. (2015). The concept of "presence" as a measure of ecological validity in driving simulators. *Journal of Interaction Science*, *3*(1), 1-13. DOI 10.1186/s40166-015-0005-z

De Waard, D. (1996). *The Measurement of Drivers' Mental Workload*. Netherlands: Groningen University, Traffic Research Center.

De Waard, D., Kruizinga, A., & Brookhuis, K. A. (2008). The consequences of an increase in heavy goods vehicles for passenger car drivers' mental workload and behaviour: A simulator study. *Accident Analysis Prevention, 40(2)*, 818–828.

De Waard, D., Jessurun, M., Steyvers, F. J. J. M., Reggatt, P. T. F., & Brookhuis, K. A. (1995). Effect of road layout and road environment on driving performance, drivers' physiology and road appreciation. *Ergonomics*, *38*(7), 1395–1407.

DiDomenico, A., & Nussbaum, M. A. (2011). Effects of different physical workload parameters on mental workload and performance. *International Journal of Industrial Ergonomics*, *41*(3), 255-260.

Dijksterhuis, C., Brookhuis, K. A., & De Waard, D. (2011). Effects of steering demand on lane keeping behaviour, self-reports, and physiology. A simulator study. *Accident Analysis & Prevention*, *43*(3), 1074-1081.

Di Stasi, L. L., Antolí, A., & Cañas, J. J. (2013). Evaluating mental workload while interacting with computer-generated artificial environments. *Entertainment Computing*, *4*(1), 63-69.

Domini, F., Shah, R., & Caudek, C. (2011). Do we perceive a flattened world on the monitor screen? *Acta Psychologica*, *138*(3), 359-366.

Donges, E. (1978). A two-level model of driver steering behavior. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, *20*(6), 691-707.

Eggemeier, F. T., Wilson, G. F., Kramer, A. F., & Damos, D. L. (1991). Workload assessment in multi-task environments. In D. L. Damos (Ed.), *Multiple-task Performance* (pp. 207-216). London: Taylor & Francis.

Engström, J., Johansson, E., & Östlund, J. (2005). Effects of visual and cognitive load in real and simulated motorway driving. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, *8*(2), 97-120.

Engstrom, J., Markkula, G., Victor, T., & Merat, N. (2017). Effects of cognitive load on driving performance: The cognitive control hypothesis. *Human Factors: Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, *59*(5), 734-764.

Espié, S., Mohellebi, H., & Kheddar, A. (2003). A high performance/low-cost mini driving simulator alternative for human factor studies. In *Proceeding of the North America Driving Simulation Conference.* Dearborn, USA.

Feenstra, P. J., Wentink, M., Roza, Z. C., & Bles, W. (2007). Desdemona, an alternative moving base design for driving simulation. In *Proceedings of the North America Driving Simulation Conference*. Iowa City, U.S.A.

Fogarty, C., & Stern, J. A. (1989). Eye movements and blinks: Their relationship to higher cognitive processes. *International Journal of Psychophysiology*, *8*(1), 35-42.

Foulsham, T., Walker, E., & Kingstone, A. (2011). The where, what and when of gaze allocation in the lab and the natural environment. *Vision research*, *51*(17), 1920-1931.

Frissen, I., & Mars, F. (2014). The effect of visual degradation on anticipatory and compensatory steering control. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *67*(3), 499-507.

Fuchs, P. (1996). *Les interfaces de la réalité virtuelle*. Les presses de l'école des mines de Paris. ISBN 2-9509954-0-3.

Fukuda, K., Stern, J. A., Brown, T. B., & Russo, M. B. (2005). Cognition, blinks, eye-movements, and pupillary movements during performance of a running memory task. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, *76*(7), C75-C85.

Fuller, R. (2005). Towards a general theory of driver behaviour. *Accident Analysis & Prevention*, *37*(3), 461-472.

Gallagher, A. G., McClure, N., McGuigan, J., Crothers, I., & Browning, J. (1999). Virtual reality training in laparoscopic surgery: a preliminary assessment of minimally invasive surgical trainer virtual reality (MIST VR). *Endoscopy*, *31*(04), 310-313.

Giannopulu, I., Bertin, R., Brémond, R., Espié, S., & Kapoula, Z. (2008). Visuomotor strategies using driving simulators in virtual and pre-recorded environment. *Advances in Transportation Studies*, *14*, 49-56.

Glass, G. V., Peckham, P. D., & Sanders, J. R. (1972). Consequences of failure to meet assumptions underlying the fixed effects analyses of variance and covariance. *Review of Educational Research*, *42*(3), 237-288.

Godley, S. T., Triggs, T. J., & Fildes, B. N. (2002). Driving simulator validation for speed research. *Accident Analysis & Prevention*, *34*(5), 589-600.

Godley, S. T., Triggs, T. J., & Fildes, B. N. (2004). Perceptual lane width, wide perceptual road centre markings and driving speeds. *Ergonomics*, *47*(3), 237–256.

Grant, T. M., Karimi, D., & Mann, D. D. (2006). Effect of steering torque feedback on driving performance in a tractor simulator. In *ASABE/CSBE North Central Intersectional Meeting*. American Society of Agricultural and Biological Engineers. North Bern, U.S.A.

Grechkin, T. Y., Plumert, J. M., & Kearney, J. K. (2014). Dynamic affordances in embodied interactive systems: The role of display and mode of locomotion. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, *20*(4), 596-605.

Greenhouse, S. W., & Geisser, S. (1959). On methods in the analysis of profile data. *Psychometrika, 24*, 95–112.

Groen, E. L., & Bles, W. (2004). How to use body tilt for the simulation of linear self-motion. *Journal of Vestibular Research*, *14*(5), 375-385.

