HAL
open science

Apport de la simulation dans l'évaluation des aptitudes à la conduite : l'exemple des personnes cérébrolésées

Céline Prévost

To cite this version:

Céline Prévost. Apport de la simulation dans l'évaluation des aptitudes à la conduite : l'exemple des personnes cérébrolésées. Psychologie. Université Rennes 2, 2013. Français. NNT : 2013REN20063 . tel-00962172

HAL Id: tel-00962172

https://theses.hal.science/tel-00962172

Submitted on 20 Mar 2014

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.

THESE DE L'UNIVERSITE DE RENNES 2

sous le sceau de l'Université européenne de Bretagne

pour obtenir le titre de
DOCTEUR DE RENNES 2
Mention : Psychologie cognitive
Ecole doctorale Sciences Humaines et Sociales

présentée par

Céline PREVOST

Préparée l'IRCCyN (Institut de Recherche en Communications et Cybernétique de Nantes)
Unité Mixte de Recherche 6597

Apport de la simulation dans l'évaluation des aptitudes à la conduite : l'exemple des personnes cérébrolésées

Thèse soutenue le 18 novembre 2013
devant le jury composé de :

Claude MARIN-LAMELLET
Directeur de recherche IFFSTAR, Bron / *rapporteur*

Jean-Claude MARQUIE
Directeur de recherche CNRS, Toulouse / *rapporteur*

Catherine GABAUDE
Chargée de Recherche IFFSTAR, Bron / *examinateur*

Isabelle MILLEVILLE
Directrice de thèse

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

« *Le succès, c'est d'aller d'échec en échec sans perdre son enthousiasme.* »,

Winston Churchill.

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

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

REMERCIEMENTS

La thèse est une grande aventure durant laquelle on rencontre de nombreuses personnes. Certaines ne feront que passer mais d'autres influenceront, positivement ou négativement, le déroulement du doctorat. Ces sont à ces dernières que sont destinés mes remerciements.

Comme il se doit, je tiens à remercier en premier lieu mon directeur de thèse, M. Hoc, sans qui cette thèse n'aurait pas pu se faire. Son soutien de tous les instants, ses encouragements mesurés, et ses critiques durant mes premières années de thèse m'ont permis d'appréhender la réalité du doctorat et du monde de la recherche avec lucidité. Son apport ne se limitait pas au plan professionnel mais aussi personnel. En effet, j'ai beaucoup appris sur moi également. Ensuite, je remercie Isabelle Milleville-Pennel, mon encadrante puis directrice de thèse. Malgré les hauts et les bas que présentent chaque thèse, et particulièrement celle-ci, tu as réussi à m'amener au bout du doctorat. Pour ça, je t'en remercie sincèrement. A Franck Mars, notre nouveau chef d'équipe, merci d'avoir su intervenir lorsqu'il le fallait. Ton aide a été précieuse en phase finale de rédaction et a évité une catastrophe ! Je remercie Robert Boisliveau pour avoir écouté, supporté et réparé tous mes problèmes sur simulateur ou ailleurs. Tu fais partie des personnes grâce auxquelles je n'ai jamais abandonné. Un gros câlin à Patricia Brière, notre secrétaire, dont le sourire communicatif permet de voir le soleil tous les jours, même à Nantes. Au laboratoire de manière générale, merci de m'avoir soutenue lorsque j'en ai eu besoin et d'avoir écarter l'épée de Damoclès qui pendait au-dessus de ma tête et dont je n'osais soupçonner l'existence.

Au Centre Hospitalier Universitaire de Nantes, je remercie principalement le Pr. Mathé, qui nous a grandement facilité l'utilisation du simulateur, et Johanna Pothié. Tu as su, malgré un emploi du temps bien chargé, te rendre toujours disponible pour des passations et pour répondre à mes nombreuses questions en tout genre, dans des délais souvent très courts !

Naturellement, je remercie tous les membres de mon jury, Mme Gabaude, M. Marin-Lamellet, et M. Marquié. Vos remarques, commentaires, et encouragements, dans les rapports ou durant la soutenance, m'ont permis de prendre un peu de recul sur la thèse et d'envisager la suite.

Je remercie tous les doctorants et amis que j'ai rencontrés, qui m'ont aidé à me sortir cette thèse de la tête, un instant au moins ! Certains ont davantage contribué que d'autres (vive le club des pingouins !) mais pour ne pas faire de jaloux ou d'oublis, je ne citerai personne. Vous êtes tous suffisamment intelligents pour vous reconnaître et savoir ce que je pense de

vous ! Entre les restos, cinés, balades, sorties plage même au mois de mars, ou tournées des bars, j'ai passé de super moments, alors merci !

Une partie des remerciements va bien entendu à ma famille et en particulier à mes parents. Vous avez eu le privilège d'affronter tous mes changements d'humeur et mes états d'âme à distance, et ce, plusieurs fois par jour parfois !!! Je vous félicite de n'avoir jamais arrêté malgré tout de me soutenir et de m'encourager. Je dois tenir ma persévérance de vous !

Enfin, mes derniers remerciements vont aux participants. Vous êtes une denrée rare et je vous remercie de ne pas m'avoir fait payer trop cher ! Merci de votre bonne volonté, de votre enthousiasme même, à réaliser puis suivre l'avancée de ce travail de thèse, malgré les nombreux aléas auxquels nous avons dû faire face. Vous avez été très compréhensifs et je vous en suis très reconnaissante !

RESUME

La question de l'évaluation des aptitudes à la conduite constitue un enjeu important, tant en termes sécuritaires pour l'ensemble des usagers qu'en termes de qualité de vie pour les personnes dont les compétences subissent un déclin et voient leur autonomie menacée, comme les personnes atteintes de lésions cérébrales acquises. Classiquement, cette évaluation est assurée par une batterie de tests neuropsychologiques et une épreuve sur route. Cependant, ces outils présentent de nombreuses limites. Pour pallier ces limites, de plus en plus de praticiens et chercheurs se tournent vers des outils de simulation. Toutefois, les simulateurs ne font pas l'unanimité car il ne s'agit pas d'une mise en situation réelle. Le but de ce travail de thèse est de montrer l'apport du simulateur pour l'évaluation des compétences de conduite. Nous nous intéressons particulièrement à certains processus qui peuvent être déficitaires et avoir un impact important en conduite (attention sélective, attention partagée, anticipation, etc.). Pour cela, nous avons créé un protocole complet d'évaluation de la conduite, composé d'une batterie de tests neuropsychologiques, d'une épreuve de conduite sur route et d'une épreuve de conduite sur simulateur. Ce protocole a été proposé à des personnes victimes de lésions cérébrales, connues dans la littérature pour présenter des déficits dans les processus qui nous intéressaient. Nous voulions d'une part montrer que le simulateur de conduite est aussi discriminant que les deux autres évaluations pour estimer les compétences de conduite en confrontant les résultats aux différentes évaluations. D'autre part, nous souhaitions mettre en avant l'apport du simulateur pour l'étude des mécanismes déficitaires en montrant leur implication en conduite chez des populations présentant des déficits cognitifs comme les personnes cérébrolésées.

Les résultats confirment que le simulateur de conduite peut permettre d'évaluer les compétences en conduite, comme les tests neuropsychologiques et l'évaluation sur route. En effet, lors du test de conduite sur simulateur les participants cérébrolésés étaient d'une part discriminés des participants contrôles. D'autre part, les résultats étaient cohérents entre les différentes évaluations : Les participants notés majoritairement déficitaires aux tests neuropsychologiques ou à l'épreuve sur route l'étaient également sur simulateur. Par ailleurs, le simulateur apporte un autre éclairage sur les déficits en conduite en apportant notamment des informations supplémentaires susceptibles d'expliquer la nature des déficits observés sur route (oculométrie, mesure des temps de réaction). Le simulateur permet ainsi d'étudier les principaux processus impliqués en conduite, dans une situation écologique. Le simulateur constitue donc

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

un outil pertinent pour l'évaluation des déficits cognitifs et leurs répercussions sur l'activité de conduite.

Mots-clés : simulation, conduite automobile, évaluation, aptitude à la conduite, déficit cognitif, personnes cérébrolésées

ABSTRACT

The question of the driving skills assessment is an important issue, both in terms of security for all road users and in terms of life quality for people whose skills are decreasing and have their autonomy threatened, as brain-injured people. Usually, this assessment is performed by a neuropsychological tests battery and an on-road test. Nevertheless, these tools present many limitations. To overcome these limitations, more and more practitioners and researchers are looking around simulation tools. However, simulators are not welcomed unanimously because it is not a real-life situation. The purpose of this study is to show the contribution of the simulator in the assessment of the driving skills. We are particularly interested in some processes which may be impaired and may have a great issue in driving (selective attention, shared attention, anticipation, etc.). In that way, we created a complete assessment protocol of driving, consisting in a neuropsychological test battery, an on-road driving test, and a simulator driving test. This protocol was proposed to people suffering of brain damages, known in the literature to present deficits in the processes which interested us. We wanted on one hand to show that the driving simulator is also discriminating as the two other evaluations to estimate the driving skills, by confronting the results to the various evaluations. On the other hand, we wished to put forward the contribution of the simulator for the study of the impaired mechanisms by showing their implication in driving in populations presenting cognitive deficits as the brain-injured people.

The results confirm that the simulator allow us to assess the driving skills, as well as neuropsychological tests and on-road evaluation. On one hand, during the driving test on simulator, the brain-injured participants were discriminated from the control one. On the other hand, the results were coherent between the various assessments: The participants who were mainly noted impaired in the neuropsychological tests or in the on-road driving test were also noted impaired on the simulator. Besides, the simulator gives another perspective on the deficits in driving by bringing in particular additional information susceptible to explain the nature of the deficits observed on road (eye-tracker, response time measures).

The simulator so allows to study the main processes involved in driving, in an ecological situation. Thus, the simulator constitutes a relevant tool for assessing cognitive impairments and their repercussions on the driving activity.

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

Moreover, it provides a new perspective on driving skills. It also help to study the main processes involved in driving, in ecological conditions. In particular, we could highlight some cognitive deficits in brain-injured people. The simulator is therefore a relevant tool

Key-words: simulation, car driving, assessment, driving skills, cognitive deficits, brain-injured people

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE 5

PARTIE 1 : INTRODUCTION THEORIQUE ET OBJECTIFS 9

CHAPITRE 1 - APPORT DE LA SIMULATION DANS L'EVALUATION D'ACTIVITES COMPLEXES : L'EXEMPLE DE LA CONDUITE AUTOMOBILE 11

1 ETUDE DES PROCESSUS EN JEU DANS LES ACTIVITES COMPLEXES : L'EXEMPLE DE LA CONDUITE AUTOMOBILE 13

1.1 PROCESSUS IMPLIQUES DANS LA CONDUITE AUTOMOBILE 14
1.1.1 Processus attentionnels 14
1.1.2 Contrôle cognitif des activités complexes 26
1.2 SYNTHESE DES PROCESSUS PARTICULIEREMENT IMPLIQUES DANS LA CONDUITE 34

2 EVALUATION DES PROCESSUS COGNITIFS : LES OUTILS DISPONIBLES EN CONDUITE AUTOMOBILE 35

2.1 TESTS NEUROPSYCHOLOGIQUES 35
2.1.1 Fonctions cognitives évaluées et tests neuropsychologiques utilisés 36
2.1.2 Limites des tests neuropsychologiques par rapport à l'étude de la conduite automobile 38
2.2 CONDUITE SUR ROUTE 39
2.2.1 Evaluations existantes 39
2.2.2 Limites des évaluations de conduite sur route 39
2.3 SIMULATEUR DE CONDUITE : UNE SOLUTION ALTERNATIVE 40
2.3.1 Conduite sur simulateur et conduite réelle 41
2.3.2 Avantages du simulateur de conduite 48
2.3.3 Limites du simulateur : le mal du simulateur 50
2.4 QUESTIONNAIRES ET AUTRES MESURES SUBJECTIVES 51

3 IMPACT DE LA DETERIORATION DES FONCTIONS COGNITIVES SUR LA CONDUITE : L'EXEMPLE DES PERSONNES CEREBROLESEES 51

3.1 DEFINITION DES LESIONS CEREBRALES ACQUISES 51
3.2 DETERIORATION DES FONCTIONS COGNITIVES : IMPACT SUR LA CONDUITE 52

CHAPITRE 2 - OBJECTIFS DE LA RECHERCHE 53

1 PREMIER OBJECTIF : VALIDATION DE L'UTILISATION D'UN SIMULATEUR DE CONDUITE POUR EVALUER LES COMPETENCES DE CONDUITE COMPARATIVEMENT A UNE BATTERIE DE TESTS NEUROPSYCHOLOGIQUES ET A UNE EVALUATION SUR ROUTE 55

2 SECOND OBJECTIF : APPORT DU SIMULATEUR DE CONDUITE POUR L'ETUDE DES MECANISMES COGNITIFS DEFICITAIRES LORS DE LA CONDUITE 56

2.1 ETUDE DE L'ATTENTION SELECTIVE 57
2.2 ETUDE DE L'ATTENTION PARTAGEE 58
2.3 ETUDE DE L'ANTICIPATION 59
2.4 ETUDE DE L'ADAPTATION DU CONTROLE COGNITIF 60
2.5 ETUDE DE LA VITESSE DE TRAITEMENT 60

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

PARTIE 2 : VALIDITE ECOLOGIQUE DE L'OUTIL DE SIMULATION 61

CHAPITRE 3 - VALIDITE ECOLOGIQUE DU SIMULATEUR : INTERETS ET LIMITES 63

1 METHODE 65

1.1 PARTICIPANTS 65
1.2 DISPOSITIF ET PROCEDURE 66
1.2.1 Dispositif 66
1.2.2 Appareil de mesure de la fréquence cardiaque 68
1.2.3 Questionnaires 68
1.3 PROCEDURE 69
1.3.1 Conduite sur simulateur (condition Simulation) 70
1.3.2 Conduite sur route (condition VAutoEcole) 70
1.3.3 Evaluation de la présence lors de la conduite du véhicule personnel (condition VPerso) 70
1.4 RECUEIL DES DONNEES ET TRAITEMENTS 70

2 RESULTATS 71

2.1 ANALYSE DE LA FREQUENCE CARDIAQUE MAXIMUM (FCM) 71
2.2 CHARGE MENTALE (NASA-TLX) 71
2.3 STRESS 71
2.4 MAITRISE 72
2.4.1 Maîtrise du véhicule 72
2.4.2 Maîtrise des événements 72
2.5 EFFORT 72
2.6 IMMERSION 73
2.7 PRESENCE 73
2.7.1 Place illusion 73
2.7.2 Plausibility illusion et réalisme 73

3 CONCLUSION 74

PARTIE 3 : APPORT DU SIMULATEUR DANS UN PROTOCOLE D'EVALUATION DES APTITUDES A LA CONDUITE 75

CHAPITRE 4 - ETUDES PRELIMINAIRES POUR LA CONCEPTION ET LA VALIDATION DES SCENARIOS SUR SIMULATEUR DE CONDUITE 77

1 PRISE EN MAIN DU VEHICULE : CONCEPTION DES PARCOURS D'INITIATION 79

2 DEFINITION DU MATERIEL POUR L'ETUDE DE PLUSIEURS PROCESSUS A TRAVERS DES EVENEMENTS CRITIQUES 80

2.1 DEFINITION DES TERMES IMPORTANTS POUR LA COMPREHENSION DE L'ETUDE DES EVENEMENTS CRITIQUES 80
2.1.1 Objet critique, objet d'intérêt, et moment critique 80
2.1.2 Processus impliqués et processus critiques 81
2.2 CONCEPTION DES PARCOURS : ETUDE DE LA VARIABILITE DES CONDITIONS DE CONDUITE 81
2.3 EVENEMENTS DU PARCOURS EN VILLE, PROCESSUS ET PROCESSUS CRITIQUES IMPLIQUES 83
2.3.1 Evénement 1 en ville : piéton qui traverse au feu piéton rouge 84
2.3.2 Evénement 2 en ville : camionnette à l'arrêt dans une courbe 88

2.3.3 Evénement 3 en ville : piéton qui traverse derrière un camion de vente ambulante 89
2.3.4 Evénement 4 en ville : enfant qui traverse en suivant son ballon 89
2.3.5 Evénement 5 en ville : piéton qui traverse pour rejoindre le bus 89
2.3.6 Récapitulatif des processus critiques impliqués dans les événements en ville 90
2.4 EVENEMENTS DU PARCOURS EN CAMPAGNE ET PROCESSUS IMPLIQUES 90
2.4.1 Evénement 1 en campagne : véhicule en sens inverse qui double un bus 91
2.4.2 Evénement 2 en campagne : scooter lent sur la voie du participant 91
2.4.3 Evénement 3 en campagne : voiture qui s'insère devant le participant 92
2.4.4 Evénement 4 en campagne : tracteur lent sur notre voie que le participant voit tardivement 92
2.4.5 Evénement 5 en campagne : biche qui traverse la route 92
2.4.6 Evénement 6 en campagne : piéton qui traverse la chaussée 93
2.4.7 Evénement 7 en campagne : véhicule en sens inverse qui veut forcer le passage en tournant 93
2.4.8 Récapitulatif des processus critiques impliqués dans les événements en campagne 94
2.5 EVENEMENTS DU PARCOURS DE NUIT ET PROCESSUS IMPLIQUES 94
2.5.1 Evénement 1 de nuit : voiture lente sur la voie du participant avec feux arrière défaillants ... 95
2.5.2 Evénement 2 de nuit : camion lent sur la voie du participant peu visible 95
2.5.3 Evénement 3 de nuit : voiture en panne dans un virage 96
2.5.4 Evénement 4 de nuit : piéton sur le bas-côté droit 96
2.5.5 Evénement 5 de nuit : biche qui traverse 96
2.5.6 Récapitulatif des processus critiques impliqués dans les événements de nuit 97
2.6 VALIDATION DES EVENEMENTS CRITIQUES 97

3 DEFINITION DU MATERIEL POUR L'ETUDE DES PROCESSUS D'ATTENTION VISUELLE 98

3.1 SELECTION DES IMAGES PUBLICITAIRES 99
3.1.1 Contrôle de la couleur 99
3.1.2 Contrôle du thème de l'image 100
3.1.3 Contrôle de la composante affective : la valence et l'excitation 100
3.1.4 Contrôle de la taille 105
3.2 POSITIONNEMENT DES PANNEAUX PUBLICITAIRES 105

4 DEFINITION DU MATERIEL POUR L'ETUDE DE L'EFFET DE LA CHARGE AUDITIVE ET DES CONSIGNES 107

4.1 MISE AU POINT DE PARCOURS EXPERIMENTAUX COMPARABLES 107
4.2 DEFINITION DE LA CHARGE AUDITIVE 108
4.3 DEFINITION DES CONSIGNES 109

5 CONCEPTION D'UN SCENARIO POUR L'ETUDE DE LA VITESSE DE TRAITEMENT 110

CHAPITRE 5 - ETUDE DES MECANISMES COGNITIFS DEFICITAIRES A TRAVERS LE SIMULATEUR DE CONDUITE, COMPARATIVEMENT AUX TESTS NEUROPSYCHOLOGIQUES ET A L'EVALUATION SUR ROUTE : METHODOLOGIE 113

1 PARTICIPANTS 115

2 MATERIEL ET METHODE 117

2.1 PROTOCOLE D'EVALUATION DE LA CONDUITE 118
2.1.1 Evaluation de conduite sur simulateur 118
2.1.2 Bilan neuropsychologique 123
2.1.3 Evaluation sur route 127
2.2 RE-ENTRAINEMENT 130
2.3 DEUXIEME EVALUATION 131

3 PLAN EXPERIMENTAL ET METHODES D'ANALYSES STATISTIQUES 132

3.1 PLAN EXPERIMENTAUX 132
3.2 METHODES D'ANALYSES STATISTIQUES 132

CHAPITRE 6 - ETUDE DES MECANISMES COGNITIFS DEFICITAIRES A TRAVERS LE SIMULATEUR DE CONDUITE, COMPARATIVEMENT AUX TESTS NEUROPSYCHOLOGIQUES ET A L'EVALUATION SUR ROUTE : RESULTATS.....133

1 BILAN NEUROPSYCHOLOGIQUE 135

1.1 ETUDE INTER-GROUPES 137
1.1.1 Tests normés..... 137
1.1.2 Tests non normés..... 141
1.2 ETUDE INTRA-GROUPE..... 142
1.3 SYNTHESE ET IMPLICATIONS POUR LA CONDUITE 145

2 RESULTATS SUR ROUTE 145

2.1 ETUDE INTER-GROUPES 147
2.2 ETUDE INTRA-GROUPE..... 150
2.3 CONFRONTATION AVEC LES TESTS NEUROPSYCHOLOGIQUES 151
2.4 POINTS FORTS ET FAIBLESSES DE L'EVALUATION SUR ROUTE..... 152

3 RESULTATS SUR SIMULATEUR..... 152

3.1 ETUDE DES PROCESSUS MIS EN JEU DANS LES EVENEMENTS CRITIQUES..... 153
3.1.1 Etude des accidents lors des événements critiques 154
3.1.2 Etude détaillée des événements critiques n'ayant pas entrainé d'accident 171
3.1.3 Synthèse de l'étude des événements critiques par rapport aux tests neuropsychologiques et à l'évaluation sur route..... 176
3.2 ETUDE DES PROCESSUS D'ATTENTION VISUELLE A TRAVERS LES DISTRACTEURS VISUELS..... 177
3.2.1 Etude inter-groupe..... 177
3.2.2 Etude intra-groupe 185
3.2.3 Synthèse des résultats concernant l'étude des processus attentionnels à travers des distracteurs visuels 187
3.3 RALENTISSEMENT DE LA VITESSE DE TRAITEMENT 188

4 CONFRONTATION DES EVALUATIONS : APPORT DU SIMULATEUR DE CONDUITE..... 190

CHAPITRE 7 - DISCUSSION GENERALE 193

1 SYNTHESE DES PRINCIPAUX RESULTATS 195

1.1 PREMIER OBJECTIF : VALIDATION DE L'UTILISATION D'UN SIMULATEUR DE CONDUITE POUR EVALUER LES COMPETENCES DE CONDUITE COMPARATIVEMENT A UNE BATTERIE DE TESTS NEUROPSYCHOLOGIQUES ET A UNE EVALUATION SUR ROUTE 195
1.1.1 Etude de la validité écologique du simulateur de conduite 195
1.1.2 Evaluation des compétences de conduite sur simulateur par rapport aux tests neuropsychologiques et à l'évaluation sur route 196
1.1.3 Cohérence et complémentarité du protocole d'évaluation des compétences de conduite 196
1.2 DEUXIEME OBJECTIF : APPORT DU SIMULATEUR DE CONDUITE POUR L'ETUDE DES MECANISMES COGNITIFS DEFICITAIRES LORS DE LA CONDUITE..... 197
1.2.1 Etude de l'attention sélective 197
1.2.2 Etude de l'anticipation..... 198
1.2.3 Etude de la vitesse de traitement 199

2 CONCLUSION ET PERSPECTIVE 199

BIBLIOGRAPHIE.....201

INDEX DES FIGURES 217

INDEX DES TABLEAUX 223

ANNEXES 229

INTRODUCTION GENERALE

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

Face au nombre d'accidents de la route, la question de la sécurité routière présente des enjeux importants. Un aspect de celle-ci consiste en l'évaluation des compétences de conduite. S'il est vrai que cette question se pose pour les futurs conducteurs, elle concerne également un certain nombre de personnes qui, du fait du vieillissement, de maladie, ou d'atteintes cérébrales, vont présenter des diminutions de leurs capacités, notamment cognitives. Il est donc essentiel pour ces personnes d'être capable d'évaluer de manière efficace leur aptitude à la conduite. Par ailleurs, cela ne constitue pas seulement un objectif sécuritaire, mais également un objectif de qualité de vie, pour maintenir ces personnes dans l'autonomie dans la vie quotidienne.

Actuellement, les outils utilisés afin d'évaluer les compétences de conduite sont souvent restreints à une évaluation sur route et une batterie de tests neuropsychologiques. Bien que très utiles, ces outils présentent de nombreuses limites. En effet, d'une part, les tests neuropsychologiques sont statiques et n'estiment pas les compétences en situation écologique, ce qui empêche de prendre en compte la mise en place de compensations d'éventuels déficits classiquement observées dans des situations complexes. D'autre part, l'évaluation sur route est évidemment plus écologique mais peut être risquée lors de réponses comportementales inadaptées. Par ailleurs, elle est rarement standardisée et difficilement reproductible si l'on veut l'effectuer sur route ouverte.

Avec l'apparition de la réalité virtuelle émergent de nouveaux outils dont les simulateurs de conduite. Ceux-ci présentent, à première vue, tous les avantages d'une évaluation classique sur route, sans leurs inconvénients. Les scénarios de conduite peuvent être programmés précisément et donc parfaitement standardisé, mais également reproductible d'une personne à l'autre. Néanmoins, le recours à la simulation est souvent critiqué car il ne s'agit pas d'une mise en situation réelle.

Dans ce travail de thèse, nous nous demanderons donc quel est l'apport de la simulation dans l'évaluation des aptitudes à la conduite. Pour cela, nous nous interrogerons dans un premier temps sur la validité de cet outil, comparativement aux outils existants. Permet-il d'évaluer les compétences de conduite, de la même manière que le permettent des tests neuropsychologiques ou une évaluation sur route ? En quoi peut-il différer ? En quoi peut-il être complémentaire ? Dans un second temps, nous nous intéresserons plus particulièrement aux mécanismes cognitifs mis en jeu dans l'activité de conduite automobile. Nous nous pencherons sur le cas de personnes qui présentent des déficits dans ces processus: les personnes cérébro-

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

lésées. Nous essayerons ainsi de montrer que le simulateur de conduite peut permettre de mettre en évidence des déficits concernant certains mécanismes impliqués en conduite.

Dans la première partie de ce manuscrit, nous aborderons les aspects théoriques qui sous-tendent cette thèse et ses objectifs. Ainsi, le chapitre 1 présentera des modèles théoriques sur lesquels s'est appuyée l'étude des processus impliqués dans l'activité de conduite automobile. Nous définirons ainsi les processus qui nous intéressent particulièrement et les outils disponibles pour les évaluer. Enfin, nous verrons une manière de les étudier, à travers l'exemple des personnes cérébrolésées. Le chapitre 2 énoncera les objectifs fixés dans cette étude et, en accord avec les modèles présentés, un moyen de les atteindre.

Dans la deuxième partie constituée du chapitre 3, nous discuterons de la validité écologique de l'outil de simulation.

Enfin, dans la troisième et dernière partie, nous considèrerons l'apport du simulateur dans un protocole d'évaluation des aptitudes à la conduite. Ainsi, dans le chapitre 4, nous détaillerons les études préliminaires réalisées afin de concevoir et valider des scénarios de conduite sur simulateur, dans le but d'étudier les mécanismes impliqués en conduite. Le chapitre 5 développera la méthode employée pour évaluer les aptitudes à la conduite, alors que le chapitre 6 présentera les résultats de cette étude. Enfin, le chapitre 7 discutera des résultats vus dans le chapitre précédent et apportera les conclusions et perspectives de cette étude.

Partie 1 :

Introduction théorique et objectifs

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

CHAPITRE 1 - APPORT DE LA SIMULATION DANS L'EVALUATION D'ACTIVITES COMPLEXES : L'EXEMPLE DE LA CONDUITE AUTOMOBILE

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

1 Etude des processus en jeu dans les activités complexes : l'exemple de la conduite automobile

De nombreux auteurs se sont attachés à modéliser le comportement humain à travers diverses activités. Si certaines tâches dites simples (comme le geste de pointage) ont souvent été étudié, la plupart des activités de la vie quotidienne sont plus complexes et font appel à différentes sous-tâches. Lorsqu'on parle d'activité complexe, cela ne signifie pas une activité difficile ou compliquée. Cela fait référence à une activité qui mobilise des ressources variées, quelles soient internes (des savoirs, des savoir-faire, des compétences, etc.) ou externes (aides méthodologiques, fiches techniques, etc.). La conduite automobile est un bon exemple d'activité complexe. En, effet, elle nécessite des capacités perceptives, motrices et cognitives. Au plan cognitif, le conducteur doit sélectionner, parmi toutes les informations dont il dispose, celles qui sont pertinentes pour la tâche de conduite et inhiber celles qui ne le sont pas. Il doit partager ses ressources entre les différentes sous-tâches de conduite (gestion de la trajectoire, de la vitesse, interaction avec l'environnement, etc.). Il doit aussi répondre à la situation de manière adaptée, souvent dans un délai limité.

Les modèles du comportement humain proposés se sont intéressés notamment aux ressources cognitives mises en œuvre pour mener à bien une tâche et aux mécanismes qui gèrent ces ressources. Peu à peu, les théories se sont complexifiées, intégrant de plus en plus la diversité de l'activité et l'aspect dynamique de la situation. La diversité de l'activité a poussé les chercheurs vers des modèles intégratifs, combinant plusieurs processus. La prise en considération de la dynamique de la situation a nécessité d'introduire des mécanismes de régulation des processus et des ressources afin de rendre compte des aspects adaptatifs du fonctionnement humain.

Dans le cadre de cette thèse nous ne nous intéresserons pas aux activités complexes en elles-mêmes, mais à l'étude des outils dont nous disposons afin d'évaluer le bon fonctionnement des processus cognitifs à l'œuvre dans ces activités. Nous nous intéresserons tout particulièrement au cas de l'activité de conduite automobile et nous nous attacherons à montrer en quoi l'évolution de nouvelles technologies, telles que la simulation de conduite, peut nous fournir des outils précieux pour l'évaluation.

La conduite automobile, en tant qu'activité complexe, a été largement étudiée. En effet, de nombreux chercheurs se sont servis de cette activité pour étudier les processus qui les intéressaient. C'est le cas par exemple du réseau éveil, sommeil, attention, transports (RESAT), qui se focalise principalement sur l'étude des processus attentionnels en conduite. Il est vrai que la conduite automobile sollicite beaucoup les processus attentionnels et constitue donc un bon

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

point d'entrée pour les étudier : sélection des informations pertinentes, inhibition des informations non pertinentes, répartition des ressources entre différentes tâches (comme la gestion de la vitesse, le maintien de la trajectoire, l'interaction avec les autres usagers, etc.), ou encore le maintien des ressources attentionnelles.

Selon le cadre théorique auquel on s'attache, l'attention peut également être considérée, non pas comme un processus, mais davantage comme une ressource utilisée et partagée par de nombreux autres processus cognitifs. Nous nous intéresserons donc également aux modèles concernant le contrôle de ces ressources. En effet, la manière dont sont réparties les ressources a longtemps été discutée. S'il n'existe pas de consensus, il y a tout de même eu une évolution vers des modèles plus intégratifs qui permettent de rendre compte d'activités dynamiques. Nous présenterons l'évolution de ces modèles qui ont abouti à un modèle qui nous semble pertinent, le modèle du contrôle cognitif de Hoc et Amalberti (2007). Nous discuterons de l'apport de ce modèle pour l'étude des processus impliqués dans la conduite automobile.

Pour cela nous commencerons par une présentation exhaustive des processus cognitifs impliqués dans l'activité de conduite. Nous présenterons ensuite les outils disponibles actuellement pour l'évaluation de ces processus en conduite, puis nous nous attacherons à montrer en quoi l'apport de la simulation, peut nous permettre d'accéder à une meilleure compréhension des processus à l'œuvre ainsi que de leur dysfonctionnement, le cas échéant.

1.1 Processus impliqués dans la conduite automobile

1.1.1 Processus attentionnels

Le cadre des théories de l'attention a souvent été utilisé pour rendre compte des activités complexes. Dans un premier temps, nous allons expliquer en quoi consistent les théories de l'attention. Sachant que la définition de l'attention varie selon les perspectives théoriques, nous expliquerons quelles assertions nous considérons dans cette thèse. Dans un second temps, nous détaillerons comment les processus attentionnels peuvent être évalués à travers une activité complexe telle que la conduite automobile.

1.1.1.1 Modèles de l'attention

1.1.1.1.1 Modèles de filtres

On ne peut pas parler d'attention sans citer celui qu'on considère comme le père des théories de l'attention, William James.

« *[Attention is] the taking possession of the mind, in clear and vivid form, of one out of what seem several simultaneously possible objects or trains of thoughts. [...] It implies withdrawal from some things in order to deal effectively with others*» (extrait de *The Principles of Psychology,* 1890, p. 403-404)

Dans cette première définition, on peut retenir certains aspects importants. Tout d'abord, la notion de sélectivité est abordée dans cette "prise de possession par l'esprit (...) d'un objet (...) parmi d'autres simultanément possibles". Ce point fera l'unanimité parmi les théories plus récentes. Ensuite, la sélectivité n'est possible, lorsque plusieurs objets peuvent être sélectionnés, qu'accompagnée d'un processus d'inhibition qui écarte les stimuli non sélectionnés.

Les modèles de filtre, également appelés modèles structuraux, sont les premiers modèles à émerger en considérant ces aspects de sélection et d'inhibition (Broadbent, 1958 ; Treisman, 1960 ; Deutsch & Deutsch, 1963). Ils considèrent l'attention comme un système complet qui va réaliser l'ensemble des opérations de détection, sélection et filtrage des informations. Cette entité possède une structure propre, par laquelle les informations doivent transiter pour être traitées correctement. Ils posent l'hypothèse que l'attention agirait comme un filtre. Les stimuli de l'environnement passeraient par un "goulet d'étranglement" et ne pourraient pas être tous traités. Le filtrage, tel qu'il est alors conçu, va permettre de sélectionner les stimuli qui doivent être traités plus profondément et d'inhiber ceux qui ne le doivent pas. Par exemple, dans l'épreuve de Stroop (1935), il faut identifier de quelle couleur est écrit un mot. Or, dans cette expérience, ce mot peut désigner une couleur. Le participant doit donc sélectionner la couleur à identifier et inhiber la lecture du mot : c'est l'attention sélective visuelle.

Le filtrage des informations ne se fait pas uniquement dans la modalité visuelle, mais concerne également toutes les modalités d'entrée des informations. On le retrouve donc par exemple en audition. En effet, Cherry (1953) fut le premier à mettre en évidence ce filtrage (sans toutefois aboutir à une théorie) en élaborant le paradigme d'écoute dichotique. Il montre que les gens sont capables d'inhiber ce qu'ils entendent dans une oreille et de sélectionner ce

qu'ils entendent dans l'autre. Cette capacité est à la base de l'*effet cocktail party*. En effet, lors d'un cocktail, nous sommes capables de nous focaliser sur la conversation en cours, même s'il y a du bruit environnant. Il faudrait donc opérer, à un certain niveau de traitement, une sélection des informations pertinentes.

Pour Broadbent (1958), cette sélection se feraient de manière précoce, sur la base des caractéristiques physiques des stimuli (saillance, intensité, etc.). On parle alors de théories de sélection précoce des informations ("early selection theories"). Or, les détenteurs des théories de sélection tardive ("late selection theories"), comme Deutsch & Deutsch (1963) par exemple, ont montré que le traitement effectué sur les informations filtrées pouvait être plus profond que le supposaient au premier abord ces théories. C'est ce qui est mis en évidence à travers l'*effet cocktail party*. En effet, lors d'un cocktail, nous sommes capables de nous focaliser sur la conversation et d'inhiber le bruit ambiant. Toutefois, si notre prénom est prononcé dans le bruit ambiant, nous l'entendrons. L'information, initialement inhibée, a donc été traitée sur ses caractéristiques sémantiques, et non simplement physiques. Toutefois, les théories de sélection tardive de l'information ont rapidement été abandonnées car il était inconcevable que toute information soit traitée au niveau sémantique.

1.1.1.1.2 Modèles fonctionnels

Les modèles structuraux ont été critiqués (Kahneman, 1973) car ils ne rendaient pas compte des mécanismes impliqués, notamment en termes de capacité de traitement et de quantité de ressources attentionnelles. En effet, ils ne rendaient pas compte de l'intensité de traitement lorsque la tâche nécessite un traitement en profondeur. Par ailleurs, ils n'expliquaient pas les baisses de performances liées au partage attentionnel entre différentes tâches. Par exemple, le modèle de Broadbent (1958), repose sur l'existence d'un canal unique de traitement : toute information, quelle que soit sa nature, passe par un seul et unique canal. Il n'existe donc pas de mécanisme permettant de répartir les ressources attentionnelles sur plusieurs sources d'information simultanément selon leur nature.

Ainsi, les modèles structuraux ont rapidement laissé place à des modèles plus fonctionnels. Kahneman (1973) propose alors le modèle de ressources attentionnelles. Il s'agit d'un modèle rendant compte de la distribution des ressources entre les diverses tâches. Le système cognitif dispose d'une quantité de ressources limitée, qu'il va affecter aux différentes tâches, selon leurs besoins. Les baisses de performances relevées lorsque d'une situation de double-tâche

sont liées aux ressources limitées qui ne permettent pas de traiter équitablement chacune des informations.

Wickens (1984, 2002) propose quant à lui le modèle des ressources multiples (figure 1) dans lequel chaque modalité d'informations a son propre stock de ressources. Un partage peut être effectué si les ressources nécessaires au traitement de deux informations proviennent de stocks différents. Les deux tâches seront traitées avec la même efficacité, sans subir la moindre dégradation. Ainsi, les informations auditives et visuelles seraient traitées séparément et plus efficacement. Wickens (2002) a en effet montré que le traitement était plus efficace si l'on présentait deux informations dans des modalités différentes (visuelle et auditive) que dans les mêmes modalités (visuelles par exemple).

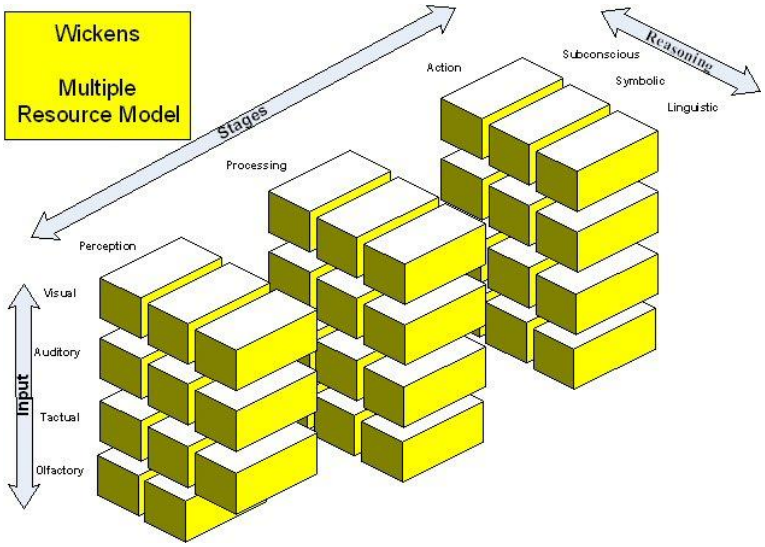


Figure 1 : Modèle des ressources multiples de Wickens (1984)

Camus (1996, 2003), s'inspirant des travaux de Wickens, postule l'existence « d'une multitude de réservoirs attentionnels où chaque traitement viendrait puiser la quantité de ressources dont il a besoin sans rien consommer des ressources appartenant aux autres réservoirs qu'ils n'utilisent pas et qui peuvent donc servir à réaliser en parallèle d'autres traitements différents».

Toutefois, ce type de modèle reste à un niveau global et simpliste (Chapon, Bruyas, Lelekov-Boissard, Letisserand, Deleurence, & Chanut, 2004). D'une part, il ne permet pas d'expliquer pourquoi le traitement de deux tâches, utilisant des modalités sensorielles différentes puissent interférer entre elles. D'autre part, il ne souligne pas la distinction et le rôle des processus automatiques et contrôlés.

En effet, la nature des processus en œuvre est une perspective qui a beaucoup intéressé les chercheurs, à savoir s'il s'agit de processus automatiques ou de processus contrôlés. En effet, reprenons l'épreuve de Stroop (1935) dans laquelle le participant doit identifier la couleur dans laquelle est écrit un mot. Si le mot désigne une couleur, il peut être soit congruent avec la couleur dans laquelle le mot est écrit, soit non congruent. Or dans cette épreuve, on a observé ce qu'on appelle un phénomène d'interférence : Lorsque le mot et la couleur à identifier ne coïncident pas, les participants ont des temps de réaction plus longs que lorsqu'ils sont congruents. Cet effet est expliqué par la lecture automatique du mot qu'il faut inhiber lorsque c'est non congruent. Certains processus seraient donc automatiques et d'autres seraient contrôlés. Les mêmes constatations ont été faites en ce qui concerne le paradigme d'écoute dichotique (Cherry, 1953). Alors que les participants sont capables d'inhiber ce qu'ils entendent dans une oreille et de sélectionner ce qu'ils entendent dans l'autre, projeter le prénom du participant dans l'oreille à inhiber va amener à une capture attentionnelle. Les participants ne pourront pas inhiber l'information.

Cette notion d'automatisme des processus a beaucoup intéressé Schneider et Shiffrin. En 1977, ils ont proposé une expérience dans laquelle une lettre devait être détectée parmi d'autres lettres, qui jouaient le rôle de distracteurs. Ils faisaient varier le nombre de cibles et le nombre de distracteurs. Pour un groupe, les cibles étaient toujours les mêmes, pour un autre groupe, les cibles variaient d'un essai à l'autre. Ils ont montré ainsi que la cohérence de la tâche (cibles identiques d'un essai à l'autre) permet d'automatiser les processus cognitifs. Cette automatisation apparaît sur la base de la répétition. Le groupe avec les cibles changeantes a dû avoir recours à des processus contrôlés pour mener à bien la tâche. Selon Schneider et Shiffrin (1977), les processus contrôlés sont conscients, séquentiels et nécessitent de nombreuses ressources. Ils peuvent facilement être interrompus et ne peuvent pas être menés simultanément avec une autre activité contrôlée. Au contraire, les processus automatiques, inconscients, ne sont pas coûteux et vont libérer des ressources. Ils sont difficiles à interrompre mais peuvent être menés simultanément avec une autre activité contrôlée. Ainsi, dans le cas de la conduite automobile, un conducteur va libérer des ressources en automatisant des tâches et sous-tâches liées à la conduite. Ces ressources pourront être allouées à d'autres tâches automatiques ou à une tâche contrôlée. Afin d'automatiser un processus, il est nécessaire de répéter l'activité de nombreuses fois, comme c'est le cas avec l'apprentissage du passage de vitesse par exemple.

1.1.1.1.3 Modèles intégratifs : l'exemple du modèle de Van Zomeren et Brouwer (1994)

Les modèles de Broadbent (1958) ou encore de Schneider et Shiffrin (1977) étaient des modèles qui considéraient l'attention comme un tout "indifférencié". Ils ont servi de base à d'autres modèles à composantes, plus intégratifs. Initiés par Posner et Rafal (1987), ces modèles envisagent l'attention comme un ensemble de mécanismes ou fonctions spécifiques, possédant des ressources limitées, mobilisables selon la situation. Le modèle à composante le plus élaboré et le plus utilisé à ce jour est sans doute le modèle de Van Zomeren et Brouwer (1994). Dans leur modèle, ils proposent de distinguer deux composantes de l'attention qui leur semblent fondamentales : (1) l'intensité et (2) la sélectivité (cf. figure 2). Ces deux composantes sont contrôlées par (3) un système superviseur.

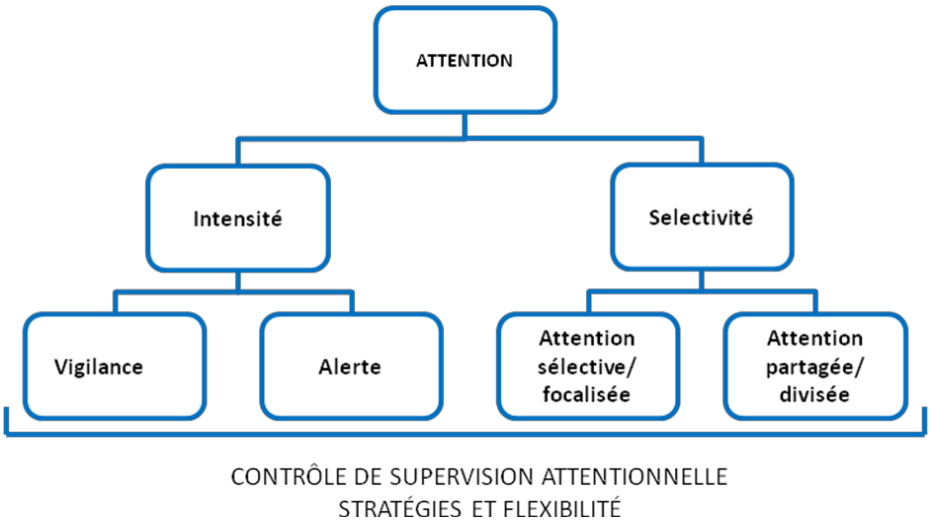


Figure 2 : Modèle de l'attention de Van Zomeren et Brouwer (1994).

(1) L'intensité de l'attention se décline en deux sous-composantes. D'une part, il existe l'alerte, qui comprend elle-même deux aspects : l'alerte phasique et l'alerte tonique. Concernant l'alerte phasique, il s'agit de la « facilitation instantanée et généralisée de la performance induite par un avertisseur ». On parle alors d'état d'alerte phasique lorsqu'on mobilise nos ressources attentionnelles suite à un avertissement ou une consigne. Posner et Rafal (1987) définissent l'alerte tonique comme « les changements diurnes du niveau d'éveil et des performances d'un sujet ». Il n'existe pas d'évaluation spécifique du niveau d'alerte tonique (Leclerc, 2002), son observation repose principalement sur des signes cliniques : obnubilation de la conscience, somnolence, paupières lourdes, bâillements, etc. La vigilance est l'autre aspect intensif de l'attention. En réalité, il s'agirait plutôt d'un continuum qui oppose deux notions :

la vigilance et l'attention soutenue. La vigilance est la capacité à maintenir un niveau d'attention suffisant pour traiter activement des stimuli lors d'une tâche qui s'étend dans le temps. Mackworth (1957) la définit comme un « état de préparation à détecter et réagir à certains changements discrets apparaissant à des intervalles de temps variables au sein de l'environnement ». L'attention soutenue correspond au contraire à la capacité à traiter activement et de manière continue un grand nombre d'informations dont le flux de présentation est rapide et ininterrompu. En situation de vie quotidienne, on peut illustrer la vigilance par la conduite d'un véhicule sur une autoroute dégagée et dans des conditions climatiques favorables. L'attention soutenue serait davantage proche de la situation dans laquelle se trouve l'interprète en traduction simultanée lors d'un congrès.

(2) A l'opposé de l'intensité se trouve le versant "sélectivité". La sélectivité de l'attention fait référence à ce que nous avons déjà vu avec les théories sur le filtre attentionnel : Il n'est pas possible de traiter simultanément toutes les informations qui se présentent, il est donc nécessaire d'effectuer une sélection des informations à traiter. Il s'agit donc d'un aspect fondamental dans les processus attentionnels. La composante "sélectivité" se décline elle-même en deux sous-composantes : l'attention sélective et l'attention partagée. L'attention sélective (ou attention focalisée) va consister à sélectionner le stimulus à traiter, tout en inhibant les autres. Par ailleurs, dans ce cadre théorique, il est possible de traiter plusieurs stimuli en parallèle grâce aux capacités de partage des ressources attentionnelles : c'est l'attention partagée. L'attention partagée, dépend des capacités du système de supervision, qui doit allouer correctement les ressources, et nécessite un certain niveau de vigilance.

(3) Pour un fonctionnement optimal des différentes composantes et sous-composantes de l'attention, le modèle de Van Zomeren et Brouwer (1994) rend compte d'un système superviseur attentionnel qui module l'activité de l'ensemble des composantes de l'attention. Ce système s'inspire du système attentionnel superviseur (SAS) défini par Norman et Shallice (Norman & Shallice, 1986). Il supervise l'ensemble des processus attentionnels et adapte les ressources aux besoins définis selon les composantes décrites ci-dessus. Par exemple, pour l'attention partagée, il est nécessaire que ce système alloue correctement (en sélectivité et en intensité) les ressources aux différentes cibles. Ce système interviendrait dans la gestion de la stratégie de sélection des schémas d'action et coordonnerait les processus impliqués dans l'exécution de tâches, simples ou complexes. Il permettrait également une flexibilité dans la réalisation de la tâche quand le maximum des ressources attentionnelles est atteint (en stoppant certains processus, par exemple) et qu'une décision doit être prise (face à une situation nouvelle, non routinière, par exemple). Eslinger et Grattan (1993) définissent la flexibilité

cognitive comme « la capacité à réorienter les contenus de pensée et l'action afin d'être à même de percevoir, traiter et réagir aux situations de différentes manières ».

Le modèle de Van Zomeren et Brouwer (1994), en incluant les divers systèmes, composantes et sous composantes liées à l'attention, semble donc constituer un ancrage théorique pertinent pour rendre compte des processus attentionnels. Comme nous l'avons signalé, ces derniers sont fortement impliqués dans les activités complexes. Nous nous intéresserons particulièrement à l'activité de conduite automobile. Nous verrons ainsi comment l'attention, telle qu'elle est modélisée par Van Zomeren et Brouwer (1994), intervient au niveau de la conduite automobile.

1.1.1.2 Implications des processus attentionnels dans la conduite automobile

L'attention est nécessaire pour l'activité de conduite puisque le conducteur est soumis à un flux d'information important qu'il doit filtrer, en tenant compte de ses ressources attentionnelles. Il doit sélectionner les informations pertinentes afin de pouvoir réagir en conséquence et inhiber les informations non pertinentes qui pourraient le distraire (attention sélective). Il doit pouvoir traiter différentes informations simultanément et, pour cela, partager ses ressources attentionnelles entre elles (attention partagée). Il doit rester vigilant à d'éventuels risques (vigilance) et se préparer à réagir en cas de besoin, par exemple, se préparer à freiner lorsqu'un feu tricolore passe au orange ou lorsqu'un piéton attend au bord de la chaussée (alerte phasique). Si l'on s'appuie sur le modèle de Van Zomeren et Brouwer (1994), toutes les composantes attentionnelles sont impliquées dans la conduite.

1.1.1.2.1 Attention sélective en conduite automobile

En conduite automobile, l'attention sélective est primordiale (Chapon , Gabaude, & Fort, 2006 ; Lemercier & Cellier, 2008). En effet, l'environnement de conduite est un environnement riche en informations de toutes sortes (visuelles avec les autres usagers ou les panneaux de signalisation, auditives avec le bruit des moteurs, haptique avec le retour de force du volant, etc.). Tout ne peut pas et ne doit pas être traité simultanément. Il convient donc de filtrer ces informations afin de prendre en compte les seules informations pertinentes à un moment donné, d'inhiber celles qui ne le sont pas et de ne pas surcharger le système de traitement. C'est pourquoi l'attention sélective va jouer un rôle prépondérant en conduite.

La mise en défaut de ce processus peut amener différentes erreurs. La plus commune et la plus étudiée est sûrement l'erreur de distraction. Comme le définissent Chapon et ses col-

lègues (2006), « une distraction apparaît lorsqu'un conducteur est retardé dans la reconnaissance d'informations nécessaires à la réalisation de la tâche de conduite en toute sécurité, du fait d'un événement, d'un objet, d'une activité ou d'une personne à l'intérieur ou à l'extérieur du véhicule, qui pousse le conducteur à soustraire son attention de la tâche de conduite ». Si l'on considère cette définition, on peut observer une erreur de distraction lorsqu'il y a un retard dans la prise d'informations ou leur traitement. Cette distraction peut donc mettre en jeu la sécurité du conducteur. Stutts et al. (2003, 2005) ont montré que les distractions sont très courantes en conduite automobile et qu'un conducteur est soumis a des distractions 16% du temps où son véhicule est en mouvement. Certaines études estiment même que les distractions en conduite contribueraient dans 20% des accidents de véhicules motorisés (Brooks et Rakotonirainy, 2005 ; Harbluk, Noy, & Eizenman, 2002 ; Utter, 2001). La cause de ces distractions est variée, elle peut être interne ou externe au véhicule, d'ordre perceptive, motrice, ou cognitive. Stutts, Reinfurt, Staplin, et Rodgman (2001) observent que près de 30% des distractions ayant amené un accident proviennent de l'extérieur du véhicule (personne, objet, événement). Parmi les distractions externes au véhicule, on note par exemple les panneaux publicitaires, les sites touristiques, une scène d'accident, un événement imprévu et incongru, etc. Bendak et Al-Saleh (2010) ont montré que les panneaux publicitaires que l'on trouve sur le bord des routes constituent des distracteurs visuels efficaces. Cela signifie qu'ils attirent l'attention visuelle du conducteur au détriment des informations utiles et pertinentes pour la conduite et peuvent ainsi amener des erreurs de distraction. De plus, Crundall, Van Loon, et Underwood (2006) ont étudié l'effet de la localisation des publicités, positionnées soit au niveau de la rue (sur des arrêts de bus par exemple), soit sur le bas-côté à 3m de hauteur. Ils montrent ainsi que les publicités au niveau de la rue, attirent et retiennent davantage l'attention à des moments inappropriés que des publicités plus excentrées. Concernant les distractions internes au véhicule, on distingue les distractions motrices (manger, fumer, changer un CD, régler la climatisation, etc.) des distractions cognitives (utiliser un téléphone portable et tout autre système d'information qui nécessite les ressources cognitives).

1.1.1.2.2 Attention partagée en conduite automobile

La conduite automobile requiert également une capacité de partage des ressources importante. En effet, si nous nous s'intéressons exclusivement à l'activité principale de conduite, le conducteur doit être capable de gérer la trajectoire, adapter sa vitesse, observer les différentes sources d'informations de l'environnement (internes et externes au véhicule), etc. Si l'on considère le modèle des ressources multiples de Wickens (1984), la nature des informations va

également avoir son importance. En effet, Parkes et Coleman (1990) ont montré que, lors d'une épreuve de conduite sur simulateur, qui sollicite d'importantes ressources visuelles, le guidage sur la route était plus efficace lorsqu'il était présenté auditivement que visuellement. Ainsi, le partage des ressources attentionnelles semble dépendre de la nature de la modalité impliquée. Par ailleurs, de nombreuses tâches secondaires peuvent se faire en parallèle de la conduite : régler le chauffage ou la climatisation, écouter de la musique, suivre les indications d'un GPS, parler au téléphone, etc. Ces tâches secondaires constituent des distractions qui vont obliger le conducteur à partager ses ressources attentionnelles entre la tâche secondaire et la tâche principale de conduite. Moins de ressources seront donc allouées à la conduite, ce qui peut entraîner des baisses de performances : moins bonne performance à suivre un véhicule et augmentation de temps de freinage (Lamble, Kauranen, Laakso, et Summala, 1999) ; difficulté à maintenir la position sur la voie, plus grande variabilité au volant (Reed & Green, 1999) ; réduction de l'utilisation de rétroviseurs dans certaines conditions et baisse de la capacité à répondre aux variations de vitesse des autres usagers (Brookhuis, de Vries, & de Waard, 1991), etc. Si les études ont montré que des stratégies de compensation pouvaient être mises en place pour pallier cette diminution des performances, en roulant moins vite par exemple (Haigney, Taylor, et Westerman, 2000), ce n'est pas toujours suffisant lorsque le conducteur présente un réel défaut d'attention partagée.

1.1.1.2.3 Alerte phasique et alerte tonique en conduite automobile

Si l'alerte phasique et l'alerte tonique sont toutes les deux impliquées en conduite, elles sont néanmoins plus difficiles à mettre en évidence et à étudier directement que l'attention sélective ou l'attention partagée. D'une part, en considérant la définition de l'alerte tonique (Posner et Rafal, 1987), on comprend qu'elle se témoigne par des changements lents et graduels du niveau d'éveil. Son observation en conduite est donc compliquée. D'autre part, l'alerte phasique se manifeste en conduite lorsque le conducteur se prépare à réagir en cas de besoin. Par exemple, lorsqu'un conducteur attend au feu rouge, il démarrera plus vite lorsque le feu passera au vert s'il s'est préparé (Auclair et Siéroff, 2005). On peut supposer qu'il freinera également plus rapidement si, voyant un piéton sur le bord de la chaussée, il s'attend à ce qu'il traverse. On peut alors supposer qu'un déficit d'alerte phasique entraînera un manque de préparation à l'action, qui va se répercuter sur les temps de réaction à un événement annoncé. On peut donc observer indirectement l'alerte phasique en étudiant les temps de réaction. Cependant, conclure sur les temps de réaction n'est pas chose aisée. En effet, un retard dans le temps de réaction peut révéler une vitesse de traitement ralentie. La vitesse de traitement est considérée

par certains comme une sous-composante attentionnelle. Pour d'autres, elle est considérée comme un processus à part entière de très bas niveau. Le but de cette thèse n'étant pas de discuter des modèles théoriques mais de s'appuyer dessus pour évaluer les processus qui nous intéressaient, nous avons fait le choix de le considérer comme un processus à part entière, de très bas niveau, tout en gardant à l'esprit que l'on peut l'étudier à travers une tâche d'alerte phasique. C'est pourquoi, dans la suite de cette étude, nous séparerons la vitesse de traitement de l'attention. Par ailleurs, en conduite, la plupart des événements sont imprévus et, de ce fait, ne sont pas annoncés à l'avance. Il est donc difficile d'observer l'alerte phasique dans une tâche de conduite écologique.

C'est pourquoi peu d'études portent sur les dimensions d'alerte tonique et d'alerte phasique. Néanmoins de nombreuses études se sont intéressées aux facteurs l'influençant : la fatigue (Reyner et Horne, 1998 ; Åkerstedt, Czeisler, Dinges, et Horne, 1994), les produits excitants comme la caféine (Brice & Smith, 2001), l'environnement de conduite comme la conduite de nuit (Åkerstedt, Kecklund, et Hörte, 2001 ; Åkerstedt, Peters, Anund, et Kecklund, 2005) ou la monotonie de la route (Thiffault et Bergeron, 1997, 2003). Cependant, la difficulté d'étudier l'alerte fait qu'elle est souvent confondue avec la vigilance. D'ailleurs, Oken, Salinsky, et Elsas (2006) montrent que de nombreux auteurs considèrent la vigilance, l'attention soutenue et l'alerte comme des synonymes.

1.1.1.2.4 Vigilance et attention soutenue en conduite automobile

Lemercier & Cellier (2008) considèrent la vigilance (et par extension, l'attention soutenue) comme "un préalable à tout comportement attentionnel" (p.272). Selon cette définition, l'activité de conduite implique donc nécessairement le continuum vigilance/attention soutenue. L'attention soutenue, définie comme la capacité à maintenir un certain niveau d'attention sur une longue durée et de façon continue, est donc particulièrement impliquée dans les activités où il y a un flux continuel, rapide et important d'informations à traiter, telles que la conduite automobile. L'attention soutenue intervient donc de manière générale dans la conduite automobile et plus particulièrement dans les situations qui nécessitent un traitement actif de la part de l'individu, comme par exemple lorsque l'environnement de conduite est dense. La vigilance intervient plus particulièrement dans un environnement de conduite familier, monotone, ou lorsque l'activité dure longtemps. Le conducteur doit alors maintenir un niveau d'attention suffisant pour traiter activement les stimuli qui peuvent se présenter à lui (par exemple, une voiture qui freine devant lui). Un environnement de route monotone, peu exigeant, à faible densité de trafic, peut produire des fluctuations de l'éveil qui diminuent la vigilance. Lemke

(1982) a montré qu'une conduite prolongée dans des conditions monotones diminue la vigilance du conducteur et ses performances dans la tâche de conduite et augmente le risque de somnolence et d'endormissement. Ainsi, 8,4% des accidents fatals en France seraient à imputer à la somnolence (Thomas & Attard, 1994). Un manque de vigilance va se caractériser par des erreurs d'inattention. Les erreurs d'inattention sont difficiles à définir puisque « ce qui caractérise l'inattention, c'est l'absence de déclencheur externe à l'instant où elle survient » (Chapon et al., 2006). Observer une erreur de ce type n'est donc pas une chose aisée. Il s'agit le plus souvent d'une difficulté à maîtriser ou focaliser ses pensées (un "vagabondage de l'esprit"). L'inattention intervient généralement lorsque la tâche est routinière et demande un niveau de vigilance faible.

Deux grandes catégories de facteurs peuvent influer sur les états physiologiques qui sous-tendent les sous-composantes intensives de l'attention : les facteurs endogènes et exogènes (Cabon, Bérard, Fer, & Coblentz, 1996 ; Thiffault & Bergeron, 1997, 2003). Les facteurs endogènes comprennent les variations circadiennes associés au temps de la journée, la fatigue générée par la durée de la tâche et les problèmes liés au sommeil. Conduire de longues heures, tard le soir, le manque de sommeil, ou encore la prise de médicaments sont de bons exemples de facteurs endogènes largement étudiés qui nuisent aux performances de conduite. Cependant, les caractéristiques de l'environnement routier (facteurs exogènes) peuvent avoir un impact sur les performances de conduite en affectant l'éveil, la vigilance et le traitement de l'information. Les facteurs endogènes et exogènes interagissent en permanence et c'est leur influence conjointe qui détermine le niveau de vigilance. Par exemple, la monotonie de la route peut exacerber l'impact de la conduite en fin de soirée, tandis que les environnements routiers surchargés peuvent générer des niveaux d'excitation qui contrecarrent cet effet. Cela signifie que les caractéristiques à la fois de la tâche de conduite et de l'environnement routier sont essentielles lorsque l'on examine la vigilance.

1.1.1.2.5 Système de supervision attentionnelle en conduite automobile

Le système de supervision attentionnelle est fortement impliqué dans l'activité de conduite. En effet, ce système est responsable de la coordination entre les processus impliqués dans l'exécution des différentes tâches de conduite, comme la gestion de la trajectoire et de la vitesse par exemple. Il gère l'allocation des ressources attentionnelles entre les différentes sources d'informations, permet l'anticipation et la planification des actions, ainsi que la prise de décision face à une situation nouvelle ou non routinière. Il est évident que la mise en défaut

de ce système va avoir de nombreuses conséquences en conduite. Nous en discuterons plus précisément dans la partie suivante.

Pour conclure sur les modèles de l'attention, il nous semble que le modèle de Van Zomeren et Brouwer (1994) offre un cadre pertinent pour rendre compte des processus attentionnels dans l'activité de conduite. En effet, toutes les composantes du modèle de l'attention de Van Zomeren et Brouwer (1994) seraient impliquées dans la réalisation de l'activité de conduite. Toutefois, le système de supervision présenté dans ce modèle, issu du SAS de Norman et Shallice (1986), nous semble limité pour rendre compte de l'interaction entre tous les processus cognitifs impliqués dans cette activité. Nous nous baserons donc sur un autre modèle explicatif du contrôle des ressources, le modèle de Hoc et Amalberti (2007), après avoir présenter rapidement l'évolution des modèles concernant le système de contrôle des ressources.

1.1.2 Contrôle cognitif des activités complexes

1.1.2.1 Evolution des modèles vers un système de contrôle cognitif de l'activité

Comme nous l'avons vu précédemment, on doit principalement aux travaux de Schneider & Shiffrin (1977) les notions de contrôle et d'automatisme des processus. Cependant, la notion de contrôle des routines a longtemps été ignorée puisqu'on considérait que les processus automatiques, rapides et inconscients, ne requéraient pas d'attention. Il a fallu attendre les années 1980 pour qu'émerge l'idée d'une supervision des activités routinières. Norman et Shallice (1986) ont proposé un modèle qui s'organisent en trois niveaux de contrôles : (1) Des schémas d'actions déclenchés automatiquement lors de situations routinières et ne demandant qu'un faible niveau de contrôle attentionnel. Ce niveau comprendrait ainsi toutes les actions qui ont fait l'objet d'un apprentissage et qui caractérisent le savoir-faire (aspect procédural) ; (2) Un système semi-automatique qui interviendrait en cas de conflit entre les schémas d'actions, appelé aussi "gestionnaire de priorités de déroulement" ; (3) le système superviseur attentionnel (SAS) qui interviendrait pour des situations nouvelles, non routinières, où aucun schéma d'action courant ne peut être appliqué.

A peu près à la même époque, Rasmussen (1986) a proposé une hiérarchie des niveaux de contrôle de l'activité à travers le modèle SRK (Skills, Rules, and Knowledge). Il rend compte des différents niveaux de traitement d'une tâche et des méta-règles de passage d'un niveau à l'autre. Le modèle SRK (ou taxonomie SRK) définit trois types de comportements ou de processus psychologiques (cf. figure 3):

1. Le comportement basé sur les habiletés (*skill based behavior*). C'est un type de comportement qui requiert très peu ou aucun contrôle conscient pour exécuter une action puisque le comportement est intériorisé et automatisé. Il est ainsi très économique et fait appel aux routines. C'est le niveau des signaux : des éléments d'informations simples et rapides. Le comportement sensorimoteur en est un bon exemple.

2. Le comportement basé sur des règles (*rule based behavior*). Il est activé si la situation le nécessite mais il est coûteux en ressources. Un comportement basé sur les règles est caractérisé par l'utilisation de règles et de procédures (connaissances procédurales) pour sélectionner une séquence d'action dans une situation de travail familière (Rasmussen, 1990). Les règles peuvent être un ensemble d'instructions acquises par un opérateur par expérience ou données par les superviseurs et les opérateurs formateurs. C'est le niveau des signes : des éléments faiblement perceptibles et/ou verbalisables mais interprétables.

3. Le comportement basé sur des connaissances (*knowledge based behavior*). Il est activé dans le cas où aucune règle ou procédure connue ne permet de résoudre le problème. Il faut alors trouver une solution à partir de ses connaissances déclaratives. C'est le comportement le plus coûteux. C'est le niveau des symboles : des éléments condensés d'informations, de natures diverses et hautement interprétables.

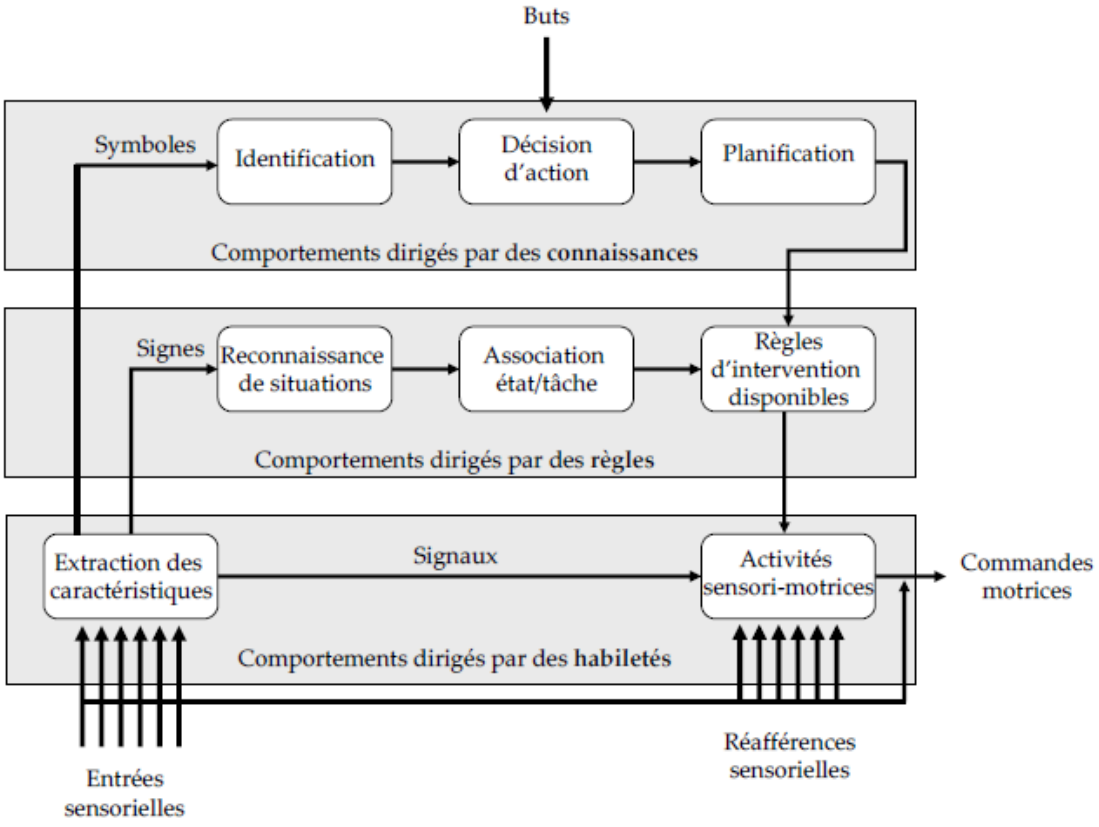


Figure 3 : Les différents niveau de contrôles de l'activité présentés par Rasmussen (1986).

En conduite, le comportement basé sur les habitudes est généralement utilisé par tous les conducteurs experts. On est alors dans un comportement routinier, les tâches sont automatisées (gestion de la trajectoire, accélération ou freinage, passage de vitesse, etc.). Lorsqu'un piéton se présente devant un passage pour piéton ou que le feu tricolore passe au rouge, on va activer un comportement basé sur les règles pour s'arrêter et rompre notre routine. Enfin, si un événement inhabituel dans le contexte de la conduite survient (arrivée à un type d'intersection inconnue où l'on ne sait pas qui a la priorité par exemple), il faut alors activer un comportement basé sur les connaissances, qui demande une analyse plus poussée de la situation.

Dans ce modèle, les trois niveaux de contrôle fonctionnent en parallèle. Pour s'adapter à une situation donnée, il faut être capable de changer de niveau. La perte de contrôle intervient lorsque le système de gestion cognitive échoue à passer d'un niveau à l'autre. Rasmussen s'intéresse donc au processus dynamique de l'adaptation à la situation.

Michon (1985) s'est inspiré de ce modèle et a proposé une taxonomie un peu différente mais spécifique à la conduite automobile. Il va également décomposer l'activité en trois niveaux (cf. figure 4) :

- le niveau stratégique, relatif à la planification de l'itinéraire et à la tâche de navigation ;
- le niveau tactique, qui regroupe les diverses actions telles que l'évitement d'obstacles, le dépassement, le choix de la distance inter-véhiculaire ou encore le choix de la vitesse.
- le niveau opérationnel, s'agissant de la mise en œuvre des actions sélectionnées au niveau tactique (exécution de la manœuvre par exemple).

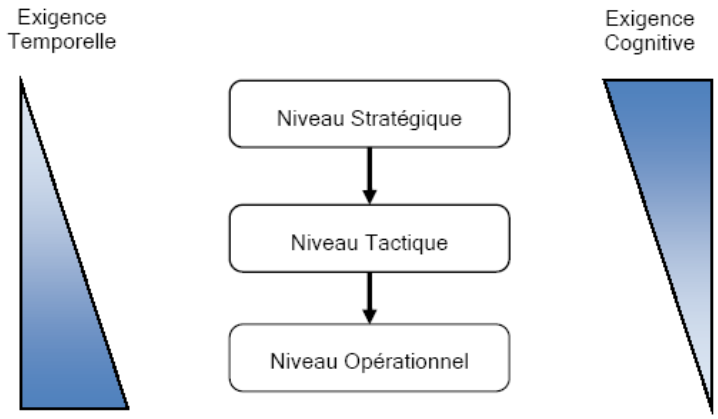


Figure 4 : Les trois niveaux de l'activité, d'après Michon (1985)

Si les deux cadres présentent beaucoup de similarités, Rasmussen se réfère davantage aux processus internes à l'individu tandis que Michon se base plus sur les caractéristiques de la tâche (Nilsson, 2001).

Ces modèles servent d'ancrage à la théorie du contrôle cognitif proposée par Hoc et Amalberti (2007) qui intègrent la notion de dynamique, et donc d'adaptation, à la complexité de l'activité étudiée (cf. figure 5). Selon cette théorie, l'opérateur doit adapter son comportement à la situation. Un critère essentiel de cette adaptation est le sentiment de maîtrise de l'activité, c'est-à-dire le sentiment qu'à l'opérateur d'atteindre le but qu'il s'est fixé. Il ne cherche pas ici à réaliser la meilleure performance possible mais une performance acceptable, définie par rapport aux connaissances qu'il a de ses capacités (métacognitions), aux ressources qu'il accepte d'allouer et au but fixé. C'est le rôle du contrôle cognitif que de permettre d'atteindre cette performance acceptable. Pour cela, il doit garantir en continu (Hoc et Amalberti, 2007) :

- un niveau de performance suffisant (pours les exigences de travail et la gestion des événements imprévus)
- un coût cognitif (immédiat, charge de travail), relationnel et émotionnel (relation à l'environnement et à la sphère des activités privées et sociales), ainsi que physiologique (travail dans la durée) acceptables.

Une gestion optimale du contrôle cognitif consisterait donc à régler la performance de l'opérateur à un niveau juste satisfaisant (mais non optimal) de performance pour répondre aux exigences perçues de la tâche, tout en permettant d'effectuer la tâche dans la durée et en préservant des ressources pour d'autres tâches en parallèle. C'est la notion de compromis cognitif.