Groen, E. L., Howard, I. P., & Cheung, B. S. (1999). Influence of body roll on visually induced sensations of self-tilt and rotation. *Perception*, *28*(3), 287-297.

Guattari, C., De Blasiis, M. R., & Calvi, A. (2012). The effectiveness of variable message signs information: A driving simulation study. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, *53*, 692-702.

Haigney, D. E., Taylor, R. G., & Westerman, S. J. (2000). Concurrent mobile (cellular) phone use and driving performance: task demand characteristics and compensatory processes. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, *3*(3), 113-121.

Hancock, P. A., Wulf, G., Thom, D., & Fassnacht, P. (1990). Driver workload during differing driving maneuvers. *Accident Analysis & Prevention*, *22*(3), 281-290.

Hanson, L., Sperling, L., & Akselsson, R. (2006). Preferred car driving posture using 3-D information. *International Journal of Vehicle Design*, *42*(1-2), 154-169.

Hao, X., Wang, Z., Yang, F., Wang, Y., Guo, Y., & Zhang, K. (2007). The effect of traffic on situation awareness and mental workload: Simulator-based study. In *International Conference on Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics* (pp. 288-296). Springer Berlin Heidelberg, Deutschland.

Hart, S. G. (2006). NASA-task load index (NASA-TLX); 20 years later. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* (Vol. 50, No. 9, pp. 904-908). Santa Monica, CA. U.S.A.

Hart, S. G., & Staveland, L. E. (1988). Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research. *Advances in Psychology*, *52*, 139-183.

Haug, E. J., Choi, K. K., Kuhl, J. G., & Wargo, J. D. (1995). Virtual prototyping simulation for design of mechanical systems. *Journal of Vibration and Acoustics*, *117*, 63-70.

Hecht, H. (2001). Regularities of the physical world and the absence of their internalization. *Behavioral and Brain Sciences, 24*, 608-617.

Hoffman, H. G., Doctor, J. N., Patterson, D. R., Carrougher, G. J., & Furness, T. A. (2000). Virtual reality as an adjunctive pain control during burn wound care in adolescent patients. *Pain*, *85*(1), 305-309.

Hoffman, J., Lee, J., Brown, T., & McGehee, D. (2002). Comparison of driver braking responses in a high-fidelity simulator and on a test track. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1803, 59-65.

Holland, M. K., & Tarlow, G. (1972). Blinking and mental load. *Psychological Reports*, *31*(1), 119-127.

Hosking, S. G., Young, K. L., & Regan, M. A. (2009). The effects of text messaging on young drivers. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, *51*(4), 582-592.

Howell, D. C. (2010). *Statistical methods for psychology (8th ed.).* Belmont, CA: Wadsworth, Cengage Learning.

Ingre, M., ÅKerstedt, T., Peters, B., Anund, A., & Kecklund, G. (2006). Subjective sleepiness, simulated driving performance and blink duration: Examining individual differences. *Journal of Sleep Research*, *15*(1), 47-53.

Jahn, G., Oehme, A., Krems, J. F., & Gelau, C. (2005). Peripheral detection as a workload measure in driving: Effects of traffic complexity and route guidance system use in a driving study. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, *8*(3), 255-275.

Jamson, A. H. (2000). Driving simulator validity: Issues of field of view and resolution. In *Proceedings of the Driving Simulation Conference* (pp. 57–64). Paris, France.

Jamson, A. H. (2001). Image characteristics and their effect on driving simulator validity. In *First International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design* (pp. 190-195). Aspen, Colorado.

Jamson, S. L., & Jamson, A. H. (2010). The validity of a low-cost simulator for the assessment of the effects of in-vehicle information systems. *Safety Science*, *48*(10), 1477–1483.

Jamson, A. H., & Merat, N. (2005). Surrogate in-vehicle information systems and driver behaviour: Effects of visual and cognitive load in simulated rural driving. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, *8*(2), 79-96.

Jamson, A. H. & Mouta, S. (2004). More bang for your buck? A cross-cost simulator evaluation study. In P. Gauriat & A. Kemeny (Eds), *DSC'2004, Driving Simulation Conference* (pp. 167-174). Paris, France: INRETS-Renault

Jamson, S., Lai, F., & Jamson, H. (2010). Driving simulators for robust comparisons: A case study evaluating road safety engineering treatments. *Accident Analysis & Prevention*, *42*(3), 961-971.

Johnson, M. J., Chahal, T., Stinchcombe, A., Mullen, N., Weaver, B., & Bédard, M. (2011). Physiological responses to simulated and on-road driving. *International Journal of Psychophysiology*, *81*, 203-208.

Kandil, F. I., Rotter, A., & Lappe, M. (2009). Driving is smoother and more stable when using the tangent point. *Journal of Vision*, *9*(1), 1–11.

Kappé, B., van Erp, J., & Korteling, J. E. (1999). Effects of head-slaved and peripheral displays on lane-keeping performance and spatial orientation. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, *41*(3), 453-466.

Kaptein, N., Theeuwes, J., & Van Der Horst, R. (1996). Driving simulator validity: Some considerations. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1550, 30-36.

Karasek, R., Baker, D., Marxer, F., Ahlbom, A., & Theorell, T. (1981). Job decision latitude, job demands, and cardiovascular disease: a prospective study of Swedish men. *American Journal of Public Health*, *71*(7), 694-705.

Kemeny, A. (2009). Driving simulation for virtual testing and perception studies. In *Proceedings of DSC Europe Conference, Monte-Carlo* (pp. 15-23).

Kemeny, A., & Panerai, F. (2003). Evaluating perception in driving simulation experiments. *Trends in cognitive sciences*, *7*(1), 31-37.

Kiefer, R., LeBlanc, D., Palmer, M., Salinger, J., Deering, R., & Shulman, M. (1999). *Development and validation of functional definitions and evaluation procedures for collision warning/avoidance systems.* DOT HS 808 964. Crash Avoidance Metrics Partnership, Washington, D.C.

Klinger, E., Kadri, A., Sorita, E., Le Guiet, J. L., Coignard, P., Fuchs, P., Leroy, L., Du Lac, N., Servant, F., & Joseph, P. A. (2013). AGATHE: A tool for personalized rehabilitation of cognitive functions based on simulated activities of daily living. *IRBM*, *34*(2), 113-118.

Klüver, M., Herrigel, C., Heinrich, C., Schöner, H. P., & Hecht, H. (2016). The behavioral validity of dual-task driving performance in fixed and moving base driving simulators. *Transportation Research part F: Traffic Psychology and Behaviour*, *37*, 78-96.

Konstantopoulos, P., Chapman, P., & Crundall, D. (2010). Driver's visual attention as a function of driving experience and visibility. Using a driving simulator to explore drivers' eye movements in day, night and rain driving. *Accident Analysis & Prevention*, *42*, 827-834.

Kountouriotis, G. K., Floyd, R. C., Gardner, P. H., Merat, N., & Wilkie, R. M. (2012). The role of gaze and road edge information during high-speed locomotion. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *38*(3), 687-702.

Larrue, F. (2011). *Influence des interfaces dans le transfert du virtuel au réel.* Thèse de doctorat, Université Bordeaux 2.

Lee, H. C., Lee, A. H., Cameron, D., & Li-Tsang, C. (2003). Using a driving simulator to identify older drivers at inflated risk of motor vehicle crashes. *Journal of Safety Research*, *34*(4), 453-459.

Lee, Y. H., & Liu, B. S. (2003). Inflight workload assessment: Comparison of subjective and physiological measurements. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, *74*(10), 1078-1084.

Lehtonen, E., Lappi, O., & Summala, H. (2012). Anticipatory eye movements when approaching a curve on a rural road depend on working memory load. *Transportation Research part F: Traffic Psychology and Behaviour*, *15*(3), 369-377.

Lehtonen, E., Lappi, O., Korikivi, I., & Summala, H. (2014). Effect of driving experience on anticipatory look-ahead fixations in real curve driving. *Accident Analysis & Prevention*, *70*, 195-208.

Leplat, J. (1997). Simulation et simulateur : principes et usages. In J. Leplat (Ed.) *Regards sur l'activité en situation de travail : Contribution à la psychologie ergonomique* (pp. 157-181). Paris: PUF.

Lewis-Evans, B., & Charlton, S. G. (2006). Explicit and implicit processes in behavioural adaptation to road width. *Accident Analysis & Prevention*, *38*(3), 610–617.

Liu, A., & Chang, S. (1995). Force feedback in a stationary driving simulator. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics,* Vol. 2, pp. 1711–1716. Vancouver, BC, Canada.

Lobjois, R., Siegler, I., & Mars, F. (2016). Effects of visual roll on steering control and gaze behavior in a motorcycle simulator. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behavior*, 38, 55-66.

Lobjois, R., Mars, F., Siegler, I., Caro, S., Colombet, F., Shahar, A., & Vienne, F. (2013). Approche sensorimotrice de la présence pour la mise au point d'un simulateur de conduite de deux-roues motorisé. Rapport final de convention IFSTTAR-Fondation Sécurité Routière n°2009/MP/07, 123 pages.

Lombard, M., & Ditton, T. (1997). At the heart of it all: The concept of presence. *Journal of Computer Mediated Communication*, *3*(2).

Lysaght, R. J., Hill, S. G., Dick, A. O., Plamondon, B. D., & Linton, P. M. (1989). *Operator workload: Comprehensive review and evaluation of operator workload methodologies* (No. TR-2075-3). Analytics Inc. Willow grove P.A.

Macdonald, W. A., & Hoffmann, E. R. (1980). Review of relationships between steering wheel reversal rate and driving task demand. *Human Factors*, *22*(6), 733-739.

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.

Marrkula, G., & Engström, J. (2006). A steering wheel reversal rate metric for assessing effects of visual and cognitive secondary task load. In *Proceedings of the 13th ITS world congress*, London, U.K.

Mars, F. (2008). Driving around bends with manipulated eye-steering coordination. *Journal of Vision*, *8*(11), 1-11.

Mars, F., & Navarro, J. (2012). Where we look when we drive with or without active steering wheel control. *PloS one*, *7*(8), e43858.

McIntire, L. K., McKinley, R. A., Goodyear, C., & McIntire, J. P. (2014). Detection of vigilance performance using eye blinks. *Applied Ergonomics*, *45*(2), 354-362.

McLean, J. R., & Hoffmann, E. R. (1975). Steering reversals as a measure of driver performance and steering task difficulty. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, *17*(3), 248-256.

McMahan, R. P., Bowman, D. A., Zielinski, D. J., & Brady, R. B. (2012). Evaluating display fidelity and interaction fidelity in a virtual reality game. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, *18*(4), 626-633.

Mecheri, S., & Lobjois, R. (soumis). Steering control in a low-cost driving simulator: A case for the role of vehicle-cab information.

Mecheri, S., Rosey, F., & Lobjois, R. (2017). The effects of lane width, shoulder width, and road cross-sectional reallocation on drivers' behavioral adaptations. *Accident Analysis & Prevention*, *104*, 65-73.

Meshkati, N., Hancock, P. A., Rahimi, M., & Dawes, S. M. (1995). Techniques in mental workload assessment. In *Evaluation of Human Work: A practical ergonomics methodology.* Taylord & Francis, London. 749-782.

Mestre, D. R., Deniaud, C., & Honnet, V. (2017). Measuring presence in driving simulators. In *Proceedings of the Driving Simulation Conference* (pp. 95-101), 6-8 September. Stuttgart, Germany.