L'adaptation de l'opérateur va donner lieu à différents modes de contrôles cognitifs. Hoc et Amalberti (2007) considèrent deux dimensions orthogonales pour caractériser ces modes : le niveau d'abstraction et l'origine des données. On les schématise classiquement par des continuums. L'idée du niveau d'abstraction est largement reprise du modèle-cadre SRK de Rasmussen (1986). En effet, le niveau d'abstraction représente la profondeur du traitement. Lorsqu'on est au niveau subsymbolique, le traitement est peu coûteux. On peut le mettre en parallèle avec le comportement basé sur les habiletés du modèle SRK. A l'opposé, un traitement coûteux correspond au niveau symbolique de l'activité. On se rapproche du comportement basé sur les connaissances dans le modèle SRK. Le deuxième axe concerne l'origine des données. Si les données sont externes à l'individu, il est dans un mode davantage réactif car il

réagit à des données perceptives. Au contraire, si les données sont internes, l'individu fait appel à des représentations internes et est donc plus anticipatif.

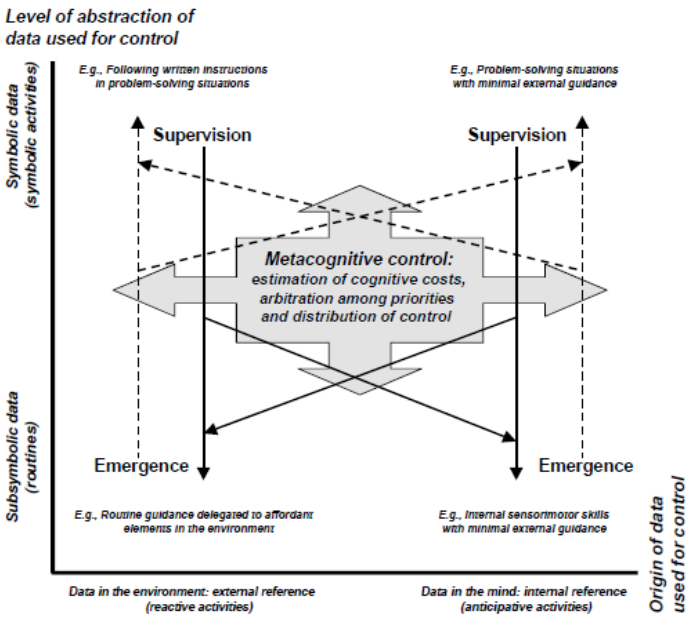


Figure 5 : Modèle du contrôle cognitif de Hoc et Amalberti (2007).

Ces modèles, et particulièrement le modèle de Hoc et Amalberti (2007), permettent de rendre compte de l'agencement entre les processus psychologiques qui interviennent pour réaliser n'importe quelle activité complexe. De nombreux travaux ont en effet été menés en aviation, dans le trafic maritime ainsi qu'en conduite automobile et ont montré l'intérêt de ces modèles pour la compréhension des processus mis en jeu. Nous allons maintenant voir comment le contrôle cognitif peut-être impliqué en conduite.

1.1.2.2 Implications du contrôle cognitif dans la conduite automobile

Le système de contrôle des ressources est un système adaptatif qui alloue les ressources en fonction de la tâche. Il convient donc d'étudier l'activité de conduite à part. Dans le cadre théorique de Hoc et Amalberti (2007), comme dans beaucoup d'autres, les ressources cognitives sont limitées. Cette limitation a un impact conséquent sur la manière dont le conducteur alloue ses ressources afin d'atteindre la performance satisfaisante qu'il s'est fixée. Lorsque les ressources ne sont pas suffisantes ou que l'allocation des ressources ne peut pas être modifiée, le système cognitif échoue à s'adapter et l'on observe ainsi des erreurs. Toutefois, il est important de rappeler que le contrôle cognitif vise une performance satisfaisante et non optimale.

Des erreurs sont alors tolérées. Lorsque nous aborderons les erreurs du système, nous ne parlerons pas des erreurs tolérées par le système, qui font partie du processus d'adaptation, mais des erreurs révélant une faille du système de contrôle.

1.1.2.2.1 Niveau de traitement subsymbolique en conduite automobile

Lorsqu'une tâche est répétée et automatisée, elle va être traitée symboliquement. Cela signifie que le conducteur va enclencher une routine, peu coûteuse, ce qui va libérer des ressources pour d'autres tâches. Par exemple, lorsqu'on maîtrise la conduite (conducteur expérimenté), la gestion du volant, des pédales ou de la boîte de vitesse se fait de manière plutôt automatique, sans y allouer beaucoup de ressources. Toutefois, le conducteur peut parfois exercer un contrôle trop subsymbolique pour la tâche en cours. Cela impliquerait de mettre en œuvre des routines alors que le conducteur devrait exercer un contrôle symbolique. Par exemple, lorsque le conducteur fait face à une situation imprévue, les routines risquent d'être mises en échec. Cela fait penser aux erreurs d'inattention que nous avons vues précédemment. En effet, elles interviennent généralement lorsque la tâche est routinière et demande un niveau de vigilance faible. Si quelque chose survient à ce moment-là, le conducteur n'aura pas le temps de traiter symboliquement l'information.

1.1.2.2.2 Niveau de traitement symbolique en conduite automobile

Le contrôle symbolique intervient lorsqu'on va allouer de nombreuses ressources pour effectuer une tâche. C'est habituellement le cas lorsque la tâche n'est pas familière ni automatisée. En conduite, on considère souvent qu'un conducteur va investir des ressources lorsqu'il est confronté à une situation qui met en défaut les routines. C'est le cas par exemple d'une situation dangereuse ou imprévue comme une voiture en panne sur la chaussée dans un virage. Le conducteur, exerçant à tort un contrôle symbolique, allouerait trop de ressources cognitives à la réalisation d'une tâche. Toutes les ressources seraient ainsi investies dans la tâche jugée prioritaire, ce qui rendrait la réalisation d'autres tâches très difficile, voire impossible.

1.1.2.2.3 Données externes et réaction en conduite automobile

L'environnement de conduite est un environnement dynamique qui change fortement en peu de temps. S'il est possible d'anticiper parfois, ce n'est pas toujours le cas. Il est également nécessaire que le conducteur se laisse guider par les éléments externes afin de réagir rapide-

ment en conséquence. Par exemple, lorsqu'un véhicule qui double le conducteur se rabat juste devant lui (ce qu'on appelle familièrement "faire une queue-de-poisson"), le conducteur doit pouvoir réagir en conséquence (freiner par exemple). De la même manière, si le véhicule que le conducteur suit freine brusquement sans raison apparente, il doit être capable d'éviter de le percuter. Pour cela, il est souhaitable d'allouer une partie des ressources aux données externes. Ne pas utiliser les informations externes lorsqu'elles sont disponibles en conduite, c'est-à-dire ne pas être suffisamment réactif, amènerait à ne pas pouvoir réagir suffisamment rapidement à une modification brusque et non anticipable de l'environnement de conduite. Cependant, Shinoda, Hayhoe, et Shrivatava (2001) ont montré que l'attention dirigée par les données n'était pas suffisante pour la réalisation de la tâche de conduite. Le conducteur doit donc faire appel à des données internes.

1.1.2.2.4 Données internes et anticipation en conduite automobile

D'après le modèle de Hoc et Amalberti (2007), utiliser les données internes (c'est-à-dire les représentations internes) permet d'anticiper. Or, l'anticipation est très importante dans les activités de contrôle des processus dynamiques telle que la conduite automobile (Amalberti, 1996). L'anticipation intervient dans deux cas de figures en conduite : (1) Le conducteur a des attentes précises concernant l'environnement (par ex. un feu risque de passer au rouge ou un piéton sur le bord de la chaussée risque de traverser). Il va donc aller chercher les informations sur lesquelles il a des attentes, là où il les attend ; (2) Le conducteur n'a pas d'attentes précises concernant l'environnement mais dispose de représentations de la situation de conduite (il sait que les abords d'un stop présentent des risques, de même que le franchissement d'une intersection même s'il est prioritaire, etc.). Dans ce dernier cas, il va aller à la recherche active d'informations afin de devancer un fonctionnement purement réactif. Dans les deux cas, il s'agit de prévoir au sens classique du terme. Cette anticipation peut se caractériser par deux types de comportements : une exploration visuelle (on va chercher des informations visuelles loin par exemple) ou une réaction motrice (on va relâcher la pédale d'accélérateur à l'approche d'une intersection sans visibilité. Ainsi, ne pas opérer un contrôle interne mènerait à un défaut d'anticipation. Deux explications peuvent alors être avancées. D'une part, il est possible que le conducteur n'ait pas de représentations internes de la situation auxquelles faire appel. C'est le cas des conducteurs novices qui n'ont pas encore de routines. D'autre part, le conducteur a peut-être les représentations internes nécessaires mais ne peut pas y faire appel parce qu'elles sont dégradées. C'est ce qu'on pourrait éventuellement observer après des lésions cérébrales acquises. Dans les deux cas, cela va obliger le conducteur à se baser unique-

ment sur les données externes et amener les difficultés que nous avons abordées précédemment.

1.1.2.2.5 Adaptation en conduite automobile

Si un conducteur va mettre en place un contrôle à la fois symbolique pour certaines tâches et subsymbolique pour d'autres tâches, le type de contrôle pour une tâche n'est pas figé. Il est en effet nécessaire, selon la situation, de pouvoir modifier la répartition du contrôle cognitif. Par exemple, le contrôle de la trajectoire peut habituellement se faire de manière subsymbolique lorsque le conducteur est expérimenté. Toutefois, si les conditions de conduite se dégradent (faible adhérence ou mauvaise visibilité de la route par exemple), il est préférable que le conducteur exerce un contrôle davantage symbolique sur sa gestion de la trajectoire.

L'adaptation peut être considérée à court terme (faire face à une difficulté ponctuelle) ou à long terme (en réponse à des conditions météorologiques difficiles par exemple). A court terme, un défaut d'adaptation ne permettra pas de réagir face à une situation nouvelle ou imprévue. A long terme, le contrôle cognitif ne pourrait pas modifier la répartition du contrôle cognitif. Le conducteur ne pourrait donc pas modifier son comportement de conduite (comme rouler plus vite en cas de nécessité ou s'adapter aux conditions climatiques).

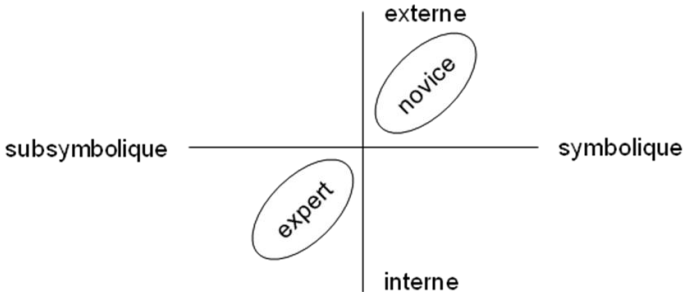


Figure 6 : Schématisation de la répartition générale du contrôle cognitif lors d'une activité de conduite, pour des conducteurs novices et experts.

Par ailleurs, un conducteur peut privilégier les données internes aux données externes, c'est-à-dire être plus anticipatif que réactif. Toutefois, si la situation le nécessite, par exemple, lorsque la visibilité est faible, le conducteur devra être davantage réactif puisqu'il lui sera difficile d'anticiper. C'est la base de l'adaptation. Cette adaptation n'est possible que lorsque le conducteur dispose des routines (traitement subsymbolique) et des représentations (données internes) nécessaires. On considère souvent qu'un conducteur novice, n'ayant ni les représentations ni les routines suffisantes, exercera un contrôle plutôt externe et symbolique, alors qu'un expert exercera un contrôle davantage interne (anticipatif) et subsymbolique (utilisation

de routines) (cf. figure 6). Toutefois, comme nous venons de le signaler, le novice n'a pas forcément les ressources pour modifier la répartition du contrôle cognitif, alors qu'un expert pourra davantage s'adapter à la situation.

1.2 Synthèse des processus particulièrement impliqués dans la conduite

Comme nous avons pu le voir dans cette première partie, la conduite automobile constitue un bon exemple d'activité permettant d'observer de nombreux processus. En effet, conduire un véhicule n'est pas aussi simple qu'il y paraît. La preuve en est le nombre d'accidents que l'on recense chaque année. Ainsi, la conduite automobile est considérée comme "une activité de contrôle de processus qui fait appel au traitement d'informations prélevées dans l'environnement du véhicule, à la fois dynamique et complexe" (tiré de Chapon et al., 2006, p. 18). Carreras (1999) a montré qu'une situation dynamique évolue de manière indépendante de l'action de l'opérateur. En conduite automobile, le dynamisme de l'environnement est d'autant plus complexe que les situations sont peu prévisibles et peuvent amener des événements entraînant eux-mêmes des incidents (Woods, 1988). La survenue de ces événements dépend de nombreux éléments que le conducteur doit identifier, sélectionner, et prendre en compte. Ainsi, le fait d'être confronté à un environnement à la fois dynamique et complexe va obliger le conducteur à solliciter son *attention sélective* pour mener à bien l'activité de conduite. De plus, cette activité est composée de différentes sous-tâches (liées à la conduite ou indépendantes), entre lesquelles il faudra partager les ressources attentionnelles (*attention partagée*), par le biais d'un *système de contrôle*. Ce système de contrôle va permettre, durant la tâche de conduite, de répondre de manière adaptée aux différentes sollicitations de l'environnement (*adaptation*) en aboutissant à une *prise de décision*. Les événements peuvent être anticipés dans certaines situations de conduite (*anticipation*) sur la base des représentations internes de ces situations que peut avoir le conducteur. Parfois, ces représentations ne sont pas suffisantes ou tout simplement disponibles, auquel cas le conducteur doit réagir à la situation en faisant appel à une *vitesse de traitement* suffisante.

Si d'autres processus interviennent également dans l'activité de conduite (pour la gestion des contraintes spatiales et temporelles par exemple), les processus listés ici nous semblent les plus importants. Ainsi, l'observation de la conduite se fera à travers la synthèse de ces processus.

2 Evaluation des processus cognitifs : les outils disponibles en conduite automobile

Dans la partie précédente, nous avons défini des processus qui nous semblaient primordiaux d'étudier afin d'appréhender une activité complexe comme la conduite automobile. Comment étudier ces processus en conduite automobile ? Nous allons donc définir, dans cette partie, les outils à notre disposition pour les étudier. Chaque outil a ses avantages et ses limites. Nous verrons donc comment combiner les outils disponibles pour proposer une évaluation des processus en conduite.

2.1 Tests neuropsychologiques

Classiquement, en psychologie cognitive et en neuropsychologie, l'étude des processus cognitifs se fait par un bilan neuropsychologique, incluant des tests spécialement conçus pour étudier les différentes fonctions. Leur but est de permettre de déterminer qualitativement et quantitativement les déficits cognitifs, suite à une lésion cérébrale par exemple.

Ainsi, il existe un très grand nombre de tests, plus ou moins connus, évaluant les diverses fonctions cognitives, perceptives, et motrices. Ces tests sont basés sur des présupposés théoriques des fonctions étudiées. L'exemple de l'étude de la mémoire est sûrement le plus parlant. En effet, certains considèrent qu'il n'existe pas une mémoire mais des mémoires multiples, c'est-à-dire des sous-systèmes de mémoire (par exemple, dans le modèle d'Atkinson et Shiffrin (1968), le registre sensoriel, la mémoire à court terme et la mémoire à long terme), alors que pour d'autres, il s'agit de processus distincts (l'encodage, le stockage et la récupération de l'information). Enfin, d'autres encore voient plutôt la mémoire comme un ensemble de systèmes de mémoire, qui interagissent concernant les propres processus d'encodage, de stockage, et de récupération (par exemple, le modèle SPI - sériel, parallèle, et indépendant - de Tulving, 1995). Selon la position théorique des chercheurs, la mémoire n'est pas abordée sous le même jour et les tests diffèreront donc. Ainsi, si certains tests semblent faire l'unanimité (comme le test de Stroop par exemple), ce n'est pas le cas de la plupart.

Concernant l'étude des processus impliqués dans la conduite, il n'y a aucune législation concernant les tests à utiliser afin d'évaluer les aptitudes à la conduite. En réalité, rien ne spécifie même les processus à observer. Les tests utilisés varient donc d'un praticien à l'autre et dépendent beaucoup du champ théorique dans lequel il s'inscrit.

2.1.1 Fonctions cognitives évaluées et tests neuropsychologiques utilisés

Comme nous l'avons vu dans la partie précédente, certains processus semblent plus ou moins impliqués dans la conduite automobile, comme l'attention, l'anticipation, etc. Nous présenterons donc succinctement les principales fonctions cognitives et les manières de les évaluer. Nous ne présenterons pas de manière exhaustive tous les tests utilisés dans la littérature mais seulement ceux qui nous semblent les plus pertinents. Pour les sélectionner, nous nous sommes basés sur les travaux réalisés précédemment par Milleville-Pennel, Pothier, Hoc, & Mathé (2010). Nous nous attarderons plus particulièrement sur les fonctions exécutives qui jouent un rôle prépondérant dans la conduite automobile (cf. section 1.2.) : les processus attentionnels, l'anticipation, etc.

2.1.1.1 Evaluation des fonctions instrumentales

Les fonctions instrumentales regroupent le langage (expression et compréhension), la mémoire, les gestes et le schéma corporel, les capacités visuo-spatiales (espace, personnes, etc.), et le calcul. Dans le cadre de cette étude sur la conduite automobile, nous nous intéresserons uniquement aux capacités visuo-spatiales et à la mémoire (nécessaire pour le suivi d'itinéraire et l'application de consignes).

- Evaluation des capacités d'exploration visuo-spatiales

Les capacités d'exploration visuo-spatiales sont communément étudiées par le biais d'une tâche de barrage. Il en existe plusieurs formes, des barrages d'objets ou de lignes..

- Evaluation de la mémoire à court terme (MCT)

La MCT permet de retenir et de réutiliser une quantité limitée d'informations pendant un temps relativement court. On évalue souvent la MCT en fonction de la nature des informations à retenir. Ainsi, on peut effectuer des tâches d'empan auditivo-verbal (empan de chiffres) ou d'empan visuo-spatial telles que celles disponibles dans les batteries de tests WAIS III et MEM II.

2.1.1.2 Evaluation des fonctions exécutives

Nous pouvons définir les fonctions exécutives comme "un ensemble assez hétérogène de processus cognitifs de haut niveau permettant un comportement flexible et adapté au contexte" (source : Wikipédia). La plupart des auteurs s'accordent pour reconnaître que les fonctions exécutives sont impliquées dans les processus tels que l'attention, l'anticipation, la mémoire de travail, la planification, le contrôle cognitif, le raisonnement logique, la résolution de problème, l'apprentissage de règles, la déduction et le maintien d'une règle, la flexibilité, etc. On comprend avec cette définition que les fonctions exécutives sont fondamentalement impliquées dans l'activité de conduite automobile. Nous allons donc brièvement présenter les différents types de tests neuropsychologiques disponibles afin d'évaluer un éventuel dysfonctionnement de ces fonctions.

- Evaluation des processus attentionnels

- *L'attention sélective* : L'attention sélective est définie par ses deux composantes opposée : la sélectivité de l'information (pertinente) et l'inhibition de l'information (non pertinente). Un paradigme connu pour étudier conjointement les deux aspects de l'attention sélective consiste en une recherche de cible parmi des distracteurs. Néanmoins, beaucoup de tests s'intéressent davantage à la composante de l'inhibition. Ainsi, lorsqu'on utilise le test de Stroop, on note généralement le score d'interférence, qui reflète les capacités d'inhibition. Un autre test souvent utilisé est le Go/NoGo : le participant doit répondre (appui sur une touche par exemple) lorsqu'un stimulus cible apparaît et inhiber cette réponse lorsque ce n'est pas le stimulus cible. Il s'agit ici d'évaluer l'inhibition comportementale.

- *L'attention partagée* : L'attention partagée est souvent évaluée à l'aide de tests induisant une double tâche comme la double tâche de Baddeley.

- *L'attention soutenue* : L'attention soutenue est souvent évaluée à l'aide de tests de barrage comme le D2.

- *L'alerte phasique* : L'alerte phasique peut être évaluée à l'aide de tâches impliquant la mesure d'un temps de réaction sans et avec avertisseur, telle que la tâche d'alerte phasique du TAP.

- Anticipation et planification

L'anticipation et la planification peuvent être évaluées à l'aide de tests incitant le participant à se projeter dans une situation réaliste où il doit planifier un certain nombre d'actions. On peut citer notamment, le test du Zoo Map.

- Prise de décision

La prise de décision peut être évaluée à l'aide de jeux de stratégie comme le Gambling Task (jeu de poker).

- Déduction et résolution de problèmes

La déduction et la résolution de problèmes peuvent être évalués à l'aide de tests comme les Cartes de Winsconsin ou le test de Brixton. Ces deux tests impliquent de déduire une règle sur la base du feedback donné par l'expérimentateur.

- Flexibilité

La flexibilité mentale peut être évaluée à l'aide de tests comme le Brixton, qui implique la détection de changement de règles et l'adaptation à la nouvelle règle. On peut également utiliser le Trail Making Test (TMT) qui implique de suivre de façon alternée deux règles d'action différentes.

- Vitesse de traitement de l'information

La vitesse de traitement de l'information peut être évaluée à l'aide de tests de barrage comme le D2.

2.1.2 Limites des tests neuropsychologiques par rapport à l'étude de la conduite automobile

La multiplication des tests et des mécanismes étudiés présentent toutefois un risque non négligeable : celui de mettre en évidence des déficits chez des populations qu'on sait déficitaires et de les interpréter en termes de difficultés de conduite sans lien évident. C'est ce que montre Lundqvist (2001) dans son étude. Elle évoque également la nécessité de mettre en évidence des capacités de compensation, qui seront détaillées plus loin. En effet, les tests neuropsychologiques sont pour la plupart statiques. Or, Fattal et al. (2006) expliquent que la conduite est dynamique, demande de s'adapter au cours du temps et permet de compenser certains processus défaillants par d'autres processus, ce dont ne rendent pas compte les tests neuropsychologiques.

Par ailleurs, les tests neuropsychologiques n'évaluent que les fonctions cognitives en termes de bon fonctionnement ou fonctionnement déficitaire. Or, la conduite réelle est une activité qui est modulée par l'expérience de conduite, les mécanismes adaptatifs, les attitudes, la motivation à se maintenir en sécurité, etc. (Lundqvist, Allinder, Alm, Gerdle, Levander, &

Rönnberg, 1997). D'ailleurs, Akinwuntan, Feys, de Weerdt, Pauwels, Baten, et Strypstein (2002) montrent dans leur étude que les tests ne font pas partie des facteurs les plus prédictifs de la capacité à conduire. C'est pourquoi le recours à une évaluation sur route est souvent demandé.

2.2 Conduite sur route

2.2.1 Evaluations existantes

Classiquement, les capacités de conduite sont évaluées sur route (le passage du permis de conduire par exemple). De nombreuses études ont d'ailleurs montré l'importance d'une évaluation écologique sur route pour apprécier les capacités à la conduite, notamment chez des cérébrolésés (Akinwuntan et al., 2002 ; Lundqvist, 2001). Elle permet entre autres d'observer les capacités de compensation (Hopewell, & Van Zomeren, 1990), ce qui n'est pas possible avec les tests neuropsychologiques classiquement utilisés dans l'évaluation des capacités de conduite. Par ailleurs, des chercheurs ont montré qu'elle est fiable lorsque les critères d'observations sont définis à l'avance et avec précision (Akinwuntan, de Weerdt, Feys, Baten, Arno, & Kiekens, 2003) et lorsque le jugement se base sur les mesures les plus objectives possibles (Fox, Bowden, & Smith, 1998). L'une des épreuves qui a prouvé sa validité et sa standardisation est le "Driver Performance Test" (Jones, 1978), dont la procédure a été reprise et utilisée par plusieurs auteurs (Engum, Lambert, Scott, Pendergrass, & Womac, 1989 ; Sivak, Hill, Henson, Butler, Silber, & Olson, 1984). Ainsi, l'évaluation sur route a été utilisée à de nombreuses reprises pour étudier les compétences en conduite de différentes populations : traumatisés crâniens (Brooke, Questad, Patterson, & Valois, 1992), personnes atteintes de démence (Hunt, Morris, Edwards, & Wilson, 1993 ; Fitten et al., 1995), etc.

2.2.2 Limites des évaluations de conduite sur route

L'avantage majeur mis en avant pour justifier d'une évaluation de la conduite sur route est son aspect écologique. Il est indéniable qu'une évaluation sur route soit la plus proche de la conduite réelle, puisque le matériel est identique. Toutefois, cela ne signifie pas qu'une évaluation sur route soit identique à de la conduite réelle. En effet, Mayo (1924) a montré que le simple fait de participer à une expérience dans laquelle on est testé biaise les résultats. Les résultats, positifs ou négatifs, ne sont pas dus aux facteurs expérimentaux, mais à l'effet psy-

chologique d'avoir conscience d'être observé. C'est ce qu'on appelle l'effet Hawthorne, bien connu dans le domaine de l'ergonomie. Ainsi, le simple fait d'observer l'activité du conducteur biaise d'ores et déjà son comportement. Alors, on peut supposer qu'une situation d'évaluation pourrait avoir un impact d'autant plus important sur le comportement de conduite du conducteur. L'interprétation des performances à une telle évaluation est donc à effectuer avec précaution.

Par ailleurs, une autre limite importante de ce type d'évaluation est sa subjectivité. En effet, le résultat dépend de l'évaluateur, du parcours proposé, des difficultés rencontrées liées à la route, etc. Parfois, l'évaluation se fait sur un circuit fermé, sans interaction avec le trafic, ce qui pose de sérieuses limites. Par exemple, dans l'étude de Fitten et al. (1995), une partie de l'évaluation sur route se faisait sur le parking de l'hôpital. Cela remet en cause l'écologie de l'évaluation.

Ensuite, une difficulté majeure de l'évaluation sur route pour la recherche est la standardisation de la situation de conduite (Christie, 1996). En effet, il est difficile, sur route réelle (hors circuit fermé) de contrôler tous les paramètres lors de la passation (météorologie, trafic, autres usagers, déviations pour cause de travaux, etc.). On ne peut donc pas considérer qu'une évaluation sur route soit parfaitement reproductible.

Enfin, un autre défaut que l'on peut noter, et non des moindres, est le risque auquel l'évaluateur et le participant sont exposés en cas de réponses comportementales inadaptées. Si, pour des raisons de sécurité évidentes, l'évaluation se fait généralement sur un véhicule avec doubles commandes, ce n'est pas toujours le cas. Certaines études privilégient la conduite sur le véhicule du participant, pour ne pas avoir de biais d'adaptation au nouveau véhicule et parce qu'il est d'usage dans certains pays de passer l'examen du permis de conduire avec son propre véhicule. Dans ce cas, on peut souligner le risque auquel sont exposés l'évaluateur, le participant mais également les autres usagers en recourant à ce type de passation avec des personnes dont les capacités de conduite sont mises en doute.

Pour pallier tous ces défauts, les chercheurs ont trouvé une solution alternative en ayant de plus en plus souvent recours à la simulation.

2.3 Simulateur de conduite : une solution alternative

Un simulateur de conduite peut être considéré comme un véhicule équipé d'un moteur, consacré à la production de stimuli sensoriels (visuels, auditifs, et haptiques) qui créent un environnement virtuel. Cet environnement va agir sur le conducteur aux niveaux cognitif et

perceptif. Afin d'avoir une meilleure compréhension de la pertinence de cette technologie, il est très important de considérer que ces environnements virtuels permettent de tester les participants en temps réel et dans des situations dynamiques. En outre, ils offrent de nombreuses possibilités, tout en étant comparables à l'environnement réel. Toutefois, ils présentent parfois un inconvénient notable : le mal du simulateur. Afin de définir l'intérêt d'avoir recours à cette technologie, nous comparerons donc la simulation à l'environnement réel puis nous discuterons des avantages et des inconvénients de cet outil.

2.3.1 Conduite sur simulateur et conduite réelle

Le simulateur de conduite est souvent critiqué parce qu'il ne s'agit pas d'une situation réelle et, par conséquent, il ne permettrait pas de faire des prédictions sur les performances sur route réelle. Néanmoins, de nombreuses études menées dans ce domaine ont montré que le simulateur procédait de nombreux avantages (Anderson, Rizzo, Shi, Uc, & Dawson, 2005 ; Bella, 2008 ; Lew, Poole, Lee, Jaffe, Huang, & Brodd, 2005 ; Mayhew, Simpson, Wood, Lonero, Clinton & Johnson, 2011 ; Patomella & Kottorp, 2005 ; Patomella, Tham & Kottorp, 2006; Stern, 2004; Vuadens & Comte, 2001). Il a notamment été montré que le simulateur peut permettre de distinguer des participants en fonction de différentes aptitudes :

- le niveau d'expérience. Par exemple, Mayhew et al. (2011) ont montré que le simulateur de conduite est suffisamment sensible pour discriminer des conducteurs selon qu'il s'agit de vrais débutants, de conducteurs novices ou expérimentés.
- les capacités cognitives. Le simulateur de conduite pourrait mettre en évidence des erreurs de conduite dues à des déficits cognitifs chez des participants ayant, par exemple, des lésions cérébrales, comparativement à des participants sains (Milleville-Pennel et al., 2010 ; Stern, 2004 ; Vuadens & Comte, 2001).

L'intérêt évident de cet outil mérite donc que l'on s'intéresse davantage à la question de la représentativité de la simulation par rapport à ce que l'on peut observer en réalité ? Lorsque l'on parle de cohérence des informations entre la simulation et le réel, un terme apparaît souvent dans la littérature : la "validité" (parfois appelée de manière impropre "fidélité"). Le terme "validité" fait référence au degré avec lequel la simulation imite (voir « reproduit ») la réalité. Un grand nombre d'études ont abordé divers aspects de cette question, en utilisant plusieurs dimensions sur lesquelles établir la comparaison entre simulateur et conduite réelle. Pour Chiniara (2007) par exemple, la validité de la simulation n'est pas une dimension unique. Elle comprend entre autres la validité psychologique, la validité physique et la validité de

l'environnement. La définition de ces dimensions se recouvre quelquefois. Nous allons donc présenter différentes dimensions sur lesquelles on peut comparer conduite sur simulateur et conduite sur route et les indicateurs utilisés dans la littérature pour les étudier.

2.3.1.1 Validité absolue et validité relative

Quelle que soit la dimension de la validité considérée, elle comporte deux volets : la *validité absolue* et la *validité relative*. On parle de validité absolue lorsque les valeurs numériques obtenues par la simulation et la réalité sont identiques pour les variables considérées, telles que la vitesse ou le maintien de la trajectoire. On parle de validité relative lorsque la même tendance d'un effet (sens et amplitude) est constatée entre le simulateur et le véhicule réel (Blaauw, 1982 ; Kaptein, Theeuwes, & Vand Der Horst, 1996 ; Törnros, 1998). Observer une validité relative peut être suffisant pour répondre à de nombreuses questions de recherche.

2.3.1.2 Validité physique et validité comportementale

Tout d'abord, en ce qui concerne la performance, deux types de validité sont principalement prises en compte : la *validité physique* et la *validité comportementale* (Blaauw, 1982 ; Wang, Mehler, Reimer, Lammers, d'Ambrosio, & Coughlin, 2010). La validité physique fait référence au degré avec lequel le simulateur reproduit l'aspect et le comportement de l'équipement réel (composants, stimuli sensoriels et dynamique). La validité physique est généralement considérée comme étant plus grande sur un simulateur à base mobile que sur un simulateur à base fixe (Godley, Triggs, & Fildes, 2002). Le deuxième type de validité, la validité comportementale, est certainement le plus important en ce qui nous concerne. Elle reflète dans quelle mesure un conducteur se comporte de la même manière sur le simulateur et en conduite réelle.

La validité comportementale a été explorée en considérant différents paramètres. Par exemple, Mayhew et al. (2011) ont montré que les tests de conduite sur simulateur corrélaient avec des tests de conduite sur route concernant les erreurs de conduite (non respect de la signalisation, absence de contrôles aux intersections, inattention, sur-vitesse, etc.) et l'anticipation des risques (15 scénarios différents d'anticipation des risques ont été créés, un examinateur a noté combien n'ont pas été bien gérés par les conducteurs). En ce qui concerne la vitesse, Bella (2008), a montré que le simulateur de conduite à base fixe pourrait être suffisant

pour apporter une validité relative. En effet, la comparaison des profils de vitesse montre une bonne correspondance entre le comportement des conducteurs sur simulateur et sur véhicule réel. En ce qui concerne la validité absolue, seules les différences entre la vitesse réelle de la voiture et la vitesse du simulateur dans des configurations peu exigeantes, telles qu'une très longue ligne droite (1100 m) et une courbe avec un rayon élevé (500 m) venant après une longue ligne droite en descente, étaient statistiquement significatives (au seuil de 5%). Ceci est cohérent avec les travaux antérieurs montrant des vitesses comparables dans le simulateur et sur route réelle dans les courbes avec des vitesses en entrée de courbe qui varient de 65km/h à 93 km/h. Néanmoins, on ne retrouve pas cette validité pour les courbes permettant une vitesse en entrée de courbe inférieure à 65 km/h ou supérieure à 93 km/h (Bittner, Simsek, Levison & Campbell, 2002). Selon Bella (2008), les vitesses plus élevées enregistrées sur le simulateur semblaient provenir d'une différence de perception du risque sur la route simulée par opposition à la vraie route.

Cette limitation de la validité absolue ne peut être totalement attribuée au fait que les auteurs ont utilisé un simulateur de conduite à base fixe "moins réaliste" car cela est également observé sur simulateur de conduite de base mobile (Törnros, 1998). Selon Bella (2008), cela serait davantage dû à une interférence cognitive ("Je sais que ce n'est pas vrai, même si je ressens la même chose"), qu'à une mauvaise/faible reproduction de la réalité.

Enfin, une évaluation effectuée sur un simulateur de conduite peut être un bon indicateur de la performance de conduite sur une vraie voiture (Patomella & Kottorp, 2005), et ce sur le long terme, et plus encore qu'une évaluation sur route traditionnelle (Lew et al., 2005). Ainsi, Lew et al. (2005) ont comparé les performances sur route de participants (évaluées au moyen de l'inventaire des performances de conduite ou DPI) et leurs performances sur simulateur (évaluées au moyen de la DPI et de l'indice de performance du simulateur, SPI) aux performances sur route de ces mêmes participants dix mois plus tard (au moyen du DPI). Ils ont observé que la première évaluation sur route n'a montré aucune relation significative avec la deuxième évaluation sur route dix mois plus tard. Au contraire, il y avait une relation significative entre la performance sur simulateur et la deuxième évaluation sur route. Stoffregen, Bardy, Smart, et Pagulayan (2003) utilisent la notion similaire de "fidélité de l'action" pour traduire la relation entre la performance dans le monde réel et la performance dans l'environnement virtuel (EV). Une conséquence importante de cette définition est que l'évaluation de ce niveau de la validité passe obligatoirement par l'analyse des performances et des compor-

tements de participants ; il n'est pas accessible de façon directe par l'introspection ou l'évaluation subjective.

2.3.1.3 Validité cognitive

Une autre dimension que l'on peut prendre en compte est la *validité cognitive* qui se définit comme "la proportion dans laquelle la tâche simulée engendre une activité et des processus psychologiques identiques à ceux de la tâche réelle" (Patrick, 1992, p. 487). La validité cognitive renvoie donc à la question de la similitude des fonctions cognitives impliquées pendant la conduite sur un simulateur par rapport à la conduite réelle : peut-on considérer que les mêmes fonctions sont impliqués et, si oui, peut-on considérer qu'elles sont impliquées de la même manière et avec la même intensité ?

Comme nous l'avons vu dans la section 1.1.2., l'attention est une fonction cognitive particulièrement impliquée dans la conduite et elle a donc été tout particulièrement étudiée. Le simulateur de conduite est souvent utilisé afin d'étudier l'impact de la distraction ou d'un déficit attentionnel sur le comportement et les performances de conduite (Chan, Pradhan, Pollatsek, Knödler & Fisher, 2010 ; Charlton, 2009 ; Horberry, Anderson, Regan, Triggs & Brown, 2006 ; Jamson & Jamson, 2010 ; Muhrer & Wollrath 2011). Néanmoins, peu d'études comparent directement les résultats sur simulateur et en conduite réelle. On peut toutefois citer le travail intéressant de Santos, Mérat, Mouta, Brookhuis, et de Waard (2005). En effet, ils ont montré que l'impact sur l'attention visuelle d'un système d'information à bord des véhicules, peut être mesuré avec la même précision sur simulateur et sur route.

En ce qui concerne l'intensité de l'implication des fonctions cognitives, un indicateur est généralement considéré : la charge mentale. Elle peut être considérée comme la différence entre les capacités du système de traitement de l'information, qui sont nécessaires à l'exécution des tâches, et les ressources disponibles à un moment donné (Gopher & Donchin, 1986). Cela implique que la charge mentale peut varier selon le moment et les capacités individuelles. Différentes méthodes peuvent être utilisées pour mesurer la charge mentale. Des mesures physiologiques permettent la détection précoce des changements dans la charge de travail (Brookhuis & de Waard, 2010 ; Mehler, Reimer, Coughlin, & Dusek, 2009, Reimer & Mehler, 2011). Par exemple, le rythme cardiaque et la réponse électrodermale ou RED (également appelée réponse galvanique de la peau ou niveau de conductance de la peau) semblent

être des mesures sensibles aux changements initiaux de la charge de travail en temps réel associé à une tâche secondaire. Ainsi, Reimer et Mehler (2011) ont montré que le pattern de changement de la fréquence cardiaque associée à une augmentation de la demande cognitive est tout à fait cohérent lors de la conduite dans un véhicule réel et sur un simulateur de conduite. Il est à noter que, dans cette étude, la charge de travail évaluée n'abordait pas directement la question de la comparaison de la charge cognitive entre la conduite réelle et la conduite sur simulateur. Ici, ce qui était mesuré était l'impact que pouvait avoir une tâche supplémentaire dans l'habitacle sur la charge mentale induite par la tâche principale de conduite, en conduite réelle et sur simulateur.

Les mesures physiologiques ne sont pas les seuls indicateurs de la charge mentale. Il est également possible d'utiliser la performance à une tâche secondaire (Wang, 2009 ; Wang et al., 2010). Cette méthode nécessite que le conducteur effectue la tâche principale de conduite alors que, dans le même temps, il utilise n'importe quelle autre ressource à sa disposition (ressources attentionnelles disponibles, par exemple) pour effectuer la tâche secondaire. La diminution de la performance dans la tâche secondaire entre différentes conditions de conduite est considérée comme indiquant le montant de la charge de travail générée par chaque situation (Gawron, 2008 ; Rudin-Brown, Williamson & Lenné, 2009). Par exemple, Wang et al. (2010) ont comparé les performances sur un système d'information à bord des véhicules (temps de réponse initial et durée pour saisir une adresse) dans deux conditions de conduite : véhicule réel et simulateur de conduite à base fixe. Le simulateur reproduisait presque exactement les pattern de performance observés sur un véhicule réel, indiquant à la fois une validité relative et une validité absolue.

Enfin, une échelle subjective d'évaluation multidimensionnelle peut également être utilisée, comme le NASA-Task Load indeX ou NASA-TLX (Cegarra & Morgado, 2009; Hart & Staveland, 1988). Ce test comprend 6 sous-échelles (exigence mentale, exigence physique, exigence temporelle, performance, effort, et frustration). Les trois premières dimensions représentent les astreintes imposées au participant par la tâche (exigences physique, mentale et temporelle) et les trois autres rendent compte des interactions du participant avec la tâche (performance, effort et frustration). Ce test est disponible en deux formats : le format papier/crayon et une application informatique entièrement automatisée. Le NASA-TLX a été utilisé dans de nombreuses recherches sur la charge cognitive en conduite (Jahn, Oehme, Krems, & Gelau, 2005 ; Matthews, Legg, & Charlton, 2003 ; Otmani, Rogé, & Muzet, 2005).

Néanmoins, une fois encore, cette échelle a souvent été utilisée pour étudier la charge mentale causée par une tâche supplémentaire pendant la conduite. Par exemple, Matthews et al. (2003) ont comparé l'effet du type de téléphone cellulaire sur la charge mentale subjective des conducteurs. Cependant, à notre connaissance, le NASA-TLX n'a pas été utilisé pour comparer directement la charge cognitive lors de la conduite sur véhicule réel et sur simulateur, c'est-à-dire, il n'a pas été utilisé pour tester la validité absolue du simulateur de conduite concernant la charge mentale.

2.3.1.4 Validité conative

La validité du ressenti psychologique (ou *validité conative*) pendant la conduite (stress, anxiété, plaisir) est une autre dimension comparative qui a à peine été explorée. Les mesures psychophysiologiques utilisées pour évaluer la charge mentale sont également mentionnées comme indicateur du ressenti psychologique, et particulièrement le stress ressenti. Par exemple, Johnson, Chahal, Stinchcombe, Mullen, Weaver, et Bédard (2011) montrent une augmentation statistiquement significative de la fréquence cardiaque moyenne en réponse à des événements surprenants qui se passent en conduite dans l'environnement virtuel. Une autre possibilité pour évaluer ce ressenti psychologique est d'utiliser une mesure indirecte comme des questionnaires. Même s'il est reconnu que cette méthode n'est pas assez objective, c'est souvent le seul moyen d'évaluer le ressenti des conducteurs. Toutefois, à notre connaissance, aucun auteur ne s'est intéressé à la mesure subjective du ressenti psychologique sur un simulateur de conduite par rapport aux conditions de conduite réelles.

2.3.1.5 Sentiment de présence

Enfin, une dernière dimension doit être pris en compte car il s'agit certainement de la combinaison des trois dernières dimensions que nous avons considérées auparavant (les validités comportementale, cognitive et conative) : le sentiment de présence. Il faut d'abord distinguer cette notion de celle d'immersion. L'immersion peut être considérée comme une description objective de l'interface de réalité virtuelle (ou RV) : la résolution d'affichage, le type d'appareils, etc. Elle renvoie au degré et la qualité avec lesquels l'interface du système contrôle les entrées sensorielles pour chaque catégorie de perception et d'action (Burkhardt, 2003, 2007). Ainsi, il s'agit (1) de la contribution relative des informations fournies par l'interface RV et des informations de l'environnement physique (par exemple, le pourcentage d'un canal sensoriel occupé par des stimuli virtuels par rapport aux stimuli de l'environnement réel) et (2) de la

suppression de l'information sensorielle de l'environnement réel (c'est à dire les propriétés de l'environnement proche qui peuvent diminuer ou neutraliser l'impact des canaux sensoriels non sollicités (ou saturés) par les interfaces RV.

En ce qui concerne la présence, elle est définie par Slater (2009) comme un phénomène subjectif lié au sentiment de l'utilisateur d'être là dans l'environnement virtuel (EV). La présence peut donc être considérée comme l'état psychologique de l'utilisateur qui caractérise ce qu'il expérimente dans l'EV. Afin de mieux comprendre comment cela peut influencer le comportement de l'utilisateur et les interactions dans l'EV, nous avons à considérer deux types de présence, introduites par Slater (Slater, 2009 ; Slater, Splanlang, & Corominas, 2010) :

- «place illusion» (illusion de lieu ou IL). Il s'agit de l'illusion d'*être là* dans un endroit en dépit de la certitude de ne pas y être.
- «plausibility illusion» (illusion de plausibilité ou IP). Il s'agit de l'illusion que ce qui se passe dans l'EV se passe réellement, même si l'on a la certitude que ce n'est pas le cas.

Une fois encore, des mesures physiologiques peuvent être utilisées. Nous pouvons supposer que plus la présence est élevée, plus ces variables vont se comporter de la même façon dans la réalité et dans l'EV. Par exemple, Meehan, Razzaque, Insko, Whitton, et Brooks (2005) ont comparé les réactions physiologiques de participants dans un EV non menaçant et leurs réactions face à une situation virtuelle stressante (en hauteur). Comme pour une situation réelle, ils ont constaté un changement de rythme cardiaque, qu'ils ont interprété comme une mesure satisfaisante de la présence. De plus, ces résultats étaient corrélés avec ce que rapportaient les participants concernant la présence et la présence comportementale.

Des questionnaires subjectifs ont également été mis au point par de nombreux auteurs pour évaluer le sentiment de présence dans l'EV. Nous pouvons citer, par exemple, le questionnaire complet de l'University College London (UCL) (Meehan, 2001 ; Slater, Usoh, & Steed, 1995), le Igroup Presence Questionnaire (IPQ) (Regenbrecht & Schubert, 2002 ; Schubert, Friedmann, & Regenbrecht, 1999) ou encore le Questionnaire de Présence de Gerhard, Moore et Hobbs (2001).

Toutes les études sur la notion de présence semblent considérer que le sentiment de présence doit nécessairement être le plus proche possible d'une "valeur de référence" qui correspond à la "présence absolue" (100% de présence ressenti). Ces études prennent pour acquis l'hypothèse implicite que la présence ressentie dans la réalité est nécessairement égale à 100%. Mais, étonnamment, cette hypothèse n'a jamais été testée, et encore moins discutée. A

notre connaissance, le sentiment de présence n'a jamais été mesuré dans la réalité. Il n'existe donc aucune preuve que ce sentiment soit nécessairement égal au niveau maximal théorique dans la réalité. En outre, il est même concevable que la présence ressentie soit parfois relativement faible dans la réalité. Cela peut être le cas lorsque le conducteur effectue une tâche de conduite en même temps qu'il pense à autre chose, au point qu'il se sent totalement ailleurs en esprit. Ainsi, le niveau de présence nécessaire pour déclarer la simulation adaptée à l'évaluation ou la formation en conduite doit être mis en évidence par une mesure de cette dimension dans l'environnement réel.

Pour conclure, tous ces travaux révèlent une grande ressemblance entre les comportements et les processus cognitifs impliqués dans la conduite sur simulateur et la conduite réelle. Néanmoins, il est évident que, selon l'auteur considéré, une même mesure (comme les mesures physiologiques) peut être considérée comme l'indicateur de différents processus. C'est notamment le cas de la fréquence cardiaque qui est utilisée par Mehler et son équipe (Mehler et al., 2009 ; Reimer & Mehler, 2011) comme une mesure de la charge mentale, alors qu'elle est utilisée par Johnson et al. (2011) comme un indicateur de stress et par Meehan et al. (2005) comme un indicateur de présence. Ainsi, dès que l'on considère des situations de conduite relativement complexes, les changements de ces indicateurs physiologiques sont multifactoriels et deviennent difficiles à interpréter. C'est la raison pour laquelle il semble très important de combiner ces indicateurs avec les mesures subjectives (des questionnaires par exemple).

2.3.2 Avantages du simulateur de conduite

Le simulateur de conduite présente de nombreux avantages. Parmi eux, nous pouvons citer le contrôle de la situation de conduite, de l'environnement visuel et des interactions avec l'EV. Il est aussi moins stressant pour l'utilisateur et moins coûteux que les évaluations traditionnelles réalisées avec des auto-écoles.

2.3.2.1 Contrôle de la situation de conduite et reproductibilité

L'utilisation du simulateur de conduite offre la garantie de pouvoir contrôler les différentes situations de conduite présentées et ainsi de reproduire parfaitement une situation de conduite

d'un participant à l'autre, sans aucun danger pour le participant en cas de comportement inadapté. Ainsi, les environnements virtuels sont capables d'augmenter considérablement les possibilités d'évaluation des capacités de conduite ainsi que d'accroître la normalisation de l'évaluation. Cette technologie semble particulièrement adaptée pour les personnes considérées comme "à risque", comme pour les personnes souffrant de lésions cérébrales ou les personnes âgées (Milleville-Pennel et al., 2010).

2.3.2.2 Gestion et enregistrement de l'environnement visuel

Gérer l'environnement visuel permet de faire varier la quantité d'informations visuelles disponible lors de la conduite automobile (conduite dans le brouillard, insertion d'écrans noirs pendant une durée limitée, etc.) et leur nature (pertinentes ou non pertinentes par rapport à la conduite). On peut aussi positionner les informations où on le souhaite (piéton visible ou non, panneau de publicité plus ou moins proche de la chaussée, etc.). Ces possibilités n'existent pas sur route ouverte.

Par ailleurs, en combinant le simulateur à un oculomètre, nous avons la possibilité de situer précisément les objets de l'environnement. C'est un aspect intéressant puisque Falkmer & Gregerson (2005) distinguent des conducteurs expérimentés de conducteurs inexpérimentés en étudiant les mouvements oculaires. Ils notent que les conducteurs inexpérimentés regardent plus souvent les objets dans le véhicule ou des objets classifiés comme danger potentiel et qu'ils déploient moins souvent leurs fixations le long de l'axe horizontal.

De la même façon, le recours à un oculomètre afin d'enregistrer les mouvements oculaires durant la tâche de conduite lors d'une étude préliminaire (Charron Hoc, & Milleville-Pennel, 2010 ; Milleville-Pennel et al., 2010) a montré une modification du pattern d'exploration visuelle chez des traumatisés crâniens. Cela se traduisait, d'une part, par un regard moins loin sur la route qui orientait vers un défaut d'anticipation et, d'autre part, par un regard qui se portait moins sur l'environnement périphérique, interrogeant sur les capacités d'attention partagée.

2.3.2.3 Gestion de l'interaction avec l'environnement

Le simulateur nous permet également de contrôler les feux, les véhicules, les piétons ou toute autre interaction avec l'environnement. On peut rappeler deux techniques importantes proposées par Brookhuis, de Waard, et Fairclough (2003) pour observer des déficits de con-

duite : le recours à des incidents critiques et la conduite dans des circonstances défavorables. Ainsi, Lundqvist et al. (1997) ont montré que des cérébrolésés ont des performances de conduite similaires aux contrôles dans des conditions habituelles. Cependant, ils se distinguent face à des événements critiques. L'utilisation de tels événements semblent donc appropriée dans le cadre d'une évaluation de la conduite. Cependant, pour des raisons évidentes de sécurité cela n'est pas envisageable sur une route réelle en raison du risque encouru. L'utilisation d'un simulateur de conduite permet au contraire d'introduire ce genre de paramètres tout en conservant une situation proche de la situation réelle mais sans risque pour le conducteur et les autres usagers.

2.3.3 Limites du simulateur : le mal du simulateur

Une des limites du simulateur est le mal du simulateur (MS). Il est difficile de clairement définir le MS car il y a de nombreux facteurs susceptibles d'expliquer et/ou de provoquer le MS. Ainsi, selon la façon dont il est abordé la définition peut changer. Néanmoins, il existe un consensus pour considérer le mal du simulateur comme un cas particulier de cinétose. Cela consiste en une réaction physique à l'exposition de l'environnement virtuel (EV) et peut comprendre une désorientation, des nausées, des étourdissements, de la transpiration, la somnolence, la fatigue oculaire, des maux de tête, la perte de la stabilité posturale et des vomissements (bien que rare). La sévérité des effets indésirables varie selon les participants et les EV, et il peut aller d'un léger inconfort à un malaise invalidant (Drexler, 2006). Le pourcentage d'utilisateurs de simulateurs affectés par les MS varie largement en fonction du type de simulateur, la tâche et la façon dont le MS est défini. Par exemple, Mullen, Weaver, Riendeau, Morrison & Bedard (2010) ont indiqué que 13 participants sur 25 (52%) n'ont pas terminé un entraînement sur simulateur en raison de MS. Park, Lim, Lee, Lee, Choi et Chung (2008) ont montré que sur 20 participants, sept ont été considérés comme malades après 60 min passées à rouler sur le simulateur de conduite (35%), parce qu'ils ont obtenu un score supérieur à la moyenne au score SSQ (Simulator Sickness Questionnaire). En utilisant un casque de réalité virtuelle, Stanney, Hale, Nahmens & Kennedy (2003) ont rapporté que sur un total de 1102 participants qui ont été exposés à la VE, 142 (12,9%) ont abandonné en raison de MS et sur les 960 participants qui ont terminé la passation, 81% ont signalé un niveau élevé de symptômes sur la SSQ. Le mal du simulateur peut donc présenter une réelle limite quant à l'utilisation du simulateur de conduite, comparativement à la conduite sur route réelle.

2.4 Questionnaires et autres mesures subjectives

Les trois évaluations que nous venons de présenter (bilan neuropsychologique, test sur route et évaluation sur simulateur) s'intéressent à des données objectives. Pourtant, l'objectivité n'est pas toujours de mise en psychologie. Les mesures subjectives, telles que l'on peut en obtenir à travers des questionnaires, sont régulièrement utilisées. L'étude de la conduite automobile n'est pas en reste. En effet, il existe un nombre conséquent de questionnaires en lien avec la conduite. Parmi eux, on peut citer par exemple le *Cognitive Behavioral Driver's Inventory* (Engum et al., 1989), plus récemment le *Driving Cognition Questionnaire* (Ehlers et al., 2007) ou, en France, le questionnaire sur les habitudes de conduite ((Rajaonah, Anceaux, & Vienne, 2006 ; Rajaonah, Tricot, Anceaux, & Millot, 2008).

Pour conclure, nous avons vu qu'il existe trois outils principaux pour évaluer les compétences de conduite : les tests neuropsychologiques, l'épreuve sur route, et l'évaluation sur simulateur. Si chaque évaluation prise séparément présente des limites, au moins l'une des autres permet de les pallier. Par exemple, les tests neuropsychologiques sont pratiques pour évaluer précisément les fonctions cognitives mais ils sont statiques, contrairement à l'épreuve sur route. Cette dernière présente une situation écologique difficilement contrôlable et reproductible, contrairement à l'évaluation sur simulateur. Nous comprenons donc l'intérêt qu'il peut y avoir à combiner ces évaluations dans un seul protocole.

3 Impact de la détérioration des fonctions cognitives sur la conduite : l'exemple des personnes cérébrolésées

De nombreuses pathologies peuvent entraîner des défauts dans la conduite, tels qu'on les a présentés précédemment. Lorsqu'il s'agit d'une pathologie acquise, comme une lésion cérébrale, on va souvent observer une modification du comportement de conduite. Ce changement est fonction du type de lésion, de sa localisation mais également du patient.

3.1 Définition des lésions cérébrales acquises

L'étude des fonctions cognitives et notamment des fonctions exécutives (les fonctions de haut niveau) a régulièrement fait appel au cas des personnes cérébrolésées (CL), c'est-à-dire de personnes ayant des lésions cérébrales acquises. C'est par exemple le cas princeps de Phi-

neas Gage (Harlow, 1968), probablement le premier cas vu par les étudiants en psychologie. Parmi les différentes causes de lésions cérébrales acquises, nous pouvons citer les plus courantes : l'accident vasculaire cérébral (AVC) et le traumatisme crânien (TC). L'accident vasculaire cérébral caractérise toute anomalie clinique secondaire à une lésion anatomique d'un ou de plusieurs vaisseaux cérébraux. Le traumatisme crânien (ou traumatisme crânio-cérébral, TC) fait suite à un choc sur la boîte crânienne pouvant engendrer des lésions cérébrales.

3.2 Détérioration des fonctions cognitives : impact sur la conduite

A la suite d'un AVC ou d'un TC grave, les personnes vont présenter des déficits qui varient en fonction des zones cérébrales atteintes. Notre but n'étant pas une analyse poussée des déficits avec une localisation hémisphérique, nous nous contenterons d'énumérer les déficits classiquement observés sur l'ensemble de la population. Ainsi, les personnes cérébrolésées présentent des déficits cognitifs assez larges et hétérogènes. Les troubles que l'on retrouve le plus souvent dans la littérature (Azouvi, Vallat-Azouvi, & Belmont, 2009 ; De Jouvencel, Narcyzfadoul, Bourdon, & Masse, 2008 ; De Labarthe, & Guérin-Bonvoisin, 1998) concernent :

l'attention - toutes ses composantes seraient touchées, avec un déficit majeur en attention partagée (Azouvi, Couillet, Leclercq, Martin, Asloun, & Rousseaux, 2004 ; Park, Moscovitch, & Robertson, 1999) ;

la mémoire à court terme et à long terme (Andres et Van der Linden, 2004) ;

la mémoire de travail ;

un ralentissement général, psychique et moteur (Andres et Van der Linden, 2004) ;

des troubles visuels, notamment une négligence spatiale unilatérale (NSU) et une difficulté à traiter les informations visuelles (comme l'appréciation des distances) ;

la flexibilité.

De plus, de nombreux patients présentent une anosognosie, c'est-à-dire qu'ils n'ont pas conscience de leurs troubles.

Ces différents troubles cognitifs vont avoir un impact direct sur les compétences de conduite, puisqu'ils concernent des processus qui sont majoritairement impliqués dans cette activité, comme nous avons pu le voir précédemment. C'est pourquoi, dans ce travail de thèse, nous nous intéressons particulièrement au cas des personnes cérébrolésées. Ce sont, en effet, des participants tout à fait indiqués pour la validation d'un protocole sur simulateur destiné à évaluer les déficits au niveau des processus cognitifs impliqués en conduite automobile.

CHAPITRE 2 - OBJECTIFS DE LA RECHERCHE

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

Comme nous avons pu le voir, la question de l'évaluation d'activités complexes comme la conduite automobile est difficile. De nombreuses méthodes sont disponibles mais aucune n'est satisfaisante en elle-même. La mise en place d'une évaluation complète nécessite donc de faire appel à différents outils qui n'ont pas nécessairement de lien direct entre eux. Il convient d'effectuer une sélection rigoureuse pour qu'une telle évaluation soit à la fois complète et cohérente, mais aussi pour qu'elle soit suffisamment discriminante entre les participants sains et ceux en difficulté.

Par ailleurs, nous avons vu que le cas des personnes cérébrolésées pouvait être un cadre pertinent pour valider l'apport de nouveaux outils d'évaluation des aptitudes à la conduite. En effet, ces personnes présentent une grande variété de troubles (attention, ralentissement de la vitesse de traitement, etc.) qui ont un fort impact sur cette activité. Toutefois, les personnes cérébrolésées ont besoin de conserver un maximum d'autonomie pour pouvoir reprendre une vie aussi proche que possible de celle qu'ils menaient avant la survenue des lésions. Or, ce maintien dans l'autonomie passe en grande partie par la mobilité et donc la reprise de la conduite automobile. La reprise du volant doit donc se faire en gardant à l'esprit des impératifs sécuritaires.

Il est donc essentiel que le dispositif d'évaluation mis en place permette de mettre en évidence d'éventuels déficits concernant les processus cognitifs essentiels dans l'activité de conduite automobile, mentionnés dans le chapitre 1 (section 1.2).

1 Premier objectif : validation de l'utilisation d'un simulateur de conduite pour évaluer les compétences de conduite comparativement à une batterie de tests neuropsychologiques et à une évaluation sur route

Dans ce travail de recherche, nous voulions créer un protocole complet d'évaluation qui nous permette d'étudier les compétences en conduite automobile. Nous avons vu dans le chapitre 1 qu'une telle évaluation implique classiquement une batterie de tests neuropsychologiques et une évaluation sur route. Nous avons également montré que de nouveaux outils de simulation existent et semblent permettre une évaluation des aptitudes à la conduite (Anderson et al., 2005 ; Bella, 2008 ; Lew et al., 2005 ; Mayhew, et al., 2011 ; Patomella & Kottorp, 2005 ; Patomella et al., 2006 ; Stern, 2004 ; Vuadens & Comte, 2001.). Les travaux précédents de Milleville-Pennel et al. (2010) ont notamment permis de montrer que l'évaluation de l'exploration visuelle réalisée sur simulateur de conduite est cohérente avec l'évaluation neuropsychologique. Reste à savoir si la simulation peut être également une bonne alternative à la

conduite sur route réelle, tout au moins lors des premières confrontations à la conduite. Le premier objectif de cette thèse est donc de valider des critères de compétence en confrontant des données issues de tests neurophysiologiques aux évaluations réalisées sur simulateur et sur véhicule auto-école. Pour cela, Une première étape impliquait d'évaluer la validité écologique du simulateur de conduite par rapport à la conduite sur véhicule réel. Cela a été réalisé au cours d'une première étude présentée dans le chapitre 3.

A la suite de cette première étude, un protocole complet et cohérent d'évaluation a été créé, combinant les trois outils : une évaluation sur simulateur de conduite, un bilan neuropsychologique et un test de conduite sur route réelle.

Concernant notre protocole d'évaluation de la conduite, nous posons deux hypothèses :

- L'évaluation sur simulateur, comme les tests neuropsychologiques et l'évaluation sur route, nous permettra d'évaluer les compétences de conduite (**hypothèse 1**).
- La mise en relation des trois évaluations nous montrera la cohérence et la complémentarité du protocole (**hypothèse 2**).

L'étude présentée chapitres 5 et 6 tentera de valider ces hypothèses.

2 Second objectif : apport du simulateur de conduite pour l'étude des mécanismes cognitifs déficitaires lors de la conduite

Pour réaliser le premier objectif, il était nécessaire de mettre en place une évaluation sur simulateur qui nous permettait d'observer les mécanismes cognitifs impliqués en conduite automobile et le cas échéant mettre en avant d'éventuels déficits. Si l'utilisation d'un simulateur de conduite tend à se démocratiser de plus en plus, l'avis donné au patient varie très souvent selon la subjectivité du praticien et les scénarios de conduite utilisés. Cela tient au fait que les scénarios de conduite disponibles par défaut sur les simulateurs sont souvent développés de façon arbitraire par les constructeurs, sans réel fondement théorique. Ils sont en outre excessivement accidentogènes, y compris pour les conducteurs sains, rendant difficile la détection de réelles difficultés. Notre second objectif était donc de créer des scénarios sur simulateur de conduite qui nous permettaient d'obtenir les informations pertinentes dont nous avions besoin afin de poser un diagnostic cohérent et identique d'un praticien à l'autre. Le travail de conception de ces scénarios est présenté dans le chapitre 4. Par ailleurs, afin de valider le caractère réaliste et non accidentogène des scénarios de conduite que nous avions conçus, une étude a été réalisée sur une population tout-venant. Cette étude sera également présentée dans le chapitre 4.

Enfin, la dernière étape de notre travail consistait à valider l'apport du simulateur pour l'étude approfondie des mécanismes cognitifs impliqués en conduite automobile. Nous avons vu qu'un protocole pertinent doit nous permettre d'appréhender tout particulièrement : les processus attentionnels (notamment l'attention sélective et l'attention partagée), le système de contrôle des ressources (c'est-à-dire le contrôle cognitif) à travers les mécanismes d'anticipation et d'adaptation, et enfin la vitesse de traitement des informations. La suite du document présente plus en détail les attentes que nous avions quant aux scénarios que nous avions créés. La validation de ces hypothèses a été l'objet d'une dernière étude dont la méthodologie et les résultats sont présentés dans les chapitres 5 et 6.

2.1 Etude de l'attention sélective

L'attention, qu'elle soit sélective ou partagée, est souvent mise en avant dans les déficits des personnes cérébrolésées. En effet, il a été montré que ces personnes sont davantage sensibles aux distracteurs (éléments de l'environnement routier non pertinents pour la tâche en cours). Une personne avec un défaut d'attention sélective aura des difficultés à sélectionner les informations pertinentes et surtout à inhiber celles qui ne le sont pas. Or, l'activité de conduite est riche en stimuli pertinents pour la conduite (autres usagers, signalisation routière) et non pertinents (éléments du paysage, panneaux publicitaires). La sollicitation est encore plus importante en environnement urbain, du fait de la richesse des informations visuelles (piétons, infrastructure routière et signalisation complexes, panneaux publicitaires, etc.).

Afin d'étudier un éventuel déficit d'attention sélective, nous avons décidé d'introduire des distracteurs dans un environnement urbain, plus riche en sollicitations que l'environnement rural. D'après Wickens (1984), les informations empruntent des canaux différents selon la modalité perceptive. Si l'on considère cette théorie, puisque les informations visuelles sont prépondérantes en conduite, il faudrait recourir à des distracteurs visuels. Un distracteur visuel concurrencerait alors le traitement des informations visuelles pertinentes pour la conduite et permettrait de mettre en évidence en défaut d'attention sélective. Bendak & Al-Saleh (2010) ont montré l'efficacité des panneaux publicitaires en tant que distracteurs visuels en conduite. Nous avons donc décidé d'introduire des panneaux publicitaires dans les parcours que nous utiliserons sur simulateur de conduite, ces derniers seront disposés le long de la chaussée. En cas de déficits d'attention sélective, nous nous attendons à un nombre de regard plus important sur les panneaux publicitaires par rapport aux participants sains (contrôles, **hypothèse 3a**). De plus, un défaut d'attention sélective implique généralement un défaut d'inhibition. Le panneau,

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

sélectionné à tort, sera traité au lieu d'être inhibé. Nous pouvons donc supposer que les regards seront plus longs sur les panneaux publicitaires (**hypothèse 3b**).

Outre l'effet du panneau en tant que distracteur, nous nous sommes également intéressés à l'effet de l'excentricité du panneau sur les fréquence et durée de regards. En effet, l'étude préliminaire de Milleville-Pennel et al. (2010) montrait que les participants cérébrolésées se focalisaient davantage sur l'environnement routier direct, c'est-à-dire proche de la route, et négligeaient l'environnement plus éloigné. On pourrait donc supposer qu'ils allouent leurs ressources attentionnelles à l'environnement routier direct. Cependant, dans cette étude, les zones éloignées de la route donnaient peu d'informations pertinentes et étaient peu attrayantes. De plus, la zone proche ne comportait pas de distracteurs. Il était donc difficile de conclure sur un éventuel déficit d'attention sélective. Afin d'étudier plus avant cet effet de l'excentricité par rapport à la route, nous avons disposé des panneaux publicitaires à différentes excentricités, peu excentrés ou très excentrés. Nous nous attendons à un nombre de regards et des durées de regards plus élevés sur les panneaux peu excentrés que sur les panneaux très excentrés, chez les participants cérébrolésés, si ces derniers présentent effectivement un défaut d'attention sélective (**hypothèse 4**).

2.2 Etude de l'attention partagée

D'après le modèle de Wickens, les informations sensorielles seraient acheminées à travers des canaux distincts, en fonction de la modalité dans laquelle elles ont été perçues. Toutefois des études en conduite automobile ont montré l'impact de l'utilisation du téléphone portable sur l'activité de conduite (Bruyas, Chapon, Lelekov-Boissard, Letisserand, Duraz, & Aillerie, 2006). On peut donc se demander si un distracteur auditif ne serait pas aussi efficace en termes de sollicitations qu'un distracteur visuel. C'est pourquoi, nous avons introduit un deuxième type de distracteurs, un distracteur auditif. Notre but ici est d'étudier l'effet de l'augmentation de la charge auditive sur l'activité de conduite. Pour cela, il est nécessaire de créer un distracteur suffisamment attrayant pour qu'il soit au moins partiellement traité même par des participants sans difficultés particulières (c'est-à-dire par des participants contrôles), pendant l'activité de conduite. Le but est ainsi d'inciter au maximum le participant à partager son attention entre le distracteur et la conduite. On pourrait penser, a priori, que le distracteur sera inhibé si le filtre attentionnel fonctionne correctement. En réalité, lorsque les ressources le permettent et que le distracteur est suffisamment attrayant, il peut être traité. Nous avons donc intégré une discussion téléphonique entre l'expérimentateur et un interlocuteur imaginaire,

pendant que le participant conduisait sur simulateur. Si la conversation est écoutée, elle demande de partager les ressources attentionnelles entre la conduite et l'écoute de la discussion. Or, un tel traitement devrait avoir un impact négatif sur la tâche de conduite chez les participants cérébrolésés, du fait de ressources limitées et/ou de difficultés à allouer correctement les ressources. Ainsi, lors de l'augmentation de la charge auditive, on devrait observer des modifications du comportement de conduite chez les cérébrolésés. Nous nous intéresserons aux variables liées aux tâches les plus importantes de l'activité de conduite, c'est-à-dire la gestion de la trajectoire et de la vitesse. Ainsi, nous nous attendons à une plus forte variabilité de la vitesse (**hypothèse 5a**) et de la trajectoire (**hypothèse 5b**) lors de la discussion téléphonique chez les participants cérébrolésés, comparativement aux participants sains.

2.3 Etude de l'anticipation

Deux aspects nous intéressaient dans l'anticipation en conduite. Tout d'abord, il y a l'anticipation tout au long de la conduite, qui correspond d'après Hoc et Amalberti (2007) à la manière dont on répartit habituellement son contrôle cognitif. Nous avons vu précédemment que les personnes cérébrolésées portaient leur regard moins loin sur la route que les contrôles (Milleville-Pennel et al., 2010 ; Charron et al., 2010). Ce résultat pourrait être interprété comme un défaut d'anticipation puisque les personnes cérébrolésées ne vont pas chercher les informations loin, contrairement aux contrôles. Cependant, dans cette étude, il n'y avait pas d'événements qui obligeaient le conducteur à aller chercher les informations au loin pour anticiper. L'hypothèse d'un défaut d'anticipation ne pouvait donc pas être totalement confirmée. Nous créerons donc des scénarios comportant des événements possiblement accidentogènes, parfois visibles de loin et qui devraient obliger le conducteur, tout au long de sa conduite, à être plus anticipatif. Malgré la présence de ces événements, nous nous attendons à ce que les personnes cérébrolésées soient moins anticipatives que les conducteurs contrôles et portent leur regard moins loin sur la chaussée (**hypothèse 6**).

Par ailleurs, l'anticipation est nécessaire en conduite afin d'éviter certaines situations accidentogènes. Par exemple, si un piéton montre son intention de traverser mais que l'on ne regarde pas au loin sur la chaussée, on ne le verra qu'au dernier moment, avec les risques que cela implique. Afin d'étudier l'anticipation dans cette situation bien spécifique, nous avons conçu des scénarios avec des événements critiques anticipables, c'est-à-dire des événements dangereux, qui risquent de provoquer des accidents, mais que l'on peut facilement éviter en anticipant. Nous supposons qu'en cas de défaut d'anticipation, les personnes cérébrolésé au-

ront plus de mal à éviter l'accident. D'une part, les regards des personnes cérébrolésées devraient se porter plus tardivement sur les objets critiques, c'est-à-dire les objets à éviter comme un piéton ou un véhicule en panne (**hypothèse 7a**). D'autre part, nous devrions observer des actions (évitement, freinage) beaucoup plus tardives chez les personnes cérébrolésées que chez les contrôles (**hypothèse 5b**), ce qui pourrait se solder par davantage d'accidents (**hypothèse 7c**).

2.4 Etude de l'adaptation du contrôle cognitif

Nous nous sommes intéressés à l'adaptation du contrôle cognitif, c'est-à-dire à la manière dont le système cognitif va modifier l'allocation des ressources lorsque la tâche le nécessite, par exemple, lorsqu'on doit changer de but à atteindre ou répondre à une contrainte, interne ou externe, on modifie alors sa performance acceptable. Dans ce but, nous nous sommes inspirés d'une étude précédente en utilisant des consignes de conduite. En effet, Charron et al. (2010) ont montré que l'utilisation de consignes obligeait le conducteur à modifier sa performance acceptable. Les personnes cérébrolésées ayant des difficultés à adapter leur contrôle cognitif aux exigences de la tâche, ils ne devraient pas ou peu appliquer les consignes. L'effet des consignes devrait s'observer, entre autres, sur la gestion de la vitesse et de la trajectoire. Nous nous attendons donc à ce que les participants cérébrolésés modifient peu/pas leur vitesse et leur trajectoire par rapport aux participants contrôles lors des parcours avec consignes (**hypothèses 8a et 8b**).

2.5 Etude de la vitesse de traitement

La vitesse de traitement des informations est essentielle en conduite. Avec les tests neuropsychologiques, elle est évaluée, entre autres, avec le test d'alerte phasique. Ce test consiste à appuyer sur un bouton lors de l'apparition du stimulus-cible après un signal avertisseur. C'est une chose difficile et potentiellement dangereuse à tester en conduite réelle sur route ouverte Nous voulions donc reprendre l'idée du test d'alerte phasique en l'appliquant à une situation de conduite. Un scénario préexistant sur le simulateur correspondait à nos besoins. Il s'agissait d'un exercice très court durant lequel le participant roulait sur une route de campagne. Un signal stop apparaissait au milieu de l'écran et le participant devait freiner le plus rapidement possible. En cas de vitesse de traitement ralentie, on s'attend à observer des temps de réaction plus importants chez les participants cérébrolésées que chez des participants contrôles (**hypothèse 9**).

Partie 2 :

Validité écologique de l'outil de simulation

CHAPITRE 3 - VALIDITE ECOLOGIQUE DU SIMULATEUR : INTERETS ET LIMITES

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

Comme nous l'avons montré dans les précédents chapitres, de nombreuses études ont montré l'intérêt d'avoir recours à un simulateur de conduite pour évaluer les capacités à la conduite (Anderson et al., 2005 ; Lew et al., 2005 ; Mayhew, et al., 2011 ; etc.). En effet, le simulateur peut permettre de distinguer des participants en fonction de différentes aptitudes :

le niveau d'expérience.

les capacités cognitives.

Cependant, le simulateur de conduite est toujours critiqué à cause de son caractère artificiel. Cela soulève donc une question : à quel point la simulation est-elle représentative de ce que l'on peut observer en réalité ? Nous avons élaboré une étude visant à répondre spécifiquement à cette question. Pour cela, nous avons eu recours à des variables qui ne sont pas ou peu utilisées dans ce but jusqu'à présent telles que la charge mentale et la mesure du sentiment de présence. Nous avons comparés ainsi la conduite sur route avec un formateur avec la conduite sur simulateur sur la base :

des ressources cognitives impliquées dans deux conditions de conduite, sur simulateur et sur route.

du ressenti psychologique pendant la conduite sur simulateur et sur route réelle. Nous nous sommes surtout intéressés au cas particulier de la conduite avec un formateur d'auto-école, situation habituelle dans le contexte particulier qui nous intéresse, l'évaluation des capacités de conduite.

du sentiment de présence dans les deux conditions de conduite.

1 Méthode

1.1 Participants

Un total de 9 participants (3 femmes et 6 hommes), âgés de 22 ans à 48 ans ont participé à l'étude. Tous avaient une vision normale (avec ou sans correction). Ils étaient tous volontaires et naïfs quant au but de l'étude. Tous les conducteurs avaient une expérience de conduite d'au moins 3 ans (aucun n'était apprenti). Chacun conduisait régulièrement (au moins 50 km par semaine soit 2500 km par an).

Le recrutement s'est fait par le biais de l'Ecole Centrale de Nantes. L'échantillon est donc principalement composé d'étudiants et de chercheurs ou enseignants-chercheurs mais ne travaillant pas dans le champ de la psychologie et de la conduite automobile.

1.2 Dispositif et procédure

1.2.1 Dispositif

1.2.1.1 Simulateur de conduite

1.2.1.1.1 Caractéristiques du simulateur

Nous avons donc utilisé le simulateur Oktal de l'IRCCyN (figure 7). Ce simulateur est équipé d'un volant à retour d'effort réaliste. Le logiciel SCANNeRII®1 est utilisé avec un modèle dynamique de véhicule (Lechner, Delanne, Schaefer, & Schmitt, 1997). Ce modèle permet de reproduire avec un haut degré de réalisme la dynamique des véhicules de la cabine ainsi que du trafic. L'environnement visuel est rendu sur trois moniteurs LCD de 32 pouces. Le premier est positionné en face du conducteur et les deux autres sont positionnés sur les côtés, à un angle de 45° par rapport à l'écran central. Les conducteurs que nous avons recrutés étaient installés à environ 1 mètre de l'écran central et la scène visuelle couvrait 115° d'angle visuel en largeur et 25° en hauteur.

Figure 7 : Simulateur de conduite Oktal

Dans ce simulateur, l'environnement de conduite est reproduit de façon réaliste. La figure 8 présente une capture d'écran du type d'environnement dans lequel les conducteurs ont été amenés à évoluer.

Figure 8 : Illustration du rendu de la scène visuelle sur l'écran central

1.2.1.1.2 Parcours de conduite sur route

La conduite sur simulateur se compose d'une initiation en campagne, d'un parcours en ville et d'un parcours en campagne.

- Initiation en campagne

Il s'agit d'un trajet en milieu rural de 10 minutes environ qui devait permettre la prise en main du simulateur et de ses commandes : volant, accélérateur, frein, etc. Les conditions de conduite étaient très favorables : conduite de jour, par beau temps, avec une circulation fluide (voitures, vélos, motos). Le participant apprend ainsi à maîtriser le véhicule sans autres contraintes.

- Conduite en ville

Il s'agit d'un circuit assez court (5 minutes environ) en milieu urbain. Les conditions de conduite étaient favorables (conduite de jour, par beau temps, très peu de circulation, pas de piétons…).

- Parcours en campagne

Il s'agit d'un trajet en milieu rural de 10 minutes environ. Les conditions de conduite étaient favorables. L'itinéraire comprenait de nombreux stop, un feu de signalisation, divers panneaux routiers et plusieurs giratoires.

1.2.1.2 Véhicule réel

1.2.1.2.1 Caractéristiques du véhicule

Les tests sur route étaient effectués dans une Renault Clio III diesel, équipée d'une boîte manuelle à 5 vitesses, avec doubles commandes. Tous les participants passaient l'évaluation avec le même formateur d'auto-école.

1.2.1.2.2 Parcours de conduite sur route

Le parcours de conduite sur route durait 50 min. L'itinéraire était défini de manière à se rapprocher le plus possible des parcours ville et campagne, développés sur le simulateur.

1.2.2 Appareil de mesure de la fréquence cardiaque

Une montre Polar RS800CX multisport permettait de mesurer la fréquence cardiaque.

1.2.3 Questionnaires

Trois questionnaires ont été utilisés :

- NASA TLX. Il s'agit d'une échelle de mesure de la charge mentale composée de 6 sous-catégories (charge mentale, charge physique, demande temporelle, performance, et frustration). Une description des sous-catégories est disponible dans le tableau I.
- Questionnaire de Présence (QIP). Afin de créer ce questionnaire, nous nous sommes inspirés des nombreux questionnaires existants (UCL : Slater,et al., 1995 ; Meehan, 2001 ; IPQ : Regenbrecht & Schubert, 2002). La majeure partie des questions concernait l'estimation de l'immersion et de la présence (réalisme de la situation de conduite, évaluation de la Pi et de la Psi ; cf. tableau II). Néanmoins le questionnaire contenait également quelques questions destinées à évaluer le stress, l'effort ressenti, le sentiment de maîtrise du véhicule (l'impression d'avoir le contrôle du véhicule) et le sentiment de maîtrise des événements (l'impression d'avoir la maîtrise des événements survenant pendant la conduite).

Tableau I : Les échelles du NASA TLX (traduit et adapté d'après Hart et Staveland, 1988).

Echelle	Descripteur	Description
Exigence Mentale	De Faible à Elevée	Quelle a été l'importance de l'activité mentale et intellectuelle requise (ex. réflexion, décision, calcul, mémorisation, observation, recherche etc.) ? La tâche vous a-t-elle paru simple, nécessitant peu d'attention (faible) ou complexe, nécessitant beaucoup d'attention (élevée) ?
Exigence Physique	De Faible à Elevée	Quelle a été l'importance de l'activité physique requise (ex. pousser, porter, tourner, marcher, activer, etc.) ? La tâche vous a-t-elle paru facile, peu fatigante, calme (faible) ou pénible, fatigante, active (élevée) ?
Exigence Temporelle	De Faible à Elevée	Quelle a été l'importance de la pression temporelle causée par la rapidité nécessitée pour l'accomplissement de la tâche ? Etait-ce un rythme lent et tranquille (faible) ou rapide et précipité (élevé) ?
Performance	De Bonne à Mauvaise	Quelle réussite pensez-vous avoir eu dans l'accomplissement de votre tâche ? Comment pensez-vous avoir atteint les objectifs déterminés par la tâche ?
Effort	De Faible à Elevé	Quel degré d'effort avez-vous dû fournir pour exécuter la tâche demandée, (mentalement et physiquement) ?
Frustration	De Faible à Elevée	Pendant l'exécution du travail vous êtes-vous senti satisfait, relaxé, sûr de vous (niveau de frustration faible), ou plutôt découragé, irrité, stressé, sans assurance (niveau de frustration élevé) ?

Tableau II : Exemple de questions issues du questionnaire Présence.

Immersion	Comment était votre perception (conscience) de l'environnement réel (bruits, autres personnes présentes, …) ? très forte très faible
	Comment noteriez-vous votre distractibilité par des bruits ou événements survenus dans l'environnement non directement lié à la conduite ? très forte très faible
Psi	Les situations de conduite vous ont-elles semblé réalistes par rapport à ce que vous rencontrez habituellement? très réalistes pas du tout
	Comment était la réactivité de l'environnement suite à vos actions ? très bonne très mauvaise
Pi	Comment était votre sensation « d'être là» dans l'environnement de conduite ? très forte très faible
	Comment noteriez-vous le sentiment que vous avez eu que la voiture était votre propre voiture ? très fort très faible

1.3 Procédure

Au début de la séance, le participant était informé des conditions de passation de l'étude et devait compléter le document de consentement à l'exploitation des données. La moitié des participants a effectué en premier la conduite sur route alors que l'autre moitié a commencé par la conduite sur simulateur.

1.3.1 Conduite sur simulateur (condition Simulation)

Le participant était mis en présence du simulateur et les commandes lui étaient expliquées. Il était ensuite équipé du « cardiofréquencemètre » et était prié de s'installer dans le simulateur dans une position confortable. Il avait pour consigne de conduire comme il le ferait dans la réalité. Il réalisait ainsi les trois scénarios précédemment décrits (environs 25 à 30 min avec une pause de 5 minutes entre chaque scénario). Le participant devait ensuite compléter les questionnaires du NASA TLX et de présence.

1.3.2 Conduite sur route (condition VAutoEcole)

Le participant était équipé du « cardiofréquencemètre » et était ensuite prié de s'installer dans le véhicule de l'auto-école dans une position confortable et il avait pour consigne de conduire comme il le ferait dans la réalité (environ 50 min). Le participant devait ensuite compléter les questionnaires du NASA TLX et de présence.

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

1.3.3 Evaluation de la présence lors de la conduite du véhicule personnel (condition VPerso)

Il ne nous était pas possible, pour des raisons de sécurité, de demander aux participants de conduire avec leur véhicule personnel lors de l'étude. Néanmoins, nous avons essayé d'obtenir un minimum d'information concernant cette situation. Ainsi, à la fin de la passation avec l'auto-école, l'expérimentateur demandait au participant de se remémorer la dernière fois qu'il avait conduit seul son véhicule personnel (pour la majorité des participants, il s'agissait du matin même ou de la veille) et de compléter à nouveau le questionnaire de présence, concernant son propre véhicule (condition VPerso).

1.4 Recueil des données et traitements

Le rythme cardiaque a été analysé dans les conditions NB, VAutoEcole et Simulateur. Les analyses ont porté sur le pourcentage de fréquence cardiaque maximum (FCM). La charge

mentale a été évaluée dans les conditions VAutoEcole et Simulateur grâce au NASA TLX. Le stress, l'effort perçu, le sentiment de maitrise du véhicule, la présence et l'immersion ont été évalués dans les conditions VAutoEcole, Simulateur et VPerso grâce au QIP. L'ensemble des comparaisons entre les groupes de données à été réalisé à l'aide du *t* de Student.

2 Résultats

2.1 Analyse de la fréquence cardiaque maximum (FCM)

L'analyse de la FCM indique que les conditions Simulateur et NB différent de la condition VAutoEcole, la FCM étant plus élevée lors de cette dernière (NB vs. VAutoEcole: t-test -4.30 df= 7 p= 0.03; NB vs. Simulateur : t-test -1.58 df= 7 p= 0.15 ; VAutoEcole vs. Simulateur : t-test 4,48 df= 8 p= 0.002). Ce résultat laisse à penser que seule la condition VAutoEcole induit une augmentation notable du rythme cardiaque. Cependant, à ce stade de l'analyse, ce résultat ne permet pas d'invalider l'hypothèse d'une similarité (relative) quant aux ressources cognitives en œuvre dans les deux conditions (charge mentale, …). En effet, nous avons vu dans l'introduction que l'augmentation de la FCM peut être la résultante de plusieurs facteurs (stress, charge mentale, …). L'ambiguïté de ce résultat montre à quel point les indicateurs physiologiques ont une portée interprétative limitée et nécessitent d'être complétés.

2.2 Charge mentale (NASA-TLX)

Aucune différence statistiquement significative n'est observée entre les conditions VAutoEcole et Simulateur (tous les p sont supérieurs à 0,05). Les deux conditions semblent donc équivalentes quand à la répartition et l'intensité des ressources cognitives sollicitées dans les deux situations de conduite.

2.3 Stress

Les conditions VPerso et Simulateur différent de la condition VAutoEcole, le stress ressenti étant plus élevé lors de la condition VAutoEcole (VPerso vs. VAutoEcole: t-test -3.58 df= 8 p= 0.007; VPerso vs. Simulateur : t-test -1.53 df= 8 p= 0.16; VAutoEcole vs. Simulateur : t-test -2.34 df= 8 p= 0.05). Ce résultat indique que l'augmentation de la FCM observée dans la

condition VAutoEcole pourrait être imputée à l'augmentation du stress ressenti dans cette situation.

2.4 Maîtrise

2.4.1 Maîtrise du véhicule

Les conditions VAutoEcole et Simulateur diffèrent de la condition VPerso, la maîtrise ressentie étant plus élevée lors de la condition VPerso (VPerso vs. VAutoEcole: t-test -2.62 df= 8 p= 0.03; VPerso vs. Simulateur : t-test -2.77 df= 8 p= 0.02; VAutoEcole vs. Simulateur : t-test 1.94 df= 8 p= 0.09). Ce résultat, indique que l'augmentation de stress ressenti dans la condition VAutoEcole, ne peut pas être imputée à un manque de maîtrise du véhicule Auto-école mais bien à la situation de conduite en soi puisque le simulateur n'est pas perçu comme étant d'avantage maîtrisé et n'induit pas d'augmentation du stress perçu.

2.4.2 Maîtrise des événements

Aucune différence statistiquement significative n'est observée entre les 3 conditions (VPerso vs. VAutoEcole: t-test -1.89 df= 8 p= 0.2; VPerso vs. Simulateur : t-test -2.21 df= 8 p= 0.09; VAutoEcole vs. Simulateur : t-test 0.56 df= 8 p= 0.59).

2.5 Effort

Les conditions VAutoEcole et Simulateur diffèrent de la condition VPerso, l'effort perçu étant plus faible dans cette condition (VPerso vs. VAutoEcole: t-test -2.66 df= 8 p= 0.029; VPerso vs. Simulateur : t-test -3.84 df= 8 p= 0.005; VAutoEcole vs. Simulateur : t-test 1.69 df= 8 p= 0.13). Par contre l'effort perçu ne diffère pas de façon statistiquement significative entre les conditions VAutoEcole vs. Simulateur. Ce résultat est cohérent avec l'absence de différence significative observée au niveau de la charge mentale et plaide en faveur d'une équivalence quant aux ressources cognitives impliquées dans les deux conditions.

2.6 Immersion

Seules les conditions VAutoEcole et Simulateur différent entre elles, l'immersion étant plus élevée lors de la condition VAutoEcole (VPerso vs. VAutoEcole: t-test 2.14 df= 8 p= 0.06; VPerso vs. Simulateur : t-test 0.34 df= 8 p= 0.66; VAutoEcole vs. Simulateur : t-test -3.85 df= 8 p= 0.004). Ce résultat est surprenant pour deux raisons, la première concerne l'absence de différence entre les conditions Simulateur et Vperso, alors qu'il s'agit d'une estimation du taux de stimulation des sens induit par l'environnement (supposé être total dans la réalité). La seconde concerne les valeurs observées (VAutoEcole : 69,6%; Simulateur : 53,53% et VPerso : 56,21%) : aucune d'entre elles n'est proche de 100%. Cela implique que même dans la réalité, nous n'avons pas le sentiment que nos sens sont sollicités à 100%, même si la situation VAutoEcole semble augmenter cette sensation par rapport à la conduite sur véhicule personnel, exactement comme si l'arousal provoqué par l'augmentation de stress augmentait « l'attention » sensorielle.

2.7 Présence

2.7.1 Place illusion

Aucune différence n'est statistiquement significative entre les trois conditions (VAutoEcole : 53,09% ; Simulateur : 54,67% et VPerso : 56,21% ; VPerso vs Simulateur: t-test 0.24 df= 8 p= 0.82; VPerso vs. VAutoEcole : t-test 0.61 df= 8 p= 0.56; Simulateur vs. VAutoEcole : t-test 0.29 df= 8 p= 0.77).

2.7.2 Plausibility illusion et réalisme

La comparaison n'a pu être réalisée avec la condition VPerso car les questions du questionnaire (renvoyant aux événements vécus lors des séances de conduite sur simulateur et avec le véhicule auto-école) ne pouvaient pas être appliquées à la conduite du véhicule personnel. La « plausibility illusion » diffère de façon statistiquement significative entre les conditions Simulateur et VAutoEcole (t-test -3.74 df= 8 p= 0.006) et est plus importante pour la condition VAutoEcole (82,5% vs. 56,53%). Il en est de même pour le réalisme perçu (t-test -5.24 df= 8 p= 0.0008; VAutoEcole : 73,33% vs. Simulateur : 49,5%). Il semble donc que la simulation et la conduite réelle différent principalement quant au réalisme perçu au niveau des

interactions avec l'environnement et non concernant le sentiment de se situer dans l'environnement. Il est par ailleurs intéressant de noter à nouveau qu'aucune des valeurs observées n'est de 100% même lorsqu'il s'agit de situations réelles.

3 Conclusion

L'objectif de cette étude était d'estimer la pertinence d'un certain nombre de mesures afin de juger de la validité psychologique d'un simulateur de conduite, comparé à une situation de conduite réelle (véhicule personnel ou véhicule auto-école). Il apparaît que les données physiologiques comme le rythme cardiaque peuvent être ambiguës et complexes à interpréter. Il est donc nécessaire de compléter ces données à l'aide de mesures moins objectives telles que les questionnaires.

L'analyse des questionnaires a montré que la conduite avec Auto-école est perçue comme plus stressante mais aussi plus réaliste concernant les situations vécues, bien que le sentiment de se situer dans l'environnement ne diffère pas quelle que soit la situation considérée. Ces résultats sont donc en faveur d'une validité partielle du simulateur de conduite, suffisante pour qu'il puisse être un bon outil d'évaluation lors d'une première confrontation à la reprise de la conduite. Cette situation permet notamment d'éviter qu'un stress trop important puisse induire un échec ou une détérioration de la performance.

Enfin, il est intéressant de considérer les valeurs observées lors de l'estimation de l'immersion et de la présence dans les situations réelles. Aucune de ces valeurs n'est de 100% et elles sont même parfois relativement faibles (56,21%). il est donc erroné de considérer que, lors de l'évaluation d'un environnement virtuel, seule la présence perçue dans l'environnement est pertinente sans chercher à la comparer à la présence perçue dans la réalité pour une situation similaire.

Partie 3 :

Apport du simulateur dans un protocole d'évaluation des aptitudes à la conduite

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

CHAPITRE 4 - ETUDES PRELIMINAIRES POUR LA CONCEPTION ET LA VALIDATION DES SCENARIOS SUR SIMULATEUR DE CONDUITE

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

La première année de la thèse a été consacrée à la mise en place du protocole expérimental et notamment à la création des scénarios sur le simulateur de conduite Faros. Initialement, il était prévu d'utiliser des scénarios pré-existants sur le simulateur, conçus par les ingénieurs de Faros. Cependant, ce qui existait ne correspondait pas aux besoins de l'étude. En outre, des événements accidentogènes mettaient en échec systématique les participants contrôles. Proposer ce type de scénarios à des personnes cérébrolésées qui souhaitent reprendre la conduite et, parfois, elles-mêmes victimes d'un accident de la route, aurait pu être traumatisant.

Il a donc fallu concevoir des scénarios sur mesure afin de nous donner les moyens de tester et évaluer les processus cognitifs qui nous intéressaient en particulier. Tout d'abord, il a fallu décider des processus que nous voulions étudier et quels scénarios pourraient les mettre en évidence. Ensuite, pour chaque scénario, nous devions sélectionner les variables pertinentes à prendre en considération et comment les mesurer. La programmation des scénarios a donc été réalisée avec l'aide de R. Boisliveau, ingénieur à l'IRCCyN.

1 Prise en main du véhicule : conception des parcours d'initiation

La phase d'initiation devait permettre au participant de prendre en main le simulateur de conduite. Pour cela, nous avons utilisé deux parcours qui présentaient une difficulté et une durée croissantes.

Le premier parcours se déroulait en campagne et ne présentait pas de difficulté particulière : pas d'autres usagers, pas de feux ou de stops, pas de ronds-points, pas de virages serrés. Il permettait au participant d'apprendre à contrôler la trajectoire et la vitesse du véhicule.

Le second parcours consistait en un parcours en ville dans lequel le participant devait suivre les indications de direction données à haute voix par un GPS. L'apprentissage du suivi de ces indications était primordial pour la suite de l'étude, notamment pour les parcours qui se déroulaient en ville. Dans ce parcours, Le participant devait effectuer des virages à 90°. Il devait donc s'habituer à la gestion du véhicule sur sa voie et au changement de flux visuel important lors d'un virage, en l'absence de retour vestibulaire, une des causes probables du mal du simulateur. Il rencontrait également quelques autres usagers avec lesquels il n'avait pas besoin d'interagir. La difficulté du parcours résidait donc principalement en la compréhension des consignes de direction et l'apprentissage des démarrages et arrêts du véhicule.

2 Définition du matériel pour l'étude de plusieurs processus à travers des événements critiques

Le recours à des événements accidentogènes, ou événements critiques, est assez courant pour étudier la conduite, puisqu'ils font appel à de nombreux processus, tels que l'anticipation, le traitement de l'information, ou la prise de décision. Un événement critique est un événement potentiellement dangereux qu'un conducteur peut rencontrer en conduite réelle. Un important travail de réflexion autour des événements critiques a donc été nécessaire : quels parcours nous devions utiliser, quels événements critiques étaient pertinents, quels processus étaient mis en œuvre pour gérer ces événements et lesquels étaient nécessaires pour éviter un accident.

2.1 Définition des termes importants pour la compréhension de l'étude des événements critiques

2.1.1 Objet critique, objet d'intérêt, et moment critique

Chaque événement critique était programmé pour amener potentiellement à un accident, mais uniquement dans le cas où il était mal géré par le participant. Ainsi, le participant était confronté à des objets en mouvement ou non (piéton, véhicule, etc.) qu'il devait éviter. C'est ce nous avons appelé les *objets critiques*. Chaque événement critique comportait un et un seul objet critique. Ces objets critiques pouvaient ou non être visibles précocement. Parfois, ils n'étaient pas visibles immédiatement mais un autre objet de l'environnement pouvait nous indiquer leur présence éventuelle. Par exemple, lorsqu'on passe à proximité d'un bus à un arrêt de bus, on peut s'attendre à rencontrer des piétons, même s'ils ne sont pas visibles dans l'immédiat. Ces objets de l'environnement comme le bus dans l'exemple sont appelés *objets d'intérêt*.

Pour chaque événement critique, nous pouvons indiquer un *moment critique* T_0, c'est-à-dire le moment où l'événement devient dangereux et nécessite une action ou réaction. Par exemple, lorsqu'un piéton se dirige vers un passage pour piéton, le moment critique est celui où il s'engage sur la chaussée. Ce moment critique est propre à chaque événement mais est le même pour tous les participants pour un événement donné.

2.1.2 Processus impliqués et processus critiques

Lors de l'étude des événements critiques, nous avons distingué deux types de processus en fonction de leur criticité. D'une part, il y a les *processus impliqués* dans l'événement critique. Il s'agit des processus qui vont ou peuvent être activés au cours de l'événement et éventuellement intervenir dans sa gestion, mais qui ne permettront pas d'éviter l'accident. D'autre part, il y a les *processus critiques*. Ce sont les processus qui nous semblaient primordiaux afin de gérer au mieux l'événement critique et d'éviter l'accident. Ces processus critiques ont été définis a priori pour chaque événement critique. Nous en avons retenu quatre sur l'ensemble des événements qui nous paraissaient particulièrement importants: l'anticipation visuelle, l'anticipation motrice, la rapidité de traitement, et la prise de décision.

Un événement critique nécessitait de l'anticipation visuelle lorsque le participant devait/pouvait regarder l'objet critique (si visible) et/ou un objet d'intérêt (si objet critique était non visible) avant le moment critique. De la même manière, l'anticipation motrice était impliquée lorsque le participant devait/pouvait agir sur les commandes du véhicule (relâchement de l'accélérateur, appui sur le frein, manœuvre d'évitement, etc.) avant le moment critique. L'événement impliquait un traitement rapide des informations lorsque le participant se trouvait à proximité de l'événement critique lors du moment critique. L'événement nécessitait donc une réaction rapide de la part du participant. Enfin, tous les événements impliquaient de modifier le comportement de conduite pour gérer l'événement critique. Ils faisaient donc appel à la prise de décision. Cette prise de décision pouvait ou non être conforme à nos attentes quant à la manière de gérer l'événement, mais elle devait surtout être adaptée à la situation.

2.2 Conception des parcours : étude de la variabilité des conditions de conduite

Un conducteur s'adapte à son environnement. S'il conduit sur une route de campagne avec un horizon visuel éloigné et dégagé, il est évident qu'il n'observera pas l'environnement de la même manière que s'il conduit en milieu urbain avec une densité de trafic importante par exemple. De la même manière, il s'adapte aux conditions météorologiques et aux conditions de visibilité. Il n'abordera pas une même route de la même manière s'il fait jour avec une bonne visibilité que s'il fait nuit et qu'il pleut. Puisque son comportement de conduite varie en fonction de l'environnement, il ne va pas traiter des événements similaires de la même ma-

nière. La gestion d'événements critiques est donc intrinsèquement liée à l'environnement dans lequel ils interviennent.

Nous avons donc décidé de créer 3 parcours avec des événements critiques dans des environnements de conduite différents : en campagne de jour, en ville de jour et en campagne de nuit.

Le parcours en campagne de jour, que nous nommerons *parcours en campagne* dans la suite de ce manuscrit, se déroulait en milieu rural. L'horizon visuel était dégagé de manière générale, les participants bénéficiaient donc de bonnes conditions de visibilité. Ce parcours suivait une route départementale, prioritaire sur l'ensemble du trajet, et comportait un trafic modéré. Comme n'importe quelle condition de conduite, cet environnement sollicitait les processus attentionnels : attention sélective pour sélectionner les informations pertinentes et inhiber les informations non pertinentes, attention partagée pour allouer les ressources à différentes sources d'informations (internes au véhicule ou propre à l'environnement de conduite), etc. Cependant, il y avait peu d'informations concurrentes en même temps. Les processus attentionnels étaient donc sollicités modérément. Par ailleurs, l'environnement changeait peu, les informations ne nécessitaient pas une grande rapidité de traitement. Les bonnes conditions de visibilité et l'horizon visuel lointain permettaient d'anticiper quant à la trajectoire et à la présence d'autres usagers. Le parcours en campagne ne présentait donc pas de difficultés majeures en lui-même pour des conducteurs expérimentés.

Le parcours en ville de jour, que nous nommerons *parcours en ville* dans la suite de ce manuscrit, se déroulait en milieu urbain et possédait un environnement très riche (signalisation, autres usagers, paysage urbain). Il contenait donc davantage d'informations à traiter, notamment des informations visuelles. Les ressources attentionnelles étaient donc davantage sollicitées. Ces informations étaient ou non pertinentes pour la conduite. Elles sollicitaient ainsi l'attention sélective afin de sélectionner les informations pertinentes et d'inhiber les informations non pertinentes. Par ailleurs, l'environnement urbain est un environnement complexe. Il nécessitait donc de partager les ressources entre les différentes cibles et les différentes zones visuelles d'intérêt. C'est également un environnement dynamique, qui change rapidement. Une vitesse de traitement rapide était donc nécessaire. Enfin, l'environnement urbain est riche en représentations (par exemple, lorsqu'un feu reste longtemps vert, on sait qu'il risque de passer au rouge sous peu ou lorsqu'un piéton se dirige vers le bord de la chaussée, on sait qu'il peut vouloir traverser). Ces représentations, lorsqu'elles sont acquises, chez le conducteur expéri-

menté par exemple, vont permettre l'anticipation. Le parcours en ville sollicitait donc initialement de nombreux processus de manière assez importante.

Le parcours en campagne de nuit, appelé *parcours de nuit* par la suite, se déroulait dans le même environnement rural que le parcours en campagne de jour. Toutefois, le parcours de nuit présentait des conditions de visibilité et d'adhérence de la chaussée plus défavorables à la conduite. En effet, de manière générale, la visibilité est moins bonne de nuit (limitée à la zone éclairée par les phares). L'anticipation visuelle était donc plus limitée. De plus, il pleuvait sur certaines zones du parcours de nuit et les participants étaient confrontés, en fin de parcours, à une zone enneigée. Or, la pluie et la neige diminuent l'adhérence et nécessitent de s'adapter à cette modification.

A ces parcours, nous avons ajouté des événements critiques. Nous pensons que la différence entre les parcours joue un rôle dans la manière d'y faire face. En effet, le parcours en ville, très demandeur en termes de processus, devrait être plus difficile à réaliser que le parcours en campagne lorsque certains processus sont déficitaires. L'ajout d'événements critiques devrait permettre de mettre en échec plus aisément ces processus déficitaires et conduire à davantage d'accidents en ville qu'en campagne. Ainsi, même si des événements en ville et en campagne impliquent les mêmes processus, on peut s'attendre à ce qu'ils aboutissent plus facilement sur un accident en ville qu'en campagne. De la même manière, les conditions dégradées de conduite entre le parcours de nuit et le parcours en campagne devraient amener à davantage d'accident de nuit. Des événements impliquant les mêmes processus en campagne et de nuit pourraient plus facilement mener à un accident de nuit qu'en campagne.

Toutefois, les processus impliqués ne sont pas les mêmes d'un parcours à l'autre, ni d'un événement à l'autre. Nous allons donc présenter en quoi consistent exactement ces événements critiques.

2.3 Evénements du parcours en ville, processus et processus critiques impliqués

Comme nous l'avons déjà défini, un événement critique est un événement potentiellement dangereux qu'un conducteur peut rencontrer en conduite réelle. Il devait être évitable mais nécessitait de modifier le comportement de conduite pour éviter une collision (relâcher la pédale d'accélérateur, freiner, changer de voie). A travers ces événements critiques, nous vou-

lions étudier différents processus impliqués en conduite. Les principaux processus qui nous intéressaient étaient l'anticipation, la vitesse de traitement, la prise de décision et les processus attentionnels.

Dans le parcours en ville, le conducteur rencontrait cinq événements critiques différents. Ils sont présentés ci-dessous dans l'ordre d'apparition.

1/ Un piéton traversait après une intersection lorsque le feu tricolore était vert et le feu piéton rouge.

2/ Une camionnette était arrêtée sur la voie de droite avec ses feux de détresse, dans un virage, alors qu'une voiture dépassait le conducteur sur la voie de gauche.

3/ Un piéton surgissait derrière une camionnette stationnée à droite (commerce ambulant) et traversait devant le conducteur.

4/ Un enfant sur le trottoir de gauche, traversait subitement devant le conducteur pour rattraper son ballon.

5/ Après un virage, un piéton traversait devant le conducteur pour rejoindre un bus situé à gauche de la chaussée.

Pour chaque événement, nous allons discuter en détail des processus impliqués et notamment des processus critiques, c'est-à-dire les processus qui, mis en défaut, menaient a priori à l'accident.

2.3.1 Evénement 1 en ville : piéton qui traverse au feu piéton rouge

A titre d'exemple, l'événement 1 sera décrit dans le détail. Pour chaque événement, nous disposions des mêmes informations mais pour des soucis de clarté et pour éviter la redondance, nous ne rappellerons pas ces informations lorsque nous décrirons les prochains événements. Pour ces derniers, nous donnerons simplement une description de l'événement et des différents processus critiques impliqués dans ces évènements. La description détaillée de ces événements et de l'ensemble des processus impliqués est néanmoins disponible en annexe (annexe 1).

L'événement 1 en ville consistait en un piéton (objet critique) qui traversait sur un passage pour piéton après une intersection, alors que le feu tricolore pour le participant était vert et le feu piéton était rouge. On peut voir où était localisé le piéton sur la figure 9. Le moment cri-

tique correspondait au moment où le piéton s'engageait sur la chaussée. Le piéton était visible plusieurs secondes avant. La vitesse du piéton était asservie à celle du véhicule du participant, afin de toujours croiser son trajet.

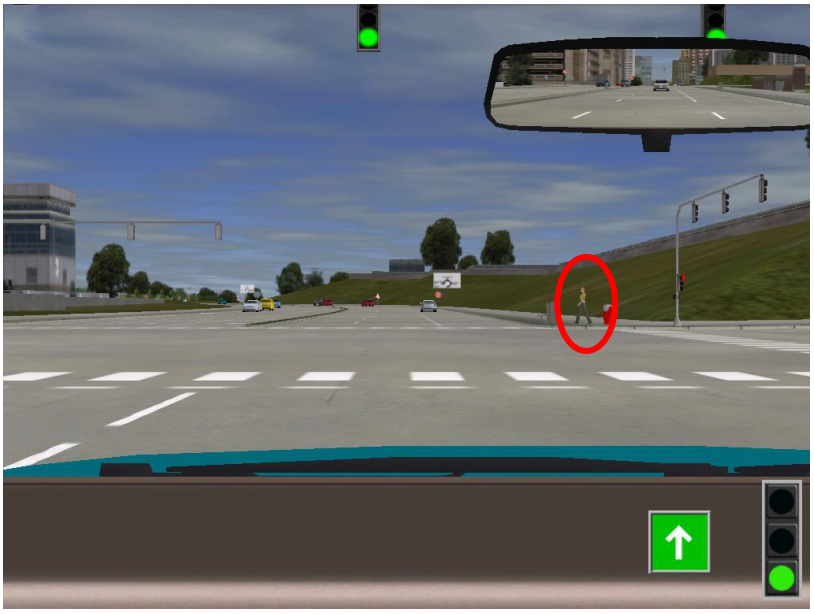


Figure 9 : Capture de l'écran principal lors de l'événement critique 1 en ville. Un piéton (entouré en rouge) traverse au feu vert.

Cet événement impliquait de nombreux processus critiques. A priori, une bonne gestion de cet événement nécessitait de l'anticipation visuelle (regarder le piéton avant qu'il ne s'engage sur la chaussée) et de l'anticipation motrice (au minimum le relâchement de l'accélérateur avant que le piéton ne s'engage). Par ailleurs, le participant se trouvait à une certaine distance du piéton lors du moment critique. Il n'y avait donc pas besoin de traiter rapidement l'information en vue d'une action. La manière dont l'événement était programmé rendait l'évitement difficile. La prise de décision adéquate était donc de freiner.

D'autres processus étaient impliqués, parmi eux nous pouvons citer la prise d'information, la temporalité de cette prise d'information et la temporalité de l'action effectuée. Néanmoins, ces processus n'étaient pas critiques. Cela signifie qu'une mise en échec de ces seuls processus ne devait pas, a priori, amener un accident. Les processus, critiques ou non, impliqués dans l'événement 1 sont répertoriés dans le tableau III, ainsi que les indicateurs utilisés pour les étudier.

Tableau III : Processus impliqués dans l'événements critique 1 en ville et indicateurs relatifs à ces processus. En rouge, les processus critiques.

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

Quel que soit le parcours étudié, nous disposions des mêmes données (les données oculométriques, les données sur le simulateur concernant l'action sur les pédales, la vitesse, la trajectoire du véhicule, etc.). Les données oculométriques nous ont permis d'étudier l'anticipation visuelle et la prise d'information sur l'objet critique. Les données du simulateur nous informaient de l'anticipation motrice et de la prise de décision.

Nous pouvions ainsi représenter les données comme on le voit dans la figure 10. Pour faciliter la compréhension, les données concernant les regards et l'action sur les pédales sont représentées en tout ou rien (0 ou 0,5 pour les regards, 0 ou 1 pour l'action sur les pédales), 0 signifiant pas de regard ou d'action sur la pédale, 0,5 ou 1 signifiant qu'il y avait un regard ou une action sur la pédale. Les données étaient représentées en fonction du temps (en seconde), avec T0 (moment critique) pour origine de l'axe des abscisses. Cela permettait aisément de conclure sur la présence ou l'absence d'anticipation visuelle et motrice et d'étudier en partie la prise de décision.

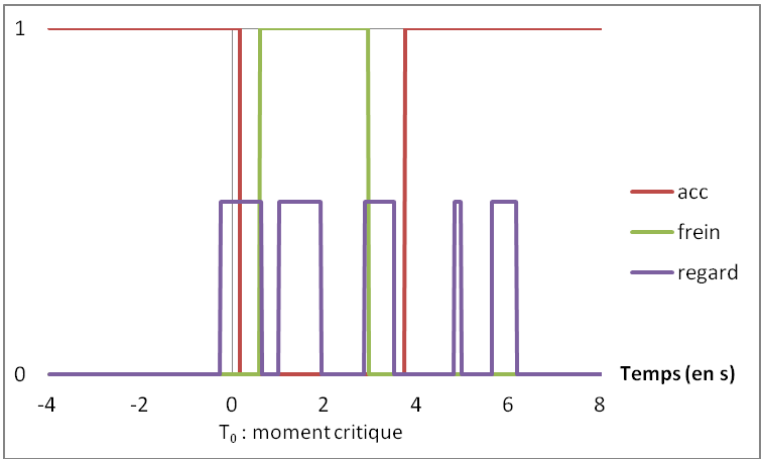


Figure 10 : Exemple de représentation des données concernant les regards sur l'objet critique les actions sur les pédales d'accélérateur et de frein en fonction du temps.

A partir des données du simulateur, nous connaissions la distance entre le participant et un objet de l'environnement, comme l'objet critique. Cela nous a permis de calculer, entre autres, le temps avant contact (time-to-contact ou TTC) aux moments opportuns, par exemple lors du moment critique, du relâchement de l'accélérateur ou de l'appui sur le frein (moment t'). Le TTC nous indique le temps qu'il reste entre un moment t' et le moment théorique t'' où le participant entrera en contact avec l'objet, calculé par rapport à la vitesse instantanée du participant à t'. Il dépend donc de la distance séparant le véhicule de l'objet critique et de la vitesse instantanée à l'instant t'.

$$TTC = -Z / (dz/dt)$$

avec Z = distance entre le véhicule et l'objet à l'instant t' (en m)

et dz/dt = vitesse instantanée à l'instant t' (en m/s)

Nous avions ainsi une valeur objective concernant la temporalité de la prise d'information et de l'action, intégrant la vitesse.

Nous bénéficions également d'autres données, comme la vitesse du participant (cf. figure 11) et la trajectoire du véhicule (cf. figure 12).

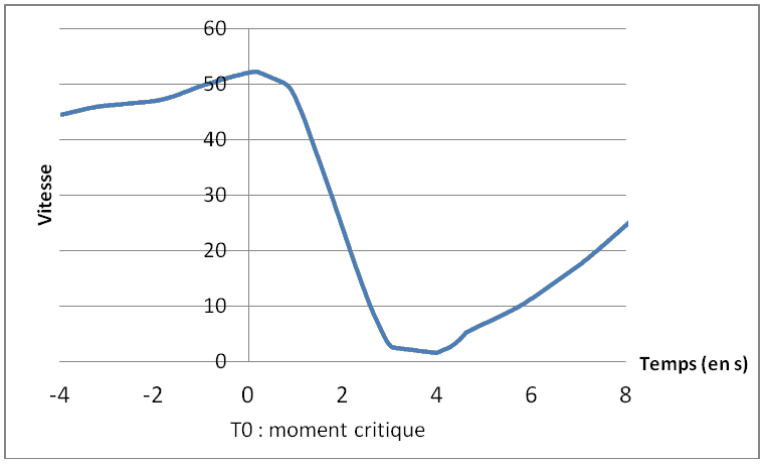


Figure 11 : Exemple de représentation des données concernant la vitesse en fonction du temps.

L'information de vitesse permet, entre autres, de déterminer s'il y a eu un ralentissement (ou freinage) et un arrêt. Cela nous donne aussi une idée quant à la force du ralentissement (ou freinage).

Pour les informations de trajectoire, nous pouvions, à partir de la position sur la voie, de la distance à l'objet critique et des connaissances concernant l'infrastructure routière, schématiser la trajectoire du participant. Dans l'exemple (figure 12), nous exprimons la position du participant en fonction de sa distance à l'objet critique (ici, symbolisé par un piéton) au point d'impact potentiel, c'est-à-dire la distance au point théorique où le participant risque de percuter l'objet critique. Le trajet du participant se lit du bas vers le haut. Les limites de la chaussée sont symbolisées en traits pleins, les voies étant séparées par des pointillés larges. Les pointillés rapprochés indiquent le centre de la voie. Cette schématisation permet de comprendre aisément sur quelle voie se trouvait le participant (voie de droite - VD- ou voie de gauche - VG). Cela ne nous informe pas s'il y a eu ou non collision, mais s'il y a eu ou non un évitement.

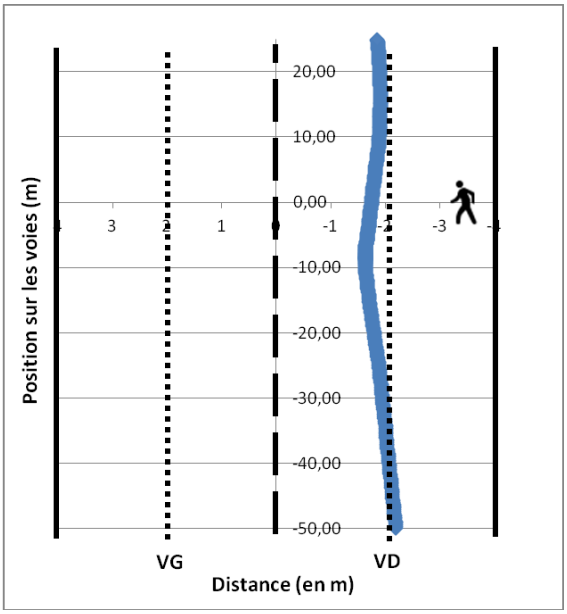


Figure 12 : Exemple de représentation des données concernant les regards sur l'objet critique les actions sur les pédales d'accélérateur et de frein en fonction du temps.

2.3.2 Evénement 2 en ville : camionnette à l'arrêt dans une courbe

Lors de l'événement 2, le participant circulait sur une chaussée comportant deux voies dans le même sens. L'événement critique consistait en une camionnette avec ses feux de détresse (objet critique) à l'arrêt dans une courbe sur la voie du participant. Un véhicule, positionné sur l'autre voie, empêchait le participant de se déporter immédiatement. Le moment critique correspond au moment où la camionnette est visible à l'écran. A ce moment, le participant se trouvait relativement proche de la camionnette. Il ne pouvait donc pas anticiper au niveau visuel ou moteur. La vitesse de traitement et la prise de décision étaient donc les seuls processus critiques, puisque le participant devait intégrer rapidement les informations relatives à

la camionnette et au véhicule sur l'autre voie pour prendre la décision appropriée. A priori, la décision adéquate consistait à ralentir, et éventuellement freiner, afin de pouvoir se déporter et dépasser la camionnette après le passage de l'autre véhicule.

2.3.3 Evénement 3 en ville : piéton qui traverse derrière un camion de vente ambulante

Dans l'événement 3 en ville, le participant conduisait sur une route comportant deux voies dans le même sens. Une camionnette de vente ambulante (objet d'intérêt) était stationnée sur une place de stationnement à droite de la chaussée, avec des encarts publicitaires la signalant à l'avant et à l'arrière du véhicule. Lorsque le participant arrivait à proximité de la camionnette, un piéton (objet critique) surgissait derrière la camionnette et traversait devant le participant. Le moment critique correspond au moment où le piéton est visible. Cet événement impliquait donc un certain nombre de processus critiques. Dans un premier temps il fallait anticiper au niveau visuel et moteur un danger potentiel à la vue de la camionnette de vente ambulante, le danger potentiel étant localisé à l'arrière de la camionnette. Une fois le piéton visible (face au participant), il fallait traiter rapidement l'information, prendre une décision et mettre en œuvre l'action appropriée. La décision attendue ici était l'arrêt car les véhicules sur la voie de gauche empêchaient l'évitement.

2.3.4 Evénement 4 en ville : enfant qui traverse en suivant son ballon

Lors de cet événement, un enfant se trouvait à gauche sur le bord de la chaussée. Quand le participant arrivait à proximité, l'enfant traversait devant lui en suivant son ballon. On pouvait voir l'enfant et le ballon sur le bord de la chaussée bien avant qu'il commence à traverser. Le comportement d'un enfant piéton n'est pas aussi rationnel que celui d'un piéton adulte. Il existait donc un risque pour que l'enfant traverse la route. Le participant pouvait donc anticiper ce risque, au niveau visuel (regarder l'enfant) et moteur (relâcher l'accélérateur à l'approche de l'enfant). Lorsque, l'enfant s'engageait à la suite de son ballon, il fallait traiter rapidement l'information puis prendre une décision. Freiner était la solution à privilégier, éventuellement conjuguée à un évitement.

2.3.5 Evénement 5 en ville : piéton qui traverse pour rejoindre le bus

Dans l'événement 5 en ville, le participant abordait une courbe dans une rue en double sens. A la sortie de la courbe, il pouvait voir sur la voie opposée un bus stationné à un arrêt de

bus et des personnes se diriger vers le bus (objet d'intérêt). Un piéton (objet critique) situé au départ à droite traversait alors devant le participant pour rejoindre le bus. Le moment critique correspondait au moment où le piéton était visible. Dans cet événement, le participant pouvait anticiper visuellement un danger potentiel en voyant le bus (objet d'intérêt). Néanmoins, contrairement à l'événement 3 en ville, l'objet critique (le piéton) ne se situait pas au niveau de l'objet d'intérêt. L'anticipation visuelle ne permettait pas d'éviter l'accident. Ce n'était donc pas un processus critique. Au contraire, l'anticipation motrice pouvait permettre d'éviter l'accident en ralentissant et/ou freinant avant même d'avoir vu le piéton. Le piéton étant visible tardivement, il fallait traiter l'information rapidement et prendre la décision adaptée. La décision appropriée a priori était le freinage.

2.3.6 Récapitulatif des processus critiques impliqués dans les événements en ville

Les processus critiques des événements en ville sont récapitulés dans le tableau IV.

Tableau IV : Processus critiques impliqués dans les événements critiques pour le parcours en ville.

	Anticipation visuelle	Anticipation motrice	Prise de décision	Rapidité de traitement
Evt 1 (femme au feu)	oui	oui	oui	
Evt2 (camionnette à l'arrêt)			oui	oui
Evt3 (piéton après friterie ambulante)	oui	oui	oui	oui
Evt4 (enfant avec ballon)	oui	oui	oui	oui
Evt5 (femme qui rejoint le bus)		oui	oui	oui

2.4 Evénements du parcours en campagne et processus impliqués

Le parcours en campagne se déroulait en environnement rural et durait 5-6 minutes. Il comportait, comme le parcours en ville, des événements critiques. On en comptait 7 différents. Ils sont présentés ci-dessous dans l'ordre d'apparition.

1/ Une voiture, en sens inverse, doublait un bus alors que le participant arrivait,

2/ Un scooter lent peu visible roulait sur la voie du participant,

3/ Une voiture, stationnée sur le bas-côté, s'insérait devant le participant,

4/ Le participant rattrapait un tracteur en sortie de virage

5/ un cerf longeait la route puis traversait un peu plus loin devant le participant,

6/ Un homme à droite traversait pour rejoindre sa voiture à gauche devant le participant,

7/ Une voiture en sens inverse semblait forcer le passage en tournant à gauche.

2.4.1 Evénement 1 en campagne : véhicule en sens inverse qui double un bus

Lors de l'événement 1, un bus arrivait en sens inverse. A environ 200m du participant, une voiture (objet critique) située derrière le bus le doublait et se trouvait alors face au participant. Lorsqu'il restait moins de 100m entre la voiture et le participant, la voiture se rabattait sur sa voie. Le moment critique correspond au moment où la voiture en sens inverse commence à doubler le bus. Cet événement n'était pas anticipable, en termes visuels ou moteurs, puisque le participant ne pouvait pas s'attendre à ce qu'une voiture double à ce moment-là. Les processus critiques étaient donc la vitesse de traitement (tout se jouait en un court laps de temps) et la prise de décision. Ici, la décision appropriée était de freiner.

2.4.2 Evénement 2 en campagne : scooter lent sur la voie du participant

Dans cet événement, le participant pouvait voir, en sortant d'une courbe, un scooter lent (objet critique) sur sa voie, dans une longue ligne droite. Le scooter roulait à 20 km/h. Deux véhicules arrivaient en sens inverse et empêchaient de doubler le scooter immédiatement. Ensuite, la route était dégagée et la visibilité permettait un dépassement en toute sécurité. Le moment critique correspond au moment où les véhicules en sens inverse empêchent le dépassement immédiat du scooter. Le scooter étant visible très tôt, le participant pouvait anticiper visuellement. Il y avait également de l'anticipation motrice puisque le participant devait ralentir avant de pouvoir dépasser à cause des véhicules arrivant en sens inverse. Néanmoins, l'anticipation, qu'elle soit visuelle ou motrice, n'était pas primordiale pour éviter l'accident. Cet événement impliquait réellement un seul processus critique : la prise de décision. Cette prise de décision devait se faire en deux phases : (1) ralentir ou freiner pour ne pas percuter le scooter et (2) dépasser le scooter dès que possible. Cette prise de décision ne nécessitait pas d'avoir traité rapidement et à l'avance les informations.

2.4.3 Evénement 3 en campagne : voiture qui s'insère devant le participant

Dans l'événement 3 en campagne, le participant pouvait voir dans une ligne droite, en sortant d'une courbe, une voiture (objet critique) stationnée sur le bas-côté droit. Cette voiture avait son clignotant gauche actionné. A l'approche du participant, la voiture s'insérait sur la route, devant le participant. Le moment critique correspond au moment où la voiture commençait son insertion. Cet événement critique impliquait trois processus critiques: l'anticipation visuelle (voir le véhicule avant qu'il commence son insertion), l'anticipation motrice (relâcher l'accélérateur avant le moment critique), et la prise de décision (ralentir ou freiner, selon la vitesse du participant). La voiture s'insérant assez loin devant le participant, l'événement ne nécessitait pas un traitement rapide des informations.

2.4.4 Evénement 4 en campagne : tracteur lent sur notre voie que le participant voit tardivement

Lors de l'événement 4 en campagne, le participant franchissait un virage sur une colline et avait peu de visibilité sur la route devant lui. A la sortie du virage, alors qu'il amorçait sa descente, il rencontrait un tracteur (objet critique), très lent, sur sa voie. La vitesse du tracteur était fixée à 15 km/h. La présence d'une ligne blanche empêchait théoriquement le conducteur de le dépasser immédiatement. Il fallait donc que le conducteur attende que la visibilité soit suffisante pour lui permettre de doubler. Puisque le participant voyait le tracteur au dernier moment, cet événement n'impliquait pas l'anticipation visuelle. Cependant l'absence de visibilité vers l'avant devait amener à un ralentissement, interprété comme de l'anticipation motrice en prévision d'un danger potentiel. Une fois le tracteur visible, il fallait traiter rapidement les informations et prendre la décision en conséquence : (1) ralentir/freiner pour ne pas percuter le tracteur et (2) dépasser le tracteur dès que possible.

2.4.5 Evénement 5 en campagne : biche qui traverse la route

On pouvait décomposer l'événement 5 en campagne en deux parties. Tout d'abord, le participant voyait, dans les champs situés loin face à lui, courir une biche (objet critique). Il la perdait de vue quelques instant. Ensuite, la route tournait et il retrouvait la biche, qui traversait assez loin devant lui, de la droite vers la gauche. Le moment critique est celui auquel la biche commençait à traverser la route. La présence de la biche très tôt permettait au participant d'an-

ticiper visuellement. Toutefois, sa position loin de la chaussée ne nécessitait pas d'anticipation motrice particulière. La prise de décision attendue était au minimum le ralentissement. Ainsi, anticipation visuelle et prise de décision étaient les seuls processus critiques à considérer pour cet événement.

2.4.6 Evénement 6 en campagne : piéton qui traverse la chaussée

L'événement 6 en campagne consistait en un piéton (objet critique) positionné à droite de la chaussée et qui traversait devant le participant pour rejoindre sa voiture située sur la gauche de la chaussée. Le participant pouvait voir le piéton à la sortie d'une courbe (moment critique T_0) et se trouvait alors proche de ce dernier. Le piéton n'étant pas visible avant le moment critique, ni la voiture qu'il tentait de rejoindre, il n'y avait donc pas d'anticipation possible, qu'elle soit visuelle ou motrice. Les processus critiques consistaient donc à traiter rapidement l'information et prendre la décision appropriée. Ici, nous attendions au moins un ralentissement.

2.4.7 Evénement 7 en campagne : véhicule en sens inverse qui veut forcer le passage en tournant

Dans l'événement 7 en campagne, une voiture (objet critique) arrivait en sens inverse. A l'approche d'une intersection (voie venant de la droite du participant), elle ralentissait, mettait son clignotant à gauche puis s'arrêtait afin de tourner. Si le participant ralentissait, la voiture, non prioritaire, passait. Si le participant continuait, la voiture faisait mine de forcer le passage lorsque le participant arrivait à son niveau (moment critique). Cependant, nous avions programmé la voiture de façon à ce qu'elle ne coupe pas réellement la route au conducteur.

Habituellement, une voiture arrivant sur la voie opposée à celle du conducteur ne présente pas forcément un aspect critique. Cependant, à partir du moment où elle montre son intention de traverser la voie du participant pour tourner, elle devient potentiellement dangereuse. Il était donc pertinent de la regarder avant d'arriver à son niveau (anticipation visuelle) et d'au moins relâcher l'accélérateur (anticipation motrice) au cas où elle tenterait de forcer le passage. A l'approche de la voiture, tout se passait comme si elle voulait forcer le passage. Il fallait donc traiter les informations rapidement. La prise de décision alors attendue était le freinage, éventuellement conjugué à un léger évitement par la droite.

2.4.8 Récapitulatif des processus critiques impliqués dans les événements en campagne

Les processus critiques des événements en campagne sont récapitulés dans le tableau V.

Tableau V : Processus impliqués dans les événements critiques pour le parcours en campagne.

	Anticipation visuelle	Anticipation motrice	Prise de décision	Rapidité de traitement
Evt 1 (véhicule en sens inverse sur la voie du participant)			oui	oui
Evt2 (scooter lent)			oui	
Evt3 (véhicule qui s'insère devant le participant)	oui	oui	oui	
Evt4 (tracteur lent que le participant voit tardivement)		oui	oui	oui
Evt5 (biche qui traverse la route)	oui		oui	
Evt6 (piéton qui traverse la chaussée)			oui	oui
Evt7 (voiture qui veut couper la route au participant)	oui	oui	oui	oui

2.5 Evénements du parcours de nuit et processus impliqués

Le parcours se déroulait en environnement rural, de nuit, avec une pluie intermittente (il pleuvait 3 fois durant le parcours). Les conditions de conduite étaient donc dégradées, en termes de visibilité et d'adhérence. On donnait une consigne d'optimisation de l'utilisation des feux et des essuie-glaces au participant, accompagnée d'une explication et d'une démonstration. Le parcours durait 6 à 7 minutes. Comme les deux scénarios précédents, celui-ci comportait des événements critiques. Voici dans quel ordre ils apparaissaient :

1/ Un voiture lente, peu visible, roulait sur la voie du participant,

2/ Une camionnette lente, peu visible, roulait sur la voie du participant,

3/ Un triangle de signalisation était posé sur la voie du participant à l'entrée d'une courbe sur la droite. A la sortie du virage, une voiture était arrêtée et une voiture arrivait en sens inverse,

4/ Un piéton marchait sur le bas-côté droit avec une lampe en main,

5/ Un cerf traversait devant le participant alors que la route était enneigée.

Durant les 2 dernières minutes (incluant l'événement 5), la route était enneigée, entraînant une faible adhérence du véhicule.

2.5.1 Evénement 1 de nuit : voiture lente sur la voie du participant avec feux arrière défaillants

Dans l'événement 1 de nuit, le participant rattrapait une voiture lente (objet critique), dont les feux arrière fonctionnaient mal, c'est-à-dire qu'ils s'allumaient par intermittence. Elle était donc peu visible. Elle roulait plus lentement que le participant : (a) si le participant roulait à plus de 75 km/h, sa vitesse était de 50 km/h ; (b) si le participant roulait entre 45 et 75 km/h, sa vitesse était inférieure de 25km/h par rapport à celle du participant, (c) ; enfin, si le participant roulait en dessous de 45 km/h, sa vitesse était de 20 km/h. Le moment critique correspondait au moment où la voiture devenait visible. Comme la voiture était peu visible, nous ne pouvions pas vraiment attendre de l'anticipation visuelle et/ou motrice sur cet événement. Toutefois, elle était visible suffisamment tôt pour ne pas nécessiter de traitement rapide des informations. Le seul processus critique impliqué dans cet événement était donc la prise de décision. La prise de décision attendue était tout d'abord de ralentir, voire freiner en fonction de la vitesse, puis de dépasser la voiture dès que possible.

2.5.2 Evénement 2 de nuit : camion lent sur la voie du participant peu visible

Dans cet événement, un camion lent (objet critique) sans feux, donc peu visible, était sur la voie du participant. La vitesse du camion était inférieure à celle du conducteur de sorte qu'il le rattrapait assez rapidement : (a) si le participant roulait à plus de 75 km/h, sa vitesse était de 50 km/h ; (b) si le participant roulait entre 45 et 75 km/h, sa vitesse était inférieure de 25km/h par rapport à celle du participant, (c) ; enfin, si le participant roulait en dessous de 45 km/h, sa vitesse était de 20 km/h. Comme pour l'événement précédent, ce qui nous intéressait particulièrement sur cet événement était la prise de décision (concernant le dépassement). Il s'agit du seul processus critique dans cet événement. Il était difficile de parler d'anticipation visuelle ou motrice puisque l'objet critique était très peu visible.

2.5.3 Evénement 3 de nuit : voiture en panne dans un virage

Dans l'événement 3 de nuit, le participant pouvait voir sur sa voie un triangle de sécurité (objet d'intérêt), à l'entrée d'une courbe vers la droite. Puis dans la courbe, il rencontrait une voiture à l'arrêt (objet critique) avec ses feux de détresse, probablement en panne. Le moment critique T_0 correspondait au moment où la voiture était visible. Une voiture arrivait en sens inverse et ne permettait pas de dépasser immédiatement. Cet événement impliquait donc dans un premier temps une anticipation motrice à la vue du triangle de sécurité, qui signalait clairement un danger potentiel. Le participant ne pouvait pas voir la voiture en panne avant T_0 et voir le triangle ne le renseignait pas sur la position et la nature exactes du danger. Il n'y avait donc pas d'anticipation visuelle. Une fois la voiture visible, il fallait traiter rapidement l'information et prendre une décision afin de ne pas la percuter. La décision attendue ici était l'arrêt car la voiture arrivant en sens inverse empêchait le dépassement immédiat. Il fallait ensuite dépasser dès que possible.

2.5.4 Evénement 4 de nuit : piéton sur le bas-côté droit

Dans cet événement, le participant croisait un piéton (objet critique), une lampe à la main, qui marchait en direction du participant, le long de la chaussée à droite. Il n'y avait pas de danger réel mais seulement un danger potentiel. Nous avons donc décidé de fixer le moment critique au moment où le participant était proche du piéton. Nous avons considéré que le participant était proche du piéton lorsqu'il arrivait à 50m de celui-ci (distance critique). Le moment critique était donc le moment où le participant arrivait à cette distance critique. Le participant pouvait voir le piéton assez tôt. Cet événement impliquait donc une anticipation visuelle. Par ailleurs, il semblait nécessaire de relâcher au moins l'accélérateur à l'approche du participant avant d'être trop près (anticipation motrice). Cependant, comme l'événement ne présentait pas de danger réel mais seulement un danger potentiel, il ne nécessitait pas de prise de décision ou de traitement rapide des informations.

2.5.5 Evénement 5 de nuit : biche qui traverse

Dans cet événement, le participant conduisait sur une route enneigée lorsqu'une biche traversait soudainement devant lui. Cet événement impliquait principalement la vitesse de trai-

tement des informations et la prise de décision puisque l'objet critique n'était visible qu'au tout dernier moment.

2.5.6 Récapitulatif des processus critiques impliqués dans les événements de nuit

Les processus critiques des événements de nuit sont récapitulés dans le tableau VI.

Tableau VI : Processus impliqués dans les événements critiques pour le parcours de nuit.

	Anticipation visuelle	Anticipation motrice	Prise de décision	Rapidité de traitement
Evt 1 (voiture lente avec feux arrière défaillants)			oui	
Evt2 (camion lent peu visible)			oui	
Evt3 (voiture en panne + triangle de signalisation)		oui	oui	oui
Evt4 (piéton)	oui	oui		
Evt5 (biche)			oui	oui

2.6 Validation des événements critiques

Tous les événements critiques ont été présentés à trois formateurs de l'auto-école ECF. En se basant sur leurs connaissances en tant que conducteurs experts, formateurs à la conduite automobile et experts dans l'évaluation des traumatisés crâniens et autre types de populations à risque (personnes âgés, conducteurs débutants, etc.), ils ont confirmé que chaque événement présentait un danger potentiel réaliste. Ils ont considéré les événements critiques comme représentatifs des événements que l'on pourrait rencontrer en situation réelle. Un seul événement a été supprimé à la demande des formateurs (non présenté dans ce chapitre). Il s'agissait d'un événement en ville dans lequel le participant rattrapait un scooter lent. Il devait le dépasser dès que la circulation en sens inverse le permettait. Cependant, le dépassement devait s'effectuer sur une ligne blanche, ce qui poussait à enfreindre le code de la route.

Une fois les événements critiques validés par l'ECF, nous avons réalisé un prétest avec 7 personnes (conducteurs tout-venant sans lésions cérébrales). L'objectif était de déterminer si les événements étaient crédibles et ne mettaient pas en échec systématique des conducteurs sans difficultés spécifiques. Les événements critiques sélectionnés ne devaient donc pas paraître aberrants ou irréalistes aux conducteurs. Par ailleurs, aucun événement ne devait se sol-

der par plus de 20% d'accidents. Le nombre d'accidents obtenus par événement est présenté dans le tableau VII. Aucun événement critique n'a effectivement eu plus de 20% d'accidents. Nous avons donc conservé tous les événements critiques. Nous pouvons noter cependant que 5 événements ont conduit à un accident. Cela souligne le caractère réellement dangereux et critique de nos événements.

Tableau VII : Nombre d'accidents obtenus par les 8 participants au prétest, pour chaque événement.

	Ville					Campagne							Nuit				
	Evt 1	Evt 2	Evt 3	Evt 4	Evt 5	Evt 1	Evt 2	Evt 3	Evt 4	Evt 5	Evt 6	Evt 7	Evt 1	Evt 2	Evt 3	Evt 4	Evt 5
Nombre d'accidents total	1	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
Pourcen-tage	12,5	0	12,5	12,5	0	0	0	0	12,5	0	0	0	0	0	0	0	12,5

3 Définition du matériel pour l'étude des processus d'attention visuelle

La littérature montre que les cérébrolésés ont souvent des déficits d'attention sélective et sont par conséquent plus distractibles que des personnes sans lésions. Dans le but d'évaluer les processus attentionnels et notamment les mécanismes de sélection/inhibition des informations, nous avons intégré, à certains parcours, des panneaux publicitaires. En effet, plusieurs études ont montré que les panneaux publicitaires constituent des distracteurs efficaces en conduite automobile (Bendak & Al-Saleh,2010). Les conducteurs ont tendance à les regarder bien qu'ils ne soient pas pertinents pour l'activité. En cas de déficit d'attention sélective, nous nous attendons à un nombre de regard plus important sur les panneaux publicitaires. De plus, un défaut d'attention sélective implique généralement un défaut d'inhibition. Le panneau, sélectionné à tort, sera traité au lieu d'être inhibé. Nous pouvons donc supposer que les regards seront plus longs sur les panneaux.

Par ailleurs, l'étude préliminaire de Milleville-Pennel et al. (2010) montrait que les participants cérébrolésées se focalisaient davantage sur l'environnement routier direct, c'est-à-dire proche de la route, et négligeaient l'environnement plus éloigné. On pourrait donc supposer qu'ils allouent leurs ressources attentionnelles à l'environnement routier direct. Cependant, dans cette étude, il n'y avait pas de distracteurs proches de la route, ce qui n'avait pas permis de conclure sur un éventuel déficit d'attention sélective. C'est pourquoi nous avons disposé des panneaux publicitaires à différentes excentricités, peu excentrés ou très excentrés. Nous

nous attendons à un nombre de regards et des durées de regards plus élevés sur les panneaux peu excentrés que sur les panneaux très excentrés, chez les participants cérébrolésés, si ces derniers présentent effectivement un défaut d'attention sélective.

Afin de tester ces hypothèses, nous avons dû créer des panneaux publicitaires pertinents que nous avons insérés dans des scénarios spécifiques.

3.1 Sélection des images publicitaires

Hills (1980) et Langham et Moberly (2003) ont montré, dans le contexte de la conduite automobile, que les facteurs les plus importants pour décrire la saillance d'une cible sont, entre autres la couleur et la taille apparente de l'objet. De plus, le thème de l'image a également son importance. En effet, tout le monde ne réagit pas de la même manière à une publicité vantant un parfum avec une femme dans une position très suggestive et une publicité pour un parc d'attraction avec des enfants sur un grand huit. Enfin, Valdez & Mehrabian (1994) ont montré que la réaction émotionnelle que suscite une image a une grande importance dans l'attention qu'on lui portera et dans la manière dont elle sera traitée. La composante affective des émotions doit donc être contrôlée, au même titre que la couleur (Gil, 2009).

Il nous paraissait donc nécessaire dans la sélection des images de contrôler certains facteurs comme la couleur, le thème, ou encore l'aspect affectif (quelle émotion déclenche la vue de l'image).

3.1.1 Contrôle de la couleur

Une première étape a consisté à sélectionner les images à insérer dans les panneaux publicitaires en contrôlant la couleur. Pour cela, nous avons constitué une base d'images publicitaires que nous pouvions trouver sur des encarts publicitaires au moment de l'étude ou que nous avions pu voir récemment. Cela nous paraissait nécessaire afin de ne pas avoir de différences en fonction de l'âge des participants. Plus de 500 images ont ainsi été collectées, correspondant à des catégories de couleurs : à dominante bleue, à dominante jaune, à dominante rouge, à dominante noir, etc.

3.1.2 Contrôle du thème de l'image

La base de données constituée sur la couleur des images a été divisée en 10 catégories d'images, selon le thème :

- affiche de cinéma
- boisson alcoolisée (bière)
- boisson non alcoolisée (marque Oasis)
- enseigne de moyenne et grande surface
- enseigne de banque, assurance et autres
- nourriture : fastfood (hamburger), M&M's
- parc d'attraction
- parfum
- voyage

Dans chaque catégorie d'image, nous avons contrôlé les couleurs principales et secondaires. Par exemple les publicités pour les voyages étaient de couleur dominante bleue et de couleur secondaire blanche. Au total, 150 images ont été sélectionnées, soit 15 en moyenne par catégorie.

3.1.3 Contrôle de la composante affective : la valence et l'excitation

Comme l'ont montré Valdez & Mehrabian (1994) ou encore Gil (2009), la composante affective des émotions a son importance sur la manière dont nous allons traiter une image et doit donc être contrôlée.

3.1.3.1 Approche continue des émotions

Si nous considérons l'approche continue des émotions, les émotions sont la résultante de trois dimensions (Holbrook et Batra, 1987 ; Lutz & Kakkar, 1975 ; Mehrabian & Russell, 1974) :

- la dimension "plaisir" (ou valence) : Elle se définit sur un continuum *déplaisir-plaisir (*ou *négatif-positif)* et correspond au degré de satisfaction et de bien-être du participant.

- la dimension "niveau d'éveil" (ou excitation ou activation) : Elle se définit sur un continuum *calme-excitation* et fait référence au degré d'éveil du participant, à l'intensité de l'émotion suscitée.
- la dimension "dominance" : Elle se définit sur un continuum *non contrôle-contrôle* et renvoie à la sensation du participant de pouvoir influencer, contrôler la situation. Il s'agit donc du degré du rapport de contrôle ou de soumission du participant à l'environnement.

Sur la base de ces trois dimensions, deux instruments de mesure sont communément utilisés.

1- Le *Pleasure-Arousal-Dominance (PAD)* (Mehrabian et Russel, 1974) est une échelle sémantique différentielle, comprenant 18 items, six pour chaque dimension. Le participant doit indiquer quel est son état, sur une échelle de 1 à 7, pour chacune des propositions.

2- La *Self Assessment Manikin Scale* (SAM) (Bradley et Lang, 1994) est une échelle de type iconique utilisant un personnage graphique pour représenter visuellement les trois dimensions du PAD de Mehrabian et Russel (1974) (cf. figure 13). La mesure la plus utilisée est sans doute la SAM (Gil, 2009).

Par ailleurs, Lane, Chua, & Dolan (1997) ont mis en évidence les effets de certains facteurs sur l'activation neuronale lors du traitement visuel d'images dont la valence et l'excitation. C'est pourquoi nous avons décidé de contrôler le niveau de valence et d'excitation des images à intégrer aux panneaux publicitaires.

Nous avons donc conçu une expérience basée sur les travaux de Lang, Bradley et Cuthberg (1994) sur l'International Affective Picture System (IAPS). L'IAPS fournit en effet une base de données normatives et une méthodologie pour étudier l'émotion et l'attention par rapport à des images. L'expérience consistait à présenter chacune des 150 images jusqu'alors sélectionnées à des participants qui devaient évaluer la valence, l'excitation et la dominance de chaque image en utilisant l'échelle SAM. Un jeu d'images de l'IAPS (60 images) a donc été ajouté aux images sélectionnées, ainsi qu'un jeu de panneaux de signalisation à titre de contrôle (14 images, équivalent à une catégorie d'images sélectionnées).

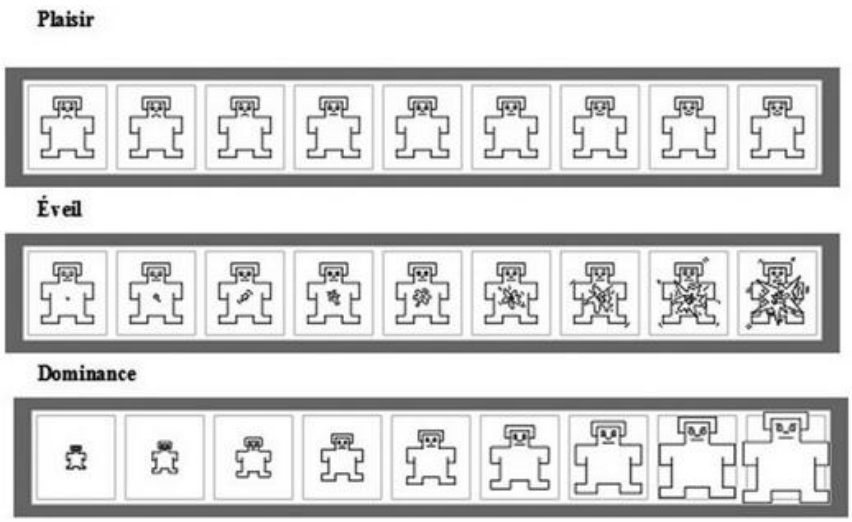


Figure 13 : Self Assessment Manikin Scale (SAM) (Bradley et Lang, 1994).

3.1.3.2 Conception de l'expérimentation

Afin de limiter le temps de passation, nous avons créé, avec l'aide d'un doctorant, L. Saleh, un programme avec le logiciel Borland studio (Turbo Delphi). Après une première phase d'entraînement avec 15 images prises au hasard dans la base de l'IAPS, les participants devaient évaluer les 224 images constituant l'expérience. L'ordre de présentation des images a été fixé à l'aide du logiciel Excel®, qui nous permettait d'attribuer aléatoirement à chaque image un numéro de passage. Tous les participants voyaient les images dans l'ordre ainsi établi.

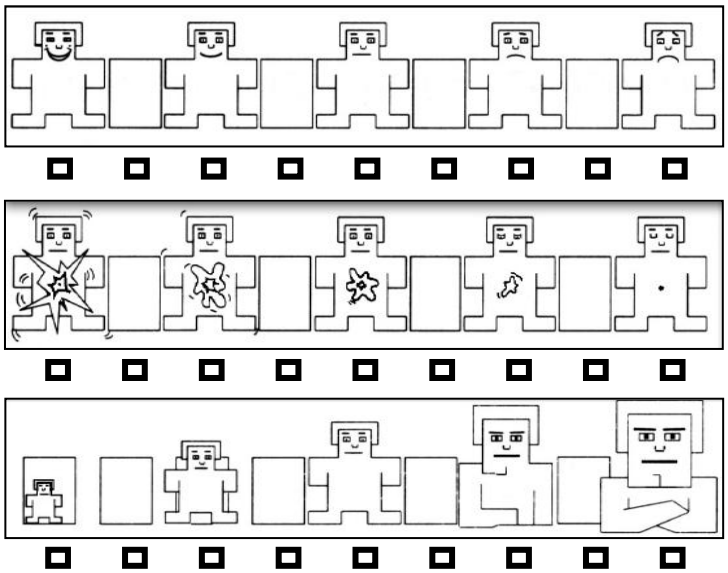


Figure 14 : Grille de réponse SAM. La première ligne correspond à la valence, la seconde ligne à l'excitation et la troisième à la dominance.

La passation durait environ 30 minutes et était entrecoupée d'une pause d'environ 10 minutes après la 110ème image. Après une diapositive de présentation (5s) "Soyez prêt à noter la prochaine image", nous affichions l'image durant 15 secondes. Ensuite, nous affichions la grille de réponse SAM (cf. figure 14). Le participant avait 5 secondes pour cocher la case correspondante à son choix, pour chaque dimension. La procédure est représentée figure 15.