Mestre, D., Fuchs, P., Berthoz, A., & Vercher, J. L. (2006). Immersion et présence. In P. Fuchs & G. Moreau (Eds.), *Le traité de la réalité virtuelle* (pp. 309-338). Paris: Ecole des Mines de Paris, 309-38.

Michon, J. A. (1985). A critical review of driver behaviour models. In L Evans & R. G. Schwing (Eds.). *Human Behavior And Traffic Safety* (pp. 485-520). Plenum Press.

Milleville-Pennel, I., & Charron, C. (2015). Driving for real or on a fixed-base simulator: Is it so different? An explorative study. *Presence:Teleoperators and Virtual Environments*, *24*(1), 74-91.

Mitchell, D. K. (2000). *Mental workload and ARL workload modeling tools* (No. ARL-TN-161). Army Research Lab, Aberdeen.

Morice, A. H., Siegler, I. A., & Bardy, B. G. (2008). Action-perception patterns in virtual ball bouncing: Combating system latency and tracking functional validity. *Journal of Neuroscience Methods*, *169*(1), 255-266.

Mourant, R. R., & Sadhu, P. (2002). Evaluation of force feedback steering in a fixed based driving simulator. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* (Vol. 46, No. 26, pp. 2202-2205). Baltimore, U.S.A.

Navarro, J., Deniel, J., Yousfi, E., Jallais, C., Bueno, M., & Fort, A. (2017). Influence of lane departure warnings onset and reliability on car drivers' behaviors. *Applied Ergonomics*, *59*, 123-131.

Neimer, J., & Mohellebi, H. (2009). Differential approach to assess the validity of a motion-base driving simulator. *Journal of Virtual Reality and Broadcasting*, *6*(7).

Nesti, A., Masone, C., Barnett-Cowan, M., Giordano, P. R., Bulthoff, H. H., & Pretto, P. (2012). Roll rate thresholds and perceived realism in driving simulation. In *Proceedings of the Driving Simulation Conference* (pp. 106-111), Paris, France.

O'Donnell, R., & Eggemeier, T. (1986). Workload assessment methodology. In K. R. Boff, L. Kaufman, & J. P. Thomas (Eds.). *Handbook of Perception and Human Performance* (pp. 1-49). New York: Wiley Interscience.

Ogden, G. D., Levine, J. M., & Eisner, E. J. (1979). Measurement of workload by secondary tasks. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, *21*(5), 529-548.

Olsson, S., & Burns, P. C. (2000). *Measuring driver visual distraction with a peripheral detection task*. Thèse de Master, University Linkoping.

Palinko, O., Kun, A. L., Shyrokov, A., & Heeman, P. (2010). Estimating cognitive load using remote eye tracking in a driving simulator. In *Proceedings of the 2010 Symposium on Eye-tracking Research & Applications* (pp. 141-144). ACM Press, New York, USA.

Pan, Y. (2001) *A Real-World Computationally Efficient Vehicle Dynamics Model*. Masters Thesis, Department of Mechanical, Industrial, and Manufacturing Engineering, Northeastern University.

Park, G. D., Allen, R. W., Rosenthal, T. J., & Fiorentino, D. (2005). Training effectiveness: How does driving simulator fidelity influence driver performance? In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* (Vol. 49, No. 25, pp. 2201-2205). Orlando, U.S.A.

Patrick, J. (1992). *Training: Research and Practice*. London: Academic Press.

Patten, C. J., Kircher, A., Östlund, J., Nilsson, L., & Svenson, O. (2006). Driver experience and cognitive workload in different traffic environments. *Accident Analysis & Prevention*, *38*(5), 887-894.

Pauzié, A. (2008). A method to assess the driver mental workload: The driving activity load index (DALI). *IET Intelligent Transport Systems*, *2*(4), 315-322.

Pauzié, A., & Manzano, J. (2007). Evaluation of driver mental workload facing new in-vehicle information and communication technology. In *Proceedings of the 20th Enhanced Safety of Vehicles Conference*, Lyon, France (Vol. 10).

Paxion, J. (2014). *Complexité des situations, expérience, tension et vigilance: Quels impacts sur la charge de travail et les performances de jeunes conducteurs?* Thèse de doctorat, Université d'Aix-Marseille.

Paxion, J., Galy, E., & Berthelon, C. (2014). Mental workload and driving. Frontiers in Psychology, **5**:1344. doi:10.3389/fpsyg.2014.01344

Pedrotti, M., Lei, S., Dzaack, J., & Rötting, M. (2011). A data-driven algorithm for offline pupil signal preprocessing and eyeblink detection in low-speed eye-tracking protocols. *Behavior Research Methods*, *43*(2), 372-383.

Pedrotti, M., Mirzaei, M. A., Tedesco, A., Chardonnet, J. R., Mérienne, F., Benedetto, S., & Baccino, T. (2014). Automatic stress classification with pupil diameter analysis. *International Journal of Human-Computer Interaction*, *30*(3), 220-236.

Pinto, M. (2007). *Les interactions multisensorielles dans la perception du mouvement longitudinal: implications pour les simulateurs de conduite.* Thèse de doctorat, Grenoble 3.

Pinto, M., Cavallo, V., & Ohlmann, T. (2008). The development of driving simulators: Toward a multisensory solution. *Le Travail Humain*, *71*(1), 62-95.

Pinto, M., Cavallo, V., Ohlmann, T., Espie, S., & Roge, J. (2004). The perception of longitudinal accelerations: What factors influence braking maneuvers in driving simulators? In *Proceedings of Driving Simulator Conference* (pp. 139-151). Paris, France.