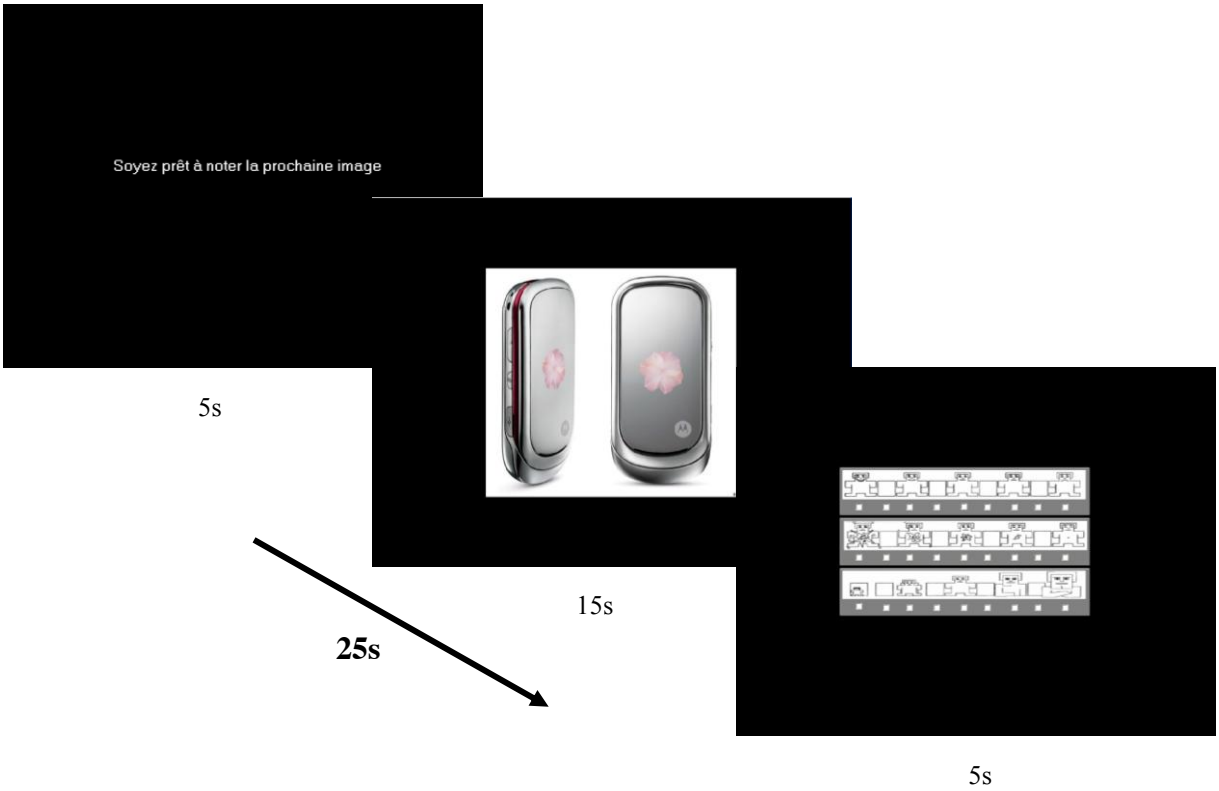


Figure 15 : Déroulement de l'expérimentation

3.1.3.3 Résultats

Chaque image a été évaluée par 8 participants, dont une seule femme. La moyenne d'âge était de 30 ans ($\sigma = 5,57$).

Dans un premier temps, nous nous sommes assurés que les résultats obtenus pour les images de la base de l'IAPS obtenaient des notes cohérentes avec les normes de l'IAPS concernant chaque dimension évaluée. Les résultats montrent que les notes attribuées par les participants correspondent effectivement à la norme de notation. En effet, on observe (figure 16) des corrélations entre les données observées et les normes de l'IAPS : (1) pour la dimension "valence" (en bleu) de $r = 0,90$, (2) pour la dimension "excitation" (en vert) de $r = 0,76$, et (3) pour la dimension "dominance" (en marron) de $r = 0,69$.

Dans un second temps, nous avons analysé chaque catégorie d'images séparément et nous avons conservé les images publicitaires ayant des valences et niveau d'excitation similaires au

sein d'une catégorie. Ont été exclues les images situées à plus ou moins 1,5 écart-types de la moyenne de la catégorie. Le but était de constituer des catégories possédant 12 images chacune. Lorsque nous avions plus de 12 images dans une catégorie, malgré le critère de 1,5 écart-type de différence à la moyenne, nous avons simplement écarté les images les plus éloignées de la moyenne.

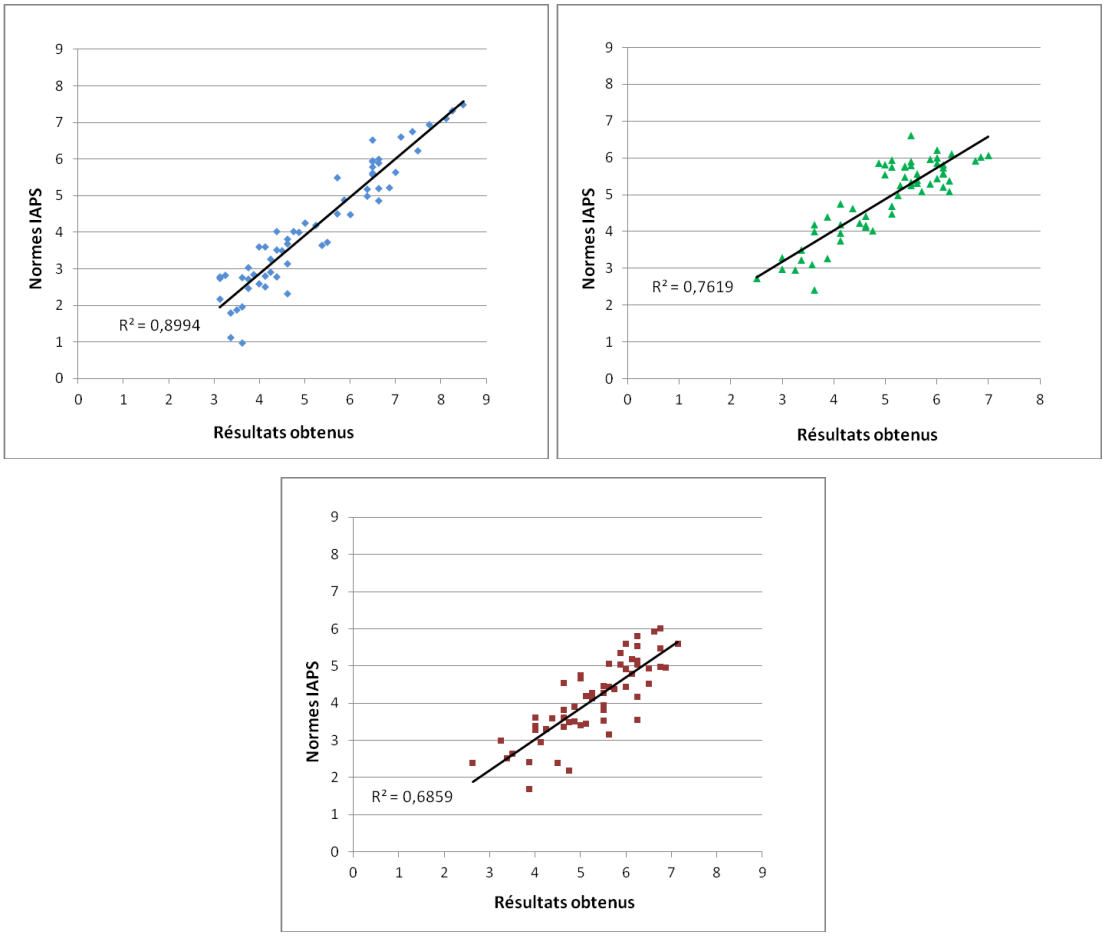


Figure 16 : Graphes de corrélation entre les résultats obtenus sur les images de l'IAPS et les normes de l'IAPS, pour la valence (en haut à gauche), la stimulation (en haut à droite) et la dominance (en bas).

Quatre parcours expérimentaux comportaient des images publicitaires. Nous avons donc répartis ces images entre les parcours (cf. tableau VIII) en fonction de leur valence et de leur excitation.

Tableau VIII : Valence et excitation moyennes obtenues pour les images sélectionnées, par parcours et par excentricité.

Valence	
Parcours 1	4,24
Parcours 2	4,18
Parcours 3	4,25
Parcours 4	4,14

Excitation	
Parcours 1	5,82
Parcours 2	5,78
Parcours 3	5,89
Parcours 4	5,77

3.1.4 Contrôle de la taille

Sur le simulateur, nous avions le choix entre deux tailles de panneaux publicitaires (cf. figure 17), des "petits" panneaux et de "grands" panneaux.

Figure 17 : Exemple des deux tailles de panneaux publicitaires, comparés à la taille d'une voiture. A gauche, les petits panneaux, à droite les grands panneaux.

Comme nous souhaitions que les panneaux restent discrets et réalistes dans l'environnement virtuel, il nous semblait inconcevable d'insérer plusieurs grands panneaux dans des parcours. Par ailleurs, les petits panneaux présentaient de nombreux avantages. En effet, ils avaient une taille proche des panneaux de signalisation. De plus, ils pouvaient être positionnés à différentes excentricités de la route, ce qui n'était pas possible avec les grands panneaux.

3.2 Positionnement des panneaux publicitaires

L'étude préliminaire de Milleville-Pennel et al. (2010) a montré que les cérébrolésés avaient tendance à se focaliser sur l'environnement proche lors de la conduite et à inhiber ce qui était plus éloigné de la chaussée. La localisation des informations a donc son importance. C'est pourquoi nous avons décidé d'installer des panneaux publicitaires proches de la chaussée

(peu excentrés par rapport au participant) ainsi que d'autres plus éloignés (très excentrés) (cf. figure 18). Les images retenues ont donc été réparties de manière équilibrée entre les quatre parcours expérimentaux et les différentes excentricités à la route (cf. tableau IX).

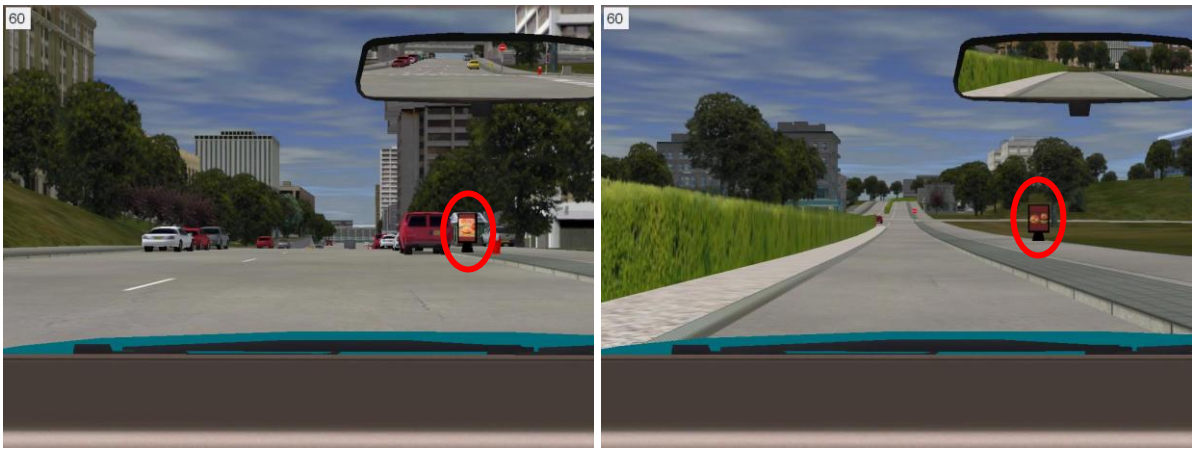


Figure 18 : Capture de l'écran principal avec un panneau publicitaire peu excentré (à gauche) et très excentré (à droite), dans la catégorie nourriture (hamburger).

Si les participants cérébrolésés ont un défaut d'attention sélective, ils devraient regarder davantage les panneaux publicitaires que les participants contrôles.

Tableau IX : Valence et excitation moyennes obtenues pour les images sélectionnés, par parcours et par excentricité.

Valence		
Parcours	Placement	Moyenne
Parcours 1	Très excentré	4,22
	Peu excentré	4,25
Total Parcours 1		4,24
Parcours 2	Très excentré	4,2
	Peu excentré	4,2
Total Parcours 2		4,18
Parcours 3	Très excentré	4,25
	Peu excentré	4,24
Total Parcours 3		4,25
Parcours 4	Très excentré	4,15
	Peu excentré	4,16
Total Parcours 14		4,14

Niveau d'excitation		
Parcours	Placement	Moyenne
Parcours 1	Très excentré	5,89
	Peu excentré	5,7
Total Parcours 1		5,82
Parcours 2	Très excentré	5,82
	Peu excentré	5,79
Total Parcours 2		5,78
Parcours 3	Très excentré	6
	Peu excentré	5,95
Total Parcours 3		5,89
Parcours 4	Très excentré	5,85
	Peu excentré	5,81
Total Parcours 4		5,77

Par ailleurs, si les participants cérébrolésés ont un défaut d'attention partagée ou un manque de ressources attentionnelles, ils devraient se focaliser effectivement sur l'environne-

ment proche. Alors, en cas de déficit d'attention sélective, ils devraient regarder davantage les panneaux peu excentrés par rapport aux panneaux très excentrés, comparativement aux participants contrôles. Nous nous attendons à un nombre de regards et des durées de regards plus élevés sur les panneaux peu excentrés que sur les panneaux très excentrés, chez les participants cérébrolésés.

4 Définition du matériel pour l'étude de l'effet de la charge auditive et des consignes

Afin d'étudier l'effet de l'ajout d'une charge auditive ou d'une consigne, nous avons décidé de créer quatre scénarios. Parmi ces quatre scénarios, il y avait un scénario de base, qui servait de scénario contrôle. Un scénario avec un distracteur auditif (l'expérimentateur était au téléphone avec une tierce personne) nous renseignait sur la faculté à partager son attention. Enfin, deux scénarios avec des consignes (une consigne de vitesse et une consigne de sécurité) modifiaient le but à atteindre pour le participant.

4.1 Mise au point de parcours expérimentaux comparables

Afin de ne pas engendrer de monotonie ou d'effet d'apprentissage en présentant le même parcours quatre fois, quatre parcours différents ont été mis en place. Toutefois, il fallait veiller à ne pas avoir de biais du parcours sur le type de scénario (c'est-à-dire, base ou charge auditive ou consigne). C'est pourquoi nous avons du concevoir intégralement quatre parcours (itinéraire, gestion du trafic, gestion des feux, etc.). En effet, nous avions besoin de quatre parcours très similaires afin de pouvoir les comparer. De nombreuses variables ont été contrôlées (cf. tableau X) : conduite en ville, avec un trafic modéré, même nombre de feux verts/rouges et de stops, distance équivalente, etc.

Afin de ne pas avoir d'effet du parcours sur le scénario, l'ordre des parcours était contrebalancé entre 4 participants selon un carré latin pré-établi (cf. tableau XI). Ainsi, chaque participant d'une catégorie (Co, PA, CR ou CA) se voyait affecté à un groupe de 4 participants dans l'ordre des passations. Ainsi contrebalancés, les scénarios étaient comparables, indépendamment du parcours effectué.

Tableau X : Présentation des scénarios expérimentaux.

	Nombre de feux (dont feux rouges)	Nombre de stops	Nombre de ronds-points	Nombre de "tourner à gauche"	Nombre de "tourner à droite"	Durée (en min)	Distance (en km)
Parcours A	9 (3)	1	2	3	4	6	2,6
Parcours B	9 (3)	1	1	3	4	6	2,7
Parcours C	9 (3)	1	2	3	4	6	2,6
Parcours D	9 (3)	1	1	5	3	6	2,7

Par ailleurs, il était également nécessaire de définir des portions de route comparables afin de les analyser. Comme nous nous intéressions à l'effet de consignes et à l'effet d'une charge auditive, nous avons pensé que les lignes droites étaient les plus appropriées pour mettre en évidence des variations de conduite, notamment en termes de vitesse et de positionnement sur la voie. En effet, nous nous attendons à une augmentation de la vitesse avec une consigne de vitesse et une diminution avec la consigne de sécurité. Par ailleurs, avec la charge auditive, nous nous attendons à une variabilité plus importante de la vitesse et/ou de la trajectoire en cas de déficit attentionnel, car une partie des ressources initialement allouées à la gestion de la vitesse et de la trajectoire sont réquisitionnées pour traiter la charge auditive. Les lignes droites semblaient donc privilégiées pour observer l'effet des consignes et de la charge auditive.

Tableau XI : Présentation du contrebalancement en carré latin.

Participant	Base-line	Charge auditive	Vitesse	Sécurité
1	Parcours A	Parcours B	Parcours C	Parcours D
2	Parcours B	Parcours C	Parcours D	Parcours A
3	Parcours C	Parcours D	Parcours A	Parcours B
4	Parcours D	Parcours A	Parcours B	Parcours C

4.2 Définition de la charge auditive

L'objectif de la charge auditive était d'obliger le participant à partager son attention entre la conduite et cette charge auditive, sans lui en donner la consigne. Nous avons opté pour une discussion téléphonique entre l'expérimentateur et un interlocuteur imaginaire car c'est ce qui nous semblait le plus probable. De plus, cela reste assez écologique puisqu'il arrive que le

passager réponde au téléphone alors que le conducteur roule. L'écoute de la discussion fait bien appel à la modalité auditive, ne nécessite aucune réponse de la part du participant et lui permet de continuer de conduire. Cette charge auditive constituant un distracteur, elle devrait théoriquement être inhibée. Cependant, si elle est suffisamment attractive et que les ressources sont suffisantes, elle sera traitée. A l'aide d'une grille de recueil, nous nous sommes assurés de l'attractivité de notre distracteur auditif. En effet, lors des prétests, tous les participants ont restitué au plus de 50% des sujets abordés par l'expérimentateur au téléphone. De plus, aucun d'entre eux n'a pensé qu'il s'agissait d'une discussion simulée. Le texte de la discussion apparaît en annexe 2.

Le scénario "charge auditive se déroulait de la manière suivante. Le participant conduisait sur simulateur. Peu après le début du parcours, l'expérimentateur recevait un appel. Placé derrière le participant, il annonçait au conducteur qu'il était obligé de répondre (on avait déjà informé le participant de l'éventualité d'un appel durant la pause). Le participant avait pour consigne de continuer de conduire pendant que l'expérimentateur répondait à l'appel. Peu avant la fin du parcours, l'expérimentateur raccrochait en s'excusant auprès du participant.

Avant d'étudier l'impact de la charge auditive, il fallait s'assurer que la conversation avait été écoutée. Pour cela, nous avons procédé, à l'oral à la fin de la passation sur simulateur, à une tâche de rappel, suivie d'une tâche de rappel indicé et enfin de reconnaissance des éléments cités dans la fausse discussion téléphonique. L'expérimentateur remplissait la grille de rappel de la discussion (annexe 3). La discussion était divisée en deux parties (sujets globaux), puis chaque partie comportait un certain nombre d'informations plus détaillées, qui pouvaient elles-mêmes être précisées.

4.3 Définition des consignes

Les consignes utilisées étaient tirées de l'étude de Charron et al. (2010). Il y avait deux consignes, données oralement, toujours dans le même ordre, une consigne de vitesse puis une consigne de sécurité.

La consigne de vitesse était : "Imaginez que vous vous êtes en retard à un rendez-vous très important que vous ne pouvez pas vous permettre de manquer. Suivez les instructions de trajet, dépêchez-vous."

La consigne de sécurité était : "Imaginez que vous conduisez chez sa nounou le fils de votre meilleur ami. Vous ne pouvez pas vous permettre de faire courir le moindre risque à l'enfant. Suivez les instructions de trajet, soyez prudent(e)."

Nous nous intéresserons aux effets des consignes sur la vitesse en ligne droite. Nous nous attendons à ce que les cérébrolésés, qui ont des difficultés à s'adapter, n'appliquent pas les consignes. En effet, les CR n'ayant pas les ressources pour modifier leur performance acceptable n'appliqueraient pas ces consignes. Nous ne devrions donc pas observer de modification de la vitesse, contrairement aux participants contrôles. Par ailleurs, si la première consigne de vitesse est appliquée, du fait de ces ressources limitées, nous pourrions observer une persévération de cette consigne dans le scénario suivant.

5 Conception d'un scénario pour l'étude de la vitesse de traitement

Enfin, nous voulions étudier la vitesse de traitement, notée comme déficitaire chez de nombreux cérébrolésés dans la littérature. Nous avons donc choisi d'utiliser un parcours spécifiquement conçu par Faros pour évaluer le temps de réaction. Il s'agissait d'un exercice durant lequel le participant roulait à une vitesse régulée à 90 km/h sur une ligne droite en campagne. Un signal stop apparaissait au milieu de l'écran et le participant devait freiner le plus rapidement possible (cf. figure 19). Les participants n'avaient qu'un seul essai.

Figure 19 : Apparition du signal stop lors de l'épreuve évaluant le temps de réaction.

Nous nous intéresserons au moment où le participant relâche l'accélérateur après l'apparition du signal et au moment où il freine. En cas de ralentissement de la vitesse de traitement, nous observerons des temps plus élevés chez les participants cérébrolésés que chez les participants contrôles.

En conclusion de ce chapitre, nous pouvons souligner qu'un soin particulier a été accordé à l'élaboration des scénarios de conduite sur simulateur. Cela constitue une part importante de ce travail de thèse. Ce travail préliminaire était nécessaire pour répondre aux besoins de l'étude. Ainsi, après avoir conçu les scénarios, nous avons pu entreprendre la validation du simulateur de conduite, en tant qu'outil pour étudier les mécanismes cognitifs impliqués en conduite automobile.

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

CHAPITRE 5 - ETUDE DES MECANISMES COGNITIFS DEFICITAIRES A TRAVERS LE SIMULATEUR DE CONDUITE, COMPARATIVEMENT AUX TESTS NEUROPSYCHOLOGIQUES ET A L'EVALUATION SUR ROUTE : METHODOLOGIE

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

Ce travail de thèse comportait deux objectifs : (1) la validation de l'utilisation d'un simulateur de conduite pour évaluer les compétences de conduite comparativement à une batterie de tests neuropsychologiques et à une évaluation sur route et (2) l'étude des mécanismes cognitifs déficitaires à travers le simulateur de conduite. Les choix méthodologiques que nous avons faits reflètent ces objectifs. En effet, il a fallu définir les processus qui nous intéressaient et les outils dont nous disposions pour les étudier. Parmi la liste exhaustive d'outils existants, il a fallu sélectionner ceux qui étaient pertinents pour notre étude. De plus, certains outils ne nous apportant pas entière satisfaction, nous avons nous-mêmes conçu une partie du protocole sur simulateur (cf. chapitre 4). Ce chapitre méthodologique précisera les choix que nous avons faits en présentant le matériel et la procédure utilisés. Nous décrirons également les données recueillies lors de chaque évaluation.

1 Participants

Dans cette étude, nous avions constitué quatre groupes de participants : les participants contrôles (Co), les participants âgés (PA), les participants cérébrolésés récents (CR) et les participants cérébrolésés anciens (CA).

Les Co devaient être âgés de 25 à 50 ans, cet âge correspondant généralement à l'âge des CR à leur entrée à l'hôpital. Les PA devaient avoir plus de 60 ans.

Les Co et PA devaient être titulaires du permis B français depuis plus de 7 ans et avoir une vue correcte (avec ou sans correction). Ils devaient conduire régulièrement, sur tout type de route (agglomération, nationale, autoroute). Les participants Co et PA étaient exclus s'ils présentaient des antécédents de lésions cérébrales (accident vasculaire cérébral, traumatisme crânien sévère, etc.), épilepsie, maladie neurodégénérative, glaucome, opération de la cataracte ou dégénérescence maculaire liée à l'âge.

Concernant les CR, ils devaient avoir entre 25 et 50 ans, une expérience de conduite de plus de 7 ans avant leur hospitalisation et ne pas avoir repris le volant depuis. Les participants CR avaient subi des lésions cérébrales (traumatisés crâniens frontaux ou victimes d'un accident vasculaire cérébral) entre 6 mois et 2 ans avant de participer au protocole, à un mois près. Ils devaient avoir été évalués avec un score inférieur ou égal à 8 sur l'échelle de coma de Glasgow (critères de gravité) et avoir eu une durée du coma compris entre 48h et 1 mois maximum. Il s'agissait de personnes souhaitant reprendre la conduite mais ne l'ayant pas encore fait, et pour lesquelles cette possibilité se discutait. Elles ne devaient pas présenter de

déficits moteurs puisque nous travaillions sans adaptation des véhicules (simulateur et voiture de l'auto-école).

Aucun critère d'âge n'avait été retenu pour les CA mais les lésions dont ils avaient été victimes devaient remonter à plus de 10 ans. Ils devaient avoir une expérience de conduite pré-lésionnelle de plus de 7 ans et post-lésionnelle de plus de 3 ans. Ils devaient conduire régulièrement, sur tout type de route (agglomération, nationale, autoroute) et avoir une vue correcte (avec ou sans correction).

Tous les participants devaient signer une lettre de consentement d'exploitation des données (cf. annexe 4). Les CR devaient, en plus, signer un document qui leur expliquait l'objectif de l'étude et en quoi consistait le protocole de conduite (cf. annexe 5).

L'échantillon initial était composé de 49 personnes à savoir : 25 participants contrôles (Co), 9 participants âgés (PA), 6 participants cérébrolésés récents (CR), et 9 participants cérébrolésés anciens (CA). Malheureusement, 21 personnes ont eu le mal du simulateur et n'ont pas pu achever la conduite sur simulateur. Pour 3 personnes, il a été impossible de calibrer l'oculomètre correctement (appareil sensible au port de lunettes ou lentilles, à la couleur ou à la forme des yeux, etc.). Enfin, pour 5 autres personnes, nous avons connu une panne matérielle de l'oculomètre et les données vidéo ont été perdues. Au total, sur les 49 personnes qui ont accepté de participer à l'étude, seulement 20 ont effectivement pu le faire.

Concernant les Co, 9 personnes ont pu participer à l'étude, dont une seule femme. Elles avaient en moyenne 40 ans ($\sigma = 6,59$) et conduisaient depuis 21 ans en moyenne ($\sigma = 5,85$).

La seule personne âgée ayant fini l'évaluation sur simulateur sans perte de données était âgée de 66 ans et conduisait depuis près de 45 ans.

Parmi les 6 CR, la moitié était des hommes. Quatre avaient été victimes d'un traumatisme crânien sévère et 2 autres d'un accident vasculaire cérébral. Lorsqu'ils ont commencé le protocole, la moyenne d'âge était de 38 ans ($\sigma = 9,07$), avec une expérience de conduite moyenne (avant la survenue des lésions) de 18 ans ($\sigma = 9,01$). La plupart du temps, il s'agissait de patients admis en hôpital de jour à l'hôpital Saint-Jacques (CHU de Nantes) ou d'anciens patients qui intégraient une unité d'évaluation de reclassement et d'orientation sociale (UEROS).

Les CA, uniquement des hommes, étaient quant à eux des volontaires de différents centres de l'association de réinsertion pour les traumatisés crânien atlantique (ARTA), tous victimes d'un traumatisme crânien plus de 10 ans auparavant. L'âge moyen était de 52 ans ($\sigma = 8,69$). Ils avaient conduit 13 ans en moyenne ($\sigma = 12,31$) avant d'arrêter à cause du traumatisme crânien et ils avaient repris depuis 17 ans en moyenne ($\sigma = 6,85$).

Les informations concernant les groupes sont récapitulées dans le tableau XII.

Tableau XII : Caractéristiques des différents échantillons

	Co	PA	CR	CA
Nombre de participants	9 (1 femme, 8 hommes)	1 (1 homme)	6 (3 femmes, 3 hommes)	4 (4 hommes)
Age moyen (en années)	40,33 (σ = 6,59)	65,7	38,39 (σ = 9,07)	51,61 (σ = 8,69)
Expérience moyenne de conduite (en années)	21,10 (σ = 5,85)	44,84	*pré-lésionnelle :* 17,77 (σ = 9,01)	*pré-lésionnelle :* 13,38 (σ = 12,31) *post-lésionnelle :* 16,51 (σ = 6,85)

Les analyses statistiques non paramétriques (un test U de Mann-Whitney) montrent qu'il n'y a pas de différence significative entre les Co et les CR concernant l'âge ($U = 23$; $n_1 = 9$, $n_2 = 6$, $p = 0,69$) ni l'expérience de conduite ($U = 20$; $n_1 = 9$, $n_2 = 6$, $p = 0,46$). Nos groupes Co et CR ne sont pas statistiquement différents concernant ces deux variables.

S'il n'y a pas de différence significative entre les Co et les CA concernant l'expérience de conduite (pré-lésionnelle pour les CA) ($U = 9$; $n_1 = 9$, $n_2 = 4$, $p = 0,16$), nous pouvons toutefois signaler une différence significative entre ces deux groupes concernant l'âge ($U = 5$; $n_1 = 9$, $n_2 = 4$, $p < 0,05$).

Il n'existe pas non plus de différence significative entre les CR et les CA concernant l'âge ($U = 4$; $n_1 = 6$, $n_2 = 4$, $p = 0,11$) ni l'expérience de conduite pré-lésionnelle ($U = 10$; $n_1 = 6$, $n_2 = 4$, $p = 0,76$).

2 Matériel et méthode

Le protocole de recherche comportait trois étapes : (1) une évaluation des capacités de conduite par le biais d'un protocole complet comportant trois épreuves (bilan neuropsychologique, évaluation sur route réelle, évaluation sur simulateur de conduite), (2) un ré-entraînement sur route pour les participants cérébrolésés récents, et (3) une deuxième évaluation pour les participants ré-entrainés comportant les mêmes épreuves que la première évaluation. Nous allons donc présenter la méthodologie correspondant à ces trois étapes.

2.1 Protocole d'évaluation de la conduite

Tous les participants donnaient par écrit leur consentement libre et éclairé pour participer à l'étude. Ils devaient également signer la lettre de consentement d'utilisation des données. En plus, les CR recevaient un document expliquant le protocole jusqu'au ré-entraînement et la deuxième évaluation. Ils s'engageaient notamment à ne pas reconduire avant la fin de l'étude.

Le protocole complet d'évaluation de la conduite se passait à l'hôpital Saint-Jacques (CHU de Nantes) ou au départ de l'hôpital Saint-Jacques pour la conduite sur route.

La conduite sur simulateur était préalable à toute autre évaluation. En effet, il s'agissait de la partie de la passation qui présentait le plus de risque de perte des participants, due soit au « mal du simulateur », soit à l'impossibilité d'enregistrer les mouvements oculaires avec l'oculomètre (lunettes trop épaisses, etc.). Ensuite, les participants passaient le bilan neuropsychologique avec l'une des deux neuropsychologues associées au projet et effectuaient une évaluation de conduite sur route avec un formateur de l'auto-école Ecole de Conduite Française (ECF).

Les évaluations n'étaient pas effectuées le même jour mais réparties dans le temps de façon à limiter au maximum la fatigue liée aux passations. Elles devaient être réalisées dans un délai de 3 mois lorsque c'était possible, notamment chez les CR, afin d'éviter une amélioration des résultats entre les évaluations due à une récupération spontanée.

2.1.1 Evaluation de conduite sur simulateur

2.1.1.1 Matériel

2.1.1.1.1 Caractéristiques techniques de l'évaluation sur simulateur de conduite

Le simulateur de conduite utilisé était une cabine Faros équipée de trois écrans 22" permettant une vision panoramique, d'une boite de vitesse manuelle, d'un tableau de bord type Opel (compteur de vitesse, compte tour, jauge d'essence, etc.) et d'un jeu complet de commandes : pédalier, comodos, etc. (cf. figures 20 et 21).

Il s'agissait d'un simulateur à base fixe. Il n'y avait donc pas de retour proprioceptif, contrairement à un véhicule réel. Cependant, il y avait un retour de force au volant ainsi qu'une immersion auditive (bruits du moteur et de l'environnement virtuel) et visuelle. L'environne-

ment visuel était rendu par trois écrans LCD de 22", le premier face au participant, les deux autres latéraux à gauche et à droite, avec un angle de 45° par rapport à l'écran central. Le participant était à environ 1m et disposait ainsi d'un champ visuel d'environ 120° en largeur et 20° en hauteur.

Figure 20 : Simulateur à base fixe EF-X, d'Eca-Faros.

Figure 21 : Tableau de bord du simulateur

L'évaluation de la conduite sur simulateur comportait dix scénarios. Deux parcours d'initiation au simulateur familiarisaient le participant avec le simulateur et huit parcours expérimentaux composaient l'évaluation à proprement parler. Le contenu de ces scénarios a été décrit plus en détail dans le chapitre précédent.

2.1.1.1.2 L'oculomètre

Nous avions utilisé un oculomètre couplé au simulateur de conduite. Il s'agissait de l'IviewX de SMI (cf. figure 22). Il se présentait sous la forme d'un casque de vélo sur lequel étaient installées deux caméras (une caméra de scène et une caméra qui filmait l'œil par le biais d'un miroir).

Figure 22 : Oculomètre IviewX de SMI

L'oculomètre IviewX calcule la position du regard en utilisant la technique du reflet cornéen (ou technique de réflexion IR). En effet, une lumière infrarouge (IR) est envoyée par une diode au centre de la pupille, le reflet IR est renvoyé par la cornée et est détecté par une caméra infrarouge filmant l'œil. Des capteurs positionnés sur le casque permettent de le situer dans l'espace et de calculer la rotation de la tête. Une autre caméra filme la scène visuelle en face du participant et, par intégration des données des capteurs et de la caméra infrarouge, permet de définir où se trouve le regard du participant sur la scène visuelle en temps réel.

2.1.1.1.3 Le questionnaire d'évaluation des habitudes de conduite

Nous avons eu recours à un questionnaire général nous renseignant sur les caractéristiques des participants, leur expérience de conduite et leurs habitudes de conduite, à remplir avant de conduire sur simulateur. Ce questionnaire est tiré des travaux menés au Laboratoire d'Automatique, de Mécanique et d'Informatique industrielles et Humaines (LAMIH) par Rajaonah et ses collègues (Rajaonah et al., 2006, 2008). Il visait à nous renseigner sur le participant de manière générale (âge, sexe, profession...) et ses habitudes de conduite.

En tout, 11 items composaient ce questionnaire. Six questions étaient dites ouvertes, quatre questions comportaient des cases à cocher (à choix unique ou multiples), enfin, la dernière requérait une réponse sur une échelle de valeur.

2.1.1.2 Procédure

Avant de conduire, les participants remplissaient un questionnaire sur les habitudes et styles de conduite. Après cela, nous présentions le simulateur de conduite : l'habitacle, les différentes commandes, le réglage du siège. Les participants étaient alors invités à s'installer sur le siège conducteur, comme ils le feraient dans une vraie voiture. La consigne principale était d'ailleurs d'essayer de conduire comme ils le faisaient habituellement, le plus naturellement possible. Etant donné que toute l'évaluation de conduite sur simulateur se faisait équipé d'un oculomètre, il était nécessaire de le calibrer au préalable. Il s'agissait d'une calibration en 13 points, réalisée sur l'écran central uniquement, les écrans latéraux étant définis par rapport à l'écran central.

La conduite en elle-même débutait par deux parcours d'initiation avec une difficulté et une durée croissantes pour prendre en main le véhicule. Ensuite les participants passaient les huit autres scénarios selon l'ordre indiqué sur le tableau XIII ci-dessous.

Tableau XIII : Tableau récapitulatif des scénarios de conduite et de leur durée.

Ordre	Scénario	Durée de parcours (en min)
1	Initiation en campagne	5-6
2	Initiation en ville	12
3	Parcours en ville	10-12
4	Parcours en campagne	5-6
5	Parcours de nuit (en campagne)	6-8
6	Parcours expérimental 1 : parcours de base	6-7
7	Parcours expérimental 2 : charge auditive	6-7
8	Parcours expérimental 3 : consigne de vitesse	6-7
9	Parcours expérimental 4 : consigne de sécurité	6-7
10	Stop	1

Entre chaque parcours, les participants répondaient à un court questionnaire sur le parcours qu'ils venaient de réaliser. Dans ce questionnaire, nous évaluions, entre autres, le sentiment de maîtrise de la situation, la difficulté ressentie et l'effort consenti.

La conduite sur simulateur durait environ 1h30. Toutefois, le temps nécessaire pour compléter les questionnaires et la calibration de l'oculomètre étendait la durée de passation complète à environ 3h.

2.1.1.3 Données recueillies

Lors de l'évaluation sur simulateur, nous avons recueilli, en plus des réponses aux questionnaires, les données objectives provenant de deux outils, l'oculomètre et le simulateur.

2.1.1.3.1 Données oculométriques

L'oculomètre nous fournissait d'une part des vidéos sur lesquelles apparaissaient l'endroit où était posé le regard du participant, c'est-à-dire le point de fixation (représenté par un rond orange, cf. figure 23). Nous pouvions étudier les vidéos, image par image, avec 25 img/s. D'autre part, nous obtenions une matrice de données brutes enregistrées avec un pas de 20 ms, regroupant les données des capteurs de position et de rotation de l'oculomètre, le diamètre pupillaire du participant et la position du reflet cornéen.

Figure 23 : Capture d'écran extraite d'une vidéo obtenue avec l'oculomètre. En orange, le point de fixation du participant.

Le logiciel permettant d'analyser les données brutes de l'oculomètre a été conçu pour des scènes statiques et n'était pas approprié pour des scènes dynamiques telles que celles issues du simulateur. Nous avons donc principalement utilisé les données vidéos, à partir desquelles nous avons estimé les temps de regard sur les objets de l'environnement qui nous intéressaient : panneaux publicitaires, piétons, véhicules, etc. Nous n'avions pas la possibilité de mesurer

finement la position (x ; y) du regard sur l'image dynamique pour pouvoir raisonner en terme de fixation oculaire. C'est pourquoi nous parlerons uniquement de regards dans la suite de ce document. Par ailleurs, le taux d'échantillonnage de 25 img/s nous donnait un pas de 40 ms que nous avons considéré comme suffisant pour nos analyses.

De plus, le visionnage des vidéos pour les événements critiques nous a souvent permis d'orienter plus précisément les analyses et de vérifier la pertinence des indices utilisés. En effet, nous disposions de nombreuses variables et toutes n'étaient pas nécessaires pour étudier tous les événements. Cela nous a permis de réduire le coût des analyses tout en augmentant leur efficacité.

2.1.1.3.2 Données du simulateur

Le simulateur de conduite contenait de nombreux capteurs et nous permettait d'avoir accès à de nombreuses informations : vitesse du véhicule simulé, angle du volant, actions sur les pédales, nombre de collisions, etc. Pour ne pas surcharger le système cognitif, nous avons sélectionné les variables qui nous paraissaient pertinentes pour étudier le comportement de conduite des participants en fonction des scénarios proposés. Ainsi, si les variables relatives à la vitesse et à la trajectoire étaient indispensables quelle que soit la situation, nous ne pouvions négliger d'enregistrer d'autres variables telles que l'action sur les pédales ou le nombre de collisions pour l'étude des événements critiques par exemple. Les variables exploitées étant dépendantes du type de scénario et de l'événement critique concerné, elles seront décrites dans le détail dans le chapitre suivant.

Les données simulateur étaient enregistrées avec un pas de 17 ms. Comme ce n'était pas le même pas que celui des données oculométriques, nous avons dû coupler les différentes informations (simulateur, vidéos et données oculométriques brutes). Un algorithme de couplage a été réalisé par R. Boisliveau, ingénieur d'études à l'IRCCyN. Ce travail était primordial afin de faire correspondre les différentes données dont nous disposions et de pouvoir les exploiter au mieux.

2.1.2 Bilan neuropsychologique

Afin de compléter l'évaluation sur simulateur, les participants effectuaient une batterie de tests neuropsychologiques.

2.1.2.1 Tests utilisés

Le choix des tests utilisés est largement inspiré de l'étude de Milleville-Pennel et al. (2010). Ainsi, conformément à cette étude, nous avons eu recours à des tests classiquement utilisés dans la littérature afin d'étudier les déficits de personnes cérébrolésées, comme les tâches d'empan ou le TMT. Nous avons également utilisé des sous-tests du test de performance attentionnelle (TAP ou Test for Attentional Performance) pour leur apport en tant que tests écologiques (Zimmermann & Fimm, 2002, 2007). Enfin, nous avons ajouté certains tests en fonction des processus qui nous intéressaient, comme l'attention partagée ou la gestion des priorités. Le tableau XIV ci-dessous résume l'ensemble des tests utilisés. La mise en œuvre des différents tests ainsi que leur cotation est présentée en détail dans la partie annexe (annexe 6).

Tableau XIV : Tableau récapitulatif des tests et sous-tests utilisés et le processus observé.

Tests et sous-tests	Processus et troubles observés
Mc Nair	Conscience des troubles cognitifs
WAIS III : Empan auditivo-verbal direct et indirect	Mémoire de travail auditivo-verbale
MEM II : Empan visuo-spatial direct et indirect	Mémoire de travail visuo-spatiale
TMT (A et B)	Recherche visuelle Flexibilité mentale (B-A)
Stroop	Attention sélective et résistance à l'interférence
Zoo Map	Anticipation Planification
D2	Vitesse de traitement Concentration
Double-tâche de Baddeley	Attention partagée
Brixton	Adaptation au changement
Organisation de la gestion des priorités (OGP)	Gestion des priorités
TAP : Exploration du champ visuel/Négligence	Négligence spatiale unilatérale
TAP : Alerte phasique	Alerte phasique
TAP : Go/NoGo	Inhibition comportementale
TAP : Attention partagée	Attention partagée
TAP : Balayage visuel	Détection de cible
UFOV : Test 1	Vitesse de traitement dans le champ visuel central
UFOV : Test 2	Attention partagée entre vision centrale et périphérique
UFOV : Test 3	Attention sélective dans le champ visuel périphérique

Les tests ont été sélectionnés pour l'intérêt du processus étudié dans le cadre de la conduite automobile. En effet, vitesse de traitement, anticipation, ou processus attentionnels sont im-

pliqués dans la tâche de conduite automobile (cf. chapitre 1). Par ailleurs, certains de ces processus sont également connus pour être déficitaires chez les personnes cérébrolésées (cf. chapitre 1, section 3.2). Toutefois, à la vue de la batterie complète, certains tests pourraient paraître inutiles car redondants. Prenons par exemple la double tâche de Baddeley, classiquement utilisée en psychologie, et le test d'attention partagée du TAP. Ces deux tests évaluent l'attention partagée, mais ne font pas appel aux mêmes ressources. En effet, dans les deux tâches de Baddeley, les canaux d'entrées et sorties ne sont pas les mêmes : une tâche est visuo-motrice alors que l'autre est auditivo-verbale. Le sous-test du TAP, quant à lui, utilise une tâche visuo-motrice et une tâche auditivo-motrice, ce qui signifie que la réponse requiert le même canal de sortie. Si l'on en croit Wickens (1984) et son hypothèse de canaux modaux séparés, les deux tests ont le même coût cognitif en ce qui concerne les informations d'entrées (deux canaux distincts, visuel et auditif) mais le sous-test du TAP surcharge le canal moteur concernant les réponses motrices qui pourraient entrer en concurrence. Ainsi, le test de Baddeley serait moins coûteux en termes de réponse.

Par ailleurs, si l'on fait le lien avec la conduite automobile, le test du TAP est plus proche de ce qui se passe en situation réelle. En effet, en conduite, des informations de différentes natures affluent (le conducteur voit et entend ce qui se passe, il a un retour proprioceptif de son action sur le véhicule, etc.) et la réponse commune est de nature motrice (il va agir sur les commandes du véhicule). Ainsi, ces deux tests évaluent sous un angle différent l'attention partagée, en faisant appel à des ressources de natures différentes.

2.1.2.2 Méthode/procédure

La passation des tests neuropsychologiques était réalisée par une neuropsychologue, J. Pothié, et durait entre 2h30 pour les participants contrôles et 3h pour les personnes cérébrolésées, avec une pause au milieu de la passation.

Avant la passation, nous relevions la plainte spontanée des participants. Ensuite, nous entamions la première partie de la passation avec l'échelle d'évaluation du Mc Nair, suivie des tests d'empan, du TMT, du test de Stroop, du Zoo Map, du D2, du Brixton, puis de l'OGP. Cette première partie durait entre 1h15 et 1h30. Une pause d'une quinzaine de minutes était alors accordée aux participants. La deuxième partie de la passation, d'environ 1h, consistait à faire passer les sous-tests du TAP et de l'UFOV. L'ordre de passation des tests correspond à l'ordre dans lequel ils apparaissent dans le tableau XIV.

2.1.2.3 Scores transformés et scores standardisés

Comme nous l'avons vu, de nombreux tests neuropsychologiques affichent des scores bruts qui sont transformés en percentiles ou centiles (par exemple, le TMT), en scores T (par exemple, le test de Stroop) ou encore en scores relatifs à une échelle spécifique comme l'échelle de Wechsler pour les tests d'empan. Ces différents scores ont ensuite été standardisés en suivant la correspondance entre les scores et la loi normale (cf. figure 24). Nous avons ainsi situé tous les scores par rapport à un écart-type et avons obtenu des notes standardisées.

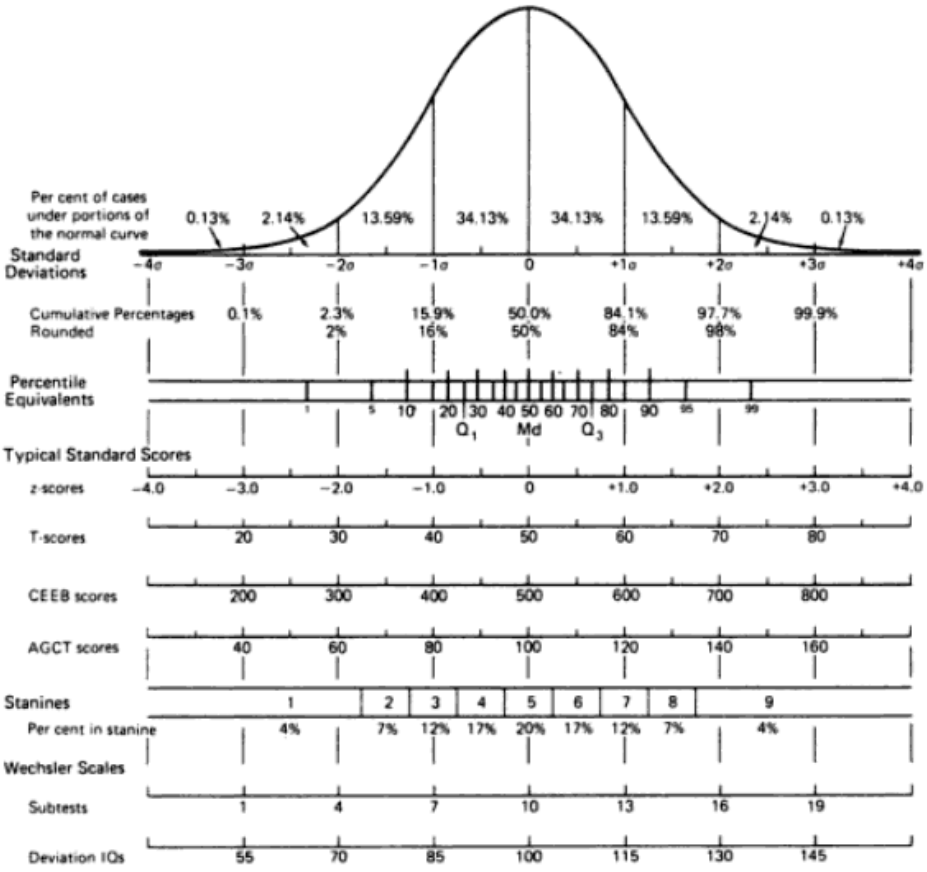


Figure 24 : Relations entre les scores communément utilisés pour les tests et la loi normale (tirée de Lezak, Howieson, & Loring, 2004, p.142).

Certains tests n'avaient pas de scores transformés. C'est le cas des sous-tests de l'UFOV par exemple. Nous obtenions des temps et une recommandation : "very low risk", "moderate risk", "high risk" ou " central vision loss or slowed processing speed". Nous avons considéré qu'un risque très faible équivalait à une note standardisée de "0", un risque modéré correspondait à une note standardisée de "-1" et un risque élevé à une note standardisée de "-2". Bien

entendu, une recommandation disant "perte de la vision centrale" était également considérée comme une note standardisée de "-2".

Concernant les résultats au sous-test "champ visuel" de la TAP et les résultats au Mc Nair, nous n'avions que les scores bruts et non transformés. Nous avons donc décidé que nous comparerions les participants au groupe contrôle dans son ensemble, dont la moyenne nous servira de note standard.

2.1.3 Evaluation sur route

2.1.3.1 Matériel

Les tests sur route étaient effectués dans une Renault Clio III à boîte manuelle, avec doubles commandes. Tous les participants passaient l'évaluation avec le même formateur d'auto-école. Ce dernier était habitué à l'évaluation de personnes cérébrolésées, intervenant souvent à la demande du CHU. A l'issue de la passation, le formateur remplissait une fiche en suivant une grille d'évaluation précise.

La grille a été construite à partir d'une grille pré-existante, utilisée par les formateurs d'auto-école pour évaluer les personnes cérébrolésées. Elle portait, à l'origine, sur des aspects principalement sécuritaires et était assez proche de la grille utilisée lors de l'évaluation de la conduite à l'examen national du permis de conduire. Aux items existants, nous avons ajouté des items propres à l'observation de la conduite chez les personnes cérébrolésées, concernant leur capacité d'anticipation ou en double-tâche par exemple. La grille comportait alors 30 items (cf. annexe 7) qui évaluaient aussi bien les aspects moteurs (maniement des commandes) que visuels (observation de la scène, mobilité du regard, etc.). Comme nous ne nous intéressions pas à toutes les observations faites par les formateurs, utiles en examen mais non pertinentes pour notre étude (par exemple, l'installation au poste de commande), nous n'avons conservé que 21 items.

2.1.3.2 Méthode/procédure

L'épreuve de conduite sur route durait entre 1h15 et 1h30 dont 1h00 à 1h15 de conduite. Le parcours était le même pour tous. Il s'agissait d'une boucle de 22,2 km comportant à la fois de la conduite en agglomération et hors agglomération (cf. figure 25). Le parcours comprenait un

certain nombre de ronds-points, des priorités à droite, des "cédez-le-passage" et des "stops". Ce parcours a été défini afin que le trajet suivi soit le plus proche possible de ceux réalisés sur le simulateur de conduite.

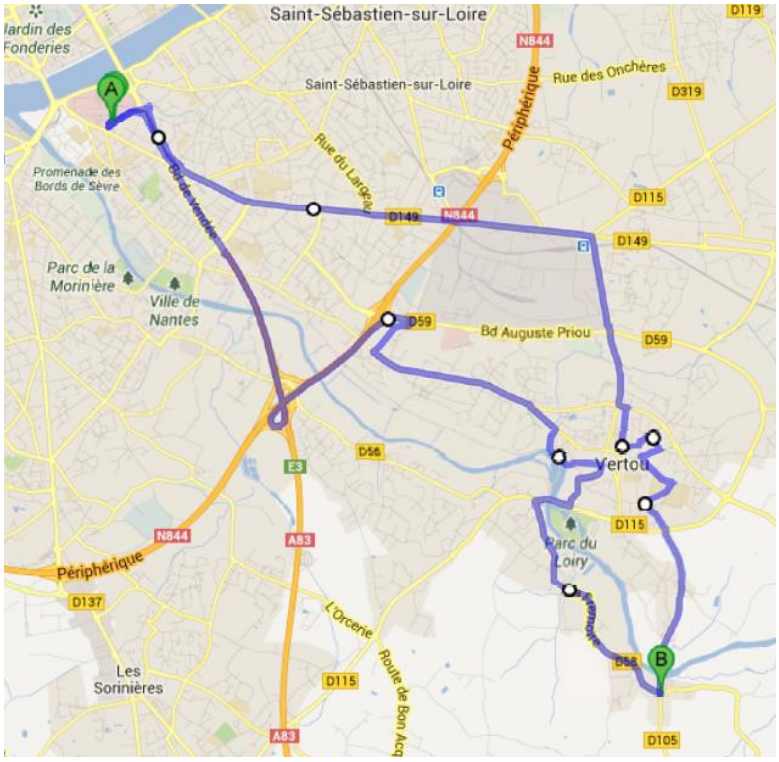


Figure 25 : Plan du parcours effectué lors de l'évaluation sur route (source : itinéraire via google map).

Afin d'éviter les heures de pointe dans le secteur dans lequel le participant allait circuler, nous avions convenu avec l'auto-école de 2 tranches horaires : le matin de 9h-9h30 à 12h-12h30 (en fonction de la luminosité) et l'après-midi de 13h30 à 16h-17h. La conduite se déroulait seulement en la présence du formateur ECF et en ma présence, lorsque cela était possible et avec l'accord du participant.

Dans un premier temps, le participant était invité à s'installer confortablement dans le véhicule, en ajustant la position de son siège et du volant. Le formateur d'auto-école rappelait ensuite au participant le maniement du véhicule et des commandes, l'interrogeait sur le type de véhicule qu'il avait l'habitude de conduire, et présentait l'évaluation. Le participant devait suivre les indications de direction qu'il lui donnait tout en conduisant le plus naturellement possible. Durant le parcours, le formateur obstruait le rétroviseur central, notamment aux abords d'intersections, et interrogeait le participant sur la couleur du véhicule le suivant (sans

qu'il y ait nécessairement un véhicule). Cela permettait de vérifier que le participant contrôlait son rétroviseur, par exemple avant de freiner. Il questionnait également le participant sur la limitation de vitesse en vigueur sur la route où ils se situaient. Ces questions intervenaient toujours aux mêmes endroits du parcours. Par ailleurs, à un endroit précis du parcours, le formateur demandait au participant de commenter sa conduite en indiquant les indices qu'il utilisait pour l'anticipation lors de la conduite : « Vous allez me dire, le plus loin et le plus tôt possible, quels sont les indices qui sont intéressants pour nous, pour conduire. Par exemple, on longe des voitures, une portière risque de s'ouvrir. Un piéton peut traverser. Au loin, on voit des feux, on va faire attention parce qu'ils peuvent passer au rouge. ». Le début et la fin de la conduite commentée se situaient toujours au même endroit du parcours.

A la fin de l'épreuve, un bilan était dressé par le formateur. Il comportait principalement des conseils pour améliorer la conduite chez les Co, PA et CA. Avec les participants CR, le formateur expliquait en quoi consisteraient le ré-entraînement et les points qui seraient travaillés en priorité.

2.1.3.3 Types d'observations utilisées

Afin de noter les performances du participant, le formateur utilisait la grille d'observation spécifique décrite précédemment. Pour chaque item, les scores s'échelonnaient de 0 à 3, 0 signifiant qu'aucune évaluation n'était possible à cause d'une incapacité totale du participant à conduire, 3 qu'il n'y avait pas de difficulté particulière. Des critères plus précis dans la notation avaient été définis a priori, notamment les interventions verbales et/ou physiques du formateur. Si le formateur avait dû intervenir verbalement de 1 à 3 fois pour une même chose, la note pour cet item était de 2, à condition que les situations dans lesquelles il était intervenu n'aient pas mis en danger le conducteur ou les autres usagers. Si le formateur avait dû intervenir plus de 3 fois verbalement, ou intervenir physiquement pour éviter une situation dangereuse, la note pour l'item était de 1. Enfin, s'il avait dû prendre les commandes à chaque fois que la situation se présentait, la note obtenue était de 0.

Par exemple, il arrivait qu'un participant se positionne à gauche dans un rond-point alors qu'il allait tout droit. Il "coupait" alors le rond-point. C'était une erreur de positionnement sur la chaussée, typique des erreurs faites par habitude de conduite, qui ne sont pas toujours en adéquation avec le respect du code de la route. Le formateur le signalait alors au participant et s'attendait à ce qu'il corrige cette erreur aux ronds-points suivants. Si le participant corrigeait son erreur, l'item "positionnement sur la chaussée" était noté 2. Si l'erreur n'était pas corrigée

après 3 rappels des règles, l'item "positionnement sur la chaussée" était noté 1. Par contre, si le formateur devait rectifier la trajectoire, pour éviter de couper la route à un autre véhicule par exemple (mise en danger), il était automatiquement noté 1. S'il devait prendre le volant à chaque rond-point, il était noté 0.

Si un participant obtenait un score de 0, cela signifiait qu'il n'avait pas les capacités cognitives et/ou motrices suffisantes pour conduire. Cette note était éliminatoire et il n'aurait pas pu participer à l'étude. Cela ne s'étant jamais produit, les scores s'échelonnaient en réalité de 1 (des difficultés importantes) à 3 (pas de difficulté). Afin de faciliter la compréhension des scores et la comparaison avec les résultats obtenus aux tests neuropsychologiques, les résultats ont été transformés comme indiqué dans le tableau XV.

Tableau XV : Transformation des scores de la grille d'évaluation et signification des différents score

Score de la grille d'évaluation	Score transformé	Signification
0		aucune évaluation possible
1	-2	difficultés importantes
2	-1	quelques difficultés
3	0	pas de difficulté

Ainsi, les participants présentaient des scores transformés allant de -2 (très difficile, noté 1 dans la grille) à 0 (pas de difficulté particulière, noté 3 dans la grille).

2.2 Ré-entraînement

A la fin du protocole d'évaluation, nous dressions un bilan de l'ensemble des évaluations pour les participants CR. Ce bilan leur était transmis et expliqué par Mme Pothier, la neuropsychologue de l'Hôpital St Jacques. Il permettait de faire le lien avec le ré-entraînement qui suivait cette première évaluation chez les participants CR.

Le ré-entraînement avait pour objectif de travailler les problèmes généraux ou plus spécifiques remarqués lors des évaluations, notamment lors de l'évaluation en conduite réelle. L'idée était d'amener une amélioration de ces capacités déficitaires ou, lorsque ce n'était pas possible, de faire prendre conscience au patient de ses limites afin qu'il adapte sa conduite future en conséquence.

Dans ce but, il était nécessaire de poser un cadre assez rigoureux à ce ré-entraînement. Pour cela, les formateurs de l'ECF ont décidé de « scénarios » et de zones géographiques par-

ticulières, permettant de travailler les divers points évalués dans la grille de notation. Ainsi, chaque personne présentant un profil de difficulté particulier était ré-entraînée d'une façon spécifique, destinée à améliorer les aspects de la conduite identifiés comme déficitaires chez elle. Sans cela, il aurait été impossible d'étudier l'effet du réentraînement. Nous avons donc demandé aux formateurs de l'ECF d'arriver à un consensus sur le ré-entraînement à utiliser en fonction des difficultés, puisque ce ré-entraînement, pour des raisons de ressources humaines, n'était pas réalisable par le même formateur pour toutes les leçons et pour tous les participants.

Lorsqu'une capacité semblait ne pas pouvoir être améliorée (limite de récupération du participant), il convenait néanmoins de la travailler. Si elle n'évoluait pas, le formateur le précisait dans son bilan d'entraînement afin que soient notées d'éventuelles limites. Il fallait également qu'on amène le patient à prendre conscience de ses limites pour qu'il adapte sa conduite en conséquence, soit en évitant la situation identifiée comme difficile, soit en utilisant une autre stratégie de compensation.

A la fin de chaque séance, le formateur réalisait un bilan écrit, expliquant les points travaillés, la manière de les travailler, les problèmes constatés, les éventuelles améliorations et les recommandations pour la séance suivante.

Le cycle de réentraînement durait 3 mois environ, à raison d'une leçon de conduite d'une heure par semaine, soit un total de 12h.

En cas de vacances durant cette période, il était décidé :

- d'interrompre le réentraînement en cas d'absence d'une semaine et moins (une seule séance ratée).
- de reporter la totalité du réentraînement après la période de vacances en cas d'absence de plus d'une semaine (plus d'une séance ratée).

2.3 Deuxième évaluation

La deuxième évaluation comportait, comme la première évaluation, une évaluation de conduite sur simulateur, une batterie de tests neuropsychologiques, et une épreuve de conduite sur route. Toutefois, les contraintes liées au simulateur, à savoir être sûr que le participant n'était pas malade sur le simulateur et que l'on parvenait à enregistrer des données oculométriques, n'existaient plus puisque nous savions déjà que le participant supportait bien le simulateur.

L'ordre de passation des trois évaluations n'était donc pas nécessairement le même que celui de la première évaluation.

3 Plan expérimental et méthodes d'analyses statistiques

3.1 Plan expérimentaux

Le détail des plans expérimentaux est donné en annexe 8.

3.2 Méthodes d'analyses statistiques

Toutes les analyses statistiques présentées dans ce manuscrit de thèse ont été réalisées à l'aide du logiciel STATISTICA© 8.0.

Le nombre de données était parfois suffisant pour utiliser une analyse paramétrique, concernant l'analyse des données au questionnaire de présence ou l'étude des regards sur les panneaux publicitaires par exemple. Les hypothèse ad-hoc ont alors été testés à l'aide d'un *t de Student* (comparaison de 2 échantillons) ou d'une *ANOVA* (comparaison de plus de 2 échantillons). Les hypothèses post-hoc ont été faites avec un *Newman-Keuls*.

Toutefois, nous avions souvent peu de participants dans chaque groupe. Dans ce cas, pour des comparaisons intergroupes sur des données numériques, nous nous sommes orientés vers un test non paramétrique pour échantillons indépendants : *le U de Mann-Whitney*. Lorsque nous considérions la répartition de données ordinales, comme les scores standardisés aux tests neuropsychologiques, nous avons utilisé le *Khi*^{2}.

Cependant, nous avons également eu recours à une analyse clinique, c'est-à-dire au cas par cas, dans de nombreuses situations. En effet, les participants cérébrolésés nécessitaient une analyse individuelle. Nous avons alors situé chaque participant par rapport à l'ensemble du groupe contrôle.

CHAPITRE 6 - ETUDE DES MECANISMES COGNITIFS DEFICITAIRES A TRAVERS LE SIMULATEUR DE CONDUITE, COMPARATIVEMENT AUX TESTS NEUROPSYCHOLOGIQUES ET A L'EVALUATION SUR ROUTE : RESULTATS

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

Les participants ont complété le protocole d'évaluation de la conduite en effectuant les tests neuropsychologiques, l'évaluation de conduite sur simulateur et celle sur route. Dans un premier temps, nous présenterons les résultats obtenus aux différentes évaluations puis nous les comparerons afin de mettre en exergue l'intérêt de combiner ces différents tests pour étudier des déficits.

1 Bilan neuropsychologique

Tous les participants ont effectué notre batterie de tests neuropsychologiques. Elle comportait, entre autres, des tests papier-crayon, des sous-tests de la batterie du TAP, et les 3 sous-tests de l'UFOV. La plupart des ces tests sont standardisés, nous indiquons donc les scores normés. Lorsqu'il n'existe pas de normes ou que la comparaison à la norme n'est pas pertinente, comme pour les résultats à l'échelle d'évaluation des difficultés cognitives (comme Mc Nair qui auto-évalue la plainte mnésique) ou le sous-test du TAP de négligence spatiale unilatérale, nous comparerons les participants cérébrolésés à notre groupe contrôle.

Les résultats obtenus par les participants figurent dans le tableau XVI.

Tout d'abord, nous constatons (tableau XVII) que 80% des participants, tous groupes confondus, ont échoué au test de gestion des priorités (OGP). On voit notamment (tableau XVI) que plus de la moitié des participants contrôles (5 sur 9) ont échoué à ce test. Il s'agit d'un test issu d'un mémoire de Master non publié (Maraccino, 2010) visant à évaluer les capacités de gestion des priorités. Lors de cette étude, les normes n'ont été obtenues que sur un petit échantillon de participants contrôles (10 par groupe d'âge). La référence à cette norme est assez discutable. Nous aurions pu envisager de comparer les participants cérébrolésés (CR et CA) au groupe contrôle, comme on le fait pour le sous-test de négligence spatiale par exemple, si ce test n'était pas sensible à l'âge. En effet, le groupe Co présente un faible effectif (9 participants), avec une variabilité concernant l'âge non négligeable (de 30 à 50 ans). Il nous semble donc préférable d'exclure ce test, peu discriminant, des analyses. Nous pouvons toutefois signaler que tous les participants cérébrolésés (CR et CA) et le participant âgé (PA) avaient échoué à ce test.

Tableau XVI : Scores des participants contrôles (Co), des participants cérébrolésés récents (CR), et des participants cérébrolésés anciens (CA) aux tests neuropsychologiques. En gris figurent les résultats pour lesquels les participants sont déficitaires. Les trois dernières lignes donnent pour chaque participant le nombre de résultats au-dessus d'un écart-type (0), entre -1σ et -2σ (-1) et au-delà de -2σ (-2).

	Co1	Co2	Co3	Co4	Co5	Co6	Co7	Co8	Co9	CR1	CR2	CR3	CR4	CR5	CR6	CA1	CA2	CA3	CA4	PA1
Mémoire de travail auditivo-verbale (empan direct et indirect)	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	0	-1	-2	-2	-2	0	0
Mémoire de travail visuo-spatiale (empan direct et indirect)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-2	-2	-1	0	-2	0	0
Recherche visuelle (TMT A)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-2	-2	-2	0	0	0	-1	0
Flexibilité mentale (TMT B-A)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-2	-2	-2	0	0	0	0
Attention sélective et résistance à l'interférence (Stroop)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-2	0	0	0	0	-1	-1	0	0	0	0
Anticipation (Zoo Map)	0	0	0	0	0	-2	-2	0	0	-1	-2	-2	0	-1	-2	-2	-1	-2	-2	0
Planification (Zoo Map)	0	0	0	0	-1	-2	-2	0	0	-2	-2	-2	0	-2	-2	-2	-2	-2	-2	0
Vitesse de traitement (D2)	0	0	0	0	0	-2	-1	0	0	0	0	0	-2	-2	-2	-2	-1	0	-2	0
Concentration (D2)	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	-1	-1	-2	-2	-1	0	0	-2	0
Attention partagée (Baddeley)	0	-1	0	0	0	0	-1	-2	0	0	-2	0	-2	-1	0	0	-2	0	0	-2
Adaptation au changement (Brixton)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-2	0	-1	-1	-1	0	0	0	0
Gestion des priorités (OGP)	-2	0	-2	-2	0	0	-2	-2	0	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2
Vitesse de traitement dans le champ visuel central (UFOV : test1)	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	-2	0	0	-2	-2	-2	0	0	-1	-1	0
Attention partagée entre vision centrale et périphérique (UFOV : test2)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	-1	-2	-2	-2	-1	0	0	-1	-1
Attention sélective dans le champ visuel périphérique (UFOV : test3)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-2	-2	-2	0	0	0	0	0
Négligence spatiale unilatérale (TAP)	0	3	0	0	3	0	0	0	0	3	1	4	20	16	1	1	0	1	2	1
Alerte phasique (TAP)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-2	0	-1	0	0	0	0	0	-1
Inhibition comportementale (TAP : Go/NoGo)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	-2	0	0	-1	-1
Attention partagée (TAP)	0	-1	0	0	0	-1	-1	0	0	-1	0	-1	-1	-2	-2	-2	-2	0	-2	0
Balayage visuel (TAP)	0	-2	0	0	-1	-1	-1	0	0	-1	-2	-2	0	-2	-2	-2	0	-1	-2	0
Mc Nair	11	31	21	31	12	23	29	27	34	28	11	83	69	33	48	23	26	27	32	31
Nombre de scores normaux (0)	19	18	20	20	19	15	15	19	21	13	16	8	8	4	4	7	14	14	10	16
Nombre de scores faibles (-1)	1	2	0	0	2	3	3	0	0	4	0	5	4	4	3	5	2	2	4	3
Nombre de scores déficitaires (-2)	1	1	1	1	0	3	3	2	0	4	5	8	9	13	14	9	5	5	7	2

Tableau XVII : Pourcentage de scores 0, -1 et -2 obtenus pour l'ensemble des participants à chaque item des tests neuropsychologiques (Co, CR, CA et PA confondus).

	0	-1	-2
Mémoire de travail auditivo-verbale (empan direct et indirect)	65	20	15
Mémoire de travail visuo-spatiale (empan direct et indirect)	75	10	15
Recherche visuelle (TMT A)	80	5	15
Flexibilité mentale (TMT B-A)	85	0	15
Attention sélective et résistance à l'interférence (Stroop)	85	10	5
Anticipation (Zoo Map)	45	15	40
Planification (Zoo Map)	40	5	55
Vitesse de traitement (D2)	60	10	30
Concentration (D2)	65	20	15
Attention partagée (Baddeley)	60	15	25
Adaptation au changement (Brixton)	80	15	5
Gestion des priorités (OGP)	20	0	80
Vitesse de traitement dans le champ visuel central (UFOV : test1)	65	20	15
Attention partagée entre vision centrale et périphérique (UFOV : test2)	60	25	15
Attention sélective dans le champ visuel périphérique (UFOV : test3)	85	0	15
Alerte phasique (TAP)	85	10	5
Inhibition comportementale (TAP : Go/NoGo)	80	15	5
Attention partagée (TAP)	45	30	25
Balayage visuel (TAP)	40	25	35

Ensuite, nous pouvons remarquer que la tâche de planification évaluée par le Zoo Map met en échec 55% des participants. Toutefois, cela ne concerne que 2 contrôles sur 9. Ce test est donc discriminant entre les participants contrôles et cérébrolésés et sera conservé dans les analyses.

Dans un premier temps, nous nous intéresserons aux différences qui peuvent exister entre les groupes de participants. Nous comparerons donc les participants cérébrolésés récents (CR) et anciens (CA) au groupe contrôle. Dans un second temps, nous nous pencherons sur le profil des participants cérébrolésés et notamment sur les différences intra-groupe qui peuvent exister.

1.1 Etude inter-groupes

1.1.1 Tests normés

Tout d'abord, lorsqu'on s'intéresse aux scores normés, on peut observer dans le tableau XVIII que les CR et les CA ont obtenu, en moyenne, davantage de scores déficitaires (-2) que les Co (5,50 pour les CR et les CA contre 0,78 pour les CR). A l'inverse, les Co ont en

moyenne davantage de scores 0 que les CR (15,78 pour les Co, contre 9,17 pour les CR et 9,25 pour les CA). Les CR et les CA présentent au premier abord assez peu de différences concernant le nombre de scores moyens obtenus.

Un Khi a révélé une différence significative à la fois en comparaison entre les trois groupes, X1 (4, N = 338) = 72,17, p = .001, mais aussi en comparant 2 à 2 le groupe contrôle au groupe CR (X2 (2, N = 266) = 68,65, p = .001), puis au groupe CA (X3 (2, N = 234) = 40,77, p = .001). La répartition des scores "0" , "-1", et "-2" varie donc en fonction du groupe. Toutefois, il n'y a pas de différence significative entre les deux groupes cérébrolésés CR et CA (X4 (2, N = 176) = 1,80, p > 0,05).

Tableau XVIII : Nombre moyen de scores 0 (normal), -1 (faible) et -2 (déficitaire) obtenus par groupe pour les participants contrôles (Co), cérébrolésés récents (CR) et cérébrolésés anciens (CA), sur les 18 scores normés de la batterie de tests neuropsychologiques.

	Co	CR	CA
Nombre moyen de scores 0	15,78 (σ = 2,64)	9,17 (σ = 3,76)	9,25 (σ = 3,40)
Nombre moyen de scores -1	1,44 (σ = 1,67)	3,33 (σ = 1,75)	3,25 (σ = 1,50)
Nombre moyen de scores -2	0,78 (σ = 1,09)	5,50 (σ = 2,88)	5,50 (σ = 1,91)

Toutefois, le nombre moyen de scores 0, -1 et -2 ne nous renseigne pas sur le profil de déficits des participants. Des tests peuvent être davantage échoués que d'autres, comme nous l'avons déjà signalé pour la planification au Zoo Map. D'un groupe à l'autre, les tests échoués ne sont pas nécessairement les mêmes. En effet, nous avons vu dans le chapitre 1 (section 3.2) que les personnes cérébrolésées souffraient de troubles cognitifs assez larges (attention, ralentissement, troubles de la mémoire, etc.). Nous pouvons donc nous attendre à ce que les participants cérébrolésés, CR et CA, présentent des scores déficitaires dans les tests évaluant ces domaines.

Comme nous l'avions vu précédemment, la tâche de planification du Zoo Map met largement en échec les participants cérébrolésés (83% des CR et 100% des CA) (cf. tableau XIX). L'anticipation est également notée déficitaire avec ce test chez plus de la moitié des participants cérébrolésés (50% des CR et 75% des CA). Le test du Zoo Map est donc échoué dans son ensemble par les CR et les CA. Un seul CR (CR4) obtient un score normal ("0").

Tableau XIX : Pourcentage de scores 0 (normal), -1 (faible) et -2 (déficitaire) par groupe pour les participants contrôles (Co), cérébrolésés récents (CR) et cérébrolésés anciens (CA) sur les 18 items de la batterie de tests neuropsychologique. En rouge, les items avec 50% ou plus de scores "-2".