Raskar, R., Welch, G., Cutts, M., Lake, A., Stesin, L., & Fuchs, H. (1998, July). The office of the future: A unified approach to image-based modeling and spatially immersive displays. In *Proceedings of the 25th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques* (pp. 179-188). ACM.

Raw, R. K., Kountouriotis, G. K., Mon-Williams, M., & Wilkie, R. M. (2012). Movement control in older adults: does old age mean middle of the road? *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *38*(3), 735-745.

Recarte, M. A., & Nunes, L. M. (2003). Mental workload while driving: effects on visual search, discrimination, and decision making. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, *9*(2), 119-137.

Recarte, M. A., Pérez, E., Conchillo, Á., & Nunes, L. M. (2008). Mental workload and visual impairment: Differences between pupil, blink, and subjective rating. *The Spanish Journal of Psychology*, *11*(02), 374-385.

Reid, L., & Nahon, M. (1988). Response of airline pilots to variations in flight simulator motion algorithms. *Journal of Aircraft*, *25*(7), 639-646.

Reid, G. B., & Nygren, T. E. (1988). The subjective workload assessment technique: A scaling procedure for measuring mental workload. *Advances in Psychology*, *52*, 185-218.

Reimer, B., D'Ambrosio, L. A., Coughlin, J. F., Kafrissen, M. E., & Biederman, J. (2006). Using self-reported data to assess the validity of driving simulation data. *Behavior Research Methods*, *38*(2), 314-324.

Reyner, L. A., & Horne, J. A. (1998). Falling asleep whilst driving: Are drivers aware of prior sleepiness? *International Journal of Legal Medicine*, *111*(3), 120-123.

Robertshaw, K. D., & Wilkie, R. M. (2008). Does gaze influence steering around a bend? *Journal of Vision*, *8*(4), 18-18.

Ronen, A., & Yair, N. (2013). The adaptation period to a driving simulator. *Transportation Research part F: Traffic Psychology and Behaviour*, *18*, 94-106.

Rosey, F., & Auberlet, J. M. (2014). Driving simulator configuration impacts drivers' behavior and control performance: An example with studies of a rural intersection. *Transportation Research part F: Traffic Psychology and Behaviour*, *27*, 99-111.

Rosey, F., Auberlet, J. M., Moisan, O., & Dupré, G. (2009). Impact of narrower lane width: Comparison between fixed-base simulator and real data. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2138, 112-119.

Rossi, R., Gastaldi, M., Biondi, F., & Mulatti, C. (2013). Warning sound to affect perceived speed in approaching roundabouts: Experiments with a driving simulator. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, *87*, 269-278.

Sahami, S., & Sayed, T. (2010). Insight into steering adaptation patterns in a driving simulator. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2185, 33-39.

Sahami, S., & Sayed, T. (2013). How drivers adapt to drive in driving simulator, and what is the impact of practice scenario on the research? *Transportation Research part F: Traffic Psychology and Behaviour*, *16*, 41-52.

Santos, J., Merat, N., Mouta, S., Brookhuis, K., & De Waard, D. (2005). The interaction between driving and in-vehicle information systems: Comparison of results from laboratory, simulator and real-world studies. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, *8*(2), 135-146.

Savage, S. W., Potter, D. D., & Tatler, B. W. (2013). Does preoccupation impair hazard perception? A simultaneous EEG and eye tracking study. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, *17*, 52-62.

Schmider, E., Ziegler, M., Danay, E., Beyer, L., & Bühner, M. (2010). Is it really robust? Reinvestigating the robustness of ANOVA against violations of the normal distribution assumption. *Methodology, 6*, 147–151.

Shahar, A., Brémond, R., & Villa, C. (2016). Can light emitting diode-based road studs improve vehicle control in curves at night? A driving simulator study. *Lighting Research & Technology*, 1-16. DOI: 10.1177/1477153516660146.

Siegler, I., Reymond, G., Kemeny, A., & Berthoz, A. (2001). Sensorimotor integration in a driving simulator: contributions of motion cueing in elementary driving tasks. In *Proceedings of THE Driving Simulation Conference* (pp. 21-32), Paris, France.

Sperandio, JC (1980). *La psychologie en ergonomie* (Vol. 80). Presses universitaires de France.

Spurr, R. T. (1965). Subjective assessment of brake performance. *Automobile Engineer*, *55*, 393-395.

Stanney, K. M., Kingdon, K. S., Graeber, D., & Kennedy, R. S. (2002). Human performance in immersive virtual environments: Effects of exposure duration, user control, and scene complexity. *Human Performance*, *15*(4), 339-366.

Stanton, N. (1996). Simulators: A review of research and practice. In N. Stanton (ed.), *Human Factors in Nuclear Safety* (pp. 117–140). Taylor & Francis, London.

Stedmon, A. W., Hasseldine, B., Rice, D., Young, M., Markham, S., Hancox, M., Brickell, E., & Noble, J. (2009). 'MotorcycleSim': An evaluation of rider interaction with an innovative motorcycle simulator. *The Computer Journal*, *54*(7), 1010-1025.

Stern, J. A., Boyer, D., & Schroeder, D. (1994). Blink rate: A possible measure of fatigue. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, *36*(2), 285-297.

Stern, J. A., Walrath, L. C., & Goldstein, R. (1984). The endogenous eyeblink. *Psychophysiology*, *21*(1), 22-33.

Stoffregen, T. A., Bardy, B. G., Smart, L. J., & Pagulayan, R. J. (2003). On the nature and evaluation of fidelity in virtual environments. In L. J.Hettinger, M. W. Haas (Eds.), *Psychological Issues in the Design and Use of Virtual and Adaptive Environments* (pp. 111–128). Lawrence Erlbaum Associates, Mahwah, NJ.