	Co			CR			CA		
	0	-1	-2	0	-1	-2	0	-1	-2
Mémoire de travail auditivo-verbale (empan direct et indirect)	88,89	11,11	0	50	50	0	25	0	75
Mémoire de travail visuo-spatiale (empan direct et indirect)	100	0	0	50	16,67	33,33	50	25	25
Recherche visuelle (TMT A)	100	0	0	50	0	50	75	25	0
Flexibilité mentale (TMT B-A)	100	0	0	66,67	0	33,33	75	0	25
Attention sélective et résistance à l'interférence (Stroop)	100	0	0	66,67	16,67	16,67	75	25	0
Anticipation (Zoo Map)	77,78	0	22,22	16,67	33,33	50	0	25	75
Planification (Zoo Map)	66,67	11,11	22,22	16,67	0	83,33	0	0	100
Vitesse de traitement (D2)	77,78	11,11	11,11	50	0	50	25	25	50
Concentration (D2)	88,89	11,11	0	33,33	33,33	33,33	50	25	25
Attention partagée (Baddeley)	66,67	22,22	11,11	50	16,67	33,33	75	0	25
Adaptation au changement (Brixton)	100	0	0	50	33,33	16,67	75	25	0
Vitesse de traitement dans le champ visuel central (UFOV : test1)	88,89	11,11	0	33,33	16,67	50	50	50	0
Attention partagée entre vision centrale et périphérique (UFOV : test2)	100	0	0	16,67	33,33	50	50	50	0
Attention sélective dans le champ visuel périphérique (UFOV : test3)	100	0	0	50	0	50	100	0	0
Alerte phasique (TAP)	100	0	0	66,67	16,67	16,67	100	0	0
Inhibition comportementale (TAP : Go/NoGo)	100	0	0	83,33	16,67	0	50	25	25
Attention partagée (TAP)	66,67	33,33	0	16,67	50	33,33	25	0	75
Balayage visuel (TAP)	55,56	33,33	11,11	16,67	16,67	66,67	25	25	50

Hormis chez CR4, le Zoo Map permet de mettre en évidence un défaut d'anticipation/planification chez les cérébrolésés. Cependant, la réussite à la tâche de planification du Zoo Map est conditionnée par la réussite de l'aspect anticipatif de la tâche. Cela signifie que pour espérer avoir un bon score en planification, il est nécessaire d'avoir anticipé. Ainsi, un participant qui a échoué en anticipation ne peut pas réussir en planification. Il est donc relativement difficile sur la seule base de ce test de mesurer exactement la part d'anticipation et de planification réellement déficitaires. Néanmoins, les deux processus sont très importants en conduite et, bien qu'ils soient souvent confondus, leur impact sur l'activité de conduite n'est

pas le même. En effet, l'anticipation permet d'aller chercher l'information plus tôt et/ou plus loin, afin de préparer la réponse adéquate. C'est aussi ce qui amène une conduite plus fluide, plus lissée, sans à-coups de vitesse ou de trajectoire. La planification, quant à elle, consiste à mettre en place une action (ou une suite d'actions) appropriée(s) en accord avec les contraintes physiques et temporelles de l'action. Elle est donc également nécessaire en conduite. Ainsi, les conséquences potentielles d'un déficit dans l'un ou l'autre de ces processus, sur la conduite nécessitent d'approfondir le diagnostic obtenu avec les tests neuropsychologiques. Cela sera fait à travers les évaluations de conduite sur route et sur simulateur.

D'autres tests mettent également en difficulté nos deux groupes cérébrolésés. Par exemple, le score en vitesse de traitement obtenu avec le D2 est déficitaire chez 50% des CR et des CA. Cela va dans le sens de nos hypothèses puisque la vitesse de traitement fait partie des processus classiquement notés déficitaires dans la littérature chez les personnes cérébrolésées. Comme nous l'avons remarqué précédemment, les tests impliquant un traitement visuel sont souvent échoués, comme nous pouvons le voir avec la tâche de balayage visuel du TAP. On peut mettre en lien ce résultat avec des déficits observés chez les CR en recherche visuelle (évaluée avec le TMT A) et avec les sous-tests de l'UFOV, qui impliquent également du traitement visuel. Or, une grande partie des informations de l'environnement que nous utilisons en conduite provient de la vision. Avoir des difficultés pour détecter ou traiter ce genre d'informations présente un danger relativement important en conduite automobile. Toutefois, les sous-tests de l'UFOV et le TMT A ne sont pas échoués par les CA.

Par ailleurs, les CA présentent de scores déficitaires qui n'apparaissent pas chez les CR, en mémoire de travail auditivo-verbale (empan direct et indirect) et au test d'attention partagée du TAP.

Un déficit d'attention partagée devrait avoir des implications en conduite non négligeables puisqu'il faut constamment allouer ces ressources attentionnelles en fonction des besoins : besoins liés à la gestion du véhicule (volant, pédales, levier de vitesse, position sur la voie, etc.) et besoins liés à l'interaction avec l'environnement (autres usagers, réglementation, etc.) par exemple.

Remarquons que seulement 1/4 des CA est noté déficitaire au test d'attention partagée de Baddeley contre 3/4 au test d'attention partagée du TAP. Comme nous l'avions vu dans le chapitre 3, il n'y a rien de surprenant à cela puisqu'ils n'évaluent pas exactement la même chose même s'ils font tous les deux appel au partage des ressources attentionnelles.

1.1.2 Tests non normés

Pour deux tests, le Mc Nair et le test de négligence spatiale unilatérale du TAP, il n'existe pas de norme établie. Nous avons donc comparé les participants cérébrolésés (CR et CA) au groupe contrôle. Pour chaque test, nous avons calculé la moyenne et l'écart-type (cf. tableau XX). Les participants CR et CA sont ainsi situés en nombre d'écart-type par rapport à la moyenne calculée (cf. tableau XXI).

Tableau XX : Moyennes et écart-type du groupe contrôle pour les tests de négligence et du Mc Nair.

	Négligence	Mc Nair
moyenne	0,67 (σ = 1,32)	24,33 (σ = 8,32)

On peut ainsi positionner en nombre d'écart-type tous les participants par rapport à notre groupe contrôle pour les deux tests (tableau XXI). Pour ces deux tests, un score élevé est négatif, c'est-à-dire qu'un score élevé au test de négligence signifie qu'il y a une négligence spatiale unilatérale (NSU), de même qu'un score élevé au Mc Nair signifie qu'il y a une forte plainte mnésique. Les participants ont donc un score de "-1" lorsqu'ils se situent entre +1 et +2 écarts-types du groupe contrôle, "-2" lorsqu'ils se situent à plus de +2 écarts-types du groupe contrôle, "0" lorsqu'ils se situent entre -1 et +1 écart-type du groupe contrôle "+1" lorsqu'ils se situent entre -1 et -2 écarts-types du groupe contrôle, et "+2" lorsqu'ils se situent à plus de -2 écarts-types du groupe contrôle.

Tableau XXI : Scores transformés pour tous les participants au test de négligence spatiale et au Mc Nair.

	Co1	Co2	Co3	Co4	Co5	Co6	Co7	Co8	Co9	PA1
Négligence spatiale unilatérale (TAP)	0	-1	0	0	-1	0	0	0	0	0
Mc Nair	+1	0	0	0	+1	0	0	0	-1	0

	CR1	CR2	CR3	CR4	CR5	CR6	CA1	CA2	CA3	CA4
Négligence spatiale unilatérale (TAP)	-1	0	-2	-2	-2	-2	0	0	0	-1
Mc Nair	0	+1	-2	2-	-1	-2	0	0	0	0

On remarque que seuls des participants CR ont des scores déficitaires au test de négligence et au Mc Nair, comparativement aux contrôles. Les participants CR3, CR4 et CR5 semblent avoir une NSU gauche (d'après les tests car il y a plus d'omissions à gauche). Ce résultat va

dans le sens des déficits que nous avions observés sur les scores normés aux tests impliquant un traitement visuel. Cela signifie qu'en conduite, il leur sera difficile de percevoir tous les éléments à gauche de la scène visuelle puisqu'ils ne peuvent pas explorer cette partie.

Concernant le Mc Nair, les participants CR3, CR4, et CR6 ont une forte plainte comparativement aux participants contrôles (plus de 2 écarts-types). Ces résultats ne sont pas surprenant puisqu'ils ont réellement plus de difficultés que les participants contrôles. Toutefois, nous pouvons remarquer que CR3 présente la plus forte plainte (cf. tableau XVI) alors qu'il a les meilleurs résultats parmi le groupe CR. Cela pourrait s'expliquer par le fait que les personnes cérébrolésées peuvent être sujettes à des séquelles psychiques telle que l'anxiété.

A l'inverse, nous notons qu'un participant, CR1, présente un score un peu plus faible que les contrôles au Mc Nair (à -1σ), ce qui signifie qu'il a une plainte plus faible relativement aux contrôles. Cela nous orienterait vers une anosognosie (pas de conscience des troubles), raison pour laquelle il déclare peu de plainte en dépit de difficultés réelles, comparé aux contrôles.

1.2 Etude intra-groupe

Le profil de déficits des cérébrolésés étant connu pour être très varié d'un individu à l'autre, il convient d'observer plus attentivement les résultats par participant (tableau XVI).

Lorsqu'on s'intéresse aux profils des individus, il convient de séparer les deux groupes de participants. En effet, les lésions des CA étant bien plus anciennes que celles des CR, ils présentent une récupération différente. Les regroupements chez les CR sont proposés dans le tableau XXII, et chez les CA dans le tableau XXIII.

Concernant les participants cérébrolésés récents (CR), nous pouvons distinguer 2 catégories de participants. La première, constituée de CR5 et CR6, présentait un profil général déficitaire (en rouge dans le tableau XXII), notamment aux tests impliquant les processus attentionnels et nécessitant un traitement visuel. On voit ainsi que les participants rencontraient des difficultés relatives à la mémoire de travail visuo-spatiale, la recherche visuelle et la flexibilité mentale (TMT), l'anticipation et la planification (Zoo Map), la vitesse de traitement et la concentration (D2), les sous-tests de l'UFOV, et les sous-tests d'attention partagée et de balayage visuel de la TAP. Ces deux participants devraient présenter des difficultés importantes en conduite, du fait des nombreux processus déficitaires.

Tableau XXII : Regroupement des participants cérébrolésés récents (CR) sur la base des résultats aux tests neuropsychologiques.

	CR5	CR6	CR2	CR3	CR1	CR4
Mémoire de travail auditivo-verbale (empan direct et indirect)	0	-1	0	-1	0	-1
Mémoire de travail visuo-spatiale (empan direct et indirect)	-2	-2	0	0	0	-1
Recherche visuelle (TMT A)	-2	-2	0	0	0	-2
Flexibilité mentale (TMT B-A)	-2	-2	0	0	0	0
Attention sélective et résistance à l'interférence (Stroop)	0	-1	0	0	-2	0
Anticipation (Zoo Map)	-1	-2	-2	-2	-1	0
Planification (Zoo Map)	-2	-2	-2	-2	-2	0
Vitesse de traitement (D2)	-2	-2	0	0	0	-2
Concentration (D2)	-2	-2	0	-1	0	-1
Attention partagée (Baddeley)	-1	0	-2	0	0	-2
Adaptation au changement (Brixton)	-1	-1	0	-2	0	0
Vitesse de traitement dans le champ visuel central (UFOV : test1)	-2	-2	0	0	-2	-2
Attention partagée entre vision centrale et périphérique (UFOV : test2)	-2	-2	0	-1	-1	-2
Attention sélective dans le champ visuel périphérique (UFOV : test3)	-2	-2	0	0	0	-2
Négligence spatiale unilatérale (TAP)	16	1	1	4	3	20
Alerte phasique (TAP)	-1	0	0	-2	0	0
Inhibition comportementale (TAP : Go/NoGo)	0	0	0	-1	0	0
Attention partagée (TAP)	-2	-2	0	-1	-1	-1
Balayage visuel (TAP)	-2	-2	-2	-2	-1	0
Mc Nair	33	48	11	83	28	69

A cette première catégorie, nous pouvons en opposer une seconde composée de CR2 et CR3 qui présentaient un profil général peu déficitaire, mis à part les scores incriminés chez la plupart des cérébrolésés, c'est-à-dire en anticipation/planification (zoo map) et au test de balayage visuel de la TAP. Les difficultés en conduite devraient principalement concerner l'anticipation et la prise de décision, avec une détection plus tardive des informations pertinentes.

Toutefois, deux participants semblaient présenter un profil unique : CR1 et CR4. Concernant CR4, il a échoué en vitesse de traitement (au D2 et aux sous-tests de l'UFOV 1, 2 3) en attention partagée (Baddeley) et présentait une NSU gauche. Ce participant devrait être mis en difficulté pour percevoir les objets situés dans l'hémichamp visuel gauche lors de la conduite. De plus, concernant les objets vus, il devrait mettre plus de temps pour les traiter.

Il est plus difficile de définir le profil de CR1. En effet, ce participant présentait des performances fluctuantes durant une même passation. Cela est probablement dû à un défaut de concentration et une fatigabilité. Une bonne illustration de cette caractéristique est donnée par les résultats à l'UFOV qui s'amélioraient en même temps que la difficulté augmentait. Toutefois, ces fluctuations étaient également visibles d'un jour à l'autre (patient suivi à l'hôpital). Il

est à noter que cette personne présentait des antécédents psychiatriques qui peuvent influer sur les résultats aux différentes épreuves et peut-être expliquer ce profil inconstant.

Tableau XXIII : Regroupement des participants cérébrolésés anciens (CA) sur la base des résultats aux tests neuropsychologiques.

	CA1	CA2	CA3	CA4
Mémoire de travail auditivo-verbale (empan direct et indirect)	-2	-2	-2	0
Mémoire de travail visuo-spatiale (empan direct et indirect)	-1	0	-2	0
Recherche visuelle (TMT A)	0	0	0	-1
Flexibilité mentale (TMT B-A)	-2	0	0	0
Attention sélective et résistance à l'interférence (Stroop)	-1	0	0	0
Anticipation (Zoo Map)	-2	-1	-2	-2
Planification (Zoo Map)	-2	-2	-2	-2
Vitesse de traitement (D2)	-2	-1	0	-2
Concentration (D2)	-1	0	0	-2
Attention partagée (Baddeley)	0	-2	0	0
Adaptation au changement (Brixton)	-1	0	0	0
Vitesse de traitement dans le champ visuel central (UFOV : test1)	0	0	-1	-1
Attention partagée entre vision centrale et périphérique (UFOV : test2)	-1	0	0	-1
Attention sélective dans le champ visuel périphérique (UFOV : test3)	0	0	0	0
Négligence spatiale unilatérale (TAP)	1	0	1	2
Alerte phasique (TAP)	0	0	0	0
Inhibition comportementale (TAP : Go/NoGo)	-2	0	0	-1
Attention partagée (TAP)	-2	-2	0	-2
Balayage visuel (TAP)	-2	0	-1	-2
Mc Nair	23	26	27	32

Concernant les participants cérébrolésés anciens, ces derniers semblent présenter une plus grande homogénéité de leurs profils. Ce résultat n'est pas surprenant étant donné l'ancienneté des lésions, on peut en effet supposer que les processus de récupération et de compensation sont aboutis chez ces participants contrairement aux CR. Ainsi, nous pouvons noter globalement une atteinte de la mémoire de travail auditivo-verbale, de l'anticipation et la planification, de l'attention partagée (TAP) et du balayage visuel (cf. tableau XXIII). Toutefois, nous pouvons remarquer quelques exceptions : CA2 n'avait pas de difficulté en balayage visuel, CA3 n'avait pas échoué au test d'attention partagée du TAP et CA4 ne montrait pas de déficit en mémoire de travail.

1.3 Synthèse et implications pour la conduite

Si les profils des participants cérébrolésés CR et CA différent d'un participant à l'autre, nous avons tout de même pu constater un déficit commun en anticipation et planification, ainsi que des difficultés de balayage visuel. Ces processus sont primordiaux en conduite automobile. Leur mise en échec devrait avoir des répercussions importantes sur les capacités de conduite des participants CR et CA.

Par ailleurs, chez les participants CR, le traitement des informations visuelles semble particulièrement difficile. Or, une grande partie des informations de l'environnement de conduite provient de la vision. Une atteinte du traitement de ce type d'informations devrait s'observer en conduite, notamment lors de l'exploration visuelle pour la recherche d'informations pertinentes.

Néanmoins, nous avons vu que tous les participants CR et CA ne présentaient pas les mêmes troubles. Dans chacune des prochaines analyses, il sera donc nécessaire d'étudier les profils individuels des participants.

2 Résultats sur route

Les tests sur route ont été effectués avec le même formateur d'auto-école qui remplissait une grille d'évaluation précise. Les participants obtenaient des notes entre 0 et 3, 0 signifiant qu'aucune évaluation n'était possible à cause d'une incapacité totale du participant à conduire, 3 qu'il n'y avait pas de difficulté particulière. Afin de faciliter la compréhension de scores et la comparaison avec les résultats obtenus aux tests neuropsychologiques, les résultats ont été transformés (cf. chapitre 4, section 2.1.2.3). Ils sont présentés ici sous la forme de scores allant de -2 (très difficile, noté 1 par le formateur) à 0 (pas de difficulté particulière, noté 3 par le formateur). Les scores obtenus par chaque participant sont fournis dans le tableau XXIV.

Tout d'abord, nous pouvons remarquer (tableau XXV) que jamais la moitié des participants, tous participants confondus, n'a été mise en échec (score "-2") pour un item, contrairement à ce que nous avions noté avec les tests neuropsychologiques. La notation peut donc sembler moins sévère lors de l'évaluation sur route. En réalité, rappelons qu'il est possible de mettre en place une compensation des processus déficitaires lors de l'évaluation sur route, alors que ce n'est pas le cas lors des tests neuropsychologiques.

Tableau XXIV : Scores des participants contrôles (Co), des participants cérébrolésés récents (CR), et des participants cérébrolésés anciens (CA) à l'évaluation de conduite sur route, En gris figurent les résultats pour lesquels les participants sont considérés comme déficitaires. Les trois dernières lignes donnent pour chaque participant le nombre de résultats bons (0), faibles (-1) et déficitaires (-2).

	Co1	Co2	Co3	Co4	Co5	Co6	Co7	Co8	Co9	CR1	CR2	CR3	CR4	CR5	CR6	CA1	CA2	CA3	CA4	PA1
Adaptation de l'allure en agglomération	-1	-1	-1	-1	0	-1	0	-1	-1	-1	-2	-1	-1	-1	-2	-1	-1	-1	-1	-1
Adaptation de l'allure hors agglomération	0	0	0	-1	0	-1	0	0	-1	-2	-1	0	-1	-2	-1	-1	-1	-1	-1	0
Attention partagée (discussion)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	0	-2	-1	-1	0	-1	-2	-1	0
Anticipation	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	-1	-2	-1	-1	-2	-1	-1	0	-1	-2	-1
Anticipation (conduite commentée)	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-2	-2	0	-1	-2	-2	-1	-1	-2	-2	-1
Vitesse de traitement (action tardive)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	-1	-2	-1	-1	-1	-1	-2	0
Exploration visuelle (conduite commentée)	-1	-1	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-2	0	-1	-2	-2	-1	-1	-2	-1	-1
Mobilité du regard	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-2	-2	-1	-1	-2	-1	-1	-2	-1	-1
Acquisition de l'information	0	0	0	0	0	-1	-1	0	0	-1	-2	0	-1	-2	-1	-1	-1	-1	-2	-1
Observation de l'environnement : détecter/percevoir	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	-1	-1	-2	-1	-1	-2	-2	-1	-1	-1	-1	-1
Placement sur la voie de circulation	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-2	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
Maintien de la trajectoire	-1	-1	-1	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-2	-1	-1	-1	-2	-1
Distances de sécurité longitudinale ou latérale	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	0	0	-1	0	0	0	0	0	0
Respect de la signalisation	0	0	0	-1	0	-1	0	-1	-1	-1	-1	0	-1	-2	-1	0	-2	-2	-1	-1
Respect des autres usagers/citoyenneté	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0
Appréciation des distances/vitesses	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-2	0	-1	-2	-2	-1	-2	0	-1	-1	0
Espaces latéraux (manœuvres)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	0	-1	-1	0	0	0	0	0	0
Contrôles rétroviseur gauche	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	-1	-1	-1	-1	-1	-2	-1	-1	-1	-1	-1	-1
Contrôles rétroviseur droit	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	-1	-1	-1	-2	-1	-2	-1	-1	-1	-1	-1	-1
Contrôles rétroviseur central	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	-1	-1	-1	-2	-1	-2	-1	-1	-1	-1	-1	-1
Angles morts	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-2	-2	-2	-1	-2	-1	-2	-1	-2	-2	-1
Nombre de scores 0	11	10	11	10	11	6	10	13	8	1	3	10	2	1	3	5	5	3	2	7
Nombre de scores -1	10	11	10	11	10	15	11	8	13	16	9	7	17	7	12	14	15	12	13	14
Nombre de scores -2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	9	4	2	13	6	2	1	6	6	0

Ensuite, nous remarquons (en rouge dans le tableau XXV) que de nombreux items sont notés -1 pour la majorité des participants. En effet, d'après les critères de l'évaluation sur route, les participants obtiennent un score de "-1" dès lors qu'ils font une erreur, même si elle est corrigée par la suite. Ainsi, une erreur, qu'elle soit due à une difficulté de conduite ou à une mauvaise habitude de conduite sera notée de la même manière tant qu'elle ne se reproduit pas plus de trois fois, que le formateur n'a pas à intervenir sur les commandes ou qu'elle ne met pas en danger le participant ou les autres usagers. Nous signalons déjà ici une limite de l'évaluation sur route, qui manque certainement de finesse quant à la notation utilisée afin de discriminer les types d'erreurs commises (du fait du manque de temps et de moyens technique d'approfondir la cause de l'erreur).

Tableau XXV : Pourcentage de scores 0, -1 et -2 obtenus pour l'ensemble des participants à chaque item de l'évaluation sur route (Co, CR, CA et PA confondus).

	0	-1	-2
Adaptation de l'allure en agglomération	10	80	10
Adaptation de l'allure hors agglomération	40	50	10
Attention partagée (discussion)	60	30	10
Anticipation	45	40	15
Anticipation (conduite commentée)	5	65	30
Vitesse de traitement (action tardive)	60	30	10
Exploration visuelle (conduite commentée)	15	65	20
Mobilité du regard	5	75	20
Acquisition de l'information	40	45	15
Observation de l'environnement : détecter/percevoir	5	80	15
Placement sur la voie de circulation	0	95	5
Maintien de la trajectoire	5	85	10
Distances de sécurité longitudinale ou latérale	85	15	0
Respect de la signalisation	35	50	15
Respect des autres usagers/citoyenneté	95	5	0
Appréciation des distances/vitesses	60	20	20
Espaces latéraux (manœuvres)	80	20	0
Contrôles rétroviseur gauche	5	90	5
Contrôles rétroviseur droit	5	85	10
Contrôles rétroviseur central	5	85	10
Angles morts	0	65	35

L'analyse des résultats portera tout d'abord sur les comparaisons entre les groupes de participants, notamment entre les groupes cérébrolésés (CR et CA) et le groupe contrôle. Ensuite, nous étudierons plus en détail les résultats des participants cérébrolésés.

2.1 Etude inter-groupes

Les résultats globaux par groupe sont présentés dans le tableau XXVI. On peut remarquer l'absence d'items notés déficitaires (scores -2) chez les participants contrôles, contrairement aux CR et CA. A l'opposé, les CR ont le plus grand nombre moyen de scores -2. Par ailleurs, les participants cérébrolésés CR et CA montrent un nombre moyen de scores 0 (pas de difficulté) faible comparativement aux contrôles.

Tableau XXVI : Nombre moyen de scores 0 (normal), -1 (faible) et -2 (déficitaire) obtenus par groupe pour les participants contrôles (Co), cérébrolésés récents (CR) et cérébrolésés anciens (CA), sur les 21 items de l'évaluation sur route.

	Co	CR	CA
Nombre moyen de 0	10 (σ = 2,00)	3,33 (σ = 3,39)	3,75 (σ = 1,50)
Nombre moyen de -1	11 (σ = 2,00)	11,33 (σ = 4,41)	13,50 (σ = 1,29)
Nombre moyen de -2	0	6,33 (σ = 4,03)	3,75 (σ = 3,81)

Les comparaisons entre les groupes à l'aide du test du Khi montrent effectivement une différence significative de la répartition des scores 0, -1, et -2 entre les Co/CR et entre les Co/CA mais pas entre CR/CA (cf. tableau XXVII).

Tableau XXVII : Calcul du Khi² sur l'effectif total de scores 0, -1, et -2 pour les groupes Co, CR, et CA.

Comparaison effectuée	**Co/CR**	**Co/CA**	**CR/CA**
ddl	2	2	2
Khi² observé	78,85	48,61	4,06
Khi² théorique	5,99	5,99	5,99
Seuil de significativité (p)	7,5E-18	2,7E-11	0,13

On remarque chez les participants CR une variabilité plus importante que dans les deux autres groupes (cf. tableau XXVI). Après la comparaison intergroupe, il sera donc nécessaire de regarder également les résultats individuels.

Le tableau XXVIII fournit le détail des scores standardisés obtenus par chaque groupe de participants. Nous pouvons voir que les deux groupes cérébrolésés CR et CA ont 50% d'échec ou plus en anticipation lors de la conduite commentée et au contrôle des angles morts. Or, ces

deux items impliquent à la fois du traitement visuel et de l'attention partagée. En effet, lors du parcours commenté, le participant devait verbaliser ce qu'il voyait le plus loin possible (anticiper) tout en conduisant. Le contrôle des angles morts sollicitait en plus la mémoire de travail puisqu'il fallait garder en mémoire ce qui était devant le participant tout en contrôlant et traitant les informations sur le côté du véhicule. Ces résultats corroborent en partie ce que nous avions observé avec les tests neuropsychologiques, notamment un déficit d'anticipation et des difficultés, pour certains cérébrolésés, dans le traitement des informations visuelles.

Tableau XXVIII : Pourcentage de scores 0 (normal), -1 (faible) et -2 (déficitaire) par groupe pour les participants contrôles (Co), cérébrolésés récents (CR) et cérébrolésés anciens (CA) sur les 21 items de l'évaluation sur route. En rouge, les items avec 50% ou plus de scores "-2".

	Co			CR			CA		
	0	-1	-2	0	-1	-2	0	-1	-2
Adaptation de l'allure en agglomération	22	78	0	0	67	33	0	100	0
Adaptation de l'allure hors agglomération	67	33	0	17	50	33	0	100	0
Attention partagée (discussion)	100	0	0	17	67	17	25	50	25
Anticipation	89	11	0	0	67	33	25	50	25
Anticipation (conduite commentée)	0	100	0	17	17	67	0	50	50
Vitesse de traitement (action tardive)	100	0	0	33	50	17	0	75	25
Exploration visuelle (conduite commentée)	22	78	0	17	33	50	0	75	25
Mobilité du regard	11	89	0	0	50	50	0	75	25
Acquisition de l'information	78	22	0	17	50	33	0	75	25
Observation de l'environnement : détecter/percevoir	11	89	0	0	50	50	0	100	0
Placement sur la voie de circulation	0	100	0	0	83	17	0	100	0
Maintien de la trajectoire	11	89	0	0	83	17	0	75	25
Distances de sécurité longitudinale ou latérale	100	0	0	50	50	0	100	0	0
Respect de la signalisation	56	44	0	17	67	17	25	25	50
Respect des autres usagers/citoyenneté	100	0	0	100	0	0	75	25	0
Appréciation des distances/vitesses	100	0	0	17	33	50	25	50	25
Espaces latéraux (manœuvres)	100	0	0	33	67	0	100	0	0
Contrôles rétroviseur gauche	11	89	0	0	83	17	0	100	0
Contrôles rétroviseur droit	11	89	0	0	67	33	0	100	0
Contrôles rétroviseur central	11	89	0	0	67	33	0	100	0
Angles morts	0	100	0	0	33	67	0	25	75

A ce propos, le traitement visuel était particulièrement déficitaire chez les CR lors des tests neuropsychologiques. Or, nous pouvons observer que plus de 50% des CR ont échoué dans d'autres items impliquant ce traitement : la mobilité du regard, l'exploration visuelle lors de la conduite commentée et l'observation de l'environnement. Ce pattern est cohérent avec ce qui avait été trouvé précédemment. L'évaluation sur simulateur devrait ici montrer tout son intérêt

puisque nous pourrons étudier précisément l'exploration du regard à l'aide de l'oculomètre. Nous nous attendons ainsi à retrouver des déficits en anticipation et, de manière plus générale, dans le traitement des informations visuelles.

2.2 Etude intra-groupe

Nous avons déjà mis en évidence des items majoritairement échoués, le contrôle des angles morts et l'anticipation lors de la conduite commentée. Cependant étant donné la grande disparité entre les participants, nous allons à présent nous intéresser davantage aux profils individuels qui peuvent émerger (cf. tableau XXIX).

Tableau XXIX : Nombre de scores 0 (normal), -1 (faible) et -2 (déficitaire) obtenus par les participants cérébrolésés récents (CR) et cérébrolésés anciens (CA), sur les 21 scores de l'évaluation sur route. Les participants ont été classés selon le nombre de score -2 obtenu, du plus petit au plus grand.

	CA2	CR4	CA1	CR1	CR3	CA3	CA4	CR6	CR2	CR5
Nombre de 0	5	2	5	1	10	3	2	3	3	1
Nombre de -1	15	17	14	16	7	12	13	12	9	7
Nombre de -2	1	2	2	4	4	6	6	6	9	13

Nous pouvons noter que CR5 est le participant qui avait le plus grand nombre de scores -2. A l'opposé, CR3 avait obtenu 10 items notés 0. Les participants CA2, CR4, CA1 et CR1, quant à eux, présentaient peu de difficultés sévères (de 1à 4 items à -2) mais le nombre élevé d'items à -1 (de 14 à 17) pourrait laisser présager des difficultés légères mais plus étendues.

Par ailleurs, nous nous sommes intéressés plus particulièrement à la réussite ou l'échec des items mettant en jeu des aspects visuels. Nous avons ainsi pu constater que nous pouvions classer les individus par rapport à leur score aux items impliquant les aspects visuels (en bleu dans le tableau XXX). Plus on se déplace vers la droite dans le tableau XXX, plus le participant a des scores déficitaires dans les items nécessitant la vision.

Nous constatons que CR4 et CA2 présentaient assez peu de scores déficitaires dans l'ensemble et aucun déficit dans les items impliquant la vision. CR1 et CA1 présentaient peu de scores déficitaires en général mais quelques uns dans les items impliquant la vision. CR3 était moyennement déficitaire dans les aspects visuels, mais sans implication des autres items, con-

trairement à CR6, CA3, et CA4 qui avaient à peu près le même profil visuel ainsi que quelques déficits annexes. On pourrait dire de CR2 qu'il était globalement déficitaire dans les aspects visuels alors que CR5 était globalement déficitaire, peu importe les items.

Tableau XXX :Classement des participants cérébrolésés CR et CA sur la base du nombre de score -2 obtenus à l'évaluation sur route, du plus petit au plus grand.

	CR4	CR1	CR3	CR6	CR5	CA2	CA1	CA3	CA4	CR2
Angles morts	-1	-2	-2	-1	-2	-1	-2	-2	-2	-2
Anticipation (conduite commentée)	-1	-2	0	-2	-2	-1	-1	-2	-2	-2
Exploration visuelle (conduite commentée)	-1	-1	0	-2	-2	-1	-1	-2	-1	-2
Mobilité du regard	-1	-1	-2	-2	-1	-1	-1	-2	-1	-2
Acquisition de l'information	-1	-1	0	-1	-2	-1	-1	-1	-2	-2
Anticipation	-1	-1	-1	-1	-2	0	-1	-1	-2	-2
Observation de l'environnement : détecter/percevoir	-1	-1	-1	-2	-2	-1	-1	-1	-1	-2
Contrôles rétroviseur central	-1	-1	-2	-1	-2	-1	-1	-1	-1	-1
Contrôles rétroviseur droit	-1	-1	-2	-1	-2	-1	-1	-1	-1	-1
Contrôles rétroviseur gauche	-1	-1	-1	-1	-2	-1	-1	-1	-1	-1
Appréciation des distances/vitesses	-2	-2	-1	-1	-2	0	-2	-1	-1	0
Respect de la signalisation	-1	-1	0	-1	-2	-2	0	-2	-1	-1
Vitesse de traitement (action tardive)	-1	-1	0	-1	-2	-1	-1	-1	-2	0
Adaptation de l'allure en agglomération	-1	-1	-1	-2	-1	-1	-1	-1	-1	-2
Adaptation de l'allure hors agglomération	-1	-2	0	-1	-2	-1	-1	-1	-1	-1
Maintien de la trajectoire	-1	-1	-1	-2	-1	-1	-1	-1	-2	-1
Attention partagée (discussion)	-2	-1	0	-1	-1	-1	0	-2	-1	-1
Placement sur la voie de circulation	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-2
Distances de sécurité longitudinale ou latérale	0	-1	0	0	-1	0	0	0	0	-1
Espaces latéraux (manœuvres)	-1	-1	0	0	-1	0	0	0	0	-1
Respect des autres usagers/citoyenneté	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0

2.3 Confrontation avec les tests neuropsychologiques

Nous avons montré qu'il y a moins de participants mis en échec avec l'évaluation sur route qu'avec les tests neuropsychologiques. Il est possible (1) que la notation soit moins sévère lors de l'évaluation sur route ou (2) que les participants cérébrolésés mettent en place une compensation des processus déficitaires lors de l'évaluation sur route, alors que ce n'est pas possible lors des tests neuropsychologiques. Néanmoins, nous constatons une cohérence entre ces deux évaluations. Tout d'abord, nous pouvons remarquer que les deux évaluations nous permettent de discriminer les différents groupes de participants. En effet, les participants cérébrolésés (CR et CA) obtiennent davantage de scores "-2" sur route et aux tests neuropsychologiques

que les participants Co. Ensuite, des processus similaires semblent être mis en cause, notamment l'anticipation chez les CR et les CA et les processus impliquant un traitement visuel chez les CR. Enfin, si l'on s'intéresse aux profils individuels, CR5, qui a le profil le plus déficitaire aux tests neuropsychologiques, a également le profil le plus déficitaire à l'évaluation sur route. Toutefois, nous pouvons voir que CR6, qui a un profil assez proche de CR5 concernant les tests neuropsychologiques, obtient de meilleurs résultats sur route, probablement dus à une compensation de ses déficits lors de la conduite réelle. Cela montre l'intérêt d'une mise en situation réelle pour étudier les mécanismes mis en jeu en conduite.

2.4 Points forts et faiblesses de l'évaluation sur route

L'évaluation sur route est donc cohérente avec les tests neuropsychologiques et nous apporte également des informations complémentaires. Elle a montré son intérêt pour étudier les compétences en conduite : une mise en situation écologique avec la possibilité d'utiliser des stratégies de compensation. Néanmoins, elle reste risquée lors de réponses comportementales inadaptées et ne nous renseigne pas toujours précisément sur les mécanismes impliqués. En effet, on ne peut pas étudier la planification. De plus, lorsque le traitement visuel est déficitaire, il est très difficile de statuer sur certains mécanismes (anticipation, attention sélective, etc.). Souvent, il n'y a pas de différenciation possible entre ce qui n'a pas été vu et ce qui n'a pas été regardé lorsque l'objet se trouve dans le champ visuel central. Par ailleurs, on ne peut pas prendre en considération ce qui peut être détecté en périphérie.

Afin de pallier ces manques d'informations, mais également pour compléter les informations déjà à notre disposition, nous avons utilisé un simulateur de conduite. Nous nous attendons à observer des résultats similaires sur simulateur et sur route pour des processus semblables. De plus, nous allons pouvoir exploiter davantage les informations concernant l'exploration visuelle grâce à l'oculomètre. Cela devrait nous renseigner plus précisément sur les mécanismes d'attention sélective (visuelle) et d'anticipation visuelle. Enfin, nous pourrons également enregistrer les actions sur les pédales, ce qui nous fournira des informations quant à la vitesse de traitement (par le biais des temps de réaction) ou encore l'anticipation motrice.

3 Résultats sur simulateur

Comme nous l'avons vu précédemment, les tests neuropsychologiques et l'évaluation sur route nous permettent de discriminer les groupes de participants. Néanmoins, si les deux évaluations concordent concernant certains processus (par exemple, l'anticipation) il est parfois difficile de statuer avec précision sur la nature et l'importance des déficits et leur implication dans une activité complexe telle que la conduite automobile. C'est l'exemple de CR6, qui a un profil très déficitaire aux tests neuropsychologiques mais obtient de meilleurs résultats sur route. C'est pourquoi, afin de compléter le protocole d'évaluation, nous avons recours à un simulateur de conduite. En effet, comme nous l'avons vu dans le chapitre 1, le simulateur de conduite permet de contrôler la situation de conduite et d'enregistrer des données objectives lors de la conduite sans être invasif. Il permet également de conserver une situation dynamique proche de la conduite sur route (Lew et al., 2005) tout en supprimant les risques liés à cette dernière.

L'évaluation sur simulateur devrait ainsi nous apporter des informations complémentaires concernant les processus étudiés, et plus spécifiquement l'anticipation ou l'attention sélective. Pour cela, nous avons conçu (chapitre 4) des scénarios spécifiques : avec des événements critiques, des distracteurs visuels, un distracteur auditif, ou encore des consignes.

Quel que soit le parcours étudié, nous disposions des mêmes données (les données oculométriques, les données sur le simulateur concernant l'action sur les pédales, la vitesse, la trajectoire du véhicule, etc.). A partir de ces données, nous connaissions la distance entre le participant et un objet de l'environnement, comme les objets critiques dans les scénarios critiques. Cela nous a permis de calculer, entre autres, le temps avant contact (time-to-contact ou TTC) aux moments opportuns, par exemples lors du relâchement de l'accélérateur ou de l'appui sur la pédale de frein. Pour des besoins évidents de synthèse, nous ne présenterons que les résultats pertinents par rapport aux analyses effectuées.

3.1 Etude des processus mis en jeu dans les événements critiques

Les événements critiques nous apportent des informations intéressantes sur les capacités de conduite des participants et les processus impliqués. Tout d'abord, des événements ont conduit à un accident chez certains participants. Nous étudierons donc ces accidents et tenterons d'apporter un éclairage sur les raisons de leur occurrence en analysant les différences du point de vue des événements (le type de parcours, les processus impliqués et notamment ceux mis en défaut) et des participants (existe-t-il un profil de participant qui a davantage d'accidents ?). Nous nous demanderons si un processus mis en défaut dans un événement sera systémati-

quement mis en défaut dans les autres événements. Par exemple, un participant qui est déficitaire en anticipation visuelle sur un événement sera-t-il déficitaire dans tous les événements qui impliquent de l'anticipation visuelle ? Ensuite, tous les événements n'ont pas conduit à un accident. Cependant, cela ne signifie pas qu'ils ont été bien gérés ou qu'aucun processus impliqué n'a été mis en défaut. Nous nous intéresserons donc aux processus impliqués dans les événements critiques pour lesquels les participants n'ont pas eu d'accident. Nous verrons comment discriminer ainsi les participants cérébrolésés des participants contrôles. Nous expliquerons les liens possibles entre les différents événements existants mais également pourquoi deux événements impliquant les mêmes processus n'amènent pas systématiquement aux mêmes résultats.

3.1.1 Etude des accidents lors des événements critiques

Tableau XXXI : Nombre d'accidents par participant en fonction des événements dans les différents scénarios (une case vide signifie aucun accident).

		Co1	Co2	Co3	Co4	Co5	Co6	Co7	Co8	Co9	CR1	CR2	CR3	CR4	CR5	CR6	CA1	CA2	CA3	CA4	PA1
Ville	Evt1																				
	Evt2																				
	Evt3					1					1				1	2				1	
	Evt4											1									
	Evt5																				
Campagne	Evt1																				
	Evt2														1						
	Evt3																				
	Evt4																				
	Evt5																				
	Evt6																				
	Evt7																				
Nuit	Evt1																				
	Evt2																1				
	Evt3																				
	Evt4																				
	Evt5											1				1					

Certains événements critiques ont donné lieu à un accident chez certains participants (tableau XXXI). On peut remarquer des différences selon les participants, leur groupe d'apparte-

nance, le parcours ou encore l'événement. Nous allons donc nous intéresser à ces différents paramètres.

On comptabilise au total 11 accidents sur l'ensemble des parcours, tous participants confondus.

3.1.1.1 Analyse des accidents par parcours

Tout d'abord, nous allons nous intéresser à l'effet du parcours sur le nombre d'accidents (tableau XXXII), indépendamment des participants.

Tableau XXXII : Description des accidents par parcours

	Ville	Camp	Nuit
Nb d'accidents	7	1	3
% d'accident total	63,636	9,1	27
Nb de participants ayant eu un accident	6	1	3
% de participants ayant eu un accident	30	5	15
Nb d'événements avec accident	2	1	2
% d'événement résultant en un accident/parcours	40	14	40

Sur les 11 accidents survenus, 7 accidents ont eu lieu dans le parcours en ville, 1 dans le parcours campagne et 3 dans le parcours de nuit. 30% des participants ont eu un accident lors du parcours en ville, 15% lors du parcours de nuit et seulement 5% lors du parcours en campagne.

Les 11 accidents ont été causés par seulement 5 événements critiques différents, 2 en ville, 1 en campagne et 2 de nuit. Mis en rapport avec le nombre d'événements par parcours, nous pouvons dire que 40% des événements en ville et de nuit ont résulté en un accident, et 14% des événements en campagne.

Nous pouvons donc conclure que le parcours en ville est celui qui a mené au plus grand nombre d'accidents, que l'on considère le nombre d'accidents absolu ou le pourcentage d'événements résultant en un accident. Le parcours de nuit comporte 2 événements résultant en un accident, tout comme le parcours en ville, mais on comptabilise moins de participants impli-

qués dans un accident dans le parcours de nuit. Enfin, le parcours en campagne est le parcours où le maximum d'accident a pu être évité.

Pourtant, comme nous pouvons le voir sur le tableau XXXIII, certains événements critiques en ville ou de nuit impliquaient les mêmes processus qu'en campagne. Toutefois, en campagne, ces événements n'ont pas conduit à un accident. L'environnement de conduite semble jouer un rôle important dans la gestion des événements critiques.

Tableau XXXIII : Processus critiques impliqués dans les événements 3 et 4 en ville et l'événement 7 en campagne.

Parcours	Evénement	Anticipation visuelle	Anticipation motrice	Prise de décision	Rapidité de traitement
Ville de jour	Evt3 (piéton après friterie ambulante)	oui	oui	oui	oui
Ville de jour	Evt4 (enfant avec ballon)	oui	oui	oui	oui
Campagne de jour	Evt7 (voiture qui veut nous couper la route)	oui	oui	oui	oui

En effet, le tableau XXXIII nous montre qu'à la fois l'anticipation visuelle, motrice, la prise de décision et une rapidité de traitement étaient nécessaires pour traiter les événements 3 et 4 en ville, ainsi que l'événement 7 en campagne. Néanmoins, seuls les 2 événements en ville ont conduit à un accident chez certains participants. Nous pouvons donc nous interroger sur les raisons pour lesquelles les événements en ville ont été davantage échoués que les événements en campagne. Nous savons que l'environnement urbain contient davantage d'informations visuelles, pertinentes ou non. Par ailleurs, l'environnement urbain change plus rapidement, cela signifie que le nombre d'informations à traiter dans un temps *t* est plus important en ville qu'en campagne. Cela peut donc nécessiter une gestion plus précise et/ou plus rapide des ressources attentionnelles, aussi bien en termes de sélection des informations pertinentes à traiter que de partage des ressources vers les différentes cibles pertinentes, ainsi qu'une sollicitation plus importante de ces ressources.

De la même manière, nous pouvons constater (tableau XXXIV) que l'événement 1 en campagne impliquait, tout comme l'événement 5 de nuit, une prise de décision et une rapidité de traitement. Or, certains participants ont eu un accident lors de l'événement de nuit, mais aucun lors de l'événement en campagne.

Tableau XXXIV : Processus critiques impliqués dans l'événement 1 en campagne et l'événement 5 en campagne de nuit.

Parcours	Evénement	Anticipation visuelle	Anticipation motrice	Prise de décision	Rapidité de traitement
Campagne de jour	Evt 1 (véhicule en sens inverse sur notre voie)			oui	oui
Campagne de nuit	Evt5 (biche)			oui	oui

Le parcours campagne et le parcours de nuit se déroulaient tous deux dans le même environnement rural. Toutefois, le parcours de nuit présentait des conditions de visibilité et d'adhérence de la chaussée plus défavorables à la conduite, en raison de la faible luminosité, de la pluie et d'un passage sur une route enneigée, comme nous l'avons vu dans le chapitre 5. Les différences de conditions de conduite (visibilité et adhérence) entre les deux parcours pourraient tout à fait expliquer qu'un accident soit évité dans les conditions plus favorables du parcours en campagne mais pas dans les conditions du parcours de nuit.

3.1.1.2 Analyse des accidents par groupe

On peut remarquer dans le tableau XXXI que le parcours n'est pas la seule variable qui ait une incidence sur le nombre d'accidents. En effet, on note des différences selon le groupe d'appartenance. Nous allons donc nous intéresser à l'effet du groupe sur le nombre d'accidents (tableau XXXV).

Tableau XXXV : Description des accidents par groupes

	Co	CR	CA	PA
Nb d'accidents	1	8	2	0
% d'accidents total	9	73	18	0
Nb de participants ayant eu un accident	1	4	2	0
% de participants ayant eu un accident/groupe	11	67	50	0

Sept participants ont été responsables de 11 accidents (1 Co, 4 CR et 2 CA). 73% des accidents ont été causés par un participant CR, 18% par un participant CA et seulement 9% par un participant Co. Le participant PA n'a été impliqué dans aucun accident.

Ainsi, si l'on rapporte ces chiffres aux différents groupes, on peut dire que 67% des CR ont été impliqués dans un ou plusieurs accidents, contre 50% des CA et seulement 11% des Co.

Les participants CR ont été les plus impliqués dans des accidents, en regard du nombre d'accident total et du pourcentage de participants ayant eu un accident. Par ailleurs, les CA ont eu deux fois plus d'accidents que les Co, ce qui, proportionnellement au nombre de participants dans chaque groupe (deux fois plus important chez les Co que chez les CA), signifie que 4 fois plus de participants CA ont été impliqués dans un accident.

Pour conclure, les participants CR sont majoritairement impliqués dans les accidents. Toutefois, si certains participants CR ont eu un accident, ce n'est pas le cas de tous les participants. Afin de comprendre d'où peut provenir cet écart, nous allons nous intéresser plus précisément aux événements et aux processus impliqués lorsqu'il y a un accident.

3.1.1.3 Analyse des accidents par événement et processus impliqués

Chaque événement critique fait appel à divers processus, qu'on peut observer de différentes manières. Dans le tableau XXXVI, nous avons indiqué l'ensemble des processus impliqués dans un ou plusieurs événements critiques et les différentes possibilités d'observer ces processus. Il peut y avoir plusieurs manières d'observer un même processus pour un même événement, comme, par exemple, le calcul du temps avant contact (Time-to-contact ou TTC) au moment du relâchement de l'accélérateur et le calcul du TTC au moment de l'appui sur le frein pour étudier la temporalité de l'action. Par ailleurs, lorsque deux événements font appel au même processus, nous avons essayé de systématiser l'étude des processus en utilisant les mêmes indicateurs, lorsque c'était possible.

Toutefois, il convient de rappeler qu'un événement peut faire appel à différents processus sans que ceux-ci soient nécessairement critiques, c'est-à-dire nécessaires pour éviter l'accident. Par exemple, on peut anticiper visuellement l'événement 2 en campagne mais l'anticipation ne permettra pas pour autant d'éviter l'accident et, de même, l'absence d'anticipation n'amènera pas nécessairement à un accident.

Tableau XXXVI : Liste des processus impliqués dans un ou plusieurs événements critiques et indicateurs relatifs à ces processus.

Processus	Indicateurs
Adaptation de la vitesse	Pas d'accélération pendant la période critique (entre le moment où l'objet critique est vu et le moment critique To)
	Vitesse adaptée par rapport à celle des contrôles
	Vitesse adaptée par rapport à un critère légal (réglementation en vigueur)
	Vitesse adaptée par rapport à un critère sécuritaire subjectif
Adaptation de la vitesse à la configuration de la route (virage…)	Relâchement de l'accélérateur avant que l'objet critique ne soit visible (pas d'anticipation visuelle possible)
Anticipation motrice	Relâchement de l'accélérateur
	Appui sur le frein
Anticipation motrice OU réaction au mouvement en périphérie	Relâchement de l'accélérateur avant de voir l'objet critique mais objet visible
Anticipation visuelle	Regard sur l'objet critique (visible) avant le moment critique T0
	Regard sur un objet non critique permettant d'anticiper sur l'objet critique (non visible) avant le moment critique T0
Contrôle de l'exécution de l'action	Sortie de voie
	Taux de ralentissement (si la vitesse est similaire à celle des contrôles avant le moment critique T0)
Prise de décision	Adaptée ou non (en fonction de la situation et de l'action attendue)
Prise d'information sur l'objet critique	Regard sur l'objet critique (oui ou non)
Prise d'informations pour la prise de décision	Regard sur les véhicules en sens inverse
Temporalité de la prise d'information sur l'objet critique	Délai entre le moment où l'objet critique est visible (moment critique T0) et le premier regard
	TTC au moment du 1er regard sur l'objet critique
Temporalité de l'action	TTC au moment du relâchement de l'accélérateur
	TTC au moment de l'appui sur le frein
Vitesse de traitement	Temps nécessaire pour relâcher l'accélérateur
	Temps nécessaire pour freiner

3.1.1.3.1 Evénement 3 en ville

Parmi l'ensemble des évènements ayant conduit à un accident, l'événement 3 en ville (evt3_ville) est particulièrement remarquable car il a donné lieu à un accident pour 5 participants (Co5, CR1, CR5, CR6, et CA4). Il s'agit d'un événement où un piéton traversait derrière une camionnette de vente ambulante. Cet événement impliquait donc (tableau XXXVII) dans un premier temps d'anticiper (au niveau visuel ou moteur) un danger potentiel causé par un objet absent de la scène au moment de l'anticipation. Une fois le piéton visible, il fallait diriger ses ressources attentionnelles vers ce dernier, traiter rapidement l'information, prendre une décision et mettre en œuvre l'action approprié (ici, l'arrêt).

Tableau XXXVII : Processus critiques impliqués dans l'événement 3 en ville.

Parcours	Evénement	Anticipation visuelle	Anticipation motrice	Prise de décision	Rapidité de traite-ment
Ville de jour	Evt3 (piéton après friterie ambulante)	oui	oui	oui	oui

Afin d'étudier tous les processus, critiques ou non, intervenant dans cet événement, nous avons eu recours à de nombreux indicateurs. Les résultats pour tous les participants figurent dans le tableau XXXVIII.

Comme nous pouvons le voir dans le tableau XXXVIII, chez CR1 et CA4, l'attention sélective visuelle semble être mise en cause, avec un regard qui se portait tardivement sur le piéton comparativement aux participants contrôle. Cela amenait à une distance plus courte lors de la prise d'informations, soit un TTC plus faible. Toutefois, nous pouvons constater que CA3 présentait également ce déficit, sans que cela conduise à un accident. Nous nous sommes donc intéressés plus spécifiquement à l'action sur les pédales (cf. figure 26, les résultats de tous les participants figurent dans l'annexe 9). Nous constatons effectivement que CR1 et CA4 regardent le piéton tardivement (plus d'une seconde après l'apparition du piéton, au temps T0), alors que CA3 le regarde un peu plus tôt. Par ailleurs, CA3 avait relâché l'accélérateur très tôt (TTC très élevé). A l'opposé, chez CR1, l'action sur le frein se fait avec un TTC plus faible. D'ailleurs, les tests neuropsychologiques indiquent chez CR1 un défaut de planification et d'attention sélective, même si l'évaluation sur route montre davantage un défaut d'anticipation, mais cela reste cohérent avec les résultats trouvés sur le simulateur.

Tableau XXXVIII : Processus impliqués dans l'événement 3 en ville chez tous les participants. En fond rose, les participants impliqués dans un accident.

Parcours	Evt	Processus	Indicateurs	Co1	Co2	Co3	Co4	Co5	Co6	Co7	Co8	Co9	CR1	CR2	CR3	CR4	CR5	CR6	CA1	CA2	CA3	CA4	PA1
ville	evt3	Anticipation motrice ou réaction au mouvement en périphérie	Relâchement l'accélérateur/appui sur le frein avant de voir le piéton mais piéton visible	NA	NA	+2	+2	0	0	0	NA	NA	0	NA	+2	0	0	NA	0	+2	+2	0	0
ville	evt3	Anticipation motrice	Relâchement de l'accélérateur	+2	+2	0	0	0	0	0	NA	+2	0	NA	0	0	+2	+2	0	0	0	0	+2
ville	evt3	Anticipation visuelle	Regard sur la camionnette	0	0	0	0	0	0	0	NA	0	0	NA	+2	+2	0	0	+2	0	0	0	0
ville	evt3	Temporalité de la prise d'information sur l'événement critique	Intervalle de temps entre le moment où le piéton est visible et le premier regard	0	0	0	0	0	0	0	NA	0	-2	NA	0	0	0	0	0	0	-2	-2	0
ville	evt3	Temporalité de la prise d'information sur l'événement critique	TTC 1er regard sur le piéton	0	0	+2	0	0	0	0	NA	0	-2	NA	0	+2	0	0	+2	0	-2	-2	0
ville	evt3	Prise de décision	Adaptée (freiner) ou non	0	0	0	0	0	0	0	NA	0	0	NA	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ville	evt3	Vitesse de traitement	Temps nécessaire pour relâcher l'accélérateur	NA	NA	NA	NA	0	0	0	NA	NA	0	NA	NA	0	0	NA	0	NA	NA	0	0
ville	evt3	Vitesse de traitement	Temps nécessaire pour appuyer sur le frein	NA	NA	NA	NA	0	0	0	NA	NA	0	NA	NA	-2	0	NA	0	NA	NA	0	0
ville	evt3	Temporalité de l'action	TTC action frein	0	0	+2	0	0	0	0	NA	0	-2	NA	0	+2	0	0	+2	0	0	0	0

Par ailleurs, chez CA4, les évaluations neuropsychologiques et sur route indiquent un défaut d'anticipation, associé à une difficulté de prise d'informations visuelles, qui vont dans le sens de ce qui est observé ici.

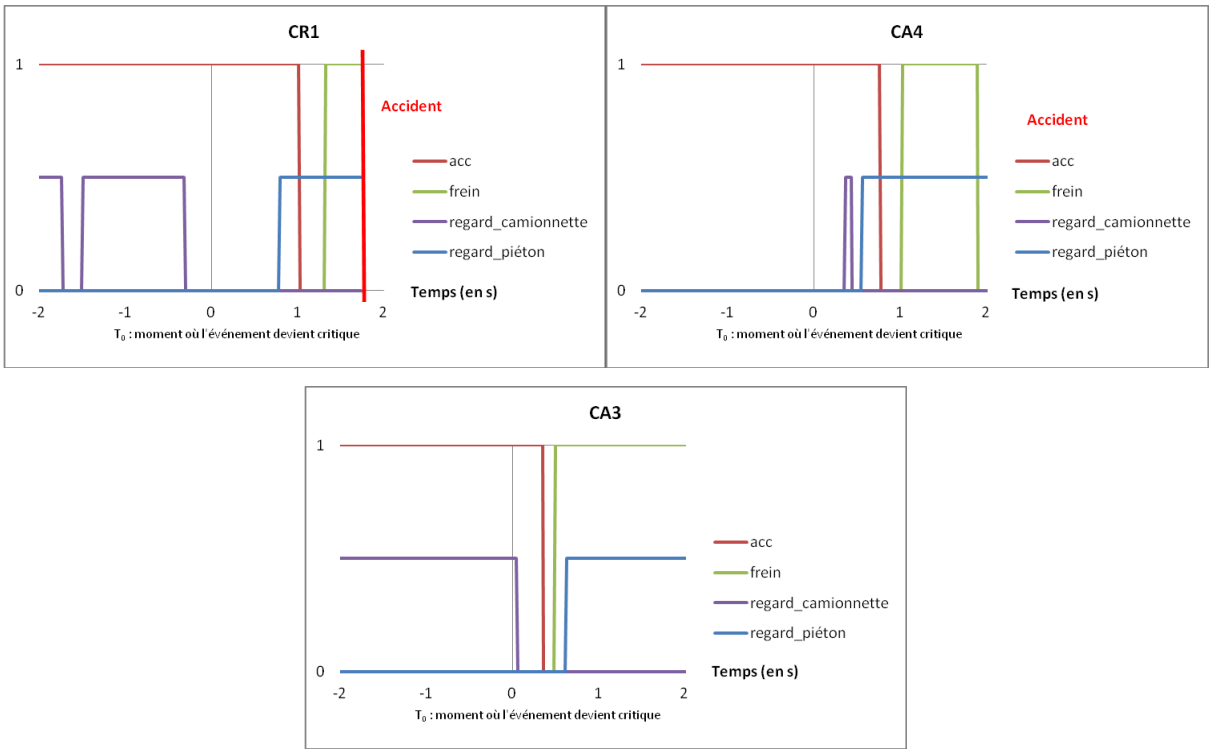


Figure 26 : Regards sur la camionnette et le piéton et actions sur les pédales d'accélérateur et de frein en fonction du temps chez CR1 (en haut à gauche), CA4 (en haut à droite), et CA3 (en bas au milieu) pour l'événement 3 en ville.

Néanmoins, aucun déficit dans les processus indiqué dans le tableau XXXVIII ne semble expliquer les accidents de Co5, CR5 et CR6. D'ailleurs, CR5 et CR6 avaient même relâché l'accélérateur avant l'apparition du piéton (cf. figure 26), ce qui indiquerait une anticipation motrice. Les résultats aux tests neuropsychologiques nous indiquent, chez ces deux participants, un profil globalement déficitaire, de même que les résultats sur route, surtout pour CR5, avec une forte prédominance d'échec aux tests impliquant le traitement visuel à la fois pour CR5 et CR6.

On peut enfin noter qu'un des participants CR (CR6) a été impliqué deux fois dans un accident sur ce même événement. Cela laisse supposer un éventuel défaut de flexibilité, mis en évidence par une persévération. Ce participant avait d'ailleurs obtenu un score "-2" (déficitaire) au TMT B-A évaluant la flexibilité mentale.

3.1.1.3.2 Evénement 4 en ville

Un autre événement en ville, l'événement 4, impliquant les mêmes processus que l'événement 3 en ville (cf. tableau XXXIX), a mis en défaut un participant cérébrolésé (CR2) qui n'avait pas eu d'accident dans l'événement 3 en ville.

Tableau XXXIX : Processus critiques impliqués dans l'événement 4 en ville.

Parcours	Evénement	Anticipation visuelle	Anticipation motrice	Prise de décision	Rapidité de traitement
Ville de jour	Evt4 (enfant avec ballon)	oui	oui	oui	oui

Lors de cet événement, un enfant, positionné au bord de la chaussée, traversait devant le participant en suivant son ballon. On pouvait voir l'enfant sur le bord de la chaussée. Il existait un risque pour que l'enfant traverse la route. On pouvait donc anticiper ce risque, au niveau visuel (regarder l'enfant) et moteur (relâcher l'accélérateur à l'approche de l'enfant). Lorsque le participant arrive à proximité, l'enfant s'engage à la suite de son ballon. Il fallait alors prendre une décision rapidement (freiner était le plus efficace, conjugué éventuellement à un évitement). CR2 est le seul participant qui a eu un accident sur cet événement. Afin de mieux comprendre la cause possible de cet accident, nous allons nous intéresser aux processus mis en jeu dans cet événement et particulièrement aux processus critiques (cf. tableau XL).

Nous avons pu remarquer chez CR2 (tableau XL) l'absence d'anticipation motrice, c'est-à-dire qu'il ne relâche pas l'accélérateur avant que l'enfant traverse (moment T0). Cette remarque est confirmée par l'observation de l'action sur les pédales (cf. figure 27, les résultats de tous les participants figurent dans l'annexe 10). Un déficit d'anticipation est d'ailleurs observé également lors des tests neuropsychologiques et de l'évaluation sur route. Toutefois, nous voyons que d'autres participants sont parvenus à éviter l'accident en l'absence d'anticipation motrice. L'anticipation motrice est donc une condition nécessaire mais pas forcément suffisante pour éviter l'accident.

Tableau XL : Processus impliqués dans l'événement 4 en ville chez tous les participant. En fond rose, le participant impliqué dans un accident).

Parcours	Evt	Processus	Indicateurs	Co1	Co2	Co3	Co4	Co5	Co6	Co7	Co8	Co9	CR1	CR2	CR3	CR4	CR5	CR6	CA1	CA2	CA3	CA4	PA1
ville	evt4	Anticipation motrice	Relâchement de l'accélérateur	0	0	-2	0	0	0	0	0	-2	-2	-2	0	-2	-2	0	-2	0	-2	-2	-2
ville	evt4	Anticipation visuelle	Regard sur l'enfant avant qu'il s'engage	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-2	0	0
ville	evt4	Prise d'information sur l'objet critique	Regard sur le piéton après qu'il se soit engagé (oui/non)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ville	evt4	Temporalité de la prise d'information sur l'objet critique	TTC 1er regard	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+2	0	0	0	0	0	+2	0
ville	evt4	Temporalité de l'action	TTC pour freiner	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-2	-2	0		0	0	0	0	0
ville	evt4	Prise de décision	Adaptée (freiner) ou non	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-2	-2		0	0	0	0	0
ville	evt4	Vitesse de traitement	Délai entre le moment où le piéton s'engage/appui sur le frein	0	0	0	0	0	0	0	0	-2	0	0	0	-2	-2		0	0	0	0	0

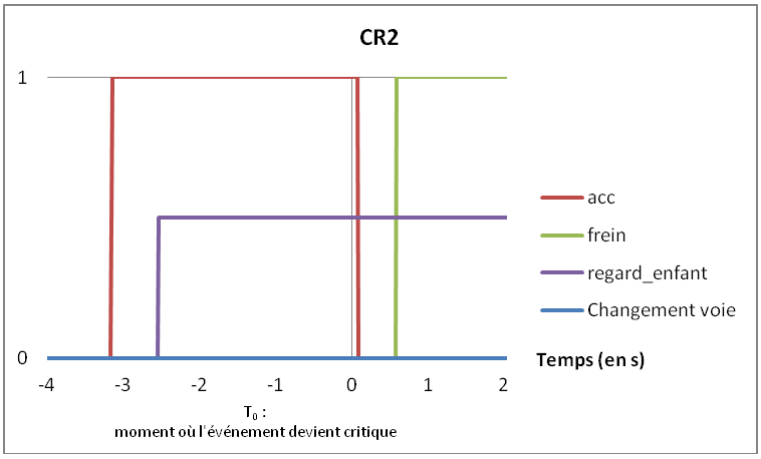


Figure 27 : Regards sur l'enfant et actions sur les pédales d'accélérateur et de frein en fonction du temps chez CR2 pour l'événement 4 en ville.

En s'intéressant à la position des participants sur la voie, nous observons chez CR2 un écart de trajectoire vers la droite (cf. figure 28, les résultats de tous les participants figurent dans l'annexe 11), probablement afin d'éviter l'enfant qui traverse de la gauche vers la droite. Nous remarquons sur les données vidéos que CR2 évite effectivement l'enfant par la droite, mais pour cela, il monte légèrement sur le trottoir où l'enfant finit son parcours, et s'arrête. En re-démarrant, il percute l'enfant, invisible alors sur les écrans. CR2 est le seul participant à percuter le trottoir. L'amplitude de l'évitement n'était donc pas appropriée.

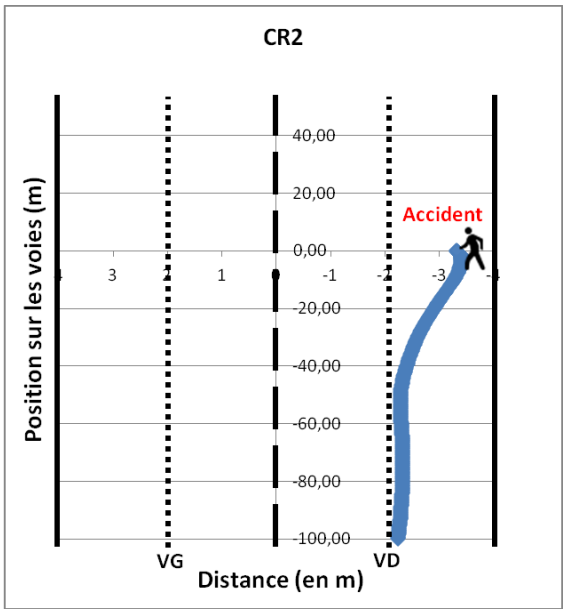


Figure 28 : Position de CR2 sur la voie en fonction de la distance à l'enfant, à l'endroit où il se trouvait au moment critique, et position finale de l'enfant (matérialisée par le petit bonhomme).

3.1.1.3.3 Evénement 5 de nuit

Un autre événement critique a causé plusieurs accidents, il s'agit de l'événement 5 de nuit (nuit_evt5). Dans cet événement, le participant conduisait sur une route enneigée lorsqu'une biche traversait soudainement devant lui. Cet événement impliquait principalement la vitesse de traitement des informations et la prise de décision (cf. tableau XLI), avec une contrainte temporelle forte. Bien sûr, les conditions particulières de conduite nécessitaient d'adapter sa vitesse.

Tableau XLI : Processus critiques impliqués dans l'événement 5 en campagne de nuit.

Parcours	**Evénement**	**Anticipation visuelle**	**Anticipation motrice**	**Prise de décision**	**Rapidité de traitement**
Campagne de nuit	Evt 5 (bic he)			oui	oui

Deux participants cérébrolésés récents ont eu un accident, CR2 et CR6. Nous nous intéressons donc aux résultats obtenus aux différents indicateurs des processus impliqués dans l'événement, et particulièrement les processus critiques (cf. tableau XLII).

Concernant le participant CR6, nous constatons (tableau XLII) qu'il a regardé l'objet critique à éviter (la biche) très tardivement (2 écarts-types plus tard que la moyenne des contrôles) et n'a pas eu le temps de freiner (prise de décision), malgré un relâchement très rapide de l'accélérateur (2 écarts-types plus rapide que la moyenne des contrôles). C'est donc principalement la sélection de l'information qui n'a pas été correctement effectuée. Ces résultats sont cohérents avec les autres évaluations puisque ce participant est noté déficitaire dans de nombreux items impliquant l'exploration visuelle aux tests neuropsychologiques et au test sur route. Par ailleurs, nous notons également que la vitesse n'est pas adaptée à la situation, quel que soit le critère de comparaison utilisé. Il est d'ailleurs le seul participant avec une vitesse supérieure à la vitesse légale autorisée (ici, 80km/h). On peut éventuellement mettre cette observation en lien avec le défaut de flexibilité constaté au TMT (B-A). Par ailleurs l'évaluation sur route n'indique une difficulté d'adaptation de l'allure qu'en agglomération (score "-1" hors agglomération).

Tableau XLII : Processus impliqués dans l'événement 5 de nuit chez les participants. En fond rose, les participants impliqués dans un accident.

Parcours	Evt	Processus	Indicateurs	Co1	Co2	Co3	Co4	Co5	Co6	Co7	Co8	Co9	CR1	CR2	CR3	CR4	CR5	CR6	CA1	CA2	CA3	CA4	PA1
nuit	evt5	Adaptation de la vitesse	Vitesse par rapport aux contrôles à T0	0	0	0	0	0	+1	0	-1	0	0	-1	0	0	NA	-2	0	0	0	0	0
nuit	evt5	Adaptation de la vitesse	Vitesse par rapport critère légal (80km/h) à T0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	NA	-2	0	0	0	0	0
nuit	evt5	Adaptation de la vitesse	Vitesse par rapport à un critère sécuritaire subjectif (<46km/h) à T0 (moyenne des contrôles -1 si supérieur à 46km/h et -2 si supérieur à 56km/h qui est la vitesse max sans risque de dérapage suite aux essais réalisés sur le simulateur)	-2	0	-1	-2	0	0	0	-2	-1	0	-2	0	0	NA	-2	0	0	0	0	-1
nuit	evt5	Temporalité de la prise d'information sur l'objet critique	Intervalle de temps entre le moment où la biche est visible et le premier regard	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	+2	0	+2	0	NA	-2	0	+2	NA	+2	0
nuit	evt5	Temporalité de la prise d'information sur l'objet critique	TTC 1er regard sur la biche	0	0	0	0	0	+2	0	0	0	+2	0	0	0	NA	-2	0	0	NA	0	0
nuit	evt5	Temporalité de l'action	TTC pour relâcher l'accélérateur	0	0	0	0	0	+2	+2	0	0	0	0	0	0	NA	-2	0	0	0	0	0
nuit	evt5	Temporalité de l'action	TTC pour freiner	0	0	0	NA	NA	NA	0	0	0	0	-2	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0	0
nuit	evt5	Prise de décision	Adaptée (freiner) ou non	0	0	0	-2	-2	-2	0	0	0	0	0	-2	-2	NA	-2	-2	-2	-2	0	0
nuit	evt5	Vitesse de traitement	Temps nécessaire pour relâcher l'accélérateur	0	0	0	0	0	NA	0	0	0	-2	0	NA	0	NA	+2	0	-2	-2	0	0
nuit	evt5	Vitesse de traitement	Temps nécessaire pour freiner	0	0	0	NA	NA	NA	-2	0	0	-2	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0	0

Concernant le participant CR2, nous voyons qu'il fait également preuve d'une vitesse peu adaptée à la situation, par rapport aux contrôles et à notre critère sécuritaire subjectif. C'est probablement cette survitesse qui amène à un appui sur le frein avec un TTC plus faible (la vitesse étant plus importante, on parcourt davantage de distance en un même temps). Comme pour CR6, l'évaluation sur route n'indique une difficulté d'adaptation de l'allure qu'en agglomération (score "-1" hors agglomération). Cependant les tests neuropsychologiques n'indiquent aucun défaut de flexibilité mentale ou d'adaptation au changement.

3.1.1.3.4 Evénement 2 de nuit

Cet événement n'avait pas été conservé dans l'analyse initiale parce qu'il ne présentait a priori pas de criticité particulière (aucun accident à déplorer lors des pré-tests ni même de difficulté à gérer l'événement). Il s'agissait d'une camionnette qui roulait plus lentement que le participant. Ce qui nous intéressait particulièrement sur cet événement était la prise de décision (concernant le dépassement) et l'éventuelle anticipation motrice (le ralentissement) qui l'accompagnait (cf. tableau XLIII). Il était difficile dans cet événement de parler d'anticipation visuelle : le véhicule était situé juste devant le participant (zone d'intérêt habituelle lors de la conduite) et il était difficile de distinguer si le regard était posé sur le véhicule ou seulement sur la route devant le conducteur (même s'il paraît difficile de ne pas voir la camionnette). Il ne nous paraissait donc pas pertinent de conserver cet événement dans les analyses.

Tableau XLIII : Processus critiques impliqués dans l'événement 2 en campagne de nuit.

Parcours	Evénement	Anticipation visuelle	Anticipation motrice	Prise de décision	Rapidité de traitement
Campagne de nuit	Evt2 (camion lent peu visible sans feux arrières)		oui	oui	

Toutefois, la survenue d'un accident chez CA1 nous a poussés à nous intéresser aux données vidéos. Nous avons ainsi pu observer CA1 percuter la camionnette sans qu'il semble ralentir ni même l'éviter. Tout se passe comme s'il ne l'avait pas vu, bien que le regard soit porté devant lui et donc sur la camionnette. L'accident nous a paru tellement étrange qu'il nous était difficile d'envisager qu'il soit dû à notre événement critique. Par ailleurs, ni les tests neuropsychologiques ni les tests sur route ne nous orientaient vers une explication. Nous avons donc décidé de ne pas pousser davantage l'analyse de cet événement. Nous pouvons avancer l'hypothèse d'une baisse de concentration, due à la fatigue, puisque ce parcours intervient juste avant

la pause nécessaire pour continuer la passation. Le participant n'était lui-même pas capable d'expliquer ce qui s'était passé.

3.1.1.3.5 Evénement 2 en campagne

CR5, qui avait eu un accident lors de l'événement 3 en ville, a également eu un accident lors de l'événement 2 en campagne. Il s'agit d'ailleurs du seul accident à déplorer dans ce parcours. Dans cet événement, un scooter lent peu visible roulait sur notre voie. On pouvait l'apercevoir à la sortie d'une courbe mais le manque de visibilité le rendait difficile à identifier. Deux véhicules arrivaient en sens inverse. Il fallait le dépasser après avoir croisé les autres véhicules et éventuellement ralenti (mais pas obligatoirement). Les processus critiques impliqués dans cet événement sont indiqués dans le tableau XLIV.

Tableau XLIV : Processus critiques impliqués dans l'événement 2 en campagne.

Parcours	**Evénement**	**Anticipation visuelle**	**Anticipation motrice**	**Prise de décision**	**Rapidité de traitement**
Campagne de jour	Evt2 (scooter lent peu visible)			oui	

Nous pouvons ainsi voir que le seul processus critique est la prise de décision. Cet événement, jugé non pertinent a priori, n'a pas été traité intégralement. Toutefois, comme nous avons noté un accident, nous nous sommes intéressés aux processus pouvant expliquer cet accident (cf. tableau XLV).