Suetomi, T., Kido, K., Yamamoto, Y., & Hata, S. (1995). A study of collision warning system using a moving-base driving simulator. In *Steps Forward. Intelligent Transport Systems World Congress* (Volume 4).

Summala, H. (1988). Risk control is not risk adjustment: The zero-risk theory of driver behaviour and its implications. *Ergonomics*, *31*(4), 491-506.

Tatler, B. W., Hayhoe, M. M., Land, M. F., & Ballard, D. H. (2011). Eye guidance in natural vision: Reinterpreting salience. *Journal of Vision*, *11*, 1-23.

Teh, E., Jamson, S., Carsten, O., & Jamson, H. (2014). Temporal fluctuations in driving demand: The effect of traffic complexity on subjective measures of workload and driving performance. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, *22*, 207-217.

Thomson, J. A., Tolmie, A. K., Foot, H. C., Whelan, K. M., Sarvary, P., & Morrison, S. (2005). Influence of virtual reality training on the roadside crossing judgments of child pedestrians. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, *11*(3), 175.

Toffin, D., Reymond, G., Kemeny, A., & Droulez, J. (2003). Influence of steering wheel torque feedback in a dynamic driving simulator. In *Proceedings of the North America Driving Simulation Conference, Dearborn, U.S.A.*

Törnros, J. (1998). Driving behaviour in a real and a simulated road tunnel—a validation study. *Accident Analysis & Prevention*, *30*(4), 497-503.

Törnros, J., & Bolling, A. (2006). Mobile phone use–effects of conversation on mental workload and driving speed in rural and urban environments. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, *9*(4), 298-306.

Tsai, Y. F., Viirre, E., Strychacz, C., Chase, B., & Jung, T. P. (2007). Task performance and eye activity: predicting behavior relating to cognitive workload. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, *78*, 176-185.

Tsingos, N., & Warusfel, O. (2008). Restitution sonore spatiale: Dispositifs et interfaces. *Techniques de l'ingénieur. Télécoms* (TE5912) Paris, France.

Underwood, G., Crundall, D., & Chapman, P. (2002). Selective searching while driving: the role of experience in hazard detection and general surveillance. *Ergonomics*, *45*(1), 1-12.

Valente Pais, A. R., Wentink, M., van Paassen, M. M., & Mulder, M. (2009). Comparison of three motion cueing algorithms for curve driving in an urban environment. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, *18*(3), 200-221.

Van Orden, K. F., Limbert, W., Makeig, S., & Jung, T. P. (2001). Eye activity correlates of workload during a visuospatial memory task. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, *43*(1), 111-121.

Veltman, J. A., & Gaillard, A. W. K. (1996). Physiological indices of workload in a simulated flight task. *Biological Psychology, 42*, 323–342.

Verwey, W. B. (2000). On-line driver workload estimation. Effects of road situation and age on secondary task measures. *Ergonomics*, *43*, 187–209.

Verwey, W. B., & Zaidel, D. M. (2000). Predicting drowsiness accidents from personal attributes, eye blinks and ongoing driving behaviour. *Personality and Individual Differences*, *28*(1), 123-142.

Victor, T. W., Harbluk, J. L., & Engström, J. A. (2005). Sensitivity of eye-movement measures to in-vehicle task difficulty. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, *8*(2), 167-190.

Vrel, F. –X., Doucet, D., & Subirats, P. (2010). Le DIRCO – Evaluation des performances. In *Rapports d'activité du CETE Normandie Centre* (p. 1–76).

Walker, G. H., Stanton, N. A., & Chowdhury, I. (2013). Self-Explaining Roads and situation awareness. *Safety Science*, *56*, 18-28.

Weinberg, G., & Harsham, B. (2009). Developing a low-cost driving simulator for the evaluation of in-vehicle technologies. In *Proceedings of the 1st International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications* (pp. 51-54). ACM, NewYork, U.S.A.

Weir, D. H., & Clark, A. J. (1995). *A survey of mid-level driving simulators* (No. 950172). SAE Technical Paper.

Wertheim, A. H., Mesland, B. S., & Bles, W. (2001). Cognitive suppression of tilt sensations during linear horizontal self-motion in the dark. *Perception*, *30*(6), 733-741.

Wickens, C. D. (1993), Cognitive factors in display design. *Journal of the Washington Academy of Sciences, 83,* 179-201.

Wilde, G. J. S. (1982). The theory of risk homeostasis: Implication for safety and health. *Risk Analysis*, *2*, 209-225.

Wilkie, R. M., Kountouriotis, G. K., Merat, N., & Wann, J. P. (2010). Using vision to control locomotion: Looking where you want to go. *Experimental Brain Research*, *204*(4), 539-547.

Williges, R. C., & Wierwille, W. W. (1979). Behavioral measures of aircrew mental workload. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, *21*(5), 549-574.

Wilson, M., Chattington, M., & Marple-Horvat, D. E. (2008). Eye movements drive steering: Reduced eye movement distribution impairs steering and driving performance. *Journal of Motor Behavior*, *40*(3), 190-202.

Witmer, B. G., & Singer, M. J. (1998). Measuring presence in virtual environments: A presence questionnaire. *Presence: Teleoperators and virtual environments*, *7*(3), 225-240.

Yang, Q., Overton, R., Han, L. D., Yan, X., & Richards, S. H. (2013). The influence of curbs on driver behaviors in four-lane rural highways – A driving simulator based study. *Accident Analysis & Prevention*, *50*, 1289-1297.

Young, M. S., Mahfoud, J. M., Stanton, N. A., Salmon, P. M., Jenkins, D. P., & Walker, G. H. (2009). The implications of roadside advertising for driver attention and eye movements. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 12*, 381–388.

Annexes

LEPSiS

Participant n°	Tâche	Date

NASA Task Load Index

Pour chaque question, mets une croix (X) dans la case qui correspond à ce que tu ressens

Pression mentale

La tâche a-t-elle exigé beaucoup d'activité mentale ?

Peu Beaucoup

Pression physique

La tâche a-t-elle exigé beaucoup d'activité physique ?

Peu Beaucoup

Pression temporelle

Est-ce que tu t'es senti pressé par le temps ?

Peu Beaucoup

Performance

Comment estimes-tu ta performance pour cette tâche ?

Très mauvaise Très bonne

Effort

Penses-tu que cette tâche était difficile à accomplir (mentalement ou physiquement) ?

Peu Beaucoup

Frustration

T'es-tu senti frustré, découragé, irrité, stressé pendant la tâche ?

Peu Beaucoup

Algorithme de détection des clignements

à partir des données oculaires fournies par le système « Pertech »

Notre algorithme dépend de la donnée « diamètre pupillaire ». Il détecte les trois phases d'un clignement :

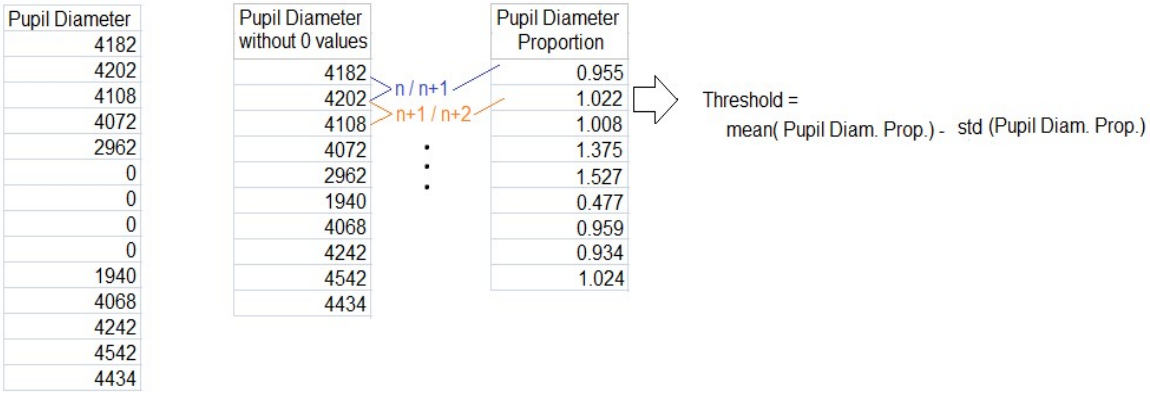
1 – lorsque l'œil se ferme (le diamètre pupillaire décroît jusqu'à 0)

2 – lorsque l'œil est fermé (le diamètre pupillaire est égal 0)

3 – lorsque l'œil s'ouvre (le diamètre pupillaire croît de 0 jusqu'à une valeur normale correspondant à un œil ouvert)

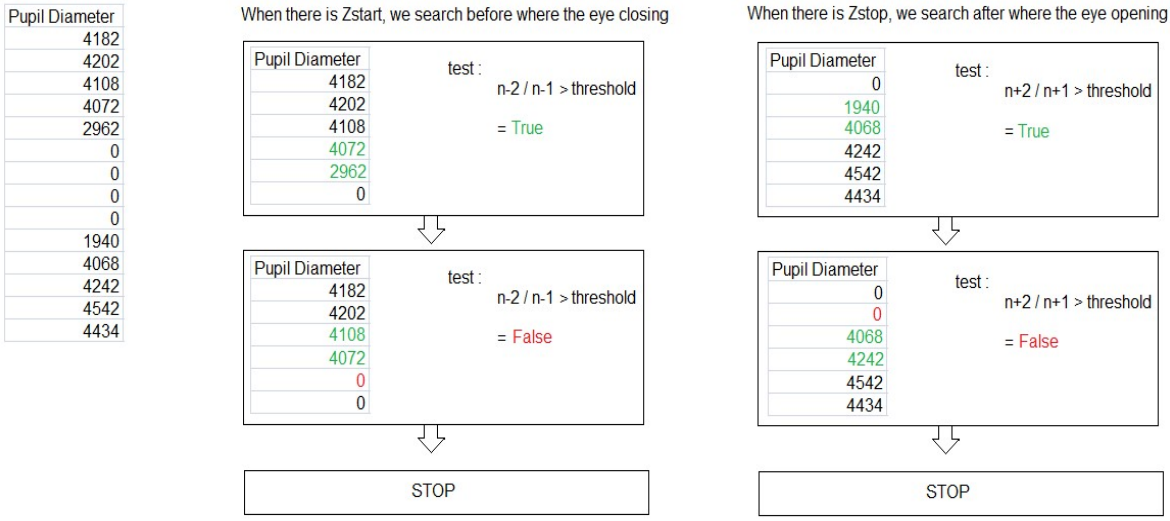
Il est structuré en quatre étapes :

1 – Nous évaluons le seuil de variation du diamètre pupillaire qui est le maximum acceptable pour considérer que l'œil n'est pas en train de se fermer ou de s'ouvrir

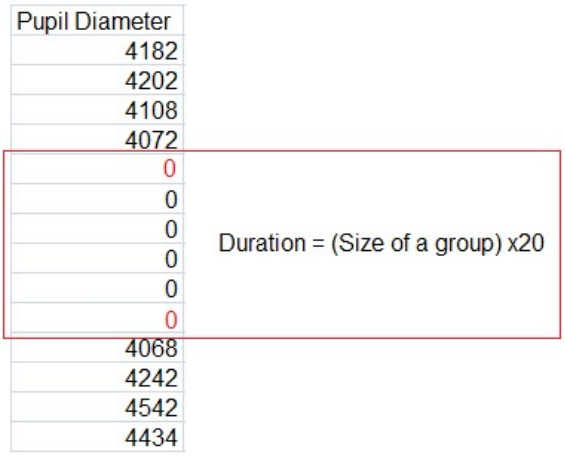


2 – Nous détectons, dans les données du diamètre pupillaire, la position de toutes les valeurs égales à 0. Nous identifions chaque groupe de 0 consécutifs, ou chaque 0 seul. Nous définissons ensuite « Zstart » la position du premier 0 de chaque groupe et « Zstop » la position du dernier 0 de chaque groupe (pour les 0 seuls, Zstart et Zstop ont la même valeur).