Nous observons ici que CR5 n'a pas regardé les véhicules arrivant en sens inverse. La vidéo nous montre qu'il les percute au milieu de la chaussée (peut-être en initiant le dépassement). Sur les vidéos, on peut voir que le regard de CR5 était focalisé sur l'objet critique, le scooter, ignorant les véhicules en sens inverse. Nous avons pu observer que CR5 avait un profil majoritairement déficitaire aux tests neuropsychologiques et à l'évaluation sur route. Les tests et items impliquant le traitement visuel étaient notamment échoués. Nous pouvons également signaler que les tests neuropsychologiques indiquent une négligence spatiale unilatérale (NSU) gauche. Nous pouvons donc supposer que les véhicules en sens inverse, apparaissant à gauche, n'ont réellement pas pu être vus et traités, comme le laissait supposer les données oculométriques. Ce type de déficit présente un grand danger pour la conduite automobile.

Tableau XLV : Processus impliqués dans l'événement 2 de campagne chez tous les participants. En fond rose, le participant impliqué dans un accident.

Parcours	Evt	Processus	Indicateurs	Co1	Co2	Co3	Co4	Co5	Co6	Co7	Co8	Co9	CR1	CR2	CR3	CR4	CR5	CR6	CA1	CA2	CA3	CA4	PA1
camp	evt2	Anticipation motrice	Ralentissement	0	0	0	0	0	0	0	0	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
camp	evt2	Prise de décision	Adaptée (dépassement dès que possible) ou non	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
camp	evt2	Prise d'informations pour la prise de décision	Regard sur les véhicules en sens inverse	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-2	0	0	0	0	0	0

3.1.1.4 Synthèse des processus impliqués dans les événements critiques ayant causé un accident

Il est difficile de conclure à un processus unique responsable des accidents pour chaque participant et pour chaque événement. Nous pouvons seulement orienter l'interprétation des accidents vers une défaillance d'un ou plusieurs processus, qui restent très liés aux conditions de l'événement en lui-même. Chez certains participants qui ont eu plusieurs accidents, nous pouvons éventuellement pointer un type de déficit, comme la sélection et/ou le traitement des informations visuelles chez CR5 et CR6. Cela apporte donc des informations sur les déficits qui, conjuguées aux autres données obtenues sur le simulateur et dans les autres évaluations, peut guider l'interprétation des troubles observés. On a d'ailleurs remarqué à travers l'étude de ces différents accidents que l'on retrouvait tout ou partie des résultats aux tests neuropsychologiques et à l'évaluation sur route. Cette première analyse des données sur simulateur nous montre donc une cohérence avec les résultats obtenus lors des évaluations sur route et sur simulateur de conduite.

Pour conclure, l'analyse descriptive des accidents nous permet de discriminer d'ores et déjà les groupes cérébrolésés du groupe contrôle. En s'intéressant plus particulièrement aux processus déficitaires qui auraient pu mener à l'accident, nous apportons une certaine compréhension des troubles des participants. Toutefois, un accident évité ne signifie pas pour autant que l'événement critique a été bien géré. En effet, comme nous avons pu le voir dans le tableau XL par exemple, certains participants n'ont pas d'accident mais sont notés déficitaires avec certains des indicateurs des processus impliqués. Il est donc pertinent, même en l'absence d'accident, d'étudier les événements critiques en détail et de voir comment sont notés les différents processus impliqués.

3.1.2 Etude détaillée des événements critiques n'ayant pas entrainé d'accident

3.1.2.1 Analyse des scores globaux par parcours

En observant les pourcentages de scores de -2 à +2 obtenus sur l'ensemble des participants (cf. tableau XLVI), nous pouvons remarquer qu'ils ne se répartissent pas de la même manière selon le parcours.

Tableau XLVI : Pourcentage des scores -2, -1, 0, 1, et 2 en fonction du parcours.

	% de -2	% de -1	% de 0	% de 1	% de 2
Ville	8,71	0,00	83,53	0,24	7,53
Campagne	17,17	0,80	81,04	0,00	1,00
Nuit	15,56	1,32	78,48	0,33	4,30

Le calcul du Khi sur l'effectif total montre une différence significative (X (8, N=1228) = 42,46 ; p < .001).

3.1.2.2 Analyse des scores globaux obtenus par groupe

La plupart des événements critiques ont été étudiés de manière détaillée. Ainsi, pour ces événements, nous avons observé, entre autres, l'action sur les pédales ou encore les regards sur l'objet critique. Lorsque les résultats correspondaient à ce qui était attendu (par exemple, porter son regard sur l'objet critique avant qu'il ne se mette en mouvement, indiquant une anticipation visuelle) ou correspondait à la moyenne du groupe contrôle (par exemple, temps de réaction après l'apparition de l'objet critique lorsqu'on ne peut pas l'anticiper), la note obtenue était "0". Dans le cas contraire, nous attribuions une note selon des critères semblables à ceux de la neuropsychologie, c'est-à-dire "-1" lorsque le participant se situait entre -1 et -2 écarts-types et "-2" lorsqu'il se situait au-delà de -2 écarts-types. Toutefois, nous avons également considéré les écarts-types positifs, c'est pourquoi un participant pouvait obtenir une note de "+1" ou "+2".

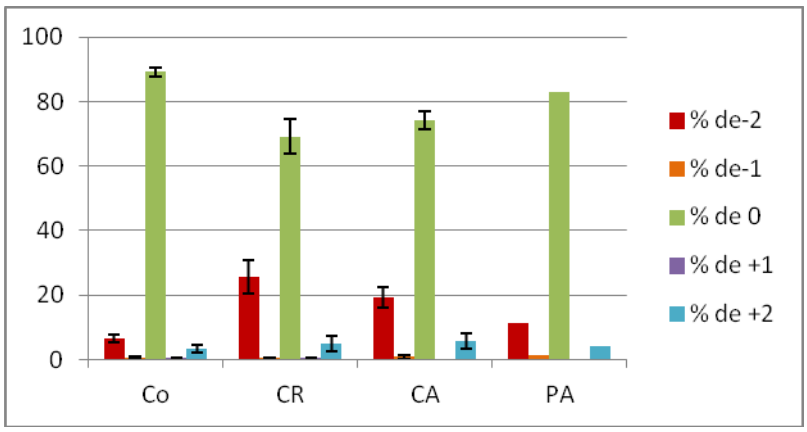


Figure 29 : Pourcentage des différents scores obtenus sur l'ensemble des notes pour tous les événements de tous les parcours par groupe.

Nous pouvons remarquer dans l'ensemble (figure 29) que les participants Co obtiennent proportionnellement plus de notes "0" que les autres groupes. A l'opposé les participants céré-

brolésés CR et CA ont davantage de "-2". Une analyse du Khi nous indique effectivement une différence significative entre les Co/CR et les Co/CA concernant la répartition des scores de -2 à 2 (cf. tableau XLVII).

Tableau XLVII : Calcul du Khi² sur l'effectif total de scores -2, -1, 0, 1, et 2 pour les groupes Co, CR, et CA.

Comparaison effectuée	Co/CR	Co/CA	CR/CA
ddl	4	4	4
Khi² observé	57,91	33,95	3,06
Khi² théorique	9,49	9,49	9,49
Seuil de significativité (p)	< 0,001	< 0,001	0,55

3.1.2.3 Analyse des scores obtenus par processus

Dans un premier temps, on peut se demander si un processus a mis en échec de nombreux participants, bien qu'ils n'aient pas eu d'accident, comme nous l'avions constaté pour les tests neuropsychologiques. Nous avons donc calculé le pourcentage de scores 2, -1, 0, +1, et +2 obtenus par l'ensemble des participants, pour tous les événements et pour chaque processus étudié. Les résultats figurent dans le tableau XLVIII.

Tableau XLVIII : Pourcentage de scores -2, -1, 0, +1, et +2 obtenus par l'ensemble des participants, pour tous les événements et pour chaque processus étudié.

	-2	-1	0	+1	+2
Adaptation de la vitesse	16,13	3,69	78,34	0,46	1,38
Anticipation motrice	20,00	0	70,71	0,71	8,57
Anticipation visuelle	13,19	0	83,52	0	3,30
Contrôle de l'exécution de l'action	24,24	0	72,73	0	3,03
Prise de décision	19,38	0	80,62	0	0
Prise d'information sur l'objet critique	2,60	0	97,40	0	0
Temporalité de la prise d'information sur l'objet critique	3,45	0	83,62	0	12,93
Temporalité de l'action	6,47	0	84,12	0	9,41
Vitesse de traitement	15,87	0	84,13	0	0

Nous pouvons remarquer que, dans l'ensemble, aucun des processus n'a été majoritairement mis en défaut, avec un minimum de 70% de scores 0 pour chaque processus, sur l'ensemble des participants.

Si nous nous intéressons plus particulièrement aux processus pour lesquels les participants ont obtenus des scores "-2", nous pouvons calculer le pourcentage de scores "-2" obtenus sur

l'ensemble des événements critiques n'ayant pas entraîné d'accident, par participant (cf. tableau XLIX). Nous pouvons alors comparer ces pourcentages au pourcentage moyen obtenus par le groupe contrôle et situer chaque participant en nombre d'écart-type à la moyenne : 0 signifie entre 0 et 1σ, "-1" signifie entre 1σ et 2σ, et "-2" signifie à plus de 2σ (cf. tableau L).

Tout d'abord, nous pouvons remarquer que les participants contrôles s'écartent peu de leur groupe (peu de "-1" et de "-2"). Au contraire, nous notons une nette différence entre les Co et les CR/CA. L'analyse des scores -2 nous permet donc de discriminer les participants contrôles des participants cérébrolésés. Ensuite, en observant les résultats chez les participants cérébrolésés, nous constatons que la vitesse de traitement, la prise de décision, le contrôle de l'exécution de l'action, et la temporalité de l'action sont déficitaires chez plus de la moitié des participants cérébrolésés CR et CA confondus (à plus de 2σ des participants contrôles). L'échec de ces quatre processus est assez cohérent puisqu'ils sont très liés. En effet, une fois l'information détectée, il faut la traiter pour prendre la décision. Or, si le traitement de l'information est lent, la prise de décision peut arriver trop tardivement ou pas du tout, ce qui est considéré comme un échec en prise de décision. L'action alors entreprise, lorsqu'il y en a une, est réalisée trop tardivement si l'on considère sa temporalité (c'est-à-dire avec un faible TTC) et il n'est pas étonnant, face à la criticité de la situation, qu'elle soit réalisée avec une plus grande intensité (mais donc parfois avec un mauvais contrôle de son exécution). De plus, la vitesse de traitement était étudiée à partir du temps mis pour relâcher l'accélérateur et/ou appuyer sur le frein, après avoir vu l'objet critique. Or, cela inclut également le temps de planification de l'action. Comme nous l'avons vu aux tests neuropsychologiques, la planification est largement déficitaire chez les cérébrolésés CR et CA.

Si nous nous penchons sur les profils individuels, nous pouvons remarquer que CR5 et CR6 ont les profils les plus déficitaires, comme nous l'avions déjà noté avec les résultats aux tests neuropsychologiques. A l'inverse, CR1 a un profil proche des participants contrôles. Parmi les CA, CA3 semble avoir le plus de difficultés, ce que confirment les résultats sur route.

Tableau XLIX : Pourcentage de scores -2 (déficitaire) par processus pour tous les participants, sur l'ensemble des scores aux différents événements critiques n'ayant pas entraînés d'accident.

	Co1	Co2	Co3	Co4	Co5	Co6	Co7	Co8	Co9	CR1	CR2	CR3	CR4	CR5	CR6	CA1	CA2	CA3	CA4	PA1
Adaptation de la vitesse	30	0	8,3	8,33	8,33	0	8,33	17	8,33	22,2	44,4	8,3	8,3	50	33,3	8,3	16,7	36,4	8,3	8,33
Anticipation motrice	14,27	0	13	0	0	0	0	17	57,1	40	33,3	12,5	37,5	50	0	25	0	37,5	33,3	25
Anticipation visuelle	0	20	0	0	0	0	40	0	0	33,3	0	0	0	25	25	0	20	40	25	20
Contrôle de l'exécution de l'action	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	50	0,0	100	100	50	0	50	0	0	50
Prise de décision	0	15,4	0	0	7,69	18,2	7,14	0	7,14	40	18,2	14,3	35,7	66,7	9,1	42,9	21,4	35,7	35,7	14,3
Prise d'information	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	33,3	0	0	0	33,3	0	0
Temporalité de la prise d'information sur l'objet critique	14,27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	33,3	0	0	40,0	0	0
Temporalité de l'action	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12,5	33,3	11,1	33,3	0	33,3	0	11,1	0	0	10
Vitesse de traitement	0	0	0	0	0	0	22,2	0	14,3	50	25	0	50	100	25	14,3	33,3	16,7	33,3	0

Tableau L : Ecart-type de chaque participant par rapport au pourcentage moyen obtenu par le groupe contrôle. En gris figurent les résultats pour lesquels les participants sont à plus de 2σ des participants contrôles. En rouge, les processus majoritairement en échec chez les CR/CA.

	Co1	Co2	Co3	Co4	Co5	Co6	Co7	Co8	Co9	CR1	CR2	CR3	CR4	CR5	CR6	CA1	CA2	CA3	CA4	PA1
Adaptation de la vitesse	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-2	0	0	0	-2	0	0	-2	0	0
Anticipation motrice	0	0	0	0	0	0	0	0	-2	-1	-1	0	-1	-2	0	0	0	-1	-1	0
Anticipation visuelle	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	-1	0	0	0	-1	-1	0	0	-2	-1	0
Contrôle de l'exécution de l'action	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-2	0	-2	-2	-2	0	-2	0	0	-2
Prise de décision	0	-1	0	0	0	-1	0	0	0	0	-1	-1	-2	-2	0	-2	2	-2	-2	-1
Prise d'information	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-2	0	0	0	-2	0	0
Temporalité de la prise d'information sur l'objet critique	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-2	0	0	-2	0	0
Temporalité de l'action	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-2	-2	-2	-2	0	-2	0	-2	0	0	0
Vitesse de traitement	0	0	0	0	0	0	-2	0	-1	-2	-2	0	-2	-2	-2	-1	-2	-1	-2	0
Nombre de 0	7	8	9	9	9	8	7	9	7	4	3	7	4	3	3	7	5	2	5	7
Nombre de -1	0	1	0	0	0	1	1	0	1	3	2	1	1	1	1	1	0	2	2	1
Nombre de -2	2	0	0	0	0	0	1	0	1	2	4	1	4	5	5	1	4	5	2	1

3.1.2.4 Synthèse des processus impliqués dans les événements critiques n'ayant pas causés d'accident

Si l'étude des accidents permettait d'ores et déjà de discriminer en partie les participants cérébrolésés des participants contrôles, l'analyse des processus impliqués dans les événements critique n'ayant pas entraîné d'accidents la complète. De plus, elle a permis de faire ressortir des profils de participants avec des difficultés (CR5 et CR6 par exemple).

Par ailleurs, certains processus ont été particulièrement échoués chez les CR et les CA lors des événements critiques, il s'agit de la vitesse de traitement, de la prise de décision, du contrôle de l'exécution de l'action, et de la temporalité de l'action. La vitesse de traitement avait été notée déficitaire chez la moitié de CR/CA, à la fois sur route et au bilan neuropsychologique. Néanmoins, aucune de ces évaluations ne donnait d'informations quant aux autres processus.

3.1.3 Synthèse de l'étude des événements critiques par rapport aux tests neuropsychologiques et à l'évaluation sur route

Dans l'ensemble, l'étude des événements critiques a permis de discriminer les participants cérébrolésés des participants contrôles. Nous nous sommes ainsi penchés sur l'étude des processus impliqués dans la gestion de ces événements et avons constaté des processus particulièrement échoués chez les CR et les CA comme la vitesse de traitement ou la prise de décision. Des difficultés de vitesse de traitement avaient été notées sur route aux tests neuropsychologiques. Cependant, seul le simulateur nous renseigne sur la prise de décision. Or, il s'agit d'un processus important dans l'activité de conduite automobile.

Par ailleurs, nous avons pu mettre en évidence deux participants cérébrolésés particulièrement déficitaires : CR5 et CR6. Tous les deux ont, en effet, été impliqués dans plusieurs accidents. De plus, même si l'on ne prend pas en compte les événements critiques ayant entraîné un accident, nous constatons qu'ils ont le profil le plus déficitaire lors de l'étude des processus. Ces résultats sont cohérents avec ceux obtenus aux tests neuropsychologiques. Ils concordent également avec l'évaluation sur route pour CR5. Toutefois, les résultats montraient que CR6 semblait compenser en partie ses déficits sur route. Les résultats sur simulateur ne vont pas dans ce sens. Au contraire, CR5 a même reproduit deux fois consécutives le même accident, ce qui laisse augurer des difficultés d'adaptation, avec une certaine persévération.

CR2 avait également un profil majoritairement déficitaire à l'évaluation sur route, avec des déficits touchant principalement les processus impliquant un traitement visuel (exploration visuelle, mobilité du regard, acquisition de l'information, etc.), ce qui entraînait des réponses tardives. Cependant, les tests neuropsychologiques n'allaient pas dans ce sens mais n'expliquaient pas les observations faites sur route. Nous pouvons appuyer avec l'évaluation sur simulateur l'absence de déficit du traitement visuel chez ce participant. La lenteur d'action s'expliquerait plutôt par un défaut de vitesse de traitement, de contrôle de l'exécution de l'action, ou de temporalité de l'action. Le simulateur apporte donc des informations complémentaires aux deux autres évaluations.

3.2 Etude des processus d'attention visuelle à travers les distracteurs visuels

On sait que les cérébrolésés ont souvent des déficits d'attention sélective et qu'ils sont par conséquent plus distractibles que des personnes sans lésions, c'est-à-dire qu'ils ont tendance à moins inhiber des distracteurs comparativement à des contrôles. Afin de tester cette hypothèse, nous avons introduit sur certains parcours des distracteurs visuels. Ils consistaient en des panneaux publicitaires disposés le long de la chaussée. Comme l'étude préliminaire de Milleville et al. (2010) montrait que les cérébrolésés se focalisaient davantage sur l'environnement routier direct, c'est-à-dire proche de la route, et négligeaient l'environnement plus éloigné, nous avons placé les panneaux publicitaires à différentes excentricités.

3.2.1 Etude inter-groupe

3.2.1.1 Effet du groupe

Nous nous sommes demandé si les participants cérébrolésés récents étaient plus distractibles que les participants contrôles, comme le laisse supposer la littérature. Nous nous attendions à ce que les cérébrolésés regardent plus fréquemment et/ou plus longtemps les panneaux publicitaires pendant la tâche de conduite. Au contraire, les participants contrôles devraient davantage les avoir inhibés puisqu'ils ne comportaient pas d'informations pertinentes pour la tâche de conduite. Nous allons donc dans un premier temps nous intéresser au nombre de panneaux vus (cf. figure 30).

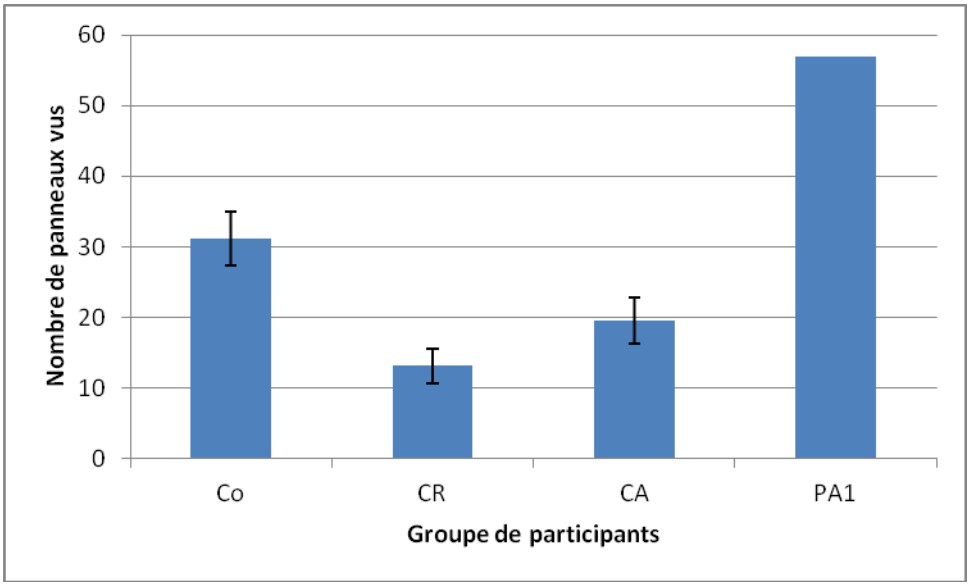


Figure 30 : Nombre de panneaux publicitaires vus et erreurs-type par groupe de participants.

Nous constatons que les CR regardaient moins de panneaux que les CA, qui en regardaient moins que les Co. L'effet du groupe est significatif, comme nous le montre le calcul de l'ANOVA (F (2, 16) = 7,25 p = 0.006). Un test réalisé a posteriori, le Newman-Keuls (cf. tableau LI), indique ce que la différence concernant le nombre de panneaux vus est à la fois significatif entre le groupe Co et le groupe CR mais également entre les Co et les CA. Les cérébrolésés, de manière générale, semblaient se focaliser sur la route et inhiber davantage que les contrôles ce qui n'est pas pertinent pour la conduite. Cependant, la différence n'est pas significative entre les CR et les CA.

Tableau LI : Significativité des comparaisons 2 à 2 a posteriori obtenue par un test de Newman-Keuls.

	Co	CR	CA
Co		0,012	0,048
CR	0,012		0,265
CA	0,048	0,265	

Néanmoins, un panneau peut être regardé une ou plusieurs fois. S'il n'est vu qu'une fois, cela peut dire qu'il a attiré l'attention (et donc remplit son rôle de distracteur) mais que le participant l'a ensuite inhibé puisqu'il n'est pas pertinent pour la conduite. Au contraire, s'il a été regardé plus d'une fois, cela signifie que le participant est revenu sur le distracteur pour le traiter. Nous allons donc nous pencher, non plus sur le nombre de panneaux vus, mais sur le nombre de regards accordés à l'ensemble des panneaux publicitaires (cf. figure 31).

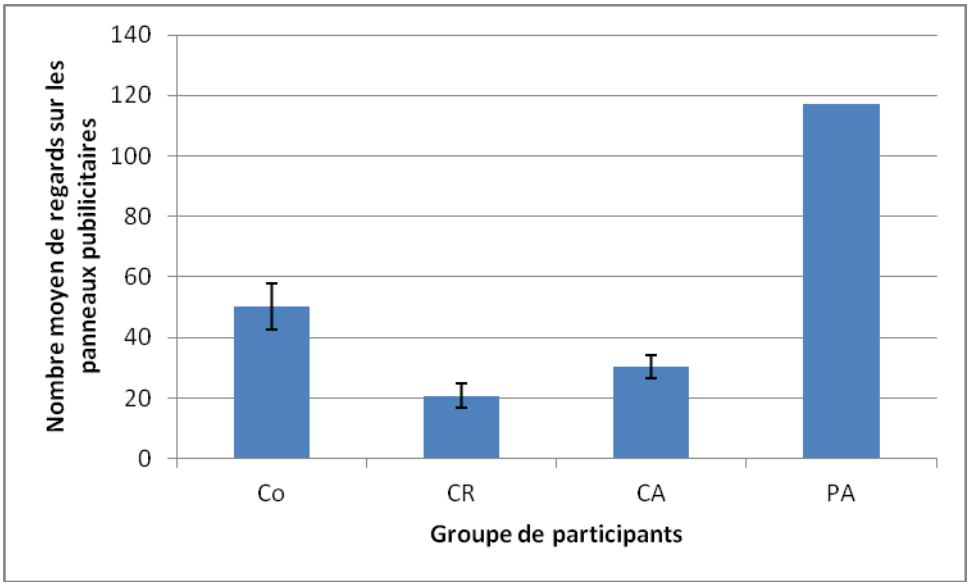


Figure 31 : Nombre moyen de regards accordés à l'ensemble des panneaux publicitaires et erreurs-type, en fonction du groupe de participants.

Pour calculer le nombre moyen de regards accordés à l'ensemble des panneaux publicitaires, nous avons d'abord calculé le nombre total de regards accordés à l'ensemble des panneaux pour chaque participant, puis nous avons calculé la moyenne par groupe.

Tout d'abord, nous notons que les participants CA accordaient moins de regards aux panneaux dans leur ensemble comparativement aux Co, mais davantage que les CR (cf. figure 31). On peut penser que les participants CR se focalisaient sur ce qui était pertinent pour la conduite et ne traitaient pas ce qui ne l'était pas. Un panneau vu ne nécessitait pas qu'on y revienne. Le calcul de l'ANOVA nous indique qu'il y a bien un effet du groupe sur le nombre total de regards accordés aux panneaux ($F (2, 16) = 4,58$. $p = 0.028$). Cependant, un Newman-Keuls a posteriori nous permet de conclure seulement sur la significativité de la comparaison Co/CR (cf. tableau LII).

Tableau LII : Significativité des comparaisons 2 à 2 a posteriori obtenue par un test de Newman-Keuls.

	Co	CR	CA
Co		0,046	0,097
CR	0,046		0,399
CA	0,097	0,399	

Cela signifie que les CR accordaient peu de regards aux panneaux publicitaires de manière générale. Toutefois, le nombre de panneaux vus et le nombre de regards accordés aux panneaux ne nous renseignent pas sur la profondeur de traitement. Pour cela, nous nous sommes intéressés à la durée des regards. En effet, nous supposons que plus la durée de regard sera longue, plus le traitement sera profond. La figure 32 indique la durée moyenne de regard sur les panneaux par groupe. Pour l'obtenir, nous avons calculé la durée moyenne de regard pour chaque participant, puis calculé la moyenne par groupe de participants.

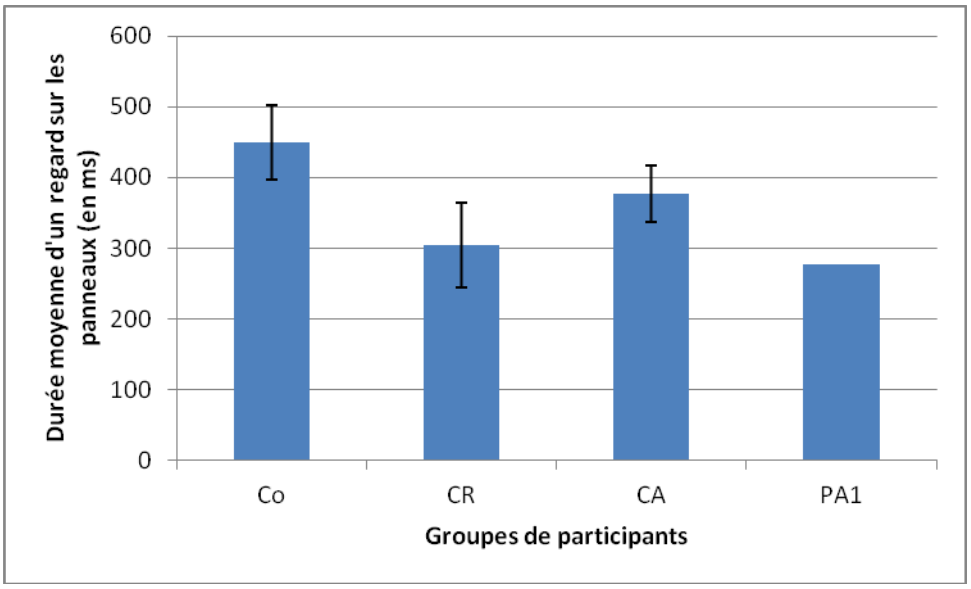


Figure 32 : Durée moyenne d'un regard sur les panneaux publicitaires et erreurs-type par groupe de participants.

Si PA1 regardait davantage les panneaux publicitaires, nous constatons par contre qu'il semblait y consacrer des regards relativement plus courts que les autres participants (cf. figure 32). Par ailleurs, nous pouvons remarquer que les CR effectuaient un traitement beaucoup plus court, avec des moyennes de regards plus faibles que les contrôles. Comme pour le nombre de panneaux vus et le nombre de regards accordés aux panneaux, les CA semblent se situer entre les Co et les CR en ce qui concerne la durée moyenne de regard.

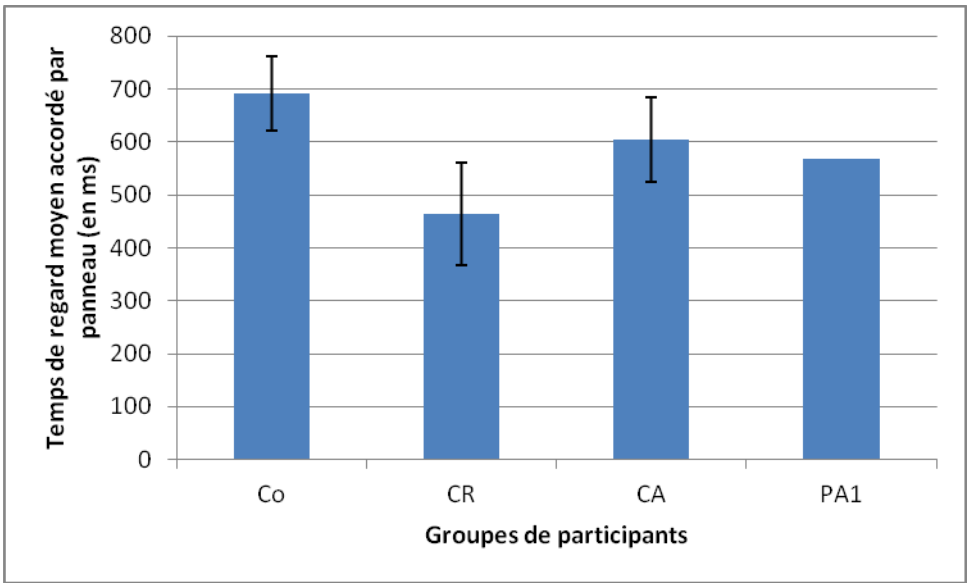


Figure 33 : Temps de regard moyen accordé à chaque panneau regardé, par groupe de participants.

Afin d'étudier l'effet du groupe, nous avons calculé une ANOVA. Cet effet n'est pas significatif sur la durée moyenne d'un regard sur les panneaux publicitaires (F (2, 16) = 3,47. p = 0.056), ni pour le temps de regard moyen accordé à chaque panneau regardé (cf. figure 33) (F (2, 16) = 2,67. p = 0.10). Toutefois, lorsque l'on considère le temps cumulé total (cf. figure 34), on observe un effet du groupe (F (2, 16) = 5,22. p = 0.018).

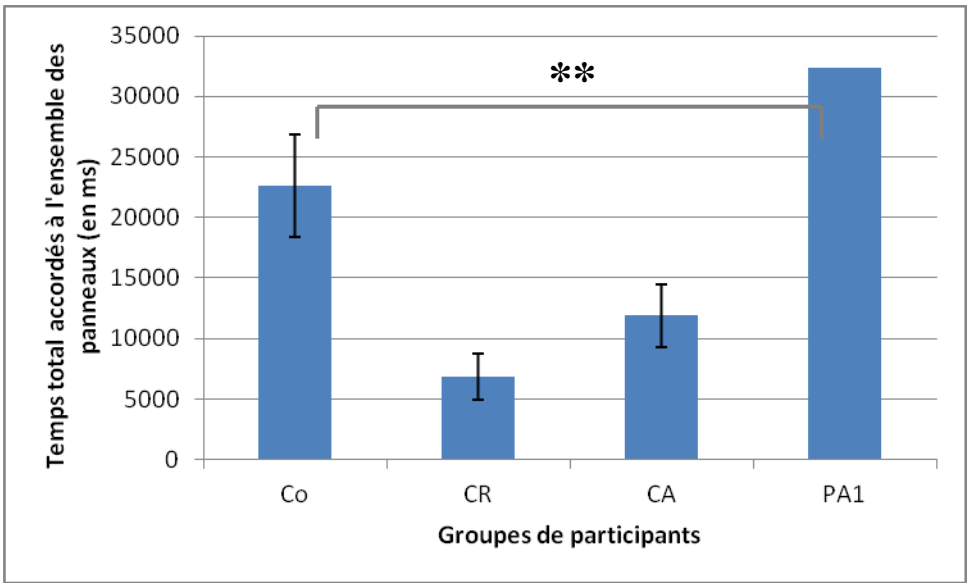


Figure 34 : Temps cumulé total accordé aux panneaux publicitaires, moyenné par groupe de participants.

Le test de Newman-Keuls effectué sur les temps cumulés totaux accordés aux panneaux publicitaires nous montre une différence significative entre les Co et les CR (cf. tableau LIII).

Les autres comparaisons ne sont pas significatives, même si nous observons une tendance en ce qui concerne la comparaison Co/CA.

Tableau LIII : Significativité des comparaisons 2 à 2 a posteriori du temps cumulé total accordé aux panneaux publicitaires obtenue par un test de Newman-Keuls.

	Co	CR	CA
Co		0,034	0,078
CR	0,034		0,384
CA	0,078	0,384	

Cela signifie que les CR sont allés regarder les panneaux moins longtemps au total que les Co. Néanmoins, un regard chez les CR durait aussi longtemps que chez les Co et un panneau exploré chez les CR était exploré aussi longtemps que chez les Co.

On a donc bien un effet du groupe sur le nombre de panneaux vus, le nombre de regards vers les panneaux et la durée totale de regard. Dans l'ensemble, les CR regardent moins les panneaux (en quantité de regard et durée de regard) que les Co. Cela va à l'encontre de notre hypothèse postulant d'une plus forte distractibilité chez les cérébrolésés (CR et CA). Il n'y aurait donc pas, de manière générale, de difficulté d'attention sélective. Ces résultats sont cohérents avec ceux observés aux tests neuropsychologiques, et notamment au test de Stroop. Cependant, les résultats montrent que les CR inhibent davantage les distracteurs que les Co. On peut se demander si cela n'indiquerait pas davantage un problème d'attention partagée : ayant du mal à partager leur attention entre l'environnement proche et l'environnement périphérique, les CR se focaliseraient sur l'environnement proche. Afin de tester cette hypothèse, nous avons positionné des panneaux à différentes excentricités. Nous allons maintenant étudier l'effet de cette excentricité sur l'exploration des panneaux par les cérébrolésés.

3.2.1.2 Effet de l'excentricité

Nous nous sommes également intéressés à l'effet de l'excentricité du panneau sur les fréquences et durées de regards. En effet, l'étude préliminaire de Milleville-Pennel et al. (2010) montrait que les cérébrolésés se focalisaient davantage sur l'environnement routier direct, c'est-à-dire proche de la route, et négligeaient l'environnement plus éloigné.

Nous avons donc introduit des panneaux à différentes excentricités, proches de la route (peu excentrés) ou pus éloignés (très excentré). On s'attendait à ce que participants cérébrolésés regardent peu les panneaux très excentrés mais beaucoup les panneaux peu excentrés, comparativement aux contrôles en cas de difficulté d'attention partagée. Nous nous sommes intéressés, tout comme précédemment, au nombre de panneaux vus, au nombre de regards portés sur les panneaux, au temps moyen accordé à chaque panneau ainsi qu'au temps total accordés aux panneaux. Les données sont représentées sur les figures 35 et 36.

Quelle que soit la variable étudiée, l'effet de l'excentricité est significatif ($p < 0.001$). Les panneaux peu excentrés sont regardés plus souvent que les panneaux très excentrés, indépendamment du groupe.

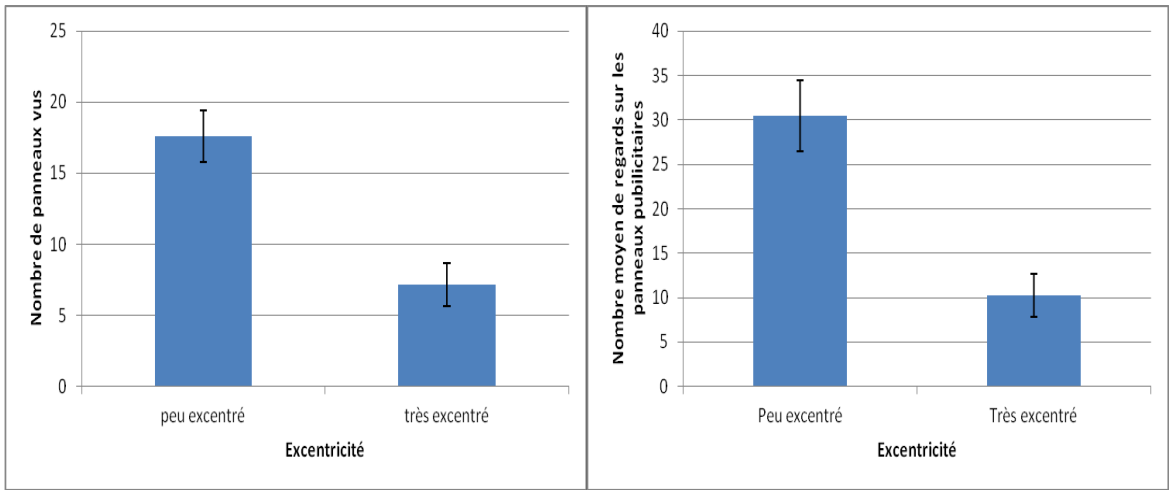


Figure 35 : Nombre de panneaux vus (à gauche) et nombre de regards total accordés aux panneaux (à droite) en fonction de l'excentricité.

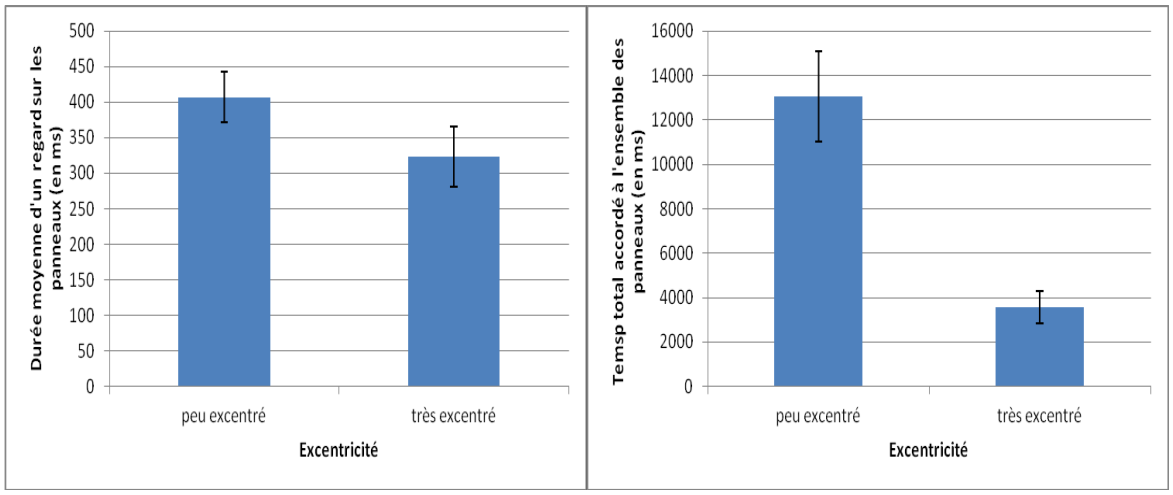


Figure 36 : Durée moyenne d'un regard sur les panneaux (à gauche) et temps total de regard accordés à l'ensemble des panneaux (à droite) en fonction de l'excentricité.

Plus l'excentricité était importante, moins les participants ont regardé les panneaux. Cela n'est pas vraiment surprenant. Il paraît logique qu'on explore davantage l'environnement proche de la route où peut se situer un danger immédiat. Toutefois, ces résultats sont présentés pour l'ensemble des participants. Or, il est possible que les participants cérébrolésés explorent moins l'environnement éloigné que les participants contrôles à cause d'un déficit d'attention partagée. Nous allons donc étudier s'il existe une interaction en ces deux facteurs.

3.2.1.3 Effet d'interaction entre le groupe et l'excentricité

Lorsque nous nous intéressons au nombre de panneaux vus ou au nombre de regards moyen portés sur les panneaux, nous ne remarquons pas d'effet d'interaction significatif entre le groupe et l'excentricité. Cependant, nous observons un effet significatif lorsque nous étudions le temps total de regard consacré à l'ensemble des panneaux publicitaires ($F(2, 16) = 4,27$, $p = 0,033$) (cf. figure 37 et tableau LIV).

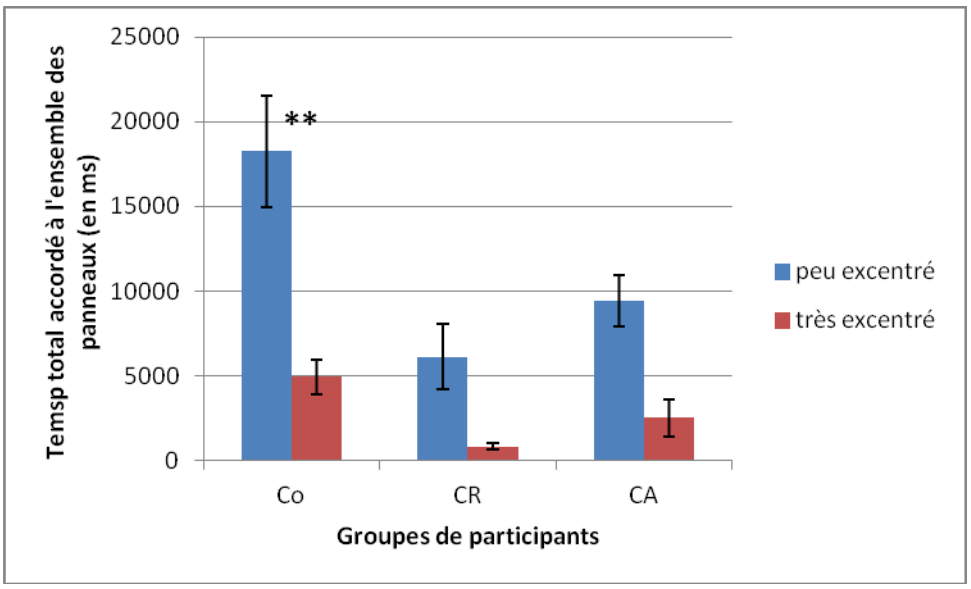


Figure 37 : Temps total de regard consacré à l'ensemble des panneaux publicitaires (et erreur-type), pour les groupes de participants Co, CR et CA en fonction de leur excentricité à la route.

Toutefois, nous avons vu dans les précédentes analyses qu'il peut exister une grande disparité entre les participants cérébrolésés. Il est donc nécessaire de se pencher sur les résultats individuels.

Tableau LIV : Significativité des comparaisons 2 à 2 a posteriori du temps cumulé total accordé aux panneaux publicitaires obtenue par un test de Newman-Keuls pour l'effet d'interaction entre le groupe et l'excentricité du panneau.

		Co		CR		CA	
		Peu excentré	Très excentré	Peu excentré	Très excentré	Peu excentré	Très excentré
Co	Peu excentré		0,000377	0,003416	0,000332	0,013544	0,000726
	Très excentré	0,000377		0,606547	0,518560	0,307594	0,580337
CR	Peu excentré	0,003416	0,606547		0,165340	0,337230	0,533758
	Très excentré	0,000332	0,518560	0,165340		0,098100	0,589311
CA	Peu excentré	0,013544	0,307594	0,337230	0,098100		0,058077
	Très excentré	0,000726	0,580337	0,533758	0,589311	0,058077	

3.2.2 Etude intra-groupe

Nous ne nous intéresserons ici qu'aux résultats des participants CR et CA ainsi qu'à ceux de PA1, qui semble se différencier des contrôles comme on l'a vu sur les figures 30, 31 et 34. Nous comparerons ces participants au groupe contrôle de la manière dont nous avons procédé pour l'étude des processus impliqués dans les événements critiques. Ainsi, les participants ont obtenu un score de "-2" lorsqu'ils se situaient au-delà de -2 écarts-types, une score de "-1" lorsqu'ils se situaient entre -1 et -2 écarts-types, "0" entre -1 et +1 écarts-types, "+1" entre +1 et +2 écarts-types, et "+2" au delà de +2 écarts-types. Nous avons ainsi étudié plusieurs variables : le nombre de panneaux vus, le nombre total de regards accordés aux panneaux, la durée moyenne d'un regard, le temps d'exploration moyen d'un panneau et le temps total d'exploration des panneaux. De manière générale, lorsque l'on considère les résultats concernant ces différentes variables pour les CR, les CA et PA1 (cf. tableau LV), nous observons ce qui a déjà été remarqué précédemment, c'est-à-dire des scores plus faibles chez les participants CR et CA (de nombreux scores "-1") que chez les Co. Cette différence concerne davantage le nombre de panneaux vus et le nombre total de regard que les durées de regards, ce qui amène à un temps total accordé aux panneaux moins importants que chez les Co. Néanmoins, nous pouvons remarquer que la moitié des CA (CA3 et CA4) se comporte comme les Co.

En étudiant en détail ces résultats, sans tenir compte de l'excentricité du panneau, nous pouvons remarquer que 2 participants se distinguent avec des résultats extrêmes concernant le nombre de panneaux vu et le nombre total de regards sur les panneaux.

Tableau LV :Scores obtenus par les participants CR, CA et PA1 en comparaison du groupe contrôle aux différentes variables utilisées pour étudier l'effet des panneaux publicitaires.

	CR1	CR2	CR3	CR4	CR5	CR6	CA1	CA2	CA3	CA4	PA1
Nombre de panneaux vus	-1	-1	-1	-1	-2	-1	-1	-1	0	0	+2
Nombre total de regards	0	-1	-1	-1	-2	-1	-1	-1	0	0	+2
Durée moyenne d'un regard	-1	0	-1	-1	-1	0	0	-1	0	0	-1
Temps d'exploration moyen d'un panneau	0	0	-1	0	-1	0	0	-1	0	0	0
Temps total accordé aux panneaux	-1	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	0	0

D'une part, PA1 a vu plus de panneaux comparativement au groupe contrôle. C'est ce que laissait présager les résultats vus figures 30 et 31. Nous pouvons également voir (tableau LVI) que ce résultat s'observe à la fois pour les panneaux peu excentrés et les panneaux très excentrés, avec une sur-exploration plus marquée pour ces derniers. Nous pouvons penser à une distractibilité dûe à un défaut d'attention sélective puisque les panneaux, non pertinents, ont été sélectionnés au lieu d'être inhibés. Toutefois, nous pouvons noter que le temps total accordé aux panneaux est comparable à celui des contrôles. PA1 a donc regardé les panneaux plus souvent mais aussi longtemps au total que les contrôles. Nous pouvons éventuellement envisager une capture attentionnelle déficitaire qui obligerait PA1 à regarder les panneaux, mais un processus d'inhibition efficace, qui lui permettrait de ne pas les traiter longtemps. Néanmoins, ses résultats aux tests neuropsychologiques et notamment au Stroop (score "0") ne confirment pas cette hypothèse.

Tableau LVI : Scores obtenus par les participants CR, CA et PA1 en comparaison du groupe contrôle aux différentes variables utilisées pour étudier l'effet des panneaux publicitaires en fonction de l'excentricité des panneaux.

	Excentricité	CR1	CR2	CR3	CR4	CR5	CR6	CA1	CA2	CA3	CA4	PA1
Nombre de panneaux vus	Peu excentré	-1	0	-1	-1	-2	-1	-1	-1	0	0	+1
	très excentré	-1	-1	0	1	NA	-1	-1	-1	0	0	+2
Nombre total de regards	peu excentré	0	0	-1	-1	-2	-1	0	-1	0	0	+2
	très excentré	0	-1	0	-1	NA	-1	-1	-1	0	0	+2
Durée moyenne d'un regard	peu excentré	-1	0	-1	-1	-2	0	0	-1	0	0	-1
	très excentré	0	0	-1	0	NA	0	0	-1	0	+2	0
Temps d'exploration moyen d'un panneau	peu excentré	0	0	-1	-1	-2	-1	0	0	0	0	0
	très excentré	0	-1	-1	0	NA	0	0	-1	0	+1	0
Temps total accordé aux panneaux	Peu excentré	-1	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	0	0
	très excentré	-1	-1	-1	-1	NA	-1	-1	-1	0	0	0

D'autre part, CR5 a obtenu des scores inférieurs aux contrôles sur toutes les variables (cf.

tableau LV) et notamment concernant le nombre de panneaux vus et le nombre total de regard. CR5 accordait donc peu de regards aux panneaux, à l'inverse de PA1. Bien entendu, nous ne pouvons pas supposer ici un déficit d'attention sélective, bien au contraire. Nous pouvons proposer deux explications possibles : un déficit d'attention partagée, avec une exploration focalisée sur la route ou un déficit d'exploration visuelle plus large.

Dans le tableau LVI, nous pouvons observer pour CR5 l'absence de valeur (NA) pour les panneaux très excentrés, ce qui signifie qu'aucun regard n'a été accordé aux panneaux très excentrés. Par ailleurs, en comparaison des contrôles, CR5 regarde aussi moins les panneaux peu excentrés. Cela tend à confirmer nos hypothèses d'un déficit d'attention partagée, avec une sur-inhibition des informations non pertinentes, de l'environnement proche et périphérique, ou un déficit d'exploration visuelle plus large. Les tests neuropsychologiques et l'évaluation sur route nous confortent dans cette idée en montrant des difficultés d'exploration et de traitement des informations visuelles assez larges ainsi qu'un déficit d'attention partagée au test du TAP.

Concernant les autres participants, il n'y a pas de tendance générale en ce qui concerne le nombre et la durée des regards en fonction de l'excentricité. Nous pouvons signaler CR2 qui tend à inhiber davantage les panneaux les plus excentrés et se comporte comme un Co concernant les panneaux peu excentrés. On peut mettre ce résultat en lien avec son déficit d'attention partagée au test de Baddeley et avec ses difficultés de mobilité du regard/observation de l'environnement constatées sur route. A l'inverse, CR3 et CR4 inhibent davantage les panneaux peu excentrés, y accordant proportionnellement moins de regard pour CR3 et moins de temps pour CR4 que les participants Co.

3.2.3 Synthèse des résultats concernant l'étude des processus attentionnels à travers des distracteurs visuels

Pour conclure sur les résultats observés dans cette partie, nous pouvons signaler tout d'abord que les participants CR consacraient moins de regards et moins de temps au total à l'exploration des panneaux publicitaires que les Co. Cela infirme notre hypothèse d'une plus grande distractibilité chez les CR. Toutefois, nous aurions pu penser que ces résultats indiquaient un déficit d'attention partagée, les CR ayant des difficultés à partager leur attention entre l'environnement proche et plus éloigné, ils se focaliseraient sur la route. Nous avons donc introduit des panneaux à différentes excentricités. Si, de manière générale, les panneaux

très excentrés sont moins regardés par l'ensemble des participants que les panneaux peu excentrés, l'étude des panneaux à différentes excentricités ne valide pas non plus l'hypothèse d'un déficit d'attention partagée. En effet, nous nous attendions à ce que les panneaux très excentrés soient davantage inhibés que les panneaux peu excentrés. Or, les résultats montrent que les participants CR inhibent autant, voire davantage (selon la variable considérée) les panneaux peu excentrés que les panneaux très excentrés, comparativement aux participants contrôles. Néanmoins, si nous ne pouvons pas conclure clairement à un déficit d'attention partagée, nous pouvons nous demander si cette sur-inhibition d'objets non pertinents pour la conduite ne reflèterait pas un défaut d'exploration visuelle, comme tendent à le montrer les résultats aux tests neuropsychologiques et à l'évaluation sur route. Pour en discuter, il aurait fallu étudier l'exploration visuelle concernant des objets pertinents pour la conduite, tels que les panneaux de signalisation. En effet, ces panneaux, placés à une excentricité proche des panneaux publicitaires peu excentrés, devraient être moins regardés en cas de défaut d'exploration visuelle.

3.3 Ralentissement de la vitesse de traitement

Un autre aspect souvent mis en cause dans les déficits des cérébrolésés est la vitesse de traitement des informations qui serait ralentie. Pour tester cette vitesse de traitement dans une situation écologique, nous avions mis au point un exercice simple qui demandait au conducteur de freiner le plus rapidement possible lorsqu'un signal stop apparaissait sur l'écran. Les participants ne réalisaient qu'un seul essai.

Nous nous intéressions au délai écoulé entre l'apparition du signal stop, le relâchement de la pédale d'accélérateur et l'action sur la pédale de frein. En cas de ralentissement de la vitesse de traitement, le relâchement de l'accélérateur et le freinage devraient être plus tardifs.

Tout d'abord, il est apparu qu'un participant contrôle (Co6) se situait à plus de 2 écarts-types de son groupe concernant le délai entre l'apparition du signal et le relâchement de l'accélérateur (747 ms, pour une moyenne du groupe contrôle à 526ms, $\sigma = 110$). Par ailleurs, ses autres temps sont relativement longs par rapport aux autres participants contrôles (entre $+1{,}5\sigma$ et $+2\sigma$). Nous avons donc décidé de ne pas tenir compte de ses résultats dans le calcul de la moyenne et de l'écart-type du délai d'apparition du signal et les différentes actions sur les pédales pour le groupe contrôle. Nous avons donc calculé de nouveau la moyenne et l'écart-type pour le groupe contrôle privé de Co6, que nous nommons Co* (tableau LVII).

Tableau LVII : Moyennes et écarts-types des délais entre l'apparition du signal et les différentes actions sur les pédales par groupes.

	Co*	CR	CA	PA1
Délai signal - relâchement de l'accélérateur	498 (σ = 78)	540 (σ =98)	511 (σ =76)	581
Délai relâchement de l'accélérateur - appui sur le frein	722 (σ =119)	797 (σ =107)	797 (σ =141)	814
Temps de réaction total	1220 (σ =192)	1337 (σ =191)	1308 (σ =213)	1395

Les résultats (figure 38) montrent peu de différences entre les participants CR, CA et les Co*, ou même PA1 concernant les différents temps d'action. Toutefois, nous remarquons que CR4 apparaît beaucoup plus lent que les autres, quelle que soit l'action concernée. En effet, il se situe à plus de 2 écart-types du groupes Co*, aussi bien pour le délai entre l'apparition du signal et le relâchement de l'accélérateur que pour le délai écoulé entre le relâchement de l'accélérateur et l'appui sur le frein. Une explication de tels résultats serait une vitesse de traitement ralentie. Cette hypothèse est confirmée par les résultats aux tests neuropsychologiques, puisque CR4 a été noté déficitaire au D2 qui évalue la vitesse de traitement et au test 1 de l'UFOV qui s'intéresse à la vitesse de traitement dans le champ visuel central.

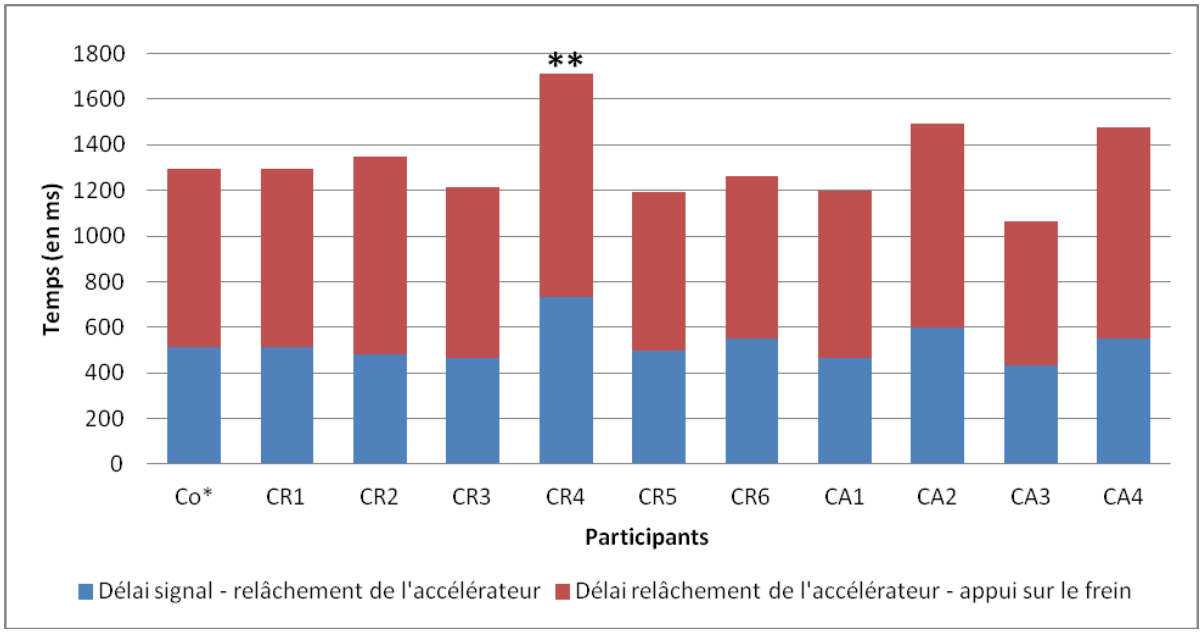


Figure 38 : Décomposition des temps d'action sur les pédales (en ms) après l'apparition du signal stop, pour les CR et les CA, en comparaison aux temps moyens des participants contrôles (Co6 exclu).

Contrairement à ce qu'indique la littérature, la majorité de nos participants cérébrolésés CA et CR ne présentent pas de ralentissement de la vitesse de traitement, évaluée dans une tâche écologique. C'est également ce qu'indiquait l'évaluation sur route. Toutefois, les tests neuropsychologiques n'allaient pas dans ce sens. En effet, 50% des CR et des CA étaient notés déficitaire au D2 en ce qui concerne la vitesse de traitement. Or, la principale différence entre d'une part, l'évaluation sur simulateur et sur route, et, d'autre part, les tests neuropsychologiques, est l'aspect écologique de la tâche.

4 Confrontation des évaluations : apport du simulateur de conduite

Comme nous l'avons rappelé tout au long de ce chapitre, chaque évaluation prise séparément nous permet de discriminer les groupes cérébrolésés du groupe contrôle. Elles sont donc justifiées dans ce protocole d'évaluation. Par ailleurs, si nous confrontons les résultats obtenus aux différentes évaluations, elles sont cohérentes. Ainsi, les participants notés majoritairement déficitaires aux tests neuropsychologiques tendent à l'être sur route et sur simulateur, comme le montrent les participants CR5, CR6, ou CA3. A l'inverse, les participants qui ont les meilleurs résultats sur route ou simulateur sont également ceux qui ont les meilleurs résultats au bilan neuropsychologique, comme CR1. Toutefois, les résultats ne sont pas identiques entre les évaluations. Si l'on reprend l'exemple de CR5 et CR6, ils ont le même profil déficitaire aux tests neuropsychologiques et sur simulateur, toutefois CR6 a obtenu de meilleurs résultats que CR5 sur route. Si nous ne nous basions que sur les résultats sur route et aux tests neuropsychologiques, nous aurions pu conclure que CR6 mettait en place des compensations sur route, ce dont ne semble pas capable CR5. Pourtant, les résultats sur simulateur montrent clairement que CR6 présente les mêmes difficultés que CR5, si elles ne sont pas plus importantes. En effet, la répétition d'un accident laisse penser à des capacités d'adaptation limitées. Ses compétences actuelles ne semblent donc pas suffisantes pour reprendre la conduite de manière sécurisée.

Un autre cas montre l'apport du simulateur de conduite. En effet, le participant CR2 était considéré, sur route, comme déficitaire dans tout ce qui concernait la prise d'information car il agissait tardivement, comme s'il n'avait pas vu. Or, les tests neuropsychologiques ne montraient pas de déficits des processus impliquant un traitement visuel. Seule la vitesse de traitement elle-même était déficitaire. Le simulateur, et notamment l'oculomètre, ont permis de montrer que la prise d'information s'effectuait correctement (bonne sélection et bonne tempo-

ralité de la prise d'information), cependant la vitesse de traitement était touchée et la mise en œuvre de l'action très tardive En cas de doute lors des résultats sur route, le simulateur tend à confirmer le bilan neuropsychologique.

Cependant, nous n'avons pas pu analyser toutes les données sur simulateur à ce jour, en raison des contraintes temporelles liées à la thèse. Ainsi, l'effet des consignes et l'effet de la charge auditive supplémentaire n'ont pas pu être traités pour le moment mais le seront ultérieurement. Ces résultats auraient pu apporter des informations complémentaires concernant les capacités d'adaptation et d'attention partagée, sur laquelle il est difficile de statuer pour le moment.

Néanmoins, à partir de la confrontation des résultats aux trois évaluations, nous avons dressé un bilan des mécanismes déficitaires en conduite chez chaque participant. Cela nous a permis d'orienter le ré-entraînement que les CR ont effectué par la suite. Sur les 6 participants CR, quatre ont pu effectuer le ré-entraînement et la ré-évaluation dans leur ensemble : CR1, CR2, CR3, et CR5. A la suite de la deuxième évaluation, les résultats de CR2 et CR3 s'étaient suffisamment améliorés pour que l'auto-école donnent un avis positif quand à la reprise de la conduite, sans restriction. Ces deux participants ont d'ailleurs pu reconduire sans restriction après en avoir fait la demande à la préfecture, avec toutefois un contrôle tous les ans.

Concernant CR5, nous avions noté un déficit d'attention partagée qui se manifestait notamment en conduite par une difficulté à gérer le levier de vitesse, les pédales et observer simultanément l'environnement de conduite. Nous avons donc décidé d'effectuer l'ensemble du ré-entraînement avec une voiture adaptée avec une boîte automatique. Grâce à cette modification, ce participant a également pu reprendre la conduite, à condition d'utiliser une boîte automatique. Nous avions suggéré d'autres restrictions momentanées comme conduire sur des trajets habituels ou éviter de conduite la nuit. Lors du renouvellement du permis, la préfecture a tenu compte de toutes les propositions de restrictions que nous avions formulées.

Enfin, concernant CR1, son anosognosie rendait le ré-entraînement peu efficace. De plus, des troubles psychiatriques ont fait apparaître de nouvelles difficultés. Les résultats sur simulateur et sur route étaient unanimes lors de la deuxième évaluation : Ce participant présentait de trop grandes difficultés pour effectuer correctement les diverses tâches de conduite et conduire en toute sécurité, pour lui et les autres usagers. Sa demande de renouvellement de permis a d'ailleurs été refusée par la préfecture, après lecture de nos recommandations, au soulagement de la famille de ce participant.

CHAPITRE 7 - DISCUSSION GENERALE

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

1 Synthèse des principaux résultats

Dans ce travail de thèse, nous avions déterminé deux objectifs, chacun posant de nombreuses hypothèses :

1. Valider l'utilisation d'un simulateur de conduite pour évaluer les compétences de conduite, comparativement à une batterie de tests neuropsychologiques et à une évaluation sur route ;

2. Montrer comment le simulateur de conduite pouvait permettre d'étudier de manière approfondie des processus cognitifs déficitaires.

Dans ce chapitre, nous reviendrons sur chacun des objectifs. Nous récapitulerons ainsi les conclusions apportées ainsi que les questions qui restent en suspens dans l'immédiat. Cela nous permettra de discuter les apports de la simulation pour l'évaluation de la conduite mais aussi d'évoquer les limites rencontrées, principalement d'ordre méthodologique et d'ouvrir sur les perspectives.

1.1 Premier objectif : validation de l'utilisation d'un simulateur de conduite pour évaluer les compétences de conduite comparativement à une batterie de tests neuropsychologiques et à une évaluation sur route

1.1.1 Etude de la validité écologique du simulateur de conduite

Dans un premier temps, nous avons évalué la validité écologique du simulateur de conduite comparativement à la conduite sur route.

Les résultats ont montré que les données physiologiques comme le rythme cardiaque peuvent être ambiguës et complexes à interpréter. Des données moins objectives telles que les questionnaires permettent de compléter ces données. L'analyse des questionnaires a montré que, même si la conduite avec auto-école est perçue sur certains aspects comme plus réaliste, elle est aussi plus stressante que la conduite sur simulateur.

Ces résultats sont donc en faveur d'une validité partielle du simulateur de conduite, suffisante pour qu'il puisse être un bon outil d'évaluation lors d'une première confrontation à la reprise de la conduite. Cette situation permet notamment d'éviter qu'un stress trop important puisse induire un échec ou une détérioration de la performance.

Enfin, lors de cette étude, nous avons pu noter que les participants estiment que l'immersion et la présence dans les situations réelles ne sont jamais parfaites (aucune valeur à

100%). Parfois, l'estimation est même relativement faible (56,21%). Considérer la présence perçue dans un environnement virtuel sans la comparer à la présence perçue dans une situation similaire dans la réalité serait donc une erreur.

1.1.2 Evaluation des compétences de conduite sur simulateur par rapport aux tests neuropsychologiques et à l'évaluation sur route

La validité écologique du simulateur de conduite étant avérée, il restait à déterminer si ce dernier était réellement un outil pertinent pour l'évaluation des compétences de conduite. Nous voulions notamment montrer que l'évaluation sur simulateur, permettait d'évaluer les compétences de conduite de façon au moins aussi pertinente que les tests neuropsychologiques et l'évaluation sur route.

Tout d'abord, il apparaît que les résultats provenant les différentes évaluations ne sont pas unanimes. Bien que les trois protocoles soient cohérents quant aux participants jugés comme les plus déficitaires, nous pouvons remarquer que les participants cérébrolésés sont largement notés déficitaires aux tests neuropsychologiques, alors que ce n'est pas systématiquement le cas aux épreuves de conduite sur simulateur et sur route. La notation peut donc sembler moins sévère lors de la conduite. Il faut cependant considérer que les épreuves de conduite permettent de mettre en place des stratégies de compensation des déficits cognitifs, ce qui n'est pas possible avec les tests neuropsychologiques. Les performances observées en situation de conduite tendent donc plutôt à prouver qu'un processus très déficitaire n'implique pas systématiquement une incapacité à conduire et cela même s'il s'agit d'un processus identifié comme étant essentiel à l'activité de conduite.

Nous avons donc pu montrer que le simulateur de conduite peut permettre d'évaluer les compétences en conduite, et cela tout autant que l'évaluation sur route comparativement aux tests neuropsychologiques.

1.1.3 Cohérence et complémentarité du protocole d'évaluation des compétences de conduite

La mise en relation des trois évaluations nous a permis de montrer la cohérence et la complémentarité de notre protocole d'évaluation. En effet, si les résultats ne sont pas totalement identiques d'une évaluation à l'autre, ils vont néanmoins dans le même sens et tendent à mettre en évidence, si ce ne sont des déficits, au moins des difficultés dans certains processus

primordiaux en conduite. En effet, si l'on prend l'exemple de CR5, il avait le profil le plus déficitaire aux trois évaluations. Ainsi, de manière générale, les résultats sur simulateur sont cohérents avec ceux obtenus sur route et aux tests neuropsychologiques. Le protocole d'évaluation semble donc cohérent.

Toutefois, nous avons remarqué dans certains cas que le simulateur de conduite permettait de clarifier ou préciser certains résultats. Par exemple, CR6 présentait un profil très déficitaire aux tests neuropsychologiques mais semblait compenser en situation réelle. Or, les résultats sur simulateur ont permis de montrer que s'il avait de meilleurs résultats sur route, cela ne signifiait pas qu'il avait une conduite sécurisée. En effet, en plus d'être noté déficitaire pour de nombreux processus, CR6 a aussi été impliqué dans plusieurs accidents, dont un mettant en cause ses capacités d'adaptation. Les résultats sur simulateur ont donc appuyé les résultats neuropsychologiques en confrontant le participant à des événements critiques, chose qui n'est pas possible sur route. Un autre exemple est celui de CR2. Ce participant était considéré, sur route, comme déficitaire dans tout ce qui concernait la prise d'information car il agissait tardivement, comme s'il n'avait pas vu les éléments pertinents à prendre en compte. Or, le simulateur, et notamment l'oculomètre, ont permis de montrer que la prise d'information s'effectuait correctement (bonne sélection et bonne temporalité de la prise d'information), cependant la mise en place de l'action était très tardive.

Le simulateur apporte donc des informations complémentaires à l'évaluation sur route et aux tests neuropsychologiques.

1.2 Deuxième objectif : Apport du simulateur de conduite pour l'étude des mécanismes cognitifs déficitaires lors de la conduite

Le deuxième objectif visait à cibler les mécanismes importants mis en jeu dans la conduite automobile et à montrer comment le simulateur de conduite pouvait contribuer à étudier les conséquences de leur dysfonctionnement. Nous nous sommes ainsi intéressés aux processus attentionnels (attention sélective et attention partagée), au contrôle cognitif (avec l'anticipation et l'adaptation), et à la vitesse de traitement.

1.2.1 Etude de l'attention sélective

Notre objectif était de montrer en quoi le simulateur de conduite pouvait être un bon outil pour évaluer les capacités d'attention sélective dans une situation écologique. Nous avions

pour cela utilisé des distracteurs visuels (panneaux publicitaires) dont nous avions contrôlé l'attractivité potentielle. Ces distracteurs étaient placés à différentes excentricités par rapport à la route, cela afin de s'assurer que les panneaux seraient effectivement placés dans le champ visuel des conducteurs même dans le cas ou un défaut d'attention partagée les conduirait à focaliser leur attention sur la gestion de la trajectoire du véhicule et ainsi à réduire la zone visuelle explorée (Milleville-Pennel et al., 2010). Nous avons ainsi pu montrer que les participants cérébrolésés sont peu distraits par les distracteurs et cela quelle que soit leur position. Le simulateur a donc permis de déterminer de façon systématique et contrôlée que nos participants cérébrolésés ne souffrent pas d'un défaut d'attention sélective et cela même dans une situation écologique très riche en distracteurs visuels.

Nous pouvons signaler un autre résultat intéressant : Les participants cérébrolésés accordent même moins d'attention aux distracteur que les participants contrôles. Cela nous permet de suspecter un défaut d'attention partagée. On peut en effet supposer que, disposant de moins de ressources attentionnelles, les participants cérébrolésés se focalisent volontairement sur la situation de conduite et accordent le minimum d'attention à ce qu'ils considèrent comme non pertinent. Cela peut également être le signe d'une sur-inhibition des informations de l'environnement (à tort peut-être parfois). Le système est surchargé et ne sélectionne que le strict minimum pour assurer la tâche principale de conduite : la gestion de trajectoire. Une solution pour vérifier cela serait de comparer l'observation d'éléments non pertinents pour la conduite (les panneaux publicitaires) avec celle d'éléments pertinents pour la conduite (les panneaux de signalisation). De plus, les panneaux peu excentrés ne se situaient pas dans l'environnement de conduite direct (c'est-à-dire sur la route). Même proches de la route, il est possible qu'ils ne fassent pas partie de la zone visuelle sur laquelle les participants cérébrolésés se focalisaient. Dans une prochaine étude nous envisageons donc d'introduire des panneaux sur des véhicules insérés dans la circulation.

1.2.2 Etude de l'anticipation

L'anticipation est un processus important en conduite automobile. Pour l'étudier, nous avions eu recours à des événements critiques qu'il fallait anticiper, de manière visuelle et/ou motrice, pour éviter un accident. Dans l'ensemble, les événements critiques sur simulateur n'ont pas permis de discriminer les participants CR et CA des participants Co sur la base de l'anticipation. Nos participants CR et CA ne sont donc pas davantage déficitaires en anticipa-

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

tion que les Co. Cependant, le simulateur a permis d'aller vérifier les regards sur les zones-clés pour l'anticipation et aussi de déterminer si un défaut d'anticipation était bien en cause dans les accidents lorsqu'on le soupçonnait. De cette manière, le simulateur apporte des informations pertinentes pour orienter vers un réentrainement éventuel dans des situations identifiées comme difficiles à gérer par les participants.

1.2.3 Etude de la vitesse de traitement

En étudiant la vitesse de traitement, nous avons pu montrer dans une situation écologique que la plupart des CR de notre échantillon ne présentait pas de ralentissement, contrairement à ce qui était attendu. Néanmoins, le simulateur de conduite nous a permis d'identifier un participant qui présentait une vitesse de traitement ralentie.

En conclusion, nous avons montré que le simulateur nous permet d'étudier les principaux processus impliqués en conduite, dans une situation écologique. Dans l'ensemble, comme nous l'avons observé à travers les divers résultats obtenus, notre échantillon cérébrolésé était très hétérogène. Néanmoins, cela ne nous a pas empêchés de mettre en évidence des déficits chez certains participants et, à l'inverse, de valider les compétences d'autres participants. Les résultats sur simulateur, souvent confirmés par les résultats sur route et/ou les tests neuropsychologiques, nous ont même permis d'aller plus loin dans l'analyse et l'interprétation des déficits, en apportant des informations complémentaires aux deux autres évaluations. Le simulateur est donc un outil pertinent pour l'évaluation des déficits cognitifs et leurs répercussions sur l'activité de conduite.

Enfin, nos résultats ne remettent pas en cause l'importance d'une analyse clinique pour des personnes qui présentent des troubles aussi diversifiés que les personnes cérébrolésées, mais soulignent l'intérêt de multiplier les moyens d'observation.

2 Conclusion et perspective

Nous avons vu que le simulateur de conduite est un outil valide pour l'évaluation des compétences de conduite en général. De plus, cet outil nous a permis de discriminer des participants cérébrolésés de participants contrôles et de mettre en évidence des déficits particuliers. Cependant, cet outil est encore récent et présente aussi des limites dues notamment au

manque de soin apporté par les constructeurs au développement des scénarios. Les simulateurs sont vendus comme tels, pour la formation à des écoles de conduite et pour l'évaluation à des hôpitaux. Or les constructeurs ne font pas l'effort d'adapter leur outil aux besoins des utilisateurs. Il est nécessaire, comme nous l'avons fait dans ce travail de thèse, de créer un environnement virtuel réellement dédié à l'analyse des processus cognitifs et capable de fournir les outils d'analyse nécessaires à l'interprétation des résultats. Il est également impératif de travailler sur les données à disposition du praticien après une évaluation.