3 – Nous recherchons, avant et après chaque groupe, quand est-ce que l'œil commence à se fermer ou finit de s'ouvrir.



4 – Nous calculons la durée de chaque clignement. Nous excluons les durées inférieures à 80 ms et supérieures à 500 ms.



université PARIS-SACLAY
ÉCOLE DOCTORALE
Sciences du sport, de la motricité et du mouvement humain (SSMMH)

Titre : Simulateur de conduite : Evaluation de la validité psychologique sous l'angle de la charge mentale
Mots clés : simulateur de conduite, validité psychologique, charge mentale, clignements oculaires

Résumé : La validité des simulateurs de conduite est une question essentielle pour étayer et valoriser les travaux visant à mieux comprendre les comportements de conduite. Alors que les dimensions subjective et comportementale de la validité ont été régulièrement étudiées, elles font face à certaines limites. A l'opposé, rares sont les études qui se sont intéressées à la validité psychologique des simulateurs. Cette dimension compare l'implication des mécanismes qui sous-tendent les comportements entre conduite réelle et virtuelle. De plus, très peu d'études ont confronté les différentes dimensions de la validité, alors que cela pourrait contribuer au développement d'une métrologie des environnements virtuels. C'est précisément à ce niveau que se situe ce travail de thèse, au cours duquel des mesures classiques de la validité comportementale (vitesse, contrôle latéral) ont été confrontées à des mesures de la validité psychologique examinée sous l'angle de la charge mentale en prenant notamment comme indicateur les clignements oculaires. L'objectif principal était de déterminer si le niveau de charge mentale diffère entre conduite sur route et conduite sur simulateur dans des cas où les comportements observés ne permettent pas de faire de distinction.
Pour répondre à cette question, ce travail de thèse a été organisé autour de trois expériences réalisées sur simulateur de conduite et d'une étude sur route réelle. Les deux premières expériences visaient à mieux cerner l'effet de certains facteurs inhérents à la conduite sur route ouverte (trafic, environnement) sur les comportements de conduite et la charge mentale. La troisième expérience était quant à elle destinée à comparer la charge mentale induite par la conduite réelle et la conduite sur simulateur « bas coût », en confrontant cette mesure de la validité psychologique aux mesures comportementales classiques. Enfin, la quatrième expérience a porté sur les effets du retour d'effort du volant sur cette même charge mentale.

Les principaux résultats ont mis en évidence un niveau de charge supérieur en conduite simulée par comparaison à la conduite en situation réelle, alors que certaines mesures comportementales (vitesse) n'étaient pas différentes. Cette charge accrue sur simulateur ne semble cependant pas trouver son origine dans le retour d'effort au volant, les modalités de retour testées n'ayant pas eu d'effet sur les indicateurs de la charge. Au final, ce travail confirme que la prise en compte de la validité psychologique, examinée ici sous l'angle de la charge mentale, présente un intérêt dans une démarche d'évaluation, dans le but de mieux cerner le positionnement des utilisateurs face à un dispositif de réalité virtuelle. Il ouvre ainsi des perspectives pour améliorer la validité des simulateurs de conduite.

Title : Driving simulator : evaluation of psychological validity using mental workload
Key words : driving simulator, psychological validity, mental workload, eye blinks

Summary : The validity of driving simulators is an essential subject to support and highlight the works aiming to understand driving behaviours more thoroughly. While the subjective and behavioural dimensions of that validity have often been studied, they encounter a few limits. On the other hand, studies about simulators' validity are fairly rare. This dimension compares the implication of mechanisms inherent in behaviours between real and virtual driving. Furthermore, very few studies have considered the various dimensions of validity at once, whereas it could contribute to the development of a metrology for virtual environments. This thesis is precisely about this, with confrontations between classical measurements of behavioural validity (speed, lateral control) and measurements of psychological validity, examined from the viewpoint of mental workload - using indicators such as eye blinking. The main objective was to ascertain whether the mental workload levels vary between road driving and simulated driving when the observed behaviours aren't relevant to make a clear difference.
To answer this question, this thesis has been organized around three experiences carried out on driving simulators and a comparison between actual road driving and low-cost simulated driving. Two of those experiences were conducted to finely analyse the effect of some factors inherent to open road driving (traffic, environment) on driving behaviours and mental workload. The third experience was made to compare the mental workload induced by real driving and low-cost simulator driving, by putting this psychological validity measurement against classical behavioural measurements. Lastly, the fourth experience focused on the effects of the driving wheel's force-feedback on this same mental workload.
The main results revealed a higher workload level on simulated driving than on real driving, while some behavioural measurements (speed) were not different. This increased workload with the simulator does not seem to stem from the wheel's force-feedback, since the tested feedback methods did not have a repercussion on the workload levels. In the end, this work confirms that taking psychological validity - examined here from a mental workload viewpoint - does have an interest within an evaluation process to analyse in a finer fashion the mental state of users when faced with a virtual reality system. It creates prospects to improve the validity of driving simulators.

Université Paris-Saclay
Espace Technologique / Immeuble Discovery
Route de l'Orme aux Merisiers RD 128 / 91190 Saint-Aubin, France