Dans cette étude, nous nous sommes intéressés aux personnes cérébrolésées car elles sont classiquement déficitaires dans de nombreux processus impliqués en conduite automobile. Néanmoins, l'activité de conduite automobile n'est pas accessible à certains patients. En effet, troubles locomoteurs, voire paralysie partielle, troubles visuels, troubles cognitifs sévères, etc., ne sont pas rares chez ces patients et empêchent la reprise de la conduite. Cela explique pourquoi nous avons un échantillon si restreint. Par ailleurs, le but de ce protocole est de permettre l'évaluation des aptitudes à la conduite, sans distinction de pathologie. Ouvrir le protocole à d'autres pathologies (Alzheimer, etc.) nous semble donc une perspective afin d'en étendre sa validité et fera l'objet de nos travaux futurs.

Par ailleurs, les résultats présentés dans ce manuscrit ne sont qu'une partie du travail de recherche qui a été effectué durant cette thèse. Ainsi, la poursuite des analyses non effectuées à ce jour semble une priorité. Il serait notamment intéressant d'explorer la question de l'autorégulation chez les personnes cérébrolésées ayant repris la conduite. Ils pourraient, en effet, avoir mis en place des stratégies d'adaptation (coping) pour faire face à leurs déficits cognitifs, un peu comme le font les personnes âgées. Nous avions créé des questionnaires afin d'approfondir cette question, tirés des travaux de Rajaonah et ses collègues (Rajaonah et al., 2006, 2008). Cependant, nous n'avons pas pu les traiter à l'heure actuelle mais cela fait l'objet de nos objectifs à court terme.

Enfin, le but de ce protocole, en évaluant les capacités de conduite et en mettant en évidence d'éventuels déficits, était de permettre une reprise de la conduite sécurisée. Pour cela, nous avions mis en place un ré-entraînement en conduite réelle. Les premiers résultats ont montré que l'évaluation sur simulateur avait orienté le ré-entraînement de manière efficace puisque les participants pour lesquels nous avons émis un avis positif après ré-entraînement ont effectivement repris la conduite. Compléter les données issues du ré-entraînement, avec davantage de participants est donc un objectif et une perspective à plus long terme.

BIBLIOGRAPHIE

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

Akerstedt, T., Czeisler, C.A., Dinges, D.F., & Horne, J.A. (1994). Accidents and sleepiness: a consensus statement from the International Conference on Work Hours, Sleepiness and Accidents. Stockholm, 8–10 September 1994. *J. Sleep Res. 3*.

Åkerstedt, T., Kecklund, G. & Hörte, L.-G. (2001). Night driving, season, and the risk of highway accidents. *Sleep, 24*, 401–406.

Åkerstedt, T., Peters, B., Anund, A., & Kecklund, G. (2005). Impaired alertness and performance driving home from the night shift: a driving simulator study. *Journal of Sleep Research*, *14* (1), 17–20.

Akinwuntan, A.E., Feys, H., de Weerdt, W., Pauwels, J., Baten, G., & Strypstein, E. (2002). Determinants of driving after stroke. *Archives of Physical Medecine & Rehabilitation, 83,* 334-341.

Akinwuntan, A.E., de Weerdt, W., Feys, H., Baten, G., Arno, P., & Kiekens, C. (2003). Reliability of a road test after a stroke. *Archives of Physical Medecine & Rehabilitation*, 84, 1792-1796.

Allain, P, Nicoleau, S, & Pinon, K. (2005). Executive functionning in normal aging: A study of action planning using the Zoo Map Test. *Brain and Cognition, 57*, 4–7.

Amalberti, R. (1996). La conduite des systèmes à risque. Paris : Presses Universitaires de France.

Anderson, S.W., Rizzo, M., Shi, Q., Uc, E.Y. & Dawson, J.D. (2005). Cognitive abilities related to driving performance in a simulator and crashing on the road. *PROCEEDINGS of the Third International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design*. (pp 286-292). Iowa City, IA: University of Iowa.

Andrés, P., Van der Linden, M., & Parmentier, F. (2004). Directed forgetting in working memory: Age-related differences. *Memory*, *12*(2), 248-256.

Atkinson, R. & Shiffrin R. (1968). Human memory: A proposed system and its control processes. *In* K. Spence and J. Spence (dir.), *The Psychology of Learning and Motivation: Advances in Research and Theory*, Vol. 2, p. 89-195, New York, Academic Press.

Auclair, L. & Siéroff, E. (2005). *Conduite automobile et contrôle attentionnel*. Paper presented at the Séminaire du Sous-Réseau Attention, Lyon.

Azouvi, P., Couillet, J., Leclercq, M., Martin, Y., Asloun, S., & Rousseaux, M. (2004). Divided attention and mental effort after severe traumatic brain injury. *Neuropsychologia*, *42*(9), 1260-1268.

Azouvi, P., Vallat-Azouvi, C., & Belmont, A. (2009). Cognitive deficits after traumatic coma. In N. D. S. and A. M. O. Steven Laureys (eds), *Progress in Brain Research* (Vol. 177, p. 89-110). Elsevier.

Baddeley, A.D., Della Sala, S., Papagno, C., et Spinnler, H. (1997). Dual-task performance in dysexecutive and nondysexecutive patients with a frontal lesion. *Neuropsychology, 11*, 187-194.

Baddeley, A.D., Logie, R.H., Bressi, S., Della Sala, S., & Spinnler, H. (1986). Dementia and working memory. *Quarterly Journal of Experimental Psychology, 38A*, 603-618.

Ball, K.K., Wadley, V.G., et Edwards, J.D. (2002). Advances in technology used to assess and retrain older drivers. *Gerontechnology,. 1* (4), 251-261.

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

Bendak, S., & Al-Saleh, K. (2010). The role of roadside advertising signs in distracting drivers. *International Journal of Industrial Ergonomics*, *40*(3), 233-236.

Bittner, A.C., Simsek, O., Levison, W.H. & Campbell, J.L. (2002). On-road versus simulator data in driver model development - Driver performance experience. *Transport. Res. Rec. J. Transport. Res. Board, 1803*, 38–44.

Blaauw, G.J. 1982. Driver experience and task demands in simulator and instrumented car: A validation study. *Human Factors, 24*, 473–486.

Bradley, M. M., & Lang, P. J. (1994). Measuring emotion: the self-assessment manikin and the semantic differential. Journal of behavior therapy and experimental psychiatry, 25 (1), 49-59.

Brickenkamp, R. (1966). Test d2 d'attention concentrée. Paris: Editest.

Broadbent, D. E. (1958). Perception and Communication. London: Academic Press.

Brooke, M.M., Questad, K.A., Patterson, D.R., & Valois, T.A. (1992). Driving evaluation after traumatic brain injury. *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation*, *71*(3), 177-182.

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

Brookhuis, K.A. & de Waard, D. (2010). Monitoring drivers'mental workload in driving simulators using physiological measures. *Accident Analysis and Prevention, 42*, 898-903.

Brookhuis, K.,A., de Waard, D., & Fairclough, S.H. (2003). Criteria for driver impairment. *Ergonomics, 46,* 433-445.

Brooks, C. A., & Rakotonirainy, A. (2005). In-vehicle technologies, Advanced Driver Assistance Systems and driver distraction: Research challenges.

Bruyas, M.-P., Chapon, A., Lelekov-Boissard, T., Letisserand, D., Duraz, M., & Aillerie, I. (2006). Évaluation de l'impact de communications vocales sur la conduite automobile. *Recherche Transports Sécurité, 91*, 99-119.

Burgess, P.W., et Shallice, T. (1996). Bizarre responses, rule detection and frontal lobe lesions. *Cortex, 32*, 241-259.

Burkhardt, J-M. (2003). Immersion, réalisme et présence dans la conception et l'évaluation des Environnements Virtuels = Immersion, realism and presence in the design and evaluation of Virtual Environments. *Psychologie française, 48*, 35-42.

Burkhardt, J.-M. (2007). Immersion, représentation et collaboration : discussion et perspectives empiriques pour l'ergonomie cognitive de la Réalité Virtuelle. *Intellectica, 45,* 59-87.

Cabon, P., Bérard, R., Fer, B., & Coblentz, A. (1996). Vigilance et conduite. ISIS: Urgence Pratique 19, 55–60.

Camus, J.-F. (1996). *La psychologie cognitive de l'attention*. Paris: Armand Colin/Masson.

Camus, J. F. (2003). L'attention et ses modèles. Attention: recent models and theories. *Psychologie Française, 48* (1), 5-18.

Carreras, O. (1999). Représentation temporelle et ajustement de l'action à la dynamique de la situation. Thèse de Doctorat, Université Le Mirail - Toulouse 2.

Cegarra, J., & Morgado, N. (2009). Étude des propriétés de la version francophone du NASA-TLX. *Communication présentée à la cinquième édition du colloque de psychologie ergonomique (Epique)*, Nice, France.

Chan, E., Pradhan, A.J., Pollatsek, A., Knodler, M.A. & Fisher, D. L., (2010). Are driving simulators effective tools for evaluating novice drivers' hazard anticipation, speed management, and attention maintenance skills? Transportation Research Part F, 13, 343-353.

Chapon, A., Bruyas, M. P., Lelekov-Boissard, T., Letisserand, D., Deleurence, P., & Chanut, O. (2004). Conséquences de l'utilisation des nouvelles technologies de l'information et de la communication pendant la conduite automobile. *INRETS-LESCOT, 0401*.

Chapon, A., Gabaude, C., & Fort, A. (Eds.). Défauts d'attention et conduite automobile : état de l'art et nouvelles orientations pour la recherche dans les transports. *Rapport INRETS n°52*, 2006.

Charlton, S.G. (2009). Driving while conversing: Cell phones that distract and passengers who react. *Accident Analysis and Prevention, 41* (160-173).

Charron, C., Hoc, J-M., & Milleville-Pennel, I. (2010). Cognitive control by brain injured car drivers: an exploratory study. *Ergonomics, 53*, 1434-1445.

Cherry, E. C. (1953). Some Experiments on the Recognition of Speech, with One and with Two Ears. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *25* (5), 975-979.

Chiniara, G. (2007). Simulation médicale pour acquisition des compétences en anesthésie. Papier présenté au *Congrès national d'anesthésie et de réanimation*. *Conférences d'actualisation*, p. 41-49.

Christie (1996), cité dans Patomella, A.H., & Kottorp, A. (2005). An evaluation of driving ability in a simulator: a good predictor of driving ability after stroke? *Proceedings of the Third International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design* (pp. 104-110). Iowa City, IA: University of Iowa, Public Policy Center.

Clay, O. J., Wadley, V. G., Edwards, J. D., Roth, D. L., Roenker, D. L., & Ball, K. K. (2005). Cumulative meta-analysis of the relationship between useful field of view and driving performance in older adults: Current and future implications. *Optometry & Vision Science*, *82* (8), 724-731.

Crundall, D.E., Van Loon, E., & Underwood, G. (2006). Attraction and distraction of attention with roadside advertisements. *Accident Analysis & Prevention*, *38*(4), 671-677.

De Jouvencel, M., Narcyzfadoul, F., Bourdon, C., & Masse, J. (2008). Vieillir après un traumatisme crânien. Aspects neuropsychologiques et psychologiques. *Journal de Réadaptation Médicale : Pratique et Formation en Médecine Physique et de Réadaptation*, *28*(2), 53-59.

De Labarthe, J. & Guérin-Bonvoisin, F. (1998). Atteintes des fonctions supérieures à la suite de lésions cérébrales : approche neuropsychologique. Encycl. Méd. Chir. (Elsevier, Paris), Kinésithérapie - Médecine Physique - Réadaptation, 26-454-A-10, 6p.

Derouesne C, Dealberto M, Boyer P, Lubin, S., Sauron, B., Piette, F., Kohler, F., et Alpérovitch, A. (1993). Empirical evaluation of the 'Cognitive Difficulties Scale' for assessment of memory complaints in general practice: A study of 1628 cognitively

normal subjects aged 45–75 years. *International Journal of Geriatric Psychiatry, 8*, 599-607.

Deutsch, J.A. & Deutsch, D. (1963). Attention: some theorical considerations. *Psychological Review, 70*, 80-90.

Drexler, J.M. (2006). *Identification of system design features that affect sickness in virtual environments* (Doctoral dissertation, University of Central Florida Orlando, Florida).

Ehlers, A., Taylor, J.E., Ehring, T., Hofmann, S.G., Deane, F.P., Roth, W.T., & Podd, J.V. (2007). The driving cognitions questionnaire: Development and preliminary psychometric properties. *Journal of anxiety disorders*, *21*(4), 493-509.

Elkin-Frankston, S., Lebowitz, B.K., Kapust, L.B., Hollis, A.M., & O'Connora, M.G. (2007). The use of the Color Trails Test in the assessment of driver competence: Preliminary report of a culture-fair instrument. *Archives of Clinical Neuropsychology, 22*, 631–635.

Engum, E.S., Lambert, E.W., Scott, K., Pendergrass, T.M., & Womac, J. (1989). Criterion-related validity of the Cognitive Behavioral Driver's Inventory. *Cognitive Rehabilitation*, *7*(4), 22-31.

Eslinger, P.G. & Grattan, L.M. (1993). Frontal lobe and frontal striatal substrates for different forms of human cognitive flexibility. *Neuropsychologia, 31*, 17-28.

Falkmer, T. & Gregersen, N. P. (2005). A Comparison of Eye Movement Behavior of Inexperienced and Experienced Drivers in Real Traffic Environments. *Optometry and Vision Science*, *82*(8), 732-739.

Fattal, C., Gania, L., Leblond, C., Israël, G., Fourroux, J., Girousse, A., & Enjalbert, M. (2006). Evaluation de la conduite automobile chez le cérébrolésé : Limites méthodologiques et perspectives. In P. Pradat-Diehl & A. Peskine (Eds.), *Evaluation des troubles neuropsychologiques en vie quotidienne* (pp. 123- 135). Paris: Springer.

Fitten, L.J., Perryman, K.M., Wilkinson, C.J., Little, R. J., Burns, M.M., Pachana, N., Mervis, J.R., Malmgren, R., Siembieda, D.W., & Ganzell, S. (1995). Alzheimer and vascular dementias and driving. *JAMA: the journal of the American Medical Association*, *273* (17), 1360-1365.

Fox, G.K., Bowden, S.C., & Smith, D.S. (1998). On-road assessment of driving competence after brain impairment: review of current practice and recommendations for a standardized examination. *Archives of Physical Medecine & Rehabilitation, 79,* 1288-1296.

Gawron, V.J. (2008). Human workload. (In: V. J. Gawron). *Human Perfromance, Workload, and Situational Awareness Measures Handbook*. Boca Raton: Taylor & Francis. 2nd edition, 87-230.

Gerhard, M., Moore, D.J. & Hobbs, D.J. (2001). Continuous presence in collaborative virtual environments: towards a hybrid avatar-agent model for user representation. In A. de Antonio, R. Aylett and D. Ballin (Eds.). *IVA 2001, LNAI 2190*, pp. 137-155.

Gil, S. (2009). Comment étudier les émotions en laboratoire. *Revue électronique de Psychologie Sociale, 4*, 15-24. Article disponible au 12 juillet 2013 à l'adresse suivante : <http://RePS.psychologie-sociale.org/>.

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

Gopher, D. & Donchin, E. (1986). Workload – An examination of the concept. In K.R. Boff, L. Kaufman and J.P. Thomas, John Wiley and Sons (Eds). *Handbook of Perception and Human Performance. Volume 2. Cognitive Processes and performance*, Inc: 41-1:41-49.

Harbluk, J.L., Noy, Y.I., & Eizenman, M. (2002). The impact of cognitive distraction on driver visual behaviour and vehicle control, report no. *TP13889E. Transport Canada, Ontario*.

Hart, S.G. & Staveland, L.E. (1988). Development of NASA-TLX (Task Load Index) : Results of empirical and theoretical reasearch. In P.A. Hancock & N. Meshkati (Eds.). *Human Mental Workload* (pp. 239-250). Amsterdam : North Holland Press.

Haigney, D., Taylor, R., & Westerman, S. (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.

Heilman, K. M., & Valenstein, E. (1979). Mechanisms underlying hemispatial neglect. *Annals of neurology*, *5*(2), 166-170.

Hills, B. L. (1980). Vision, visibility, and perception in driving. *Perception*.

Hoc, J.M., & Amalberti, R. (2007). Cognitive control dynamics for reaching a satisficing performance in complex dynamic situations. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making, 1*, 22-55.

Holbrook, M. B. & Batra, R. (1987). Assessing the role of emotions as mediators of consumer responses to advertising. *Journal of consumer research*, 404-420.

Hopewell, C.A. & Van Zomeren, A.H. (1990). Neuropsychological Aspects of Motor Vehicle Operation. In D.E. Tupper & K.D. Cicerone (Éd.), *The Neuropsychology of Everyday Life: Assessment and Basic Competencies* (p. 307-334). Boston: Kluwer.

Horberry, T., Anderson, J., Regan, M.A., Triggs, T.J. & Brown, J. (2006). Driver distraction: The effects of concurrent in-vehicle tasks, road environment complexity and age on driving performance. *Accident Analysis and Prevention, 38*, 185-191.

Hunt, L., Morris, J.C., Edwards, D., & Wilson, B.S. (1993). Driving performance in persons with mild senile dementia of the Alzheimer type. *Journal of the American Geriatrics Society*.

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

James, W. (1890). *The Principles of Psychology*. New-York: Holt.

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

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.

Jones, M.H. (1978). Drive performance measures for the safe performance curriculum.Technical Report 78-3. Los Angeles (CA): University of Southern California.

Kahneman, D. (1973). *Attention and effort*. Englewood Cliffs: Prentice Hall.

Kaptein, N.A., Theeuwes, J. & Van Der Horst, R. (1996). Driving simulator validity: some considerations. *Transport. Res. Rec. J. Transport. Res. Board, 1550*, 30–36.

Karnath, H. O., & Hartje, W. (1987). Residual information processing in the neglected visual half-field. *Journal of neurology*, *234*(3), 180-184.

Lamble, D., Kauranen, T., Laakso, M., & Summala, H. (1999). Cognitive load and detection thresholds in car following situations: safety implications for using mobile (cellular) telephones while driving. *Accident Analysis & Prevention, 31*, 617–623.

Lang, P.J., Bradley, M.M., & Cuthbert, B.N. (1994). *The International Affective Picture System (IAPS): Photographic Slides*. The Center for Research in Psychophysiology, Gainesville, University of Florida.

Lane, R.D., Chua, P.M.-L., & Dolan, R. (1997). Neural activation during selective attention to subjective emotional responses. Neuroreport, 8:3969±72

Langham, M.P. &Moberly, N.J. (2003). Pedestrian conspicuity research: a review. Ergonomics, 46 (4), 345-363.

Lechner, D., Delanne, Y., Schaefer, G., & Schmitt, V. (1997). Méthodologie de validation du logiciel de dynamique automobile CALLAS. SIA 970202. In Congrès SIA Lyon, Avril 1997. Reprinted in Ingénieurs de l'automobile N°713, May 1997.

Lemercier, C., & Cellier, J. M. (2008). Les défauts de l'attention en conduite automobile: inattention, distraction et interférence. *Le travail humain*, *71*(3), 271-296.

Lemke, M. (1982). Correlation between EEG and drivers actions during prolonged driving under monotonous conditions. *Accident Analysis & Prevention, 14*, 7-17.

Lew, H.L., Poole, J.H., Lee, E.H., Jaffe, D.L., Huang, H.C., & Brodd, E. (2005). Predictive validity of driving-simulator assessments following traumatic brain injury : a preliminary study. *Brain Injury, 19,* 177-188.

Lezak, M. D., Howieson, D. B., & Loring, D. W. (2004). *Neuropsychological assessment 4 Ed*. Oxford University Press.

Lhermitte, F., Derouesne, J., & Signoret, J. L. (1972). Analyse neuropsychologique du syndrome frontal. *Revue Neurologique*, *127*, 415-440.

Lundqvist, A. (2001). Neuropsychological aspects of driving characteristics. *Brain Injury, 15*, 981-994.

Lundqvist, A., Allinder, J., Alm, H., Gerdle, B., Levander, S., & Rönnberg, J. (1997). Neuropsychological aspects of driving after brain lesion: simulator study and on-road driving. *Applied Neuropsychology, 4*, 220-230.

Luria, A. R. (1966). *Higher cortical functions*. New York: Basic Book.

Lutz, R. J., & Kakkar, P. (1975). The psychological situation as a determinant of consumer behavior. *Advances in consumer research*, *2*(1), 439-453.

Mackworth, N. H. (1957). Some factors affecting vigilance. *Advancements in Science, 53*, 389-393.

Mackworth, N. H. (1976). Ways of recording line of sight. In R.A. Monty & J.W. Senders (Eds.), *Eye movements and psychological processes*. Hillsdale, N.J.:Erlbaum, 1976.

Matthews, R., Legg, S. & Charlton, S. (2003). The effect of cell phone type on drivers subjective workload during concurrent driving and conversing. *Accident Analysis and Prevention, 35*, 451-457.

Maraccino, L. (2010). Création et introduction au bilan neuropsychologique d'une tâche écologique d'organisation et de gestion des priorités (mémoire de Master non publié). Université de Nantes, France.

Mayhew, D.R., Simpson, H.M., Wood, K.M., Lonero, L., Clinton, K.M. & Johnson, A.G. (2011). On-road and simulated driving : concurrent and discriminant validation. *Journal of safety Research, 42*, 267-275.

Mayo, E. (1924). The basis of industrial psychology. *Bulletin of the Taylor Society*, *9* (6), 249-259.

Meehan, M. (2001). Physiological reaction as an objective measure of presence in virtual environments. Doctoral dissertation, Computer Science, University of North Carolina, Chapel Hill, NC.

Meehan, M., Razzaque, S., Insko, B., Whitton, M. & Brooks, F. (2005). Review of Four Studies on the Use of Physiological Reaction as a Measure of Presence in Stressful Virtual Environments. *Applied Psychology and Biofeedback, 30* (3), 239-258.

Mehler, B., Reimer, B., Coughlin, J.F., & Dusek, J.A. (2009). The impact of incremental increases in cognitive workload on physiological arousal and performance in young adult drivers. *Transportation Research Record, 2138* (1), 6–12.

Mehrabian, A. & Russel, J. (1974). *An Approach to Environmental Psychology*. Cambridge, Mass : The MIT Press.

Michon, J. A. (1985). A critical view of driver behavior models. What do we know, what should we do? In L. Evans & R. Schwing (Eds.), *Human behavior and traffic safety* (pp. 485-525). Plenum press, New York.

Milleville-Pennel, I., Pothier, J., Hoc, J.-M., & Mathé, J.-F. (2010). Consequences of cognitive impairments following traumatic brain injury: Pilot study on visual exploration while driving. *Brain Injury, 24*, 678-691.

Mullen, N. W., Weaver, B., Riendeau, J. A., Morrison, L. E., & Bédard, M. (2010). Driving performance and susceptibility to simulator sickness: are they related?. *The American Journal of Occupational Therapy*, *64*(2), 288-295.

Muhrer, E. & Vollrath, M. (2011). The effect of visual and cognitive distraction on driver's anticipation in a simulated car following scenario. *Transportation Research Part F, 14*, 555-566.

Nilsson, R. (2001). *Safety margins in the driver* (Doctoral dissertation, Uppsala University).

Norman, D.A. & Shallice, T. (1986). Attention to action: Willed and automatic control of behavior. In R.J. Davidson, G.E. Schwartz & D. Shapiro (Eds.), *Consciousness and self regulation: Advances in research* (pp. 1-18). New York: Plenum Press.

Oken, B.S, Salinsky, M.C, & Elsas, S.M. (2006). Vigilance, alertness, or sustained attention: physiological basis and measurement. *Clin. Neurophysiol., 117* (9), 1885–901.

Otmani, S., Rogé, J. & Muzet, A. (2005). Sleepiness in professional drivers: Effect of age and time of day. *Accident Analysis and Prevention, 37*, 930-937.

Park, N. W., Moscovitch, M. & Robertson, I. H., (1999). Divided attention impairments after traumatic brain injury. *Neuropsychologia*. *37*, 1119-1133.

Park, J.R., Lim, D.W., Lee, S.Y., Lee, H.W., Choi, H.H., & Chung, S.C. (2008). Long-term studdy of simulator sickness: differences in EEG response due to individual sensitivity. *International Journal of Neuroscience, 118*, 857-865.

Parkes, A. M. & Coleman, N. (1990). Route guidance systems: a comparison of methods of presenting directional information to the driver, in E. J. Lovesey (ed.), *Contemporary Ergonomics* (pp. 480-485). London: Taylor & Francis.

Patomella, A.H. & Kottorp, A. (2005). An evaluation of driving ability in a simulator: a good predictor of driving ability after stroke? *Proceedings of the Third International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design* (pp. 104-110). Iowa City, IA: University of Iowa, Public Policy Center.

Patomella, A.H., Tham, K., & Kottorp, A. (2006). P-drive: assessment of driving performance after stroke. *J. Rehabil. Med., 38*, 273-279.

Patrick, J. (1992). Training: research and practice. London: Academic Press.

Posner, M.I. & Rafal, R.D. (1987). Cognitive theories of attention and the rehabilitation of attentional deficits. In M.J. Meier, A.L. Benton & L. Diller (Eds.), Neuropsychological Rehabilitation (pp. 182-201). Edinburgh: Churchill Livingstone.

Rajaonah, B., Anceaux, F., & Vienne, F. (2006). Trust and the use of adaptive cruise control: a study of a cut-in situation. *Cognition, Technology & Work*, *8* (2), 146-155.

Rajaonah, B., Tricot, N., Anceaux, F., & Millot, P. (2008). The role of intervening variables in driver–ACC cooperation. *International Journal of Human-Computer Studies*, *66* (3), 185-197.

Rasmussen, J. (1986). *Information processing and human-machine interaction*. Elsevier, Amsterdam.

Rasmussen, M. (1990). Lower maintenance cost through maintenance optimization in design and operation. *Proceedings: ICMES*.

Reed, M.P. & Green, P.A., 1999. Comparison of driving performance on-road and in a low-cost simulator using a concurrent telephone dialing task. *Ergonomics, 42*, 1015–1037.

Regenbrecht, H. & Schubert, T. (2002). Real and illusory interaction enhance presence in virtual environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments, 11(4)*, 425-434.

Reimer, B. & Melher, B. (2011). The impact of cognitive workload on physiological arousal in young adult drivers: a field study and simulation validation. *Ergonomics, 54(10)*, 932-942.

Reitan, R.M. (1992). Trail Making Test: Manual for administration and scoring. South Tuscon, AZ: Reitan Neuropsychology Laboratory.

Reyner, L.A., & Horne, J.A. (1998). Falling asleep whilst driving: are drivers aware of prior sleepiness?. *Int. J. Legal. Med., 111*, 120–123.

Richardson, J.T. (2007). Measures of short-term memory: A historical review. *Cortex, 43*, 635–650.

Rogé, J., & Pébayle, T. (2009). Deterioration of the useful visual field with ageing during simulated driving in traffic and its possible consequences for road safety. *Safety Science*, *47*(9), 1271-1276.

Rudin-Brown, C.M., Williamson, A. & Lenné, M.G. (2010). Can driving simulation be used to predict changes in real-world crash risk? *Monash University Accident Research Centre, Report N° 299*.

Santos, J., Mérat, 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 Researh Part F, 8*, 135-146.

Schneider, W. & Shiffrin., R. M. (1977). Controlled and automatic human information processing: I. Detection, search, and attention. *Psychological Review*, 84, 1-66

Schubert, T., Friedmann, F., & Regenbrecht, H. (1999). Embodied Presence in Virtual Environments. In Ray Paton & Irene Neilson (Eds.), *Visual Representations and Interpretations (pp. 269-278)*. London: Springer-Verlag.

Sekuler, R. & Ball, K. K. (1986). Visual localization: age and practice. *J Opt Soc Am A, 3* (6), 864-7;

Sekuler, A.B., Bennett, P. J., & Mamelak, M. (2000). Effects of aging on the useful field of view. *Exp Aging Res, 26* (2), 103-20.

Sharpless, S., & Jasper, H. (1956). Habituation of the arousal reaction. *Brain*, *79*(4), 655-680.

Shinoda, H., Hayhoe, M. M., & Shrivastava, A. (2001). What controls attention in natural environments? *Vision Research, 41* (25–26), 3535‑3545.

Sivak, M., Hill, C. S., Henson, D. L., Butler, B. P., Silber, S. M., & Olson, P. L. (1984). Improved driving performance following perceptual training in persons with brain damage. *Archives of physical medicine and rehabilitation*, *65*(4), 163-167.

Slater, M. (2009). Place illusion and plausibility can lead to realistic behaviour in immersive virtual environments. *Phil. Trans. R. Soc. B, 364*, 3549-3557.

Slater, M., Splanlang, B. & Corominas, D. (2010). Simulating Virtual Environments within virtual environments as the basis for a psychophysics of presence. *ACM Transactions on Graphics, 29(4)*, Article 92.

Slater, M., Usoh, M., & Steed, A. (1995). Taking steps: The influence of a walking technique on presence in virtual reality. *ACM Transactions on Computer Human Interaction (TOCHI), 2(3)*, 201–219.

Spreen O, et Strauss E. (1998). A compendium of neuropsychological tests: Administration, norms and commentary. Second ed. New York: Oxford University Press.

Stanney, K.M., Hale, K.S., Nahmens, I., & Kennedy, R S. (2003). What to expect from immersive virtual environment exposure: Influences of gender, body mass index, and past experience. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, *45*(3), 504-520.

Stern, E.B. (2004). Driving simulation : a pilot study of persons with brain injury and matched controls. *Sixth National Workshop for Driver Rehabilitation Specialists*. Edmonton Canada.

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. Hass (Eds.), *Psychological issues in the design and use of virtual environments* (pp. 111-128). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.

Stroop, J. R. (1935). Studies of interference in serial verbal reactions. *Journal of Experimental Psychology, 6*, 643–662.

Stutts, J., Feaganes, J., Reinfurt, D., Rodgman, E., Hamlett, C., Gish, K. & Staplin, L. (2005). Driver's exposure to distractions in their natural driving environment. *Accident Analysis and Prevention, 37,* 1093–1101

Stutts, J., Feaganes, J., Rodgman, E., Hamlett, C., Meadows, T., Reinfurt, D., Gish, K., Mercadante, M., & Staplin, L. (2003). Distractions in Everyday Driving: Causes and Consequences. *AAA Foundation for Traffic Safety*, Washington, DC.

Stutts, J.C., Reinfurt, D.W., Staplin, L., & Rodgman, E.A. (2001). The Role of Driver Distraction in Traffic Crashes. *AAA Foundation for Traffic Safety*, Washington, DC.

Teuber, H.-L. (1964). The riddle of frontal lobe function in man. In J.M. Warren and K. Akert (eds.), *The frontal granular cortex and behavior*. McGraw-Hill Book Co., New York, p. 410-444.

Thiffault, P. & Bergeron, J. (1997). Vigilance et conduite sur autoroute: différences interindividuelles et résistance à la monotonie. In: Proceedings of the 10th Canadian Multidisciplinary Conference on Road Safety. Toronto, pp. 454–464.

Thiffault, P., & Bergeron, J. (2003). Monotony of road environment and driver fatigue: a simulator study. *Accident Analysis & Prevention*, *35*(3), 381-391.

Thomas, C., & Attard, S. (1994). Drowsiness and fatal crashes. Technical report 9/020/94/CEESAR. Nanterre, France: Centre Europe d'Etudes Socio-économiques et Accidentologiques des Risques.

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

Treisman, A.M. (1960). Contextual cues in selective listening. *Quarterly Journal of Experimental Psychology, 12*, 242-248.

Tulving, E. (1995). Organisation of memory: quo vadis? *In* M.S. Gazzaniga (Ed), *The cognitive neurosciences* (p. 839-847). Cambridge, Mass: MIT Press.

Utter, D. (2001). *Passenger vehicle driver cell phone use results from the fall 2000 national occupant protection use survey*. US Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration.

Valdez, P., & Mehrabian, A. (1994). Effects of color on emotions. *Journal of Experimental Psychology*. *General*, *123*(4), 394-409.

Van Zomeren, A. H. & Brouwer, W. H., (1994). Clinical neuropsychology of attention. New-York: Oxford University Press.

Vuadens, P., and P. A. Comte. "Assessment of car driving skills in brain injured individuals]." *Revue médicale de la Suisse romande* 121.6 (2001): 453.

Wang, Y. (2009) In-Vehicle Secondary Task Study Based on Human-Machine Interactive Simulation. Ph.D. dissertation, Tsinghua University.

Wang, C.C., Kosinski, C.J., Schwartzberg, J.G., & Shanklin, A.V.. (2003). Physician's guide to assessing and counseling older drivers. Washington, DC: National Highway Traffic Safety Administration.

Wang, Y., Mehler, B., Reimer, B., Lammers, V., D'Ambrosio, L.A., & Coughlin, J.F. (2010). The validity of driving simulation for assessing differences between in-vehicle informational interfaces: A comparison with field testing. *Ergonomics, 53* (3), 404-420.

Weschler, D. (1997). *Weschler Memory Scale- third Edition*. The psychological Corporation, San Antonio.

Wechsler, D. (2000). *Wechsler Adult Intelligence Scale (WAIS) - 3ème édition* (2000). Paris: Editions du Centre de Psychologie Appliquée.

Wickens, C.D. (1984). Processing resources in attention. In R. Parasuraman & D.R. Davis (Eds.), *Varieties of Attention* (pp. 63-101). New-York: Academic Press.

Wilson, B.A., Alderman, N., Burgess, P.W., Emslie H., & Evans, J.J. (1996). Behavioural assessment of the dysexecutive syndrome. Bury St. Edmunds: Thames Valley Test Company.

Wilson, B.A., Evans, J.J., Emslie, H., Alderman, N., Burgess, P. (1998). The development of an ecologically valid test for assessing patients with a dysexecutive syndrome. *Neuropsychological Rehabilitation, 8*, 213–228.

Woods, D.D. (1988). Coping with complexity: the psychology of human behaviour in complex systems. In L.P. Goodstein, H.B. Andersen, & S.E. Olsen (Eds), *Tasks, errors, and mental models* (pp. 128-148). London, New-York and Philadelphia: Taylor & Francis.

Zimmermann, P., & Fimm, B. (2002). A test battery for attentional performance. In: M. Leclercq & P. Zimmermann (Eds.), Applied Neuropsychology of Attention: Theory, Diagnosis and Rehabilitation, Vol.22, pp. 110–151.

Zimmermann, P., & Fimm, B. (2007). Test for Attentional Performance (TAP)–Version 2.01. Vera Fimm, psychologische Testsysteme.

Zimmermann, P., North, P., Fimm, B.. (1993). Diagnosis of attentional deficits: Theoretical considerations and presentation of a test battery. In: Stachowiak FJ, et al., editors. *Developments in the assessment and rehabilitation of brain-damaged patients*. Tübingen: Gunter Narr.

INDEX DES FIGURES

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

Figure 1 : Modèle des ressources multiples de Wickens (1984)

Figure 2 : Modèle de l'attention de Van Zomeren et Brouwer (1994).

Figure 3 : Les différents niveau de contrôles de l'activité présentés par Rasmussen (1986).

Figure 4 : Les trois niveaux de l'activité, d'après Michon (1985)

Figure 5 : Modèle du contrôle cognitif de Hoc et Amalberti (2007).

Figure 6 : Schématisation de la répartition générale du contrôle cognitif lors d'une activité de conduite, pour des conducteurs novices et experts.

Figure 7 : Simulateur de conduite Oktal

Figure 8 : Illustration du rendu de la scène visuelle sur l'écran central

Figure 9 : Capture de l'écran principal lors de l'événement critique 1 en ville. Un piéton (entouré en rouge) traverse au feu vert.

Figure 10 : Exemple de représentation des données concernant les regards sur l'objet critique les actions sur les pédales d'accélérateur et de frein en fonction du temps.

Figure 11 : Exemple de représentation des données concernant la vitesse en fonction du temps.

Figure 12 : Exemple de représentation des données concernant les regards sur l'objet critique les actions sur les pédales d'accélérateur et de frein en fonction du temps.

Figure 13 : Self Assessment Manikin Scale (SAM) (Bradley et Lang, 1994).

Figure 14 : Grille de réponse SAM. La première ligne correspond à la valence, la seconde ligne à l'excitation et la troisième à la dominance.

Figure 15 : Déroulement de l'expérimentation

Figure 16 : Graphes de corrélation entre les résultats obtenus sur les images de l'IAPS et les normes de l'IAPS, pour la valence (en haut à gauche), la stimulation (en haut à droite) et la dominance (en bas).

Figure 17 : Exemple des deux tailles de panneaux publicitaires, comparés à la taille d'une voiture. A gauche, les petits panneaux, à droite les grands panneaux.

Figure 18 : Capture de l'écran principal avec un panneau publicitaire peu excentré (à gauche) et très excentré (à droite), dans la catégorie nourriture (hamburger).

Figure 19 : Apparition du signal stop lors de l'épreuve évaluant le temps de réaction.

Figure 20 : Simulateur à base fixe EF-X, d'Eca-Faros.

Figure 21 : Tableau de bord du simulateur

Figure 22 : Oculomètre IviewX de SMI

Figure 23 : Capture d'écran extraite d'une vidéo obtenue avec l'oculomètre. En orange, le point de fixation du participant.

Figure 24 : Relations entre les scores communément utilisés pour les tests et la loi normale (tirée de Lezak, Howieson, & Loring, 2004, p.142).

Figure 25 : Plan du parcours effectué lors de l'évaluation sur route (source : itinéraire via google map).

Figure 26 : Regards sur la camionnette et le piéton et actions sur les pédales d'accélérateur et de frein en fonction du temps chez CR1 (en haut à gauche), CA4 (en haut à droite), et CA3 (en bas au milieu) pour l'événement 3 en ville.

Figure 27 : Regards sur l'enfant et actions sur les pédales d'accélérateur et de frein en fonction du temps chez CR2 pour l'événement 4 en ville.

Figure 28 : Position de CR2 sur la voie en fonction de la distance à l'enfant, à l'endroit où il se trouvait au moment critique, et position finale de l'enfant (matérialisée par le petit bonhomme).

Figure 29 : Pourcentage des différents scores obtenus sur l'ensemble des notes pour tous les événements de tous les parcours par groupe.

Figure 30 : Nombre de panneaux publicitaires vus et erreurs-type par groupe de participants.

Figure 31 : Nombre moyen de regards accordés à l'ensemble des panneaux publicitaires et erreurs-type, en fonction du groupe de participants.

Figure 32 : Durée moyenne d'un regard sur les panneaux publicitaires et erreurs-type par groupe de participants.

Figure 33 : Temps de regard moyen accordé à chaque panneau regardé, par groupe de participants.

Figure 34 : Temps cumulé total accordé aux panneaux publicitaires, moyenné par groupe de participants.

Figure 35 : Nombre de panneaux vus (à gauche) et nombre de regards total accordés aux panneaux (à droite) en fonction de l'excentricité.

Figure 36 : Durée moyenne d'un regard sur les panneaux (à gauche) et temps total de regard accordés à l'ensemble des panneaux (à droite) en fonction de l'excentricité.

Figure 37 : Temps total de regard consacré à l'ensemble des panneaux publicitaires (et erreur-type), pour les groupes de participants Co, CR et CA en fonction de leur excentricité à la route.

Figure 38 : Décomposition des temps d'action sur les pédales (en ms) après l'apparition du signal stop, pour les CR et les CA, en comparaison aux temps moyens des participants contrôles (Co6 exclu).

Figure 39 : Capture de l'écran principal lors de l'événement critique 2 en ville. Un camion est à l'arrêt dans une courbe.

Figure 40 : Capture de l'écran principal lors de l'événement critique 3 en ville. Un piéton traverse derrière un camion de vente ambulante.

Figure 41 : Capture de l'écran principal lors de l'événement critique 4 en ville. Un enfant traverse en suivant son ballon.

Figure 42 : Capture de l'écran principal lors de l'événement critique 5 en ville. Un piéton traverse pour rejoindre le bus.

Figure 43 : Capture de l'écran principal lors de l'événement critique 1 en campagne. Un véhicule en sens inverse double un bus.

Figure 44 : Capture de l'écran principal lors de l'événement critique 2 en campagne. Le participant rattrape un scooter lent.

Figure 45 : Capture de l'écran principal lors de l'événement critique 3 en campagne. Un véhicule s'insère devant le participant

Figure 46 : Capture de l'écran principal lors de l'événement critique 4 en campagne. Le participant rattrape un tracteur lent, visible tardivement.

Figure 47 : Capture de l'écran principal lors de l'événement critique 5 en campagne. A gauche, on peut voir une biche longer le bas-côté. A droite, elle traverse la route devant le participant.

Figure 48 : Capture de l'écran principal lors de l'événement critique 6 en campagne. Un piéton traverse la chaussée devant le participant.

Figure 49 : Capture de l'écran principal lors de l'événement critique 7 en campagne. Un véhicule en sens inverse veut forcer le passage en tournant.

Figure 50 : Capture de l'écran principal lors de l'événement critique 1 de nuit. Le participant rattrape une voiture lente avec des feux arrières défaillants.

Figure 51 : Capture de l'écran principal lors de l'événement critique 2 de nuit. Le participant rattrape un camion lent peu visible.

Figure 52 : Capture de l'écran principal lors de l'événement critique 3 de nuit. A gauche, on voit un triangle de signalisation, à droite, on voit un véhicule à l'arrêt dans le virage.

Figure 53 : Capture de l'écran principal lors de l'événement critique 4 de nuit. Un piéton marche sur le bas-côté droit.

Figure 54 : Capture de l'écran principal lors de l'événement critique 5 de nuit. Uen biche traverse devant le participant lorsque la route est enneigée.

Figure 55 : illustration de l'épreuve d'empan visuo-spatial.

Figure 56 : Début d'une ligne de l'épreuve du D2 (en entouré, les lettres cibles à barrer) .

Figure 57 : Exemple de deux planches du Brixton. La règle ici est d'ajouter 1 à la pastille noire précédente pour trouver la nouvelle pastille noire.

Figure 58 : Exemple de présentation des croix lors de la tâche visuelle du test d'attention partagée du TAP. On peut voir un carré formé par quatre croix à droite.

Figure 59 : Exemple de présentation des signes lors du test de balayage visuel du TAP. A gauche, le stimulus critique (cible) et à droite la matrice.

INDEX DES TABLEAUX

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

Tableau I : Les échelles du NASA TLX (traduit et adapté d'après Hart et Staveland, 1988).

Tableau II : Exemple de questions issues du questionnaire Présence.

Tableau III : Processus impliqués dans l'événements critique 1 en ville et indicateurs relatifs à ces processus. En rouge, les processus critiques.

Tableau IV : Processus critiques impliqués dans les événements critiques pour le parcours en ville.

Tableau V : Processus impliqués dans les événements critiques pour le parcours en campagne.

Tableau VI : Processus impliqués dans les événements critiques pour le parcours de nuit.

Tableau VII : Nombre d'accidents obtenus par les 8 participants au prétest, pour chaque événement.

Tableau VIII : Valence et excitation moyennes obtenues pour les images sélectionnées, par parcours et par excentricité.

Tableau IX : Valence et excitation moyennes obtenues pour les images sélectionnés, par parcours et par excentricité.

Tableau X : Présentation des scénarios expérimentaux.

Tableau XI : Présentation du contrebalancement en carré latin.

Tableau XII : Caractéristiques des différents échantillons

Tableau XIII : Tableau récapitulatif des scénarios de conduite et de leur durée.

Tableau XIV :Tableau récapitulatif des tests et sous-tests utilisés et le processus observé.

Tableau XV : Transformation des scores de la grille d'évaluation et signification des différents score

Tableau XVI :Scores des participants contrôles (Co), des participants cérébrolésés récents (CR), et des participants cérébrolésés anciens (CA) aux tests neuropsychologiques. En gris figurent les résultats pour lesquels les participants sont déficitaires. Les trois dernières lignes donnent pour chaque participant le nombre de résultats au-dessus d'un écart-type (0), entre -1σ et -2σ (-1) et au-delà de -2σ (-2).

Tableau XVII : Pourcentage de scores 0, -1 et -2 obtenus pour l'ensemble des participants à chaque item des tests neuropsychologiques (Co, CR, CA et PA confondus).

Tableau XVIII : Nombre moyen de scores 0 (normal), -1 (faible) et -2 (déficitaire) obtenus par groupe pour les participants contrôles (Co), cérébrolésés récents (CR) et cérébrolésés anciens (CA), sur les 18 scores normés de la batterie de tests neuropsychologiques.

Tableau XIX :Pourcentage de scores 0 (normal), -1 (faible) et -2 (déficitaire) par groupe pour les participants contrôles (Co), cérébrolésés récents (CR) et cérébrolésés anciens (CA) sur les 18 items de la batterie de tests neuropsychologique. En rouge, les items avec 50% ou plus de scores "-2".

Tableau XX : Moyennes et écart-type du groupe contrôle pour les tests de négligence et du Mc Nair.

Tableau XXI :Scores transformés pour tous les participants au test de négligence spatiale et au Mc Nair.

Tableau XXII : Regroupement des participants cérébrolésés récents (CR) sur la base des résultats aux tests neuropsychologiques.

Tableau XXIII :Regroupement des participants cérébrolésés anciens (CA) sur la base des résultats aux tests neuropsychologiques.

Tableau XXIV : Scores des participants contrôles (Co), des participants cérébrolésés récents (CR), et des participants cérébrolésés anciens (CA) à l'évaluation de conduite sur route, En gris figurent les

résultats pour lesquels les participants sont considérés comme déficitaires. Les trois dernières lignes donnent pour chaque participant le nombre de résultats bons (0), faibles (-1) et déficitaires (-2).

Tableau XXV : Pourcentage de scores 0, -1 et -2 obtenus pour l'ensemble des participants à chaque item de l'évaluation sur route (Co, CR, CA et PA confondus).

Tableau XXVI : Nombre moyen de scores 0 (normal), -1 (faible) et -2 (déficitaire) obtenus par groupe pour les participants contrôles (Co), cérébrolésés récents (CR) et cérébrolésés anciens (CA), sur les 21 items de l'évaluation sur route.

Tableau XXVII : Calcul du Khi² sur l'effectif total de scores 0, -1, et -2 pour les groupes Co, CR, et CA.

Tableau XXVIII : Pourcentage de scores 0 (normal), -1 (faible) et -2 (déficitaire) par groupe pour les participants contrôles (Co), cérébrolésés récents (CR) et cérébrolésés anciens (CA) sur les 21 items de l'évaluation sur route. En rouge, les items avec 50% ou plus de scores "-2".

Tableau XXIX : Nombre de scores 0 (normal), -1 (faible) et -2 (déficitaire) obtenus par les participants cérébrolésés récents (CR) et cérébrolésés anciens (CA), sur les 21 scores de l'évaluation sur route. Les participants ont été classés selon le nombre de score -2 obtenu, du plus petit au plus grand.

Tableau XXX : Classement des participants cérébrolésés CR et CA sur la base du nombre de score -2 obtenus à l'évaluation sur route, du plus petit au plus grand.

Tableau XXXI : Nombre d'accidents par participant en fonction des événements dans les différents scénarios (une case vide signifie aucun accident).

Tableau XXXII : Description des accidents par parcours

Tableau XXXIII : Processus critiques impliqués dans les événements 3 et 4 en ville et l'événement 7 en campagne.

Tableau XXXIV : Processus critiques impliqués dans l'événement 1 en campagne et l'événement 5 en campagne de nuit.

Tableau XXXV : Description des accidents par groupes

Tableau XXXVI : Liste des processus impliqués dans un ou plusieurs événements critiques et indicateurs relatifs à ces processus.

Tableau XXXVII : Processus critiques impliqués dans l'événement 3 en ville.

Tableau XXXVIII : Processus impliqués dans l'événement 3 en ville chez tous les participants. En fond rose, les participants impliqués dans un accident.

Tableau XXXIX : Processus critiques impliqués dans l'événement 4 en ville.

Tableau XL : Processus impliqués dans l'événement 4 en ville chez tous les participant. En fond rose, le participant impliqué dans un accident).

Tableau XLI : Processus critiques impliqués dans l'événement 5 en campagne de nuit.

Tableau XLII : Processus impliqués dans l'événement 5 de nuit chez les participants. En fond rose, les participants impliqués dans un accident.

Tableau XLIII : Processus critiques impliqués dans l'événement 2 en campagne de nuit.

Tableau XLIV : Processus critiques impliqués dans l'événement 2 en campagne.

Tableau XLV : Processus impliqués dans l'événement 2 de campagne chez tous les participants. En fond rose, le participant impliqué dans un accident.

Tableau XLVI : Pourcentage des scores -2, -1, 0, 1, et 2 en fonction du parcours.

Tableau XLVII : Calcul du Khi² sur l'effectif total de scores -2, -1, 0, 1, et 2 pour les groupes Co, CR, et CA.

Tableau XLVIII : Pourcentage de scores -2, -1, 0, +1, et +2 obtenus par l'ensemble des participants, pour tous les événements et pour chaque processus étudié.

Tableau XLIX : Pourcentage de scores -2 (déficitaire) par processus pour tous les participants, sur l'ensemble des scores aux différents événements critiques n'ayant pas entraînés d'accident.

Tableau L : Ecart-type de chaque participant par rapport au pourcentage moyen obtenu par le groupe contrôle. En gris figurent les résultats pour lesquels les participants sont à plus de 2σ des participants contrôles. En rouge, les processus majoritairement en échec chez les CR/CA.

Tableau LI : Significativité des comparaisons 2 à 2 a posteriori obtenue par un test de Newman-Keuls.

Tableau LII : Significativité des comparaisons 2 à 2 a posteriori obtenue par un test de Newman-Keuls.

Tableau LIII :Significativité des comparaisons 2 à 2 a posteriori du temps cumulé total accordé aux panneaux publicitaires obtenue par un test de Newman-Keuls.

Tableau LIV :Significativité des comparaisons 2 à 2 a posteriori du temps cumulé total accordé aux panneaux publicitaires obtenue par un test de Newman-Keuls pour l'effet d'interaction entre le groupe et l'excentricité du panneau.

Tableau LV : Scores obtenus par les participants CR, CA et PA1 en comparaison du groupe contrôle aux différentes variables utilisées pour étudier l'effet des panneaux publicitaires.

Tableau LVI :Scores obtenus par les participants CR, CA et PA1 en comparaison du groupe contrôle aux différentes variables utilisées pour étudier l'effet des panneaux publicitaires en fonction de l'excentricité des panneaux.

Tableau LVII : Moyennes et écarts-types des délais entre l'apparition du signal et les différentes actions sur les pédales par groupes.

Tableau LVIII : Processus impliqués dans l'événements critique 2 en ville et indicateurs relatifs à ces processus. En rouge, les processus critiques.

Tableau LIX :Processus impliqués dans l'événements critique 3 en ville et indicateurs relatifs à ces processus. En rouge, les processus critiques.

Tableau LX : Processus impliqués dans l'événements critique 4 en ville et indicateurs relatifs à ces processus. En rouge, les processus critiques.

Tableau LXI :Processus impliqués dans l'événements critique 5 en ville et indicateurs relatifs à ces processus. En rouge, les processus critiques.

Tableau LXII : Processus critiques impliqués dans les événements critiques pour le parcours en ville.

Tableau LXIII :Processus impliqués dans l'événements critique 1 en campagne et indicateurs relatifs à ces processus. En rouge, les processus critiques.

Tableau LXIV :Liste des processus impliqués dans l'événements critique 2 en campagne et indicateurs relatifs à ces processus. En rouge, les processus critiques.

Tableau LXV : Processus impliqués dans l'événements critique 3 en campagne et indicateurs relatifs à ces processus. En rouge, les processus critiques.

Tableau LXVI : Processus impliqués dans l'événements critique 4 en campagne et indicateurs relatifs à ces processus. En rouge, les processus critiques.

Tableau LXVII : Processus impliqués dans l'événements critique 5 en campagne et indicateurs relatifs à ces processus. En rouge, les processus critiques.

Tableau LXVIII : Processus impliqués dans l'événements critique 6 en campagne et indicateurs relatifs à ces processus. En rouge, les processus critiques.

Tableau LXIX : Processus impliqués dans l'événements critique 7 en campagne et indicateurs relatifs à ces processus. En rouge, les processus critiques.

Tableau LXX : Processus impliqués dans les événements critiques pour le parcours en campagne.

Tableau LXXI : Processus impliqués dans l'événements critique 1 de nuit et indicateurs relatifs à ces processus. En rouge, les processus critiques.

Tableau LXXII : Processus impliqués dans l'événements critique 2 de nuit et indicateurs relatifs à ces processus. En rouge, les processus critiques.

Tableau LXXIII : Processus impliqués dans l'événements critique 3 en ville et indicateurs relatifs à ces processus. En rouge, les processus critiques.

Tableau LXXIV : Processus impliqués dans l'événements critique 4 de nuit et indicateurs relatifs à ces processus. En rouge, les processus critiques.

Tableau LXXV : Processus impliqués dans l'événements critique 5 de nuit et indicateurs relatifs à ces processus. En rouge, les processus critiques.

Tableau LXXVI : Processus impliqués dans les événements critiques pour le parcours de nuit.

Tableau LXXVII : Exemple d'items de l'échelle d'évaluation des difficultés cognitive Mc Nair.

ANNEXES

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

Toute les références données dans les annexes sont recensées dans la bibliographie générale (cf. chapitre 8). De la même manière, toutes les figures et tous les tableaux sont indexés avec l'ensemble des figures et tableaux de ce manuscrit.

ANNEXE 1 : Description détaillée des évènements critiques et des processus impliqués

(Complément du chapitre 4 - Etudes préliminaires pour la conception et la validation des scenarios sur simulateur de conduite)

1 Evénements du parcours en ville, processus et processus critiques impliqués

1.1 Evénement 1 en ville : piéton qui traverse au feu piéton rouge

Cet événement ayant été décrit dans le détail au chapitre 5, il ne sera pas repris en annexe.

1.2 Evénement 2 en ville : camionnette à l'arrêt dans une courbe

Lors de l'événement 2, le participant circulait sur une chaussée comportant deux voies dans le même sens. L'événement critique consistait en une camionnette avec ses feux de détresse (objet critique) à l'arrêt dans une courbe sur la voie du participant. Un véhicule, positionné sur l'autre voie, empêchait le participant de se déporter immédiatement (cf. figure 39). Le moment critique correspond au moment où la camionnette était visible sur l'écran droit.

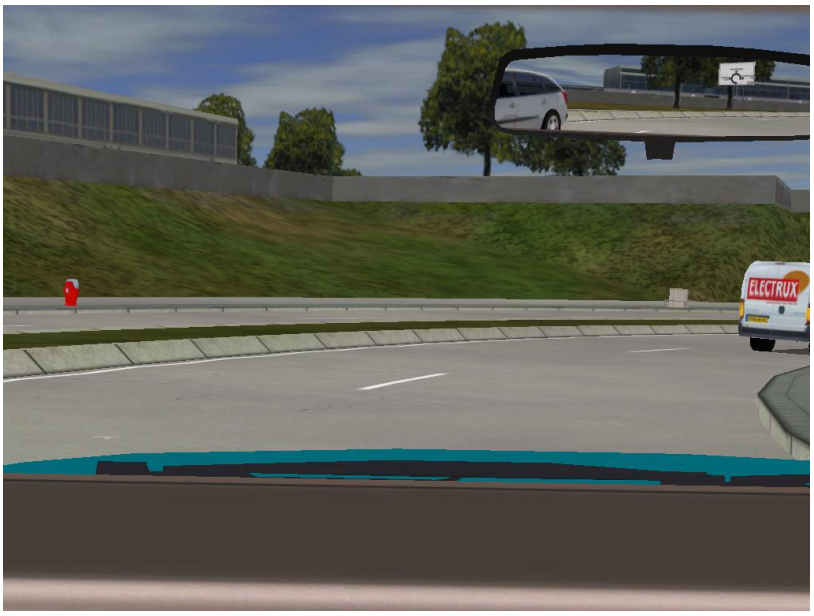


Figure 39 : Capture de l'écran principal lors de l'événement critique 2 en ville. Un camion est à l'arrêt dans une courbe.

Les processus critiques et non critiques impliqués dans cet événement, ainsi que leurs indicateurs, sont synthétisés dans le tableau LVIII. Le participant se trouvait relativement proche de la camionnette au moment critique. Il ne pouvait donc pas anticiper au niveau visuel ou moteur. La vitesse de traitement et la prise de décision étaient donc les seuls processus critiques, puisque le participant devait intégrer rapidement les informations relatives à la camionnette et au véhicule sur l'autre voie pour prendre la décision appropriée. A priori, la décision adéquate consistait à ralentir, et, éventuellement, freiner, pour pouvoir se déporter et dépasser la camionnette après le passage de l'autre véhicule.

Tableau LVIII : Processus impliqués dans l'événements critique 2 en ville et indicateurs relatifs à ces processus. En rouge, les processus critiques.

Evénement	Processus	Indicateurs
ville_evt2	Adaptation de la vitesse à la courbe	Relâchement de l'accélérateur avant que la camionnette soit visible
ville_evt2	Prise d'information sur l'objet critique	Regard sur la camionnette (oui/non)
ville_evt2	Temporalité de la prise d'information sur l'objet critique	TTC 1er regard
ville_evt2	Vitesse de traitement	Temps nécessaire pour relâcher l'accélérateur
ville_evt2	Vitesse de traitement	Temps nécessaire pour appuyer sur le frein
ville_evt2	Prise de décision	Adaptée ou non
ville_evt2	Temporalité de l'action	TTC pour relâcher l'accélérateur
ville_evt2	Temporalité de l'action	TTC pour freiner

Nous nous sommes assurés qu'il y a avait bien eu une prise d'information sur l'objet critique (qui se situe dans l'axe du regard pour le maintien de la trajectoire). La temporalité de cette prise d'information était aussi importante et nous l'avons étudiée à travers le calcul des TTC. Par ailleurs, la configuration de l'infrastructure (la courbe) pouvait amener le participant à ralentir afin d'adapter sa vitesse, avant même de voir la camionnette. Nous avons donc observé cette adaptation.

1.3 Evénement 3 en ville : piéton qui traverse derrière un camion de vente ambulante

Dans l'événement 3 en ville, le participant conduisait sur une route comportant deux voies dans le même sens. Une camionnette de vente ambulante (objet d'intérêt) était stationnée sur une place de stationnement à droite de la chaussée, avec des encarts publicitaires la signalant à l'avant et à l'arrière du véhicule. Lorsque le participant arrivait à proximité de la camionnette, un piéton (objet critique) surgissait derrière la camionnette et traversait devant le participant (cf. figure 40). Le moment critique correspond au moment où le piéton est visible.

Signalons que pour cet événement, il était nécessaire que le participant circule sur la voie de droite afin que l'événement se déroule comme prévu (piéton visible au dernier moment). L'événement ne pouvait pas être analysé si un participant était sur la voie de gauche. Des véhicules avaient été positionnés sur la voie de gauche pour éviter que le participant se positionne sur cette voie.

Figure 40 : Capture de l'écran principal lors de l'événement critique 3 en ville. Un piéton traverse derrière un camion de vente ambulante.

Cet événement impliquait donc (tableau LIX) dans un premier temps d'anticiper au niveau visuel et moteur un danger potentiel à la vue de la camionnette de vente ambulante, le danger potentiel étant localisé derrière de la camionnette.

Tableau LIX : Processus impliqués dans l'événements critique 3 en ville et indicateurs relatifs à ces processus. En rouge, les processus critiques.

Evénement	Processus	Indicateurs
ville_evt3	Anticipation motrice tardive OU réaction au mouvement en périphérie	Relâchement de l'accélérateur/appui sur le frein avant de voir le piéton mais piéton visible
ville_evt3	Anticipation visuelle	Regard sur la camionnette
ville_evt3	Anticipation motrice	Relâchement de l'accélérateur
ville_evt3	Temporalité de la prise d'information sur l'objet critique	Intervalle de temps entre le moment où le piéton est visible et le premier regard
ville_evt3	Temporalité de la prise d'information sur l'objet critique	TTC 1er regard sur le piéton
ville_evt3	Vitesse de traitement	Temps nécessaire pour relâcher l'accélérateur
ville_evt3	Vitesse de traitement	Temps nécessaire pour appuyer sur le frein
ville_evt3	Prise de décision	Adaptée (freiner) ou non
ville_evt3	Temporalité de l'action	TTC action frein

Une fois le piéton visible (face au participant), il fallait traiter rapidement l'information, prendre une décision et mettre en œuvre l'action approprié. La décision attendue ici était l'arrêt car les véhicules sur la voie de gauche empêchaient l'évitement.

D'autres processus entraient en jeu, comme la prise d'information et la temporalité de cette prise d'information, ainsi que la temporalité de l'action mise en œuvre. Par ailleurs, il existait la possibilité que le participant ne regarde pas le piéton dès qu'il est visible mais relâche l'accélérateur et/ou freine. Dans ce cas, il serait difficile de trancher s'il s'agissait d'une anticipation motrice tardive à l'approche d'un danger potentiel ou d'une réaction à un mouvement en périphérie (objet détecté mais non identifié). Néanmoins, a priori, ces processus n'étaient pas critiques.

1.4 Evénement 4 en ville : enfant qui traverse en suivant son ballon

Lors de cet événement, un enfant se trouvait à gauche sur le bord de la chaussée. Quand le participant arrivait à proximité, l'enfant traversait devant lui en suivant son ballon (cf. figure 41). On pouvait voir l'enfant et le ballon sur le bord de la chaussée bien avant qu'il commence à traverser.

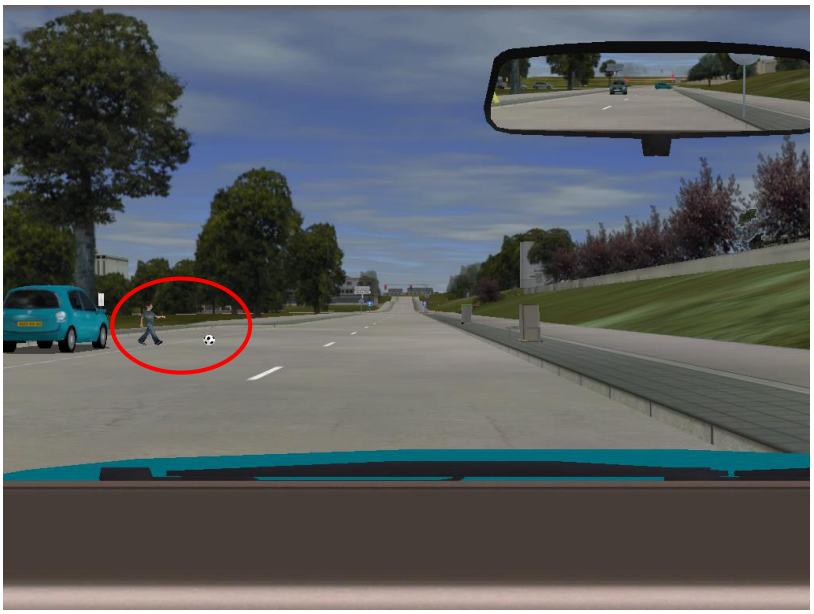


Figure 41 : Capture de l'écran principal lors de l'événement critique 4 en ville. Un enfant traverse en suivant son ballon.

Le comportement d'un enfant piéton n'est pas aussi rationnel que celui d'un piéton adulte. Il existait donc un risque pour que l'enfant traverse la route. Le participant pouvait donc anticiper ce risque, au niveau visuel (regarder l'enfant) et moteur (relâcher l'accélérateur à l'approche de l'enfant). Lorsque, l'enfant s'engageait à la suite de son ballon, il fallait traiter rapi-

dement l'information puis prendre une décision. Freiner était la solution à privilégier, éventuellement conjuguée à un évitement. Les processus impliqués sont rappelés dans le tableau LX.

Tableau LX :Processus impliqués dans l'événements critique 4 en ville et indicateurs relatifs à ces processus. En rouge, les processus critiques.

Evénement	Processus	Indicateurs
ville_evt4	Anticipation motrice	Relâchement de l'accélérateur
ville_evt4	Anticipation visuelle	Regard sur l'enfant avant qu'il s'engage
ville_evt4	Prise d'information sur l'objet critique	Regard sur le piéton après qu'il se soit engagé (oui/non)
ville_evt4	Temporalité de la prise d'information sur l'objet critique	TTC 1er regard
ville_evt4	Vitesse de traitement	Délai entre le moment où le piéton s'engage/appui sur le frein
ville_evt4	Prise de décision	Adaptée (freiner) ou non
ville_evt4	Temporalité de l'action	TTC pour freiner

Comme pour les autres événements, on pouvait étudier la prise d'information et la temporalité de cette prise d'information, ainsi que la temporalité de l'action mise en œuvre.

1.5 Evénement 5 en ville : piéton qui traverse pour rejoindre le bus

Dans l'événement 5 en ville, le participant abordait une courbe dans une rue en double sens. A la sortie de la courbe, il pouvait voir sur la voie opposée un bus stationné à un arrêt de bus et des personnes se diriger vers le bus (objet d'intérêt). Un piéton (objet critique) situé au départ à droite traversait alors devant le participant pour rejoindre le bus (cf. figure 42). Le moment critique correspond au moment où le piéton est visible.

Dans cet événement, le participant pouvait anticiper visuellement un danger potentiel en voyant le bus (objet d'intérêt). Néanmoins, contrairement à l'événement 3 en ville, l'objet critique (le piéton) ne se situait pas au niveau de l'objet d'intérêt. L'anticipation visuelle ne permettait pas d'éviter l'accident. Ce n'était donc pas un processus critique. Au contraire, l'anticipation motrice pouvait permettre d'éviter l'accident en ralentissant et/ou freinant avant même d'avoir vu le piéton. Le piéton étant visible tardivement, il fallait traiter l'information rapidement et prendre la décision adaptée. La décision appropriée a priori était le freinage.

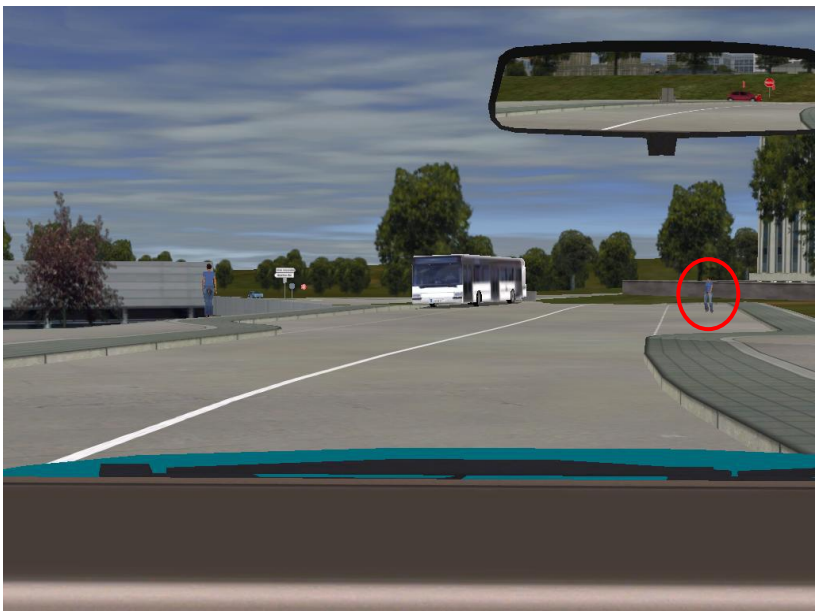


Figure 42 : Capture de l'écran principal lors de l'événement critique 5 en ville. Un piéton traverse pour rejoindre le bus.

D'autres processus entraient en jeu, comme la prise d'information et la temporalité de cette prise d'information, ainsi que la temporalité de l'action mise en œuvre (cf. tableau LXI). Néanmoins, a priori, ces processus n'étaient pas critiques. Comme pour l'événement 3 en ville, nous ne pouvons pas distinguer une anticipation motrice tardive d'une réaction au mouvement en périphérie.

Tableau LXI : Processus impliqués dans l'événements critique 5 en ville et indicateurs relatifs à ces processus. En rouge, les processus critiques.

Evénement	Processus	Indicateurs
ville_evt5	Anticipation motrice tardive OU réaction au mouvement en périphérie	Relâchement de l'accélérateur/appui sur le frein avant de voir le piéton mais piéton visible
ville_evt5	Anticipation visuelle	Regard sur le bus
ville_evt5	Anticipation motrice	Relâchement de l'accélérateur
ville_evt5	Temporalité de la prise d'information sur l'objet critique	Intervalle de temps entre le moment où le piéton est visible et le premier regard
ville_evt5	Temporalité de la prise d'information sur l'objet critique	TTC 1er regard sur le piéton
ville_evt5	Vitesse de traitement	Temps nécessaire pour relâcher l'accélérateur
ville_evt5	Vitesse de traitement	Temps nécessaire pour appuyer sur le frein
ville_evt5	Prise de décision	Adaptée (freiner) ou non
ville_evt5	Temporalité de l'action	TTC action frein

1.6 Récapitulatif des processus critiques impliqués dans les événements en ville

Le parcours en ville présentaient 5 événements critiques différents. On pouvait observer dans la plupart des événements des processus similaires, liés à la conduite. La présence d'un objet critique obligeait les participants à modifier leur comportement de conduite afin d'éviter l'accident. Tous les événements impliquaient donc le processus critique de prise de décision (cf. tableau LXII). Néanmoins, hormis les événements 4 et 5, les événements n'impliquaient pas les mêmes processus critiques.

Tableau LXII : Processus critiques impliqués dans les événements critiques pour le parcours en ville.

	Anticipation visuelle	Anticipation motrice	Prise de décision	Rapidité de traitement
Evt 1 (femme au feu)	oui	oui	oui	
Evt2 (camionnette à l'arrêt)			oui	oui
Evt3 (piéton après friterie ambulante)	oui	oui	oui	oui
Evt4 (enfant avec ballon)	oui	oui	oui	oui
Evt5 (femme qui rejoint le bus)		oui	oui	oui

En ce qui concerne les événements 4 et 5, même s'ils faisaient appel aux mêmes processus critiques, ils n'y faisaient pas appel de la même manière. La différence majeure portait sur l'anticipation visuelle et motrice. En effet, dans l'événement 4, l'objet critique était présent et visible dès le départ. Au contraire, dans l'événement 3, l'objet critique n'était pas présent et l'anticipation se faisait à partir d'un objet d'intérêt, qui devait activer la représentation d'un danger potentiel, en l'absence de danger immédiatement visible. Il est possible que dans ce dernier événement, la représentation ne soit pas activée, ou pas activée aussi fortement que pour l'événement 4. L'événement 3 pourrait donc être davantage échoué que l'événement 4.

L'événement 5 est également proche de l'événement 4 en termes de processus critiques impliqués. Comme nous l'avons expliqué, l'anticipation se fait également sur un objet d'intérêt et non sur l'objet critique lui-même. Toutefois, l'anticipation visuelle sur l'objet critique de l'événement 5 (le bus) ne devrait pas permettre d'éviter l'accident puisque le piéton venait de la direction opposée.

Par ailleurs, on peut opposer l'événement 1 et l'événement 2 en termes de processus critiques. En effet, dans l'événement 1, l'anticipation va jouer un rôle prépondérant dans la prise de décision et la gestion de l'événement critique. A l'inverse, la prise de décision pour l'évé-

nement 2 repose uniquement sur un traitement rapide des informations. Un accident survenu dans un de ces événements nous renseignerait plus précisément sur le processus mis en défaut.

2 Evénements du parcours en campagne et processus impliqués

Le parcours en campagne se déroulait en environnement rural et durait 5-6 minutes. Il comportait, comme le parcours en ville, des événements critiques. On en comptait 7 différents. Ils sont présentés ci-dessous dans l'ordre d'apparition.

1/ Une voiture, en sens inverse, doublait un bus alors que le participant arrivait,

2/ Un scooter lent peu visible roulait sur la voie du participant,

3/ Une voiture, stationnée sur le bas-côté, s'insérait devant le participant,

4/ Le participant rattrapait un tracteur en sortie de virage

5/ un cerf longeait la route puis traversait un peu plus loin devant le participant,

6/ Un homme à droite traversait pour rejoindre sa voiture à gauche devant le participant,

7/ Une voiture en sens inverse semblait forcer le passage en tournant à gauche.

2.1 Evénement 1 en campagne : véhicule en sens inverse qui double un bus

Lors de l'événement 1, un bus arrivait en sens inverse. A environ 200m du participant, une voiture (objet critique) située derrière le bus le doublait et se trouvait alors face au participant (cf. figure 43). Lorsqu'il restait moins de 100m entre la voiture et le participant, la voiture se rabattait sur sa voie. Le moment critique correspond au moment où la voiture en sens inverse commence à doubler le bus.

Cet événement n'était pas anticipable, en termes visuels ou moteurs, puisque rien n'indiquait qu'une voiture allait doubler à ce moment-là. Les processus critiques étaient donc la vitesse de traitement (tout se jouait en un court laps de temps) et la prise de décision (cf. tableau LXIII). Ici, la décision appropriée était de freiner.

Tableau LXIII : Processus impliqués dans l'événements critique 1 en campagne et indicateurs relatifs à ces processus. En rouge, les processus critiques.

Evénement	Processus	Indicateurs
camp_evt1	Vitesse de traitement	Temps nécessaire pour relâcher l'accélérateur
camp_evt1	Vitesse de traitement	Temps nécessaire pour freiner
camp_evt1	Prise de décision	Adaptée (freiner) ou non
camp_evt1	Temporalité de l'action	TTC pour freiner
camp_evt1	Temporalité de l'action	TTC pour relâcher l'accélérateur

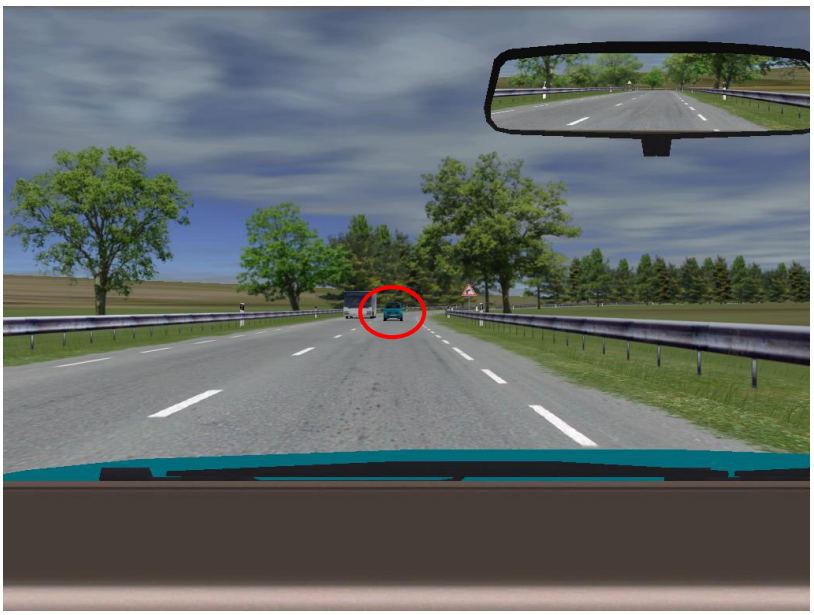


Figure 43 : Capture de l'écran principal lors de l'événement critique 1 en campagne. Un véhicule en sens inverse double un bus.

Par ailleurs, d'autres processus non critiques étaient impliqués. Cependant, certains ne pouvaient pas être observés vu le contexte de l'événement critique. Par exemple, la prise d'information est importante, néanmoins la voiture se trouvant face au participant, il ne semblait pas possible de l'étudier. Nous nous sommes tout de même intéressé à la temporalité de l'action.

2.2 Evénement 2 en campagne : scooter lent sur la voie du participant

Dans cet événement, le participant pouvait voir, en sortant d'une courbe, un scooter lent (objet critique) sur sa voie, dans une longue ligne droite. Le scooter roulait à 20 km/h. Deux véhicules arrivaient en sens inverse et empêchaient de doubler le scooter immédiatement (cf. figure 44). Ensuite, la route était dégagée et la visibilité permettait un dépassement en toute sécurité. Le moment critique correspond au moment où les véhicules en sens inverse empêchent le dépassement immédiat du scooter.

Le scooter étant visible très tôt, le participant pouvait anticiper visuellement. Néanmoins, comme le scooter se situait juste devant le participant, il était difficile de l'observer. Il y avait également de l'anticipation motrice puisque le participant devait ralentir avant de pouvoir dépasser à cause des véhicules arrivant en sens inverse.

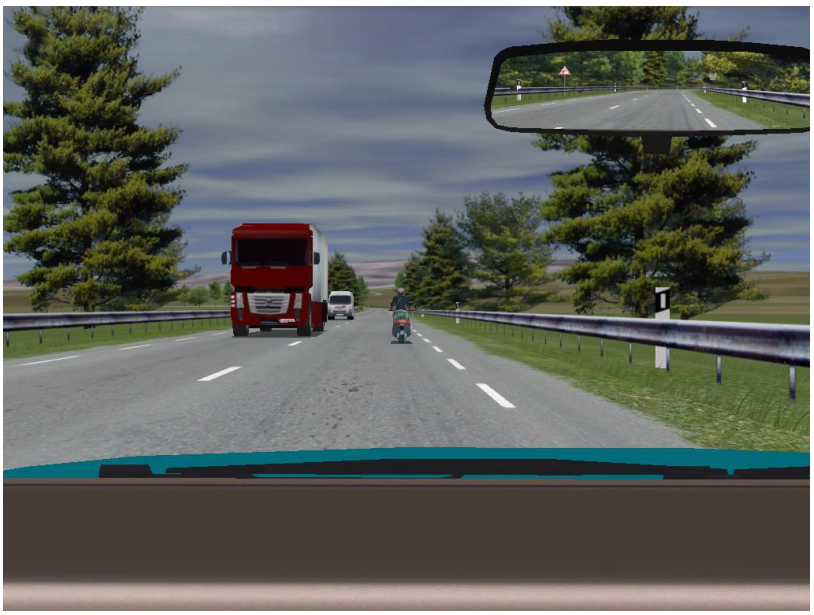


Figure 44 : Capture de l'écran principal lors de l'événement critique 2 en campagne. Le participant rattrape un scooter lent.

Néanmoins, l'anticipation, qu'elle soit visuelle ou motrice, n'était pas primordiale pour éviter l'accident. Cet événement impliquait réellement un seul processus critique : la prise de décision. Cette prise de décision devait se faire en deux phases : (1) ralentir ou freiner pour ne pas percuter le scooter et (2) dépasser le scooter dès que possible. Cette prise de décision ne nécessitait pas d'avoir traité rapidement et à l'avance les informations.

Tableau LXIV : Liste des processus impliqués dans l'événements critique 2 en campagne et indicateurs relatifs à ces processus. En rouge, les processus critiques.

Evénement	Processus	Indicateurs
camp_evt2	Anticipation visuelle	Regard sur le scooter
camp_evt2	Anticipation motrice	Ralentissement
camp_evt2	Prise de décision	Adaptée (ralentir/freiner) ou non
camp_evt2	Prise de décision	Adaptée (dépassement dès que possible) ou non
camp_evt2	Prise d'informations pour la prise de décision	Regard sur les véhicules en sens inverse

Même si les processus n'étaient pas critiques, nous avons observé l'anticipation visuelle et l'anticipation motrice, ainsi que la prise d'informations pour la prise de décision, c'est-à-dire est-ce que le participant a regardé les véhicules en sens inverses afin de prendre la décision de doubler ou non (cf. tableau LXIV).

2.3 Evénement 3 en campagne : voiture qui s'insère devant le participant

Dans l'événement 3 en campagne, le participant pouvait voir dans une ligne droite, en sortant d'une courbe, une voiture (objet critique) stationnée sur le bas-côté droit. Cette voiture avait son clignotant vers la gauche. A l'approche du participant, la voiture s'insérait sur la route, devant le participant (cf. figure 45). Le moment critique correspond au moment où la voiture commençait son insertion.

Figure 45 : Capture de l'écran principal lors de l'événement critique 3 en campagne. Un véhicule s'insère devant le participant

Cet événement critique impliquait trois processus critiques (cf. tableau LXV) : l'anticipation visuelle (voir le véhicule avant qu'il commence son insertion), l'anticipation motrice (relâcher l'accélérateur avant le moment critique), et la prise de décision (ralentir ou freiner, selon la vitesse du participant). La voiture s'insérant assez loin devant le participant, l'événement ne nécessitait pas un traitement rapide des informations.

Nous pouvions également étudier l'adaptation de la vitesse : est-ce que la vitesse était adaptée à la situation (1) par rapport au critère légal de la conduite, (2) par rapport aux participants contrôles qui servent de référence, et (3) est-ce que l'adaptation de la vitesse prenait en compte l'événement critique, c'est-à-dire est-ce que le participant évitait d'accélérer entre le moment où il avait vu la voiture et le moment où elle s'était insérée ? Le contrôle de l'exécution de l'action avait aussi son importance : est-ce que le ralentissement/freinage était adapté à l'événement critique, c'est-à-dire le ralentissement était-il suffisant sans être excessif après que la voiture se soit insérée ? En effet, freiner excessivement est tout aussi dangereux que ne pas

assez freiner. Toutefois, l'échec de l'un de ces processus ne devait pas amener systématiquement à un accident.

Tableau LXV : Processus impliqués dans l'événements critique 3 en campagne et indicateurs relatifs à ces processus. En rouge, les processus critiques.

Evénement	Processus	Indicateurs
camp _evt3	Anticipation visuelle	Regard sur la voiture avant qu'elle démarre
camp _evt3	Anticipation motrice	Relâchement de l'accélérateur
camp _evt3	Prise de décision	Relâchement de l'accélérateur
camp _evt3	Prise de décision	Adaptée (freiner) ou non
camp _evt3	Adaptation de la vitesse	Vitesse par rapport aux contrôles à T0
camp _evt3	Adaptation de la vitesse	Vitesse par rapport critère légal (90km/h) à T0
camp _evt3	Adaptation de la vitesse	Pas d'accélération pendant la période critique (après le 1er regard jusqu'à insertion du véhicule)
camp _evt3	Contrôle de l'exécution de l'action	Taux ralentissement après que la voiture se soit engagée (si vitesse identique à celle des contrôles entre la sortie du virage et T0)

2.4 Evénement 4 en campagne : tracteur lent sur notre voie que le participant voit tardivement

Lors de l'événement 4 en campagne, le participant franchissait un virage sur une colline et avait peu de visibilité sur la route devant lui. A la sortie du virage, alors qu'il amorçait sa descente, il rencontrait un tracteur (objet critique), très lent, sur sa voie. La vitesse du tracteur était fixée à 15 km/h. La présence d'une ligne blanche empêchait théoriquement le conducteur de le dépasser immédiatement (cf. figure 46). Il fallait donc que le conducteur attende que la visibilité soit suffisante pour lui permettre de doubler.

Puisque le participant voyait le tracteur au dernier moment, cet événement n'impliquait pas l'anticipation visuelle. Cependant l'absence de visibilité vers l'avant devait amener à un ralentissement, interprété comme de l'anticipation motrice en prévision d'un danger potentiel. Une fois le tracteur visible, il fallait traiter rapidement les informations et prendre la décision en conséquence : (1) ralentir/freiner pour ne pas percuter le tracteur et (2) dépasser le tracteur dès que possible.

Figure 46 : Capture de l'écran principal lors de l'événement critique 4 en campagne. Le participant rattrape un tracteur lent, visible tardivement.

Tableau LXVI : Processus impliqués dans l'événements critique 4 en campagne et indicateurs relatifs à ces processus. En rouge, les processus critiques.

Evénement	Processus	Indicateurs
camp_evt4	Anticipation motrice	Ralentissement
camp_evt4	Prise d'information sur l'objet critique	Regard sur le tracteur
camp_evt4	Temporalité de la prise d'information sur l'objet critique	TTC 1er regard sur le tracteur
camp_evt4	Vitesse de traitement	Temps nécessaire pour relâcher l'accélérateur
camp_evt4	Vitesse de traitement	Temps nécessaire pour freiner
camp_evt4	Prise de décision	Adaptée (ralentir/freiner) ou non
camp_evt4	Prise de décision	Adaptée (dépassement dès que possible) ou non
camp_evt4	Prise d'informations pour la prise de décision	Regard sur la voie en sens inverse
camp_evt4	Temporalité de l'action	TTC pour freiner
camp_evt4	Temporalité de l'action	TTC pour relâcher l'accélérateur

Dans cet événement intervenaient de manière non critique de nombreux processus (cf. tableau LXVI). Bien sûr, le participant devait prendre des informations visuelles sur l'objet critique (le tracteur), et ce, dans une certaine temporalité. La prise de décision nécessitait au préalable de prendre des informations, en provenance de la voie opposée. Mais comme aucun véhicule n'arrivait en sens inverse, ce processus n'était pas critique. Enfin l'action entreprise (relâcher l'accélérateur ou freiner) se faisaient également dans une certaine temporalité.

2.5 Evénement 5 en campagne : biche qui traverse la route

On pouvait décomposer l'événement 5 en campagne en deux parties. Tout d'abord, le participant voyait, dans les champs situés loin face à lui, courir une biche (objet critique) (cf. figure 47 à gauche). Il la perdait de vue quelques instant. Ensuite, la route tournait et il retrouvait la biche, qui traversait assez loin devant lui, de la droite vers la gauche (cf. figure 47 à droite). Le moment critique est celui auquel la biche commençait à traverser la route.

Figure 47 : Capture de l'écran principal lors de l'événement critique 5 en campagne. A gauche, on peut voir une biche longer le bas-côté. A droite, elle traverse la route devant le participant.

La présence de la biche très tôt permettait au participant d'anticiper visuellement. Toutefois, sa position loin de la chaussée ne nécessitait pas d'anticipation motrice particulière. Par ailleurs, cette anticipation motrice aurait pu être difficile à différencier d'une adaptation à l'infrastructure routière (une courbe). La prise de décision attendue était au minimum le ralentissement. Ainsi, anticipation visuelle et prise de décision étaient les seuls processus critiques à considérer pour cet événement (cf. tableau LXVII).

Tableau LXVII : Processus impliqués dans l'événements critique 5 en campagne et indicateurs relatifs à ces processus. En rouge, les processus critiques.

Evénement	Processus	Indicateurs
camp_evt5	Anticipation visuelle	Regard sur la biche
camp_evt5	Anticipation motrice OU adaptation au virage	Relâchement de l'accélérateur après avoir vu la biche mais avant le moment critique
camp_evt5	Prise de décision	Adaptée (ralentir) ou non
camp_evt5	Temporalité de l'action	TTC pour freiner
camp_evt5	Temporalité de l'action	TTC pour relâcher l'accélérateur

Selon l'action entreprise, nous pouvions observer sa temporalité, même si elle ne représentait pas un aspect critique dans la gestion de l'événement.

2.6 Evénement 6 en campagne : piéton qui traverse la chaussée

L'événement 6 en campagne consistait en un piéton (objet critique) à droite qui traversait la chaussée devant le participant pour rejoindre sa voiture à gauche (cf. figure 48). Le participant pouvait voir le piéton à la sortie d'une courbe (moment critique T_0) et se trouvait alors proche de ce dernier.

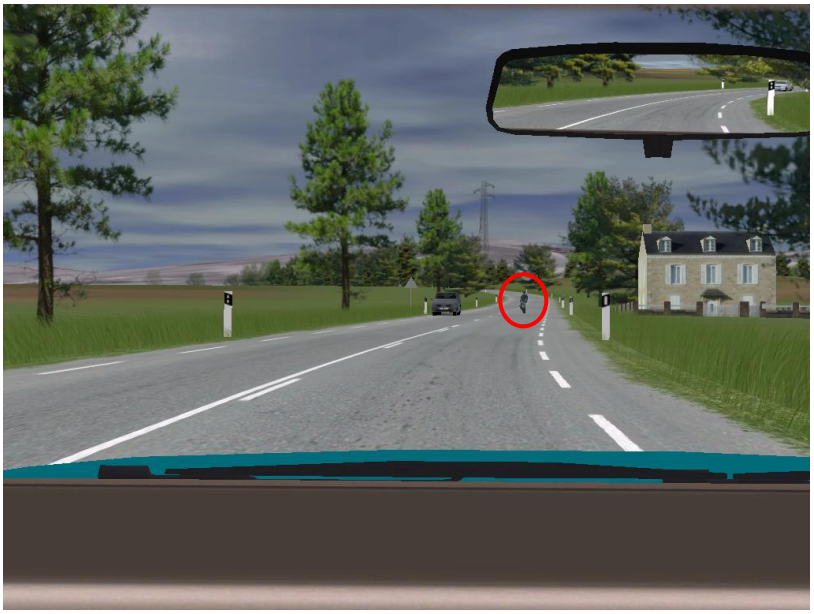


Figure 48 : Capture de l'écran principal lors de l'événement critique 6 en campagne. Un piéton traverse la chaussée devant le participant.

Le piéton n'étant pas visible avant le moment critique, ni la voiture qu'il tentait de rejoindre, il n'y avait donc pas d'anticipation possible, qu'elle soit visuelle ou motrice. Les processus critiques consistaient donc à traiter rapidement l'information et prendre la décision appropriée. Ici, nous attendions au moins un ralentissement (cf. tableau LXVIII).

Tableau LXVIII : Processus impliqués dans l'événements critique 6 en campagne et indicateurs relatifs à ces processus. En rouge, les processus critiques.

Evénement	Processus	Indicateurs
camp_evt6	Prise d'information sur l'objet critique	Regard sur le piéton
camp_evt6	Temporalité de la prise d'information sur l'objet critique	TTC 1er regard sur le piéton
camp_evt6	Prise de décision	Adaptée (freiner) ou non
camp_evt6	Vitesse de traitement	Temps nécessaire pour relâcher l'accélérateur
camp_evt6	Vitesse de traitement	Temps nécessaire pour freiner
camp_evt6	Temporalité de l'action	TTC pour relâcher l'accélérateur
camp_evt6	Temporalité de l'action	TTC pour freiner

Par ailleurs, d'autres processus non critiques étaient impliqués. Par exemple, la prise d'information et la temporalité dans laquelle elle intervenait étaient importantes. La temporalité de l'action, quelle qu'elle soit, étaient également étudiée.

2.7 Evénement 7 en campagne : véhicule en sens inverse qui veut forcer le passage en tournant

Dans l'événement 7 en campagne, une voiture (objet critique) arrivait en sens inverse. A l'approche d'une intersection (voie venant de la droite du participant), elle ralentissait, mettait son clignotant à gauche puis s'arrêtait afin de tourner (cf. figure 49). Si le participant ralentissait, la voiture, non prioritaire, passait. Si le participant continuait, la voiture faisait mine de forcer le passage lorsque le participant arrivait à son niveau (moment critique). Cependant, nous avions programmé la voiture de façon à ce qu'elle ne coupe pas réellement la route au conducteur.

Figure 49 : Capture de l'écran principal lors de l'événement critique 7 en campagne. Un véhicule en sens inverse veut forcer le passage en tournant.

Habituellement, une voiture arrivant sur la voie opposée à celle du conducteur ne présente pas forcément un aspect critique. Cependant, à partir du moment où elle montre son intention de traverser la voie du participant pour tourner, elle devient potentiellement dangereuse. Il était donc pertinent de la regarder avant d'arriver à son niveau (anticipation visuelle) et d'au moins relâcher l'accélérateur (anticipation motrice) au cas où elle tenterait de forcer le passage. A l'approche de la voiture, tout se passait comme si elle voulait forcer le passage. Il fal-

lait donc traiter les informations rapidement. La prise de décision alors attendue était le freinage, éventuellement conjugué à un léger évitement par la droite (cf. tableau LXIX).

Tableau LXIX : Processus impliqués dans l'événements critique 7 en campagne et indicateurs relatifs à ces processus. En rouge, les processus critiques.

Evénement	Processus	Indicateurs
camp_evt7	Anticipation visuelle	Regard sur la voiture avant T0
camp_evt7	Anticipation motrice	Relâchement de l'accélérateur avant T0
camp_evt7	Prise d'information sur l'objet critique	Regard sur la voiture
camp_evt7	Adaptation de la vitesse	Pas d'accélération pendant la période critique (avant le moment critique)
camp_evt7	Adaptation de la vitesse	Vitesse au point d'impact potentiel par rapport au critère sécuritaire subjectif de 30km/h (moyenne des contrôles) (score de -1 si entre 30km/h et 50km/h et -2 si supérieur à 50km/h)
camp_evt7	Adaptation de la vitesse	Vitesse au point d'impact potentiel par rapport aux contrôles (nombre d'écarts-types)
camp_evt7	Vitesse de traitement	Temps nécessaire pour freiner
camp_evt7	Prise de décision	Adaptée (freiner) ou non
camp_evt7	Prise de décision	Adaptée (évitement) ou non
camp_evt7	Contrôle de l'exécution de l'action	Sortie de voie

D'autres processus non critiques pouvaient être étudiés : la prise d'information sur l'objet critique (est-ce que l'objet a été regardé ou non, peu importe le moment), l'adaptation de la vitesse à la situation (est-ce que le participant a accéléré avant le moment critique, est-ce que sa vitesse était adaptée - par rapport aux contrôles et par rapport à un critère subjectif ?) et enfin le contrôle de l'exécution de l'action (est-ce que l'évitement, s'il y en a eu un, a été bien contrôlé, sans sortie de voie ?).

2.8 Récapitulatif des processus critiques impliqués dans les événements en campagne

Le parcours en campagne comportait 7 événements critiques différents. Comme nous l'avions déjà remarqué dans le parcours en campagne, tous les événements impliquaient le processus critique de prise de décision (cf. tableau LXX). Néanmoins, certains événements impliquaient en plus de l'anticipation visuelle, ou de l'anticipation motrice ou de la rapidité de traitement, voire un ou plusieurs de ces processus critiques.

Tableau LXX : Processus impliqués dans les événements critiques pour le parcours en campagne.

	Anticipation visuelle	Anticipation motrice	Prise de décision	Rapidité de traitement
Evt 1 (véhicule en sens inverse sur la voie du participant)			oui	oui
Evt2 (scooter lent)			oui	
Evt3 (véhicule qui s'insère devant le participant)	oui	oui	oui	
Evt4 (tracteur lent que le participant voit tardivement)		oui	oui	oui
Evt5 (biche qui traverse la route)	oui		oui	
Evt6 (piéton qui traverse la chaussée)			oui	oui
Evt7 (voiture qui veut couper la route au participant)	oui	oui	oui	oui

Certains événements faisaient appel aux mêmes processus critiques, comme les événements 1 et 6, qui nécessitaient, en plus de la prise de décision, de traiter rapidement les informations. En effet, les objets critiques étaient visibles au dernier moment. Il n'y avait donc pas de place pour l'anticipation. Néanmoins, dans l'événement 6, l'objet critique (un piéton) se déplaçait latéralement par rapport au participant alors que la voiture de l'événement 1 venait à la rencontre du participant. Nous pouvons donc imaginer que l'événement 1, plus dangereux a priori, mettra plus facilement en défaut les processus impliqués et mènera à davantage d'accidents en cas de déficits.

Ensuite, nous pouvons remarquer que certains événements faisaient appel aux mêmes processus hormis sur l'une des composantes de l'anticipation. En effet, les événements 3 et 5 ne nécessitaient pas de vitesse de traitement importante, mais requéraient une anticipation visuelle et une prise de décision. Toutefois, contrairement à l'événement 3, l'événement 5 ne sollicitait pas l'anticipation motrice. De la même manière, les événements 4 et 7 impliquaient l'anticipation motrice, la prise de décision et la rapidité de traitement. Cependant, l'événement 7 nécessitait en plus de l'anticipation visuelle. Or, nous pouvons penser qu'un événement impliquant davantage de processus critiques aura plus de risque qu'un processus soit mis en échec et pourra mener à davantage d'accidents. Ainsi, les événements 3 et 7 devraient conduire à davantage d'accidents que les événements 5 et 4, respectivement.

Par ailleurs, on peut opposer l'événement 3 aux événements 1 et 6 en termes de processus critiques. En effet, dans l'événement 3, l'anticipation va jouer un rôle prépondérant dans la prise de décision et la gestion de l'événement critique. A l'inverse, la prise de décision pour

l'événement 2 repose uniquement sur un traitement rapide des informations. Un accident survenu dans un de ces événements nous renseignerait plus précisément sur le processus mis en défaut.

3 Evénements du parcours de nuit et processus impliqués

Le parcours se déroulait en environnement rural, de nuit, avec une pluie intermittente (il pleuvait 3 fois durant le parcours). Les conditions de conduite étaient donc dégradées, en termes de visibilité et d'adhérence. On donnait une consigne d'optimisation de l'utilisation des feux et des essuie-glaces au participant, accompagnée d'une explication et d'une démonstration. Le parcours durait 6 à 7 minutes. Comme les deux scénarios précédents, celui-ci comportait des événements critiques. Voici dans quel ordre ils apparaissaient :

1/ Un voiture lente, peu visible, roulait sur la voie du participant,

2/ Une camionnette lente, peu visible, roulait sur la voie du participant,

3/ Un triangle de signalisation était posé sur la voie du participant à l'entrée d'une courbe sur la droite. A la sortie du virage, une voiture était arrêtée et une voiture arrivait en sens inverse,

4/ Un piéton marchait sur le bas-côté droit avec une lampe en main,

5/ Un cerf traversait devant le participant alors que la route était enneigée.

Durant les 2 dernières minutes (incluant l'événement 5), la route était enneigée, entraînant une faible adhérence du véhicule.

3.1 Evénement 1 de nuit : voiture lente sur la voie du participant avec feux arrière défaillants

Dans l'événement 1 de nuit, le participant rattrapait une voiture lente (objet critique), dont les feux arrières fonctionnaient mal, c'est-à-dire qu'ils s'allumaient par intermittence. Elle était donc peu visible (cf. figure 50). Elle roulait plus lentement que le participant : (a) si le participant roulait à plus de 75 km/h, sa vitesse était de 50 km/h ; (b) si le participant roulait entre 45 et 75 km/h, sa vitesse était inférieure de 25km/h par rapport à celle du participant, (c) ; enfin, si le participant roulait en dessous de 45 km/h, sa vitesse était de 20 km/h. Le moment critique correspondait au moment où la voiture devenait visible.

Figure 50 : Capture de l'écran principal lors de l'événement critique 1 de nuit. Le participant rattrape une voiture lente avec des feux arrières défaillants.

Comme la voiture était peu visible, nous ne pouvions pas vraiment attendre de l'anticipation visuelle et/ou motrice sur cet événement. Toutefois, elle était visible suffisamment tôt pour ne pas nécessiter de traitement rapide des informations. Le seul processus critique impliqué dans cet événement était donc la prise de décision (cf. tableau LXXI). La prise de décision attendue était tout d'abord de ralentir, voire freiner en fonction de la vitesse, puis de dépasser la voiture dès que possible.

Tableau LXXI : Processus impliqués dans l'événements critique 1 de nuit et indicateurs relatifs à ces processus. En rouge, les processus critiques.

Evénement	Processus	Indicateurs
nuit_evt1	Prise d'informations sur l'objet critique	Regard sur la voiture
nuit_evt1	Temporalité de la prise d'informations sur l'objet critique	Regard sur les véhicules en sens inverse
nuit_evt1	Prise de décision	Adaptée (ralentir/freiner) ou non
nuit_evt1	Prise de décision	Adaptée (dépassement dès que possible) ou non
nuit_evt1	Temporalité de l'action	TTC pour relâcher l'accélérateur
nuit_evt1	Temporalité de l'action	TTC pour freiner

L'anticipation visuelle n'étant pas possible, nous nous sommes également intéressés à la prise d'information et sa temporalité, ainsi qu'à la temporalité de l'action entreprise.

3.2 Evénement 2 de nuit : camion lent sur la voie du participant peu visible

Dans cet événement, un camion lent (objet critique) sans feux, donc peu visible, était sur la voie du participant. La vitesse du camion était inférieure à celle du conducteur de sorte qu'il le rattrapait assez rapidement (cf. figure 51) : (a) si le participant roulait à plus de 75 km/h, sa vitesse était de 50 km/h ; (b) si le participant roulait entre 45 et 75 km/h, sa vitesse était inférieure de 25km/h par rapport à celle du participant, (c) ; enfin, si le participant roulait en dessous de 45 km/h, sa vitesse était de 20 km/h.

Figure 51 : Capture de l'écran principal lors de l'événement critique 2 de nuit. Le participant rattrape un camion lent peu visible.

Comme pour l'événement précédent, ce qui nous intéressait particulièrement sur cet événement était la prise de décision (concernant le dépassement). Il s'agit du seul processus critique dans cet événement (cf. tableau LXXII). Il était difficile de parler d'anticipation visuelle ou motrice puisque l'objet critique était très peu visible.

Tableau LXXII : Processus impliqués dans l'événements critique 2 de nuit et indicateurs relatifs à ces processus. En rouge, les processus critiques.

Evénement	Processus	Indicateurs
nuit_evt2	Prise d'informations sur l'objet critique	Regard sur la voiture
nuit_evt2	Temporalité de la prise d'informations sur l'objet critique	Regard sur les véhicules en sens inverse
nuit_evt2	Prise de décision	Adaptée (ralentir/freiner) ou non
nuit_evt2	Prise de décision	Adaptée (dépassement dès que possible) ou non
nuit_evt2	Temporalité de l'action	TTC pour relâcher l'accélérateur
nuit_evt2	Temporalité de l'action	TTC pour freiner

D'autres processus non critiques étaient impliqués dans cet événement : la prise d'information, la temporalité de la prise d'information, et la temporalité de l'action entreprise.

3.3 Evénement 3 de nuit : voiture en panne dans un virage

Dans l'événement 3 de nuit, le participant pouvait voir sur sa voie un triangle de sécurité (objet d'intérêt) (cf. figure 52 à gauche), à l'entrée d'une courbe vers la droite. Puis dans la courbe, il rencontrait une voiture à l'arrêt (objet critique) avec ses feux de détresse, probablement en panne (cf. figure 52 à droite). Le moment critique T_0 correspondait au moment où la voiture était visible. Une voiture arrivait en sens inverse et ne permettait pas de dépasser immédiatement.

Figure 52 : Capture de l'écran principal lors de l'événement critique 3 de nuit. A gauche, on voit un triangle de signalisation, à droite, on voit un véhicule à l'arrêt dans le virage.

Cet événement impliquait donc (tableau LXXIII) dans un premier temps une anticipation motrice à la vue du triangle de sécurité, qui signalait clairement un danger potentiel. Le participant ne pouvait pas voir la voiture en panne avant T_0 et voir le triangle ne le renseignait pas sur la position et la nature exactes du danger. Il n'y avait donc pas d'anticipation visuelle. Une fois la voiture visible, il fallait traiter rapidement l'information et prendre une décision afin de ne pas la percuter. La décision attendue ici était l'arrêt car la voiture arrivant en sens inverse empêchait le dépassement immédiat. Il fallait ensuite dépasser dès que possible.

Tableau LXXIII : Processus impliqués dans l'événements critique 3 en ville et indicateurs relatifs à ces processus. En rouge, les processus critiques.

Evénement	Processus	Indicateurs
nuit_evt3	Prise d'information sur l'objet d'intérêt	Regard sur le triangle
nuit_evt3	Temporalité de la prise d'information sur l'objet critique	Intervalle de temps entre le moment où la voiture en panne est visible et le premier regard
nuit_evt3	Anticipation motrice	Ralentissement après avoir vu le triangle et avant T_0
nuit_evt3	Prise d'information sur l'objet critique	Regard sur la voiture en panne
nuit_evt3	Temporalité de la prise d'information sur l'objet critique	TTC 1er regard sur la voiture en panne
nuit_evt3	Vitesse de traitement	Temps nécessaire pour relâcher l'accélérateur
nuit_evt3	Vitesse de traitement	Temps nécessaire pour appuyer sur le frein
nuit_evt3	Prise de décision	Adaptée (freiner) ou non
nuit_evt3	Prise de décision	Adaptée ou non = arrêt ou ralentissement suffisant
nuit_evt3	Prise de décision	Adaptée (dépassement dès que possible) ou non
nuit_evt3	Temporalité de l'action	TTC action frein

D'autres processus entraient en jeu, comme la prise d'information sur l'objet d'intérêt et la temporalité de cette prise d'information, ou la prise d'information sur l'objet critique et sa temporalité. Il y avait également la temporalité de l'action mise en œuvre, mais ces processus n'étaient pas critiques a priori.

3.4 Evénement 4 de nuit : piéton sur le bas-côté droit

Dans cet événement, le participant croisait un piéton (objet critique), une lampe à la main, qui marchait en direction du participant, le long de la chaussée à droite (cf. figure 53). Il n'y avait pas de danger réel mais seulement un danger potentiel. Nous avons donc décidé de fixer le moment critique au moment où le participant était proche du piéton. Nous avons considéré que le participant était proche du piéton lorsqu'il arrivait à 50m de celui-ci (distance critique). Le moment critique était donc le moment où le participant arrivait à cette distance critique.

Le participant pouvait voir le piéton assez tôt. Cet événement impliquait donc une anticipation visuelle (cf. tableau LXXIV). Par ailleurs, il semblait nécessaire de relâcher au moins l'accélérateur à l'approche du participant avant d'être trop près (anticipation motrice). Cependant, comme l'événement ne présentait pas de danger réel mais seulement un danger potentiel, il ne nécessitait pas de prise de décision ou de traitement rapide des informations.

Figure 53 : Capture de l'écran principal lors de l'événement critique 4 de nuit. Un piéton marche sur le bas-côté droit.

Tableau LXXIV : Processus impliqués dans l'événements critique 4 de nuit et indicateurs relatifs à ces processus. En rouge, les processus critiques.

Evénement	Processus	Indicateurs
nuit_evt4	Anticipation visuelle	Regard sur le piéton avant T0
nuit_evt4	Anticipation motrice	Relâchement de l'accélérateur avant T0
nuit_evt4	Prise d'information sur l'objet critique	Regard sur le piéton
nuit_evt4	Temporalité de la prise d'information sur l'objet critique	TTC 1er regard sur la voiture en panne

En plus des processus critiques, cet événement impliquait de regarder l'objet critique. Nous avons donc étudié la prise d'information sur l'objet critique et sa temporalité.

3.5 Evénement 5 de nuit : biche qui traverse

Dans cet événement, le participant conduisait sur une route enneigée lorsqu'une biche traversait soudainement devant lui (cf. figure 54).

Cet événement impliquait principalement la vitesse de traitement des informations et la prise de décision (cf. tableau LXXV) puisque l'objet critique n'était visible qu'au tout dernier moment.

Figure 54 : Capture de l'écran principal lors de l'événement critique 5 de nuit. Uen biche traverse devant le participant lorsque la route est enneigée.

Tableau LXXV : Processus impliqués dans l'événements critique 5 de nuit et indicateurs relatifs à ces processus. En rouge, les processus critiques.

Evénement	Processus	Indicateurs
nuit_evt5	Adaptation de la vitesse	Vitesse par rapport au critère légal (90km/h) à T0
nuit_evt5	Adaptation de la vitesse	Vitesse par rapport aux contrôles à T0
nuit_evt5	Adaptation de la vitesse	Vitesse par rapport à un critère sécuritaire subjectif (<46km/h) à T0 (moyenne des contrôles -1 si supérieur à 46km/h et -2 si supérieur à 56km/h qui est la vitesse maximum sans risque de dérapage suite aux essais réalisés sur le simulateur)
nuit_evt5	Temporalité de la prise d'information sur l'objet critique	Intervalle de temps entre le moment où la biche est visible et le premier regard
nuit_evt5	Temporalité de la prise d'information sur l'objet critique	TTC 1er regard sur la biche
nuit_evt5	Prise de décision	Adaptée (freiner) ou non
nuit_evt5	Vitesse de traitement	Temps nécessaire pour relâcher l'accélérateur
nuit_evt5	Vitesse de traitement	Temps nécessaire pour freiner
nuit_evt5	Temporalité de l'action	TTC pour relâcher l'accélérateur
nuit_evt5	Temporalité de l'action	TTC pour freiner

D'autres processus non critiques entraient en jeu dans cet événement. Les conditions particulières de conduite nécessitaient d'adapter sa vitesse, que l'on pouvait observer de plusieurs manières (cf. tableau LXXV). Nous avons également étudié la prise d'information sur l'objet critique et la temporalité dans laquelle elle intervenait.

3.6 Récapitulatif des processus critiques impliqués dans les événements de nuit

Le parcours de nuit comportait 5 événements critiques différents. Contrairement aux parcours en ville et en campagne, tous les événements n'impliquaient pas le processus critique de prise de décision (cf. tableau LXXVI). En fait, l'événement 4 était le seul à ne pas impliquer ce processus. Cela s'explique par le fait que contrairement aux autres événements de l'ensemble des parcours, cet événement 4 de nuit ne présentait pas réellement un danger qu'il fallait éviter en changeant de comportement mais seulement un danger potentiel qui ne s'est pas réalisé.

Tableau LXXVI : Processus impliqués dans les événements critiques pour le parcours de nuit.

	Anticipation visuelle	Anticipation motrice	Prise de décision	Rapidité de traitement
Evt 1 (voiture lente avec feux arrière défaillants)			oui	
Evt2 (camion lent peu visible)			oui	
Evt3 (voiture en panne + triangle de signalisation)		oui	oui	oui
Evt4 (piéton)	oui	oui		
Evt5 (biche)			oui	oui

Nous pouvons remarquer également que les événements 1 et 2 sont très semblables, aussi bien dans leur description que dans les processus critiques impliqués. Par ailleurs, hormis les événements 1 et 2, les événements présentaient des caractéristiques très différentes d'un événement à l'autre. Nous pouvons d'ailleurs mettre en complète opposition l'événement 4 et l'événement 5, qui n'impliquaient aucun processus en commun. En effet, l'événement 4 ne nécessitait que les processus d'anticipation visuelle et motrice, alors que l'événement 5 ne nécessitait que la rapidité de traitement et la prise de décision.

ANNEXE 2 : Discussion téléphonique entre l'expérimentateur et un faux interlocuteur.

Partie 1

Le téléphone sonne, l'expérimentateur répond :

« Allo ? Ah Isabelle ! Je t'ai laissé un message…

- …

- On a repris là… Attends, deux secondes.

S'adresse au participant :

- Ca ne vous dérange pas si je prends cet appel, c'est très important. Je vous en avais parlé. (Le participant accepte). Merci. Continuez à conduire normalement, je continue de vous surveiller !

Revient à Isabelle :

- Oui, ok Isabelle. La personne accepte mais je ne vais pas pouvoir parler longtemps.

- …

- Oui. Je suis avec (un monsieur) (une dame), ça se passe bien. On est au parcours (donné le numéro). Il nous en reste 3. Non, il n'y a pas eu de problème en particulier.

-…

- Donc, je voulais qu'on se parle pour discuter de l'article. Il faut le rendre pour … (délai de 3 à 5 jours) et j'ai un problème sur la partie théorique. Tu sais, à un moment, on parle de la théorie de Jean-Michel avec les données internes/ externes, quand on est anticipatif ou réactif. Dans la théorie, quand on est interne, on est anticipatif (réfléchit)… Euh… oui c'est bien ça. Quand on est plutôt externe par contre, on est censé être anticipatif. Mais tu sais bien que Franck a montré qu'on peut être anticipatif sur des données externes ou réactif même en faisant appel à des données internes. Du coup, cette partie est totalement incompréhensible.

- …

- Mais si même moi je trouve qu'elle est difficile à comprendre, des gens qui ne connaissent pas cette théorie ne risquent pas de comprendre !

- …

- Tu penses que ça ira si je fais ça ?

- …

- Ah ok ! Donc tu penses que je laisse tomber l'histoire d'anticipatif ou réactif et que j'explique juste la théorie avec l'axe interne/externe dans cette partie. Tu penses que ça suffira ?

- …

- Tu as raison, c'est beaucoup plus simple comme ça. Je vais faire comme ça et je t'envoie ça demain pour que tu me dises ce que tu en penses. On n'a pas beaucoup de temps devant nous.

- …

- Ok, merci !

- …

Partie 2

- Et ton week-end c'est bien passé (en début de semaine ou) qu'est-ce que tu as prévu ce week-end (en fin de semaine) ?

- …

- Tu vas dans un château ??? Mais qu'est-ce que tu vas y faire ?

- …

- Un concert ? Ca à l'air sympa ! Un concert… baroque ? Ah, non de rock, j'avais mal compris ! Faut dire qu'on s'attend plus à un concert baroque dans un château ! Mais comment ça se fait que tu y ailles ?

- …

- C'est son château ? Oui, enfin celui de ses parents, je m'en doute ! Jusqu'à ce qu'il hérite en tout cas (rire) ! Et tu le connais comment ?

- …

- Tu as des amis sympas toi ! Et il a quel âge ce jeune homme ? Il est célibataire ? Bah, ça ne coûte rien de demander, tu pourrais penser à moi !

- …

- Non mais je plaisante. Bah c'est sympa en tout cas comme week-end !

- …

- Non, (si le we n'est pas encore passé) moi je n'ai rien prévu de particulier… Il faut que je finisse l'article ! (ou) je n'ai rien fait de particulier, j'ai avancé sur l'article.

- …

Partie 3

- Et oui, pas le choix ! D'ailleurs, pour en revenir à l'article, si j'ai bien compris, Je laisse de côté l'histoire d'anticipatif/réactif et je parle juste de la théorie et les aspects internes/externes. C'est bien ça ?

- …

- Non, mais c’est super, tu as raison, c’est plus simple comme ça. En tout cas, je te remercie ! Bon, il faut que je te laisse, le participant est en train de conduire. A plus tard !

S’adresse au participant :

- Je m’excuse pour cet appel mais c’était vraiment important !

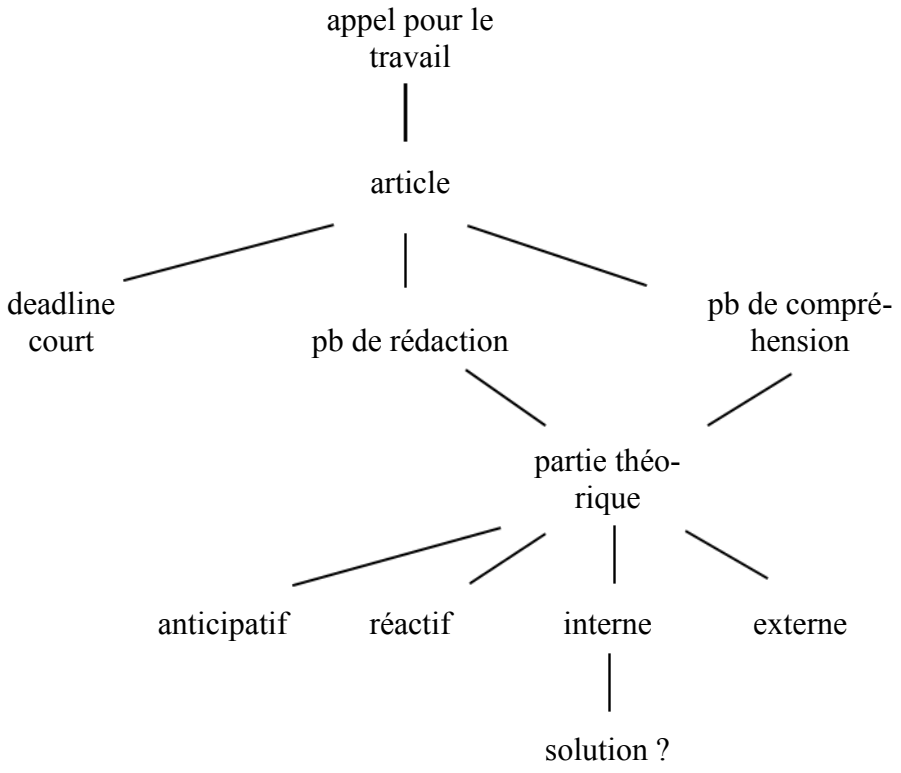
Suivant la vitesse à laquelle roule le participant, la discussion peut être ponctuée de signes d'acquiescement '« mmm », « ok », « oui je vois », etc.).

ANNEXE 3 : Grille de rappel de la discussion téléphonique.

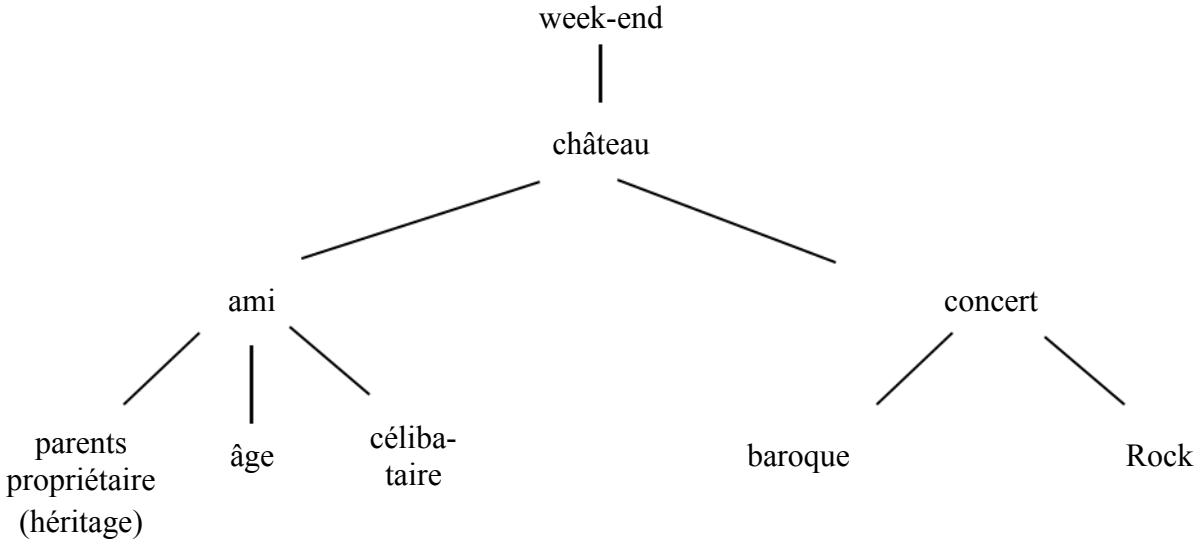
<u>Procédure de rappel :</u>
<u>Procédure de reconnaissance :</u>

NOM : **N° participant :** **Date :**

Partie 1 : l'article



Partie 2 : le concert



ANNEXE 4 : Lettre de consentement.

Institut de Recherche en communications et Cybernétique de Nantes
UMR CNRS 6597

Participation au protocole d'évaluation de la conduite automobile

Feuille de consentement pour l'exploitation des données.

Merci de participer à cette étude menée par l'IRCCyN (laboratoire CNRS UMR 6597) et le CHU de Nantes (Hôpital St Jacques). Les données recueillies lors de ce protocole d'évaluation de la conduite (passations sur simulateur de conduite, conduite sur route réelle avec l'ECF et tests neuropsychologiques), seront utilisées uniquement avec votre accord et de manière anonyme. Cette recherche a pour objet de valider l'utilisation d'un simulateur de conduite dans le cadre d'un protocole global d'évaluation de la conduite automobile. Les données recueillies seront uniquement exploitées dans ce but et ne pourront en aucun cas être utilisées afin d'émettre un avis officiel sur les aptitudes à la conduite du participant.

Je soussigné(e), …….., déclare avoir été clairement informé(e) des conditions de passation des différentes évaluations et avoir lu et compris l'intégralité du présent document. J'accepte donc que les données recueillies lors du protocole soient exploitées dans les conditions énoncées ci-dessus.

Fait le : …….

à: ……

Signature : ……..

ANNEXE 5 : Lettre d'explication de l'étude donnée aux personnes cérébrolésées récentes.

Institut de Recherche en communications et Cybernétique de Nantes
UMR CNRS 6597

Participation au protocole d'évaluation de la conduite automobile

Lettre d'information sur le protocole d'évaluation et de réentrainement à la conduite automobile

Merci de participer à cette étude menée par l'IRCCyN (laboratoire CNRS UMR 6597) et le CHU de Nantes (Hôpital St Jacques). Cette étude a pour objet de valider l'utilisation d'un simulateur de conduite dans le cadre d'un protocole global d'évaluation de la conduite automobile. Ce protocole comprend 3 étapes :

Etape 1 : Cette première étape est composée de trois évaluations :

- Passation sur simulateur de conduite (10 petits scénarios de conduite, durée totale 2,5 heures environ).
- Conduite sur route réelle dans un véhicule de l'ECF en compagnie d'un moniteur qualifié (durée 1 heure environ).
- Tests neuropsychologiques réalisés avec la Neuropsychologue de l'Hôpital St Jacques (durée 2,5 heures environ).

A l'issue de cette première étape, la neuropsychologue vous informera du résultat de l'ensemble des évaluations ainsi que du déroulement précis de l'étape suivante (cf. étape 2).

Etape 2 : Réentrainement à la conduite sur route réelle dans un véhicule de l'ECF et en compagnie d'un moniteur qualifié. Cette étape durera trois mois, à raison d'une heure par semaine (soit 12 séances).

Etape 3 : Cette dernière étape est composée de trois évaluations :

- Passation sur simulateur de conduite (10 petits scénarios de conduite, durée totale 2,5 heures environ).
- Conduite sur route réelle dans un véhicule de l'ECF en compagnie d'un moniteur qualifié (durée 1 heure environ).
- Tests neuropsychologiques réalisés avec la Neuropsychologue de l'Hôpital St Jacques (durée 2,5 heures environ).

A l'issue de cette dernière étape, la neuropsychologue vous informera du résultat de l'ensemble des évaluations.

Il est bien entendu que durant toute cette période il vous est très fortement recommandé de ne pas reconduire en dehors des périodes d'évaluation et de réentrainement sur route réelle.

Par ailleurs, à l'issue des 3 étapes de l'évaluation, ni le formateur de l'ECF, ni la neuropsychologue du CHU, ni les autres partenaires de l'étude ne pourront vous donner l'autorisation ou pas de reprendre la conduite. Leur rôle se limitera à la réalisation du bilan technique et comportemental au vu de ce que vous effectuerez pendant les différentes évaluations. Une copie de ce bilan vous sera remise afin que vous soyez clairement informé(e) des points positifs et négatifs qui auront pu être identifiés pendant les évaluations ainsi que des éventuels progrès obtenus durant la période de réentrainement.

La décision de reprise est effectuée par les médecins de la commission médicale des permis de conduire et peut être complétée par l'avis du délégué de la circonscription (inspecteur principal). Si vous souhaitez reconduire, il est donc très important que vous fassiez les démarches nécessaires auprès de la préfecture.

Par ailleurs, en cas d'avis positif, nous vous rappelons qu'il est de votre devoir d'informer l'assureur de votre véhicule de votre état. A défaut de quoi, l'assureur serait en droit d'entamer des poursuites judiciaires à votre encontre et pourrait refuser de vous verser les indemnités normalement dues en cas d'accident.

Je soussigné(e), …….., déclare avoir été clairement informé(e) des conditions de passation des différentes étapes de l'étude et avoir lu et compris l'intégralité du présent document. J'accepte donc de participer au protocole d'évaluation selon les conditions énoncées ci-dessus.

Fait le : …….

à : ……

Signature : ……..

ANNEXE 6 : Mise en œuvre et cotation des tests neuropsychologiques

(Complément du chapitre 5 - Etude des mécanismes cognitifs déficitaires à travers le simulateur de conduite, comparativement aux tests neuropsychologiques et à l'évaluation sur route : méthodologie)

1 Echelle d'évaluation des difficultés cognitive (Mc Nair - R)

Le questionnaire de plainte cognitive de Mc Nair permet d'évaluer les difficultés que la personne rencontre dans la vie quotidienne (Derouesné et al., 1993). Il est recommandé que la personne et son aidant remplissent chacun un exemplaire du questionnaire, pour comparer les résultats et déterminer si le malade est conscient de son état. Les réponses doivent se référer aux trois semaines précédant l'évaluation.

Les questions sont relatives à une plainte mnésique, comme nous pouvons le voir pour les 3 premiers items du tableau LXXVII, mais également à une plainte cognitive plus générale, comme on peut le voir pour les trois items suivants.

Tableau LXXVII : Exemple d'items de l'échelle d'évaluation des difficultés cognitive Mc Nair.

Exemple d'items du Mc Nair	Jamais	Rarement	Parfois	Souvent	Très souvent
Quand je suis interrompu(e) dans une lecture, j'ai du mal à retrouver où j'en étais					
Quand je fais des courses, j'ai besoin d'une liste écrite					
J'oublie des engagements, de me rendre à des rendez-vous, des réunions					
J'ai du mal à mettre une clef dans une serrure					
J'ai des difficultés à me concentrer sur un travail ou une occupation					
j'ai des difficultés à exprimer clairement ce que je voudrais dire					

L'échelle est composée de 26 items notés de 0 (jamais) à 4 (très souvent). Les points sont additionnés pour donner un score, de 0 à 104. Un score très élevé indique une forte plainte alors qu'un score très faible indique son absence.

2 Empan auditivo-verbal (direct et indirect)

La tâche d'empan auditivo-verbal est tirée de la WAIS III (Wechsler, 2000). Lors de la tâche d'empan, l'examinateur annonce une liste de chiffres, de 2 à 9 chiffres en empan direct, de 2 à 8 chiffres en empan indirect. Le participant doit la répéter dans l'ordre (empan direct) ou dans l'ordre inverse (empan indirect). Chaque item comporte deux essais différents. La tâche d'empan en ordre direct comprend 8 items et 7 pour la tâche en ordre indirect. L'examinateur augmente le nombre de chiffres au fur et à mesure de la réussite des items. Le test prend fin après échec aux deux essais d'un même item.

La réussite à chaque essai donne 1 point. La tâche en ordre direct peut donc apporter 16 points en cas de réussite à tous les items, et 14 points pour la tâche en ordre indirect. On additionne ensuite le score obtenu à chaque tâche (direct et indirect), ce qui nous donne un score sur 30 points. Ce score est mis en correspondance avec un score sur l'échelle de Wechsler. Un score faible pour la tâche directe indique des difficultés de stockage, alors qu'un score faible pour la tâche indirecte, en l'absence de difficulté de stockage, oriente vers des problèmes de manipulation en mémoire de travail (Richardson, 2007).

3 Empan visuo-spatial (direct et indirect)

La tâche d'empan visuo-spatial est tirée de la MEM III (Wechsler, 1997). Il s'agit d'une planche (23×28 cm) sur laquelle 10 cubes (3×3×3 cm) sont disposés aléatoirement (cf. figure 55). L'épreuve consiste à mémoriser un matériel de nature visuo-spatiale sous forme de séquences de pointage de blocs. L'examinateur est assis face au participant, les faces numérotées tournées vers lui. Il pointe au rythme d'un bloc par seconde des séquences visuo-spatiales allant de 2 à 9 blocs. Lorsque l'expérimentateur a fini de pointer les cubes, les participants doivent immédiatement reproduire les séquences visuo-spatiales soit dans le même ordre (parcours visuo-spatiaux directs) soit dans l'ordre inverse (parcours indirects). Il s'agit d'une épreuve non verbale séquentielle spécifiquement utilisée dans la mesure de la mémoire à court terme et de la mémoire de travail spatiale.

Comme pour l'épreuve auditivo-verbale, la réussite à chaque essai donne 1 point. La tâche en ordre direct peut donc apporter 16 points en cas de réussite à tous les items, et 14 points pour la tâche en ordre indirect. On additionne ensuite le score obtenu à chaque tâche (direct et indirect), ce qui nous donne un score sur 30 points. Ce score est mis en correspondance avec un score sur l'échelle de Wechsler.

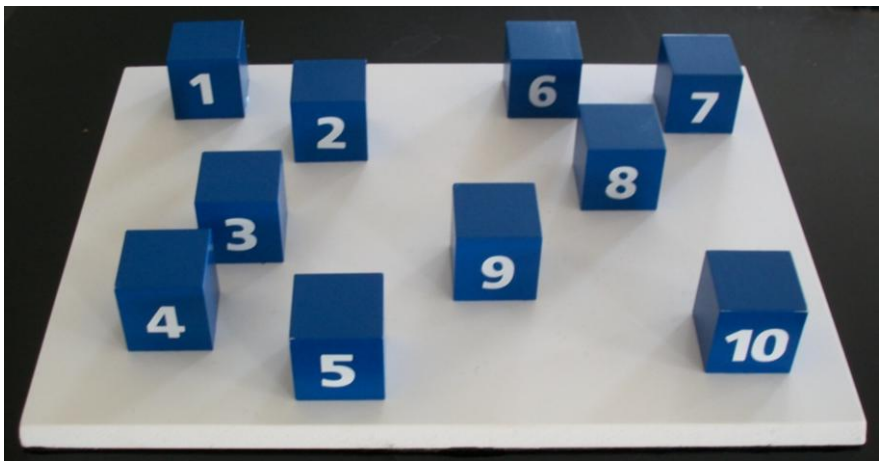


Figure 55 : Illustration de l'épreuve d'empan visuo-spatial (face expérimentateur).

4 Trail Making Test (A et B)

Le Trail Making Test (ou TMT), formes A et B (Reitan, 1992) est une épreuve papier/crayon comportant deux feuilles ; sur la première (forme A), le participant doit relier les chiffres de 1 à 25 dans l'ordre chronologique le plus rapidement possible ; sur la deuxième (forme B), le participant doit relier alternativement un chiffre et une lettre, les chiffres dans l'ordre croissant (1 à 13) et les lettres dans l'ordre alphabétique (A à L). On chronomètre le temps pour faire les épreuves et le nombre d'erreurs. Ces scores sont ensuite transformés en percentiles.

La forme A de cette épreuve permet d'évaluer la rapidité de traitement de l'information tandis que la forme B évalue les fonctions exécutives (Spreen & Strauss, 1998). La comparaison des deux temps de réalisation permet d'évaluer la flexibilité attentionnelle du sujet. Aussi ce test est fortement corrélée à la conduite (Elkin-Frankston, Lebowitz, Kapust, Hollis, et O'Connora, 2007). En fait, l'American Medical Association (AMA) a recommandé l'utilisation du TMT lors de l'évaluation des compétences de conduite (Wang, Konsinski, Schwartzberg, et Shanklin, 2003).

5 Test de Stroop

Le test de Stroop (1935) comporte quatre tâches successives. Tout d'abord, le participant dispose de 45 secondes pour lire le maximum de noms de couleurs écrits en noir et blanc. Ensuite, il doit de nouveau lire le maximum de noms de couleurs en 45 secondes, ces derniers étant écrits de différentes couleurs. La troisième épreuve consiste en une dénomination de carrés de couleurs : le participant doit nommer un maximum de couleurs en 45 secondes. Au cours de la quatrième et dernière épreuve, dite d'interférence, le participant doit reprendre la planche de l'épreuve 2 avec des noms de couleurs écrit dans une couleur qui peut être diffé-

rente de celle qu'ils dénomment, et identifier de quelle couleur est écrit chaque mot, en ignorant le mot écrit. Il doit donc sélectionner la couleur à identifier et inhiber la lecture du mot. Lorsque le mot et la couleur à identifier ne coïncident pas, les participants ont des temps de réaction plus longs que lorsqu'ils sont congruents : c'est l'effet d'interférence (l'effet Stroop). Nous avons conservé le score d'interférence calculé en soustrayant le score de la quatrième épreuve au score de la troisième épreuve. Ce score d'interférence est ensuite transformé en score T. Le score d'interférence nous indique les capacités d'attention sélective, d'inhibition cognitive et de résistance à l'interférence visuelle (Spreen & Strauss, 1998).

6 Test du plan du zoo (Zoo Map)

Le test du plan du zoo est une épreuve, simulant l'exécution d'une activité réaliste, la visite d'un zoo. Elle est empruntée à la batterie d'évaluation comportementale du syndrome dysexécutif (BADS) (Wilson, Alderman, Burgess, Emslie, & Evans, 1996 ; Wilson, Evans, Emslie, Alderman, & Burgess, 1998). Elle présente le plan d'un zoo dont le participant doit effectuer la visite dans deux conditions : une condition *formulation* où il doit organiser lui-même ses déplacements en respectant la liste des endroits à visiter et des règles précises et une condition *exécution* où il doit suivre l'itinéraire de visite indiqué. Ce test permet, entre autres, l'étude de l'anticipation et de la planification de l'action (Allain, Nicoleau, & Pinon, 2005). L'anticipation est évaluée par le temps (en secondes) que se laisse le participant avant de commencer la "visite" du zoo, la planification quant à elle s'observe par la réussite ou l'échec de l'exercice. Les scores bruts sont directement transformés en écart-types.

7 D2

Le test D2 de Brickenkamp (1966) est une épreuve de barrages constituée d'une feuille de 14 lignes dans laquelle le participant doit cocher le plus rapidement possible durant 20 secondes, pour chaque ligne, la lettre « d » associée à deux apostrophes (« d'' ») tout en ignorant les distracteurs (« d » avec 1 ou 3 apostrophes et « p ») (cf. figure 56). Le profil obtenu permet d'évaluer la fatigabilité, la vitesse et l'efficacité du traitement de l'information, l'attention sélective et l'attention soutenue

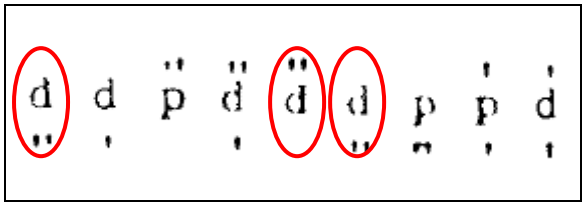


Figure 56 : Début d'une ligne de l'épreuve du D2 (en entouré, les lettres cibles à barrer) .

Nous en conserverons le score global de performance GZ (GZ = nombre d'items traités - erreurs) et le score de concentration KL (KL = performance - omissions). Ces scores seront transformés en percentiles.

8 Double tâche de Baddeley

L'épreuve de double tâche de Baddeley combine une tâche d'empan de chiffres en ordre direct et une tâche motrice (placer des croix selon un trajet imposé). Tout d'abord, chaque tâche est réalisée séparément. Les conditions des tâches simples sont : (a) répétition de séries de chiffres à la longueur de l'empan (évalué lors du test d'empan auditivo-verbal), pendant 2 minutes, et (b) barrage de cases pendant 2 minutes. Ensuite, les deux tâches sont réalisées simultanément pendant 2 minutes, d'où la situation de double tâche. La comparaison entre les conditions simples et doubles permet de déterminer si le patient est mis en difficulté ou non et nous renseigne sur ses capacités à partager son attention entre deux tâches (Baddeley, Della Sala, Papagno, et Spinnler, 1997 ; Baddeley, Logie, Bressi, Della Sala, et Spinnler, 1986). Les score sont transformés en percentiles.

9 Brixton

Le test de Brixton est une tâche visuo-spatiale séquentielle avec des changements de règles. On présente au participant une planche comportant 10 pastilles dont une noire (cf. figure 57, planche 1). Il doit trouver quelle pastille sera noircie à la planche suivante. On lui révèle ensuite la planche suivante et ainsi de suite (cf. figure 57, planche 2). La règle change au cours de la passation. Ce test mesure la capacité à détecter des règles dans des séquences de stimuli (Burgess et Shallice, 1996) ainsi que la capacité à s'adapter au changement de règle, c'est-à-dire la flexibilité. Cette tâche a été créée de façon à minimiser l'activation de schémas pré-existants. La réponse n'est pas indicée par la planche en cours, mais par l'acquisition d'une règle au fur et à mesure de la succession des planches.

Le test de Brixton est visuellement simple et ne nécessite pas une réponse verbale. Il est donc approprié pour les personnes qui souffrent d'un large éventail de déficits.

On note le nombre total d'erreurs et le nombre d'abandons prématurés de la règle. Une erreur est comptabilisée chaque fois que la réponse fournie par le participant ne correspond pas à la localisation du cercle noir sur la planche suivante. Lorsque la règle change, les réponses « erronées » mais qui correspondent à la règle qui était en cours précédemment sont considérées comme des réponses correctes ; par contre, si la réponse du participant ne correspond pas à la

règle qui était en cours, elle est cotée comme une erreur. Lors du second essai avec la nouvelle règle, si le participant donne une deuxième réponse erronée qui correspond à la règle précédente, on considère cela comme une persévération. Enfin, si le participant change de règle sans raison après deux bonnes réponses, on considère qu'il s'agit d'un abandon prématuré de la règle et donc une erreur. Le nombre total d'erreurs est transformé en percentiles.

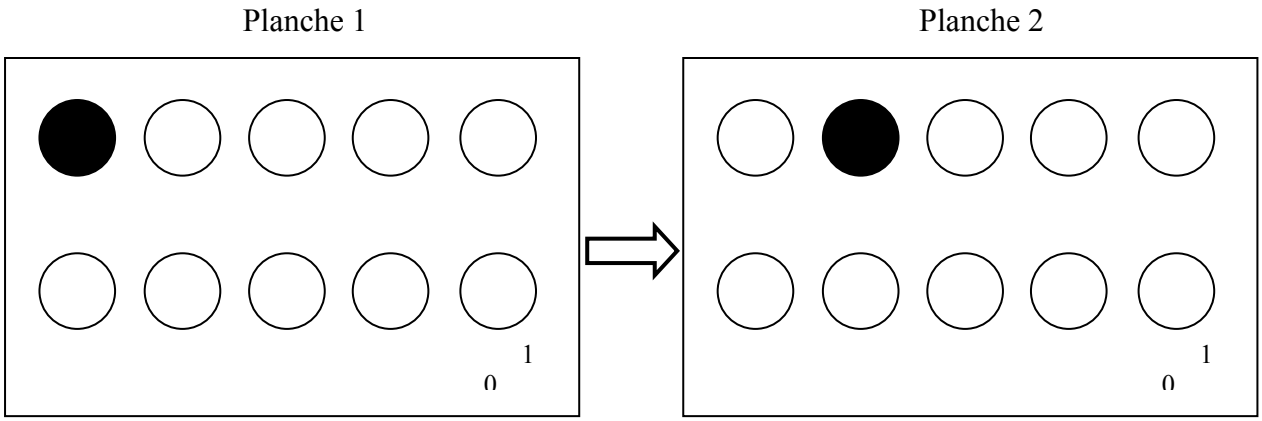


Figure 57 : Exemple de deux planches du Brixton. La règle ici est d'ajouter 1 à la pastille noire précédente pour trouver la nouvelle pastille noire.

10 Organisation et gestion des priorités (OGP)

Le test de l'OGP évalue l'organisation et la gestion des priorités à travers un ensemble d'exercices. L'épreuve se déroule dans un temps limité, les participants doivent résoudre le plus de problèmes possibles, en sachant que certains exercices sont obligatoires, qu'ils présentent une difficulté variable et qu'ils ne rapportent pas le même nombre de points. Ils doivent donc sélectionner les exercices à effectuer et organiser leur résolution en fonction des contraintes. Ce test a été créé et validé par Moraccino (2010), dans le cadre de son stage pour l'obtention du titre de psychologue à l'Université de Nantes. L'organisation et la gestion des priorités étant sensibles à l'âge, l'étalonnage du test a pris en compte des groupes contrôles d'âges différents : 15-30 ans, 30-45 ans et 45-60 ans. Chaque groupe comprenait 10 personnes. Les scores sont indiqués directement en nombre d'écart-types en comparaison au groupe d'âge de référence du participant.

11 Tests d'Evaluation de l'Attention (TAP)

La batterie du TAP a été conçue comme un outil diagnostic permettant d'évaluer les troubles attentionnels en rapport avec des lésions cérébrales (Zimmermann & Fimm, 2002 ; Zimmermann & Fimm, 2007 ; Zimmermann, North, et Fimm, 1993). Le principe qui a sous-tendu son élaboration est celui de la mesure des temps de réaction lors de tâches simples per-

mettant l'évaluation de déficits très spécifiques. Les tâches proposées consistent en des réactions motrices élémentaires, en réponse à des stimuli facilement reconnaissables. A peu d'exceptions près, les stimuli présentés ne font que peu appel aux capacités verbales. De cette manière on a pu limiter tout un ensemble de facteurs pouvant avoir un effet inhibiteur sur les tests. Il a également été tenu compte, autant que possible, de facteurs pouvant perturber les tests tels qu'une hémiparésie, une ataxie, des troubles visuels, une aphasie. Cette batterie a été informatisée.

La batterie a été normalisée pour 13 subtests à partir des résultats de participants sains recueillis dans les différents pays européens ayant participé à cette étude. Pour ces 13 subtests, les résultats sont automatiquement comparés au groupe de référence de même âge et de même niveau socio-culturel.

Dans notre étude, nous n'avons utilisé que 5 des sous-tests proposés : la négligence spatiale unilatérale, l'alerte phasique, le Go/NoGo, l'attention partagée, et le balayage visuel.

- Négligence spatiale unilatérale

Le but de cet examen est de repérer, par une exploration visuelle globale, les altérations éventuelles du champ visuel. L'intégrité de la vision centrale est l'une des conditions indispensables à la passation de la plupart des épreuves de la batterie. Ce test doit permettre la différenciation entre une négligence sans atteinte du champ visuel et un trouble du champ visuel proprement dit. Selon Karnath et Hartje (1987), un malade hémianopsique ne réagira à aucun des stimuli présentés dans l'hémichamp controlatéral alors qu'une négligence spatiale unilatérale ne se manifestera qu'en cas de stimulation simultanée et bilatérale à l'origine du phénomène d'extinction (Heilman, 1979).

L'examen du champ visuel se faisait en deux parties. Tout d'abord, le participant réalisait une tâche principale en vision centrale : Un dessin apparaissait et changeait. Lorsque le dessin devenait un 10, le participant devait appuyer le plus rapidement possible sur la touche réponse. Ensuite débutait la tâche secondaire en vision périphérique : des stimuli cibles (des nombres) apparaissaient en périphérie à des endroits différents au terme d'intervalles (de temps ?) aléatoires. La tâche centrale simultanée assurait que le participant fixait bien le milieu de l'écran tout au long du test. Le participant devait appuyer sur la touche réponse le plus rapidement possible dès qu'il avait détecté une cible en périphérie. On comptabilisait le nombre d'omissions à gauche et à droite.

- Alerte phasique

L'alerte phasique correspond à la capacité du participant à augmenter et maintenir son niveau attentionnel lorsqu'il attend la survenue de stimulus de haute priorité (Sharpless & Jaspers, 1956; Posner & Rafal, 1987). Elle peut être mesurée par la vitesse de réaction à un stimulus cible annoncé par un signal avertisseur. Dans ce test, il existait deux conditions : (1) une croix apparaissait au centre de l'écran et le participant devait répondre le plus vite possible en appuyant sur une touche et (2) tout se déroulait comme dans la condition (1) mais le stimulus était précédé d'un indice sonore. Le moment où la croix apparaissait et le délai entre l'indice et l'apparition du stimulus variaient de manière aléatoire. Pour compenser les effets de fatigue, le test était construit selon un plan ABBA (A : sans indice sonore ; B : avec indice sonore) et comprenait donc quatre blocs. L'effet de l'indiçage est transformé en score T.

- Go/NoGo

Dans l'épreuve Go/NoGo le participant doit réagir sélectivement à un type donné de stimuli (cible) et non aux autres (distracteurs). Des tâches de ce type ont été conçues en vue d'examiner la capacité du participant à inhiber les réactions inappropriées. Dans ce test, des croix ("+" ou "×") apparaissaient sur l'écran, successivement et dans un ordre aléatoire. Le participant devait appuyer sur la touche le plus rapidement possible lorsqu'il voyait une croix "×", et seulement dans ce cas. Nous avons utilisé la version "2 cibles parmi 5". On enregistre le nombre de fausses alarmes et d'omissions. Ces résultats sont ensuite transformés en scores T.

- Attention partagée

L'attention divisée peut être testée à l'aide de doubles tâches au cours desquelles le participant doit intégrer simultanément deux types de stimulations. Les tâches doivent être construites de manière à éviter toute interférence structurelle entre les différents canaux d'information (Kahneman, 1973). Dans cette épreuve, ceci est assuré par une tâche visuelle et une tâche auditive. Dans une première partie, un nombre variable de croix apparaissaient sur l'écran simultanément. Lorsque ces croix formaient un carré (cf. figure 58), le participant devait appuyer sur une touche le plus rapidement possible. Dans la seconde partie, en situation de double tâche, pendant qu'il devait traiter la tâche visuelle, le participant entendait des sons aigus ou graves. Lorsqu'il entendait deux sons de même hauteur d'affilée, il devait répondre le plus rapidement possible en appuyant sur une touche. Il devait donc traiter à la fois les croix

(traitement visuel) et les sons (traitement auditif) et répondre par le biais d'une réponse motrice dans les deux cas.

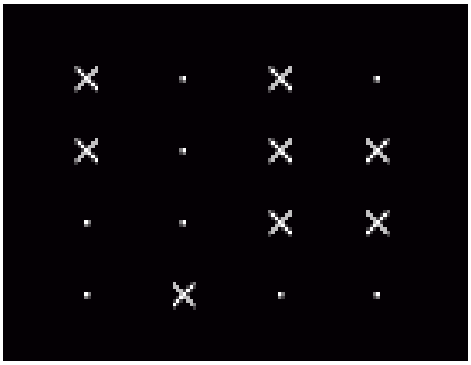


Figure 58 : Exemple de présentation des croix lors de la tâche visuelle du test d'attention partagée du TAP.On peut voir un carré formé par quatre croix à droite.

On enregistrait le nombre de fausses alarmes et d'omissions. Ces résultats sont ensuite transformés en scores T.

- Balayage visuel

Ce test est conçu pour examiner le balayage visuel ("visual scanning": Teuber, 1964 ; Luria, 1966 ; Lhermitte, Derouesné & Signoret, 1972). Cette tâche sollicite le repérage d'un stimulus critique parmi un ensemble de signes disposés dans une matrice de cinq lignes et cinq colonnes (cf. figure 59). Une touche correspondait à "présent" et l'autre touche correspondait à "absent". Le participant devait répondre le plus vite possible.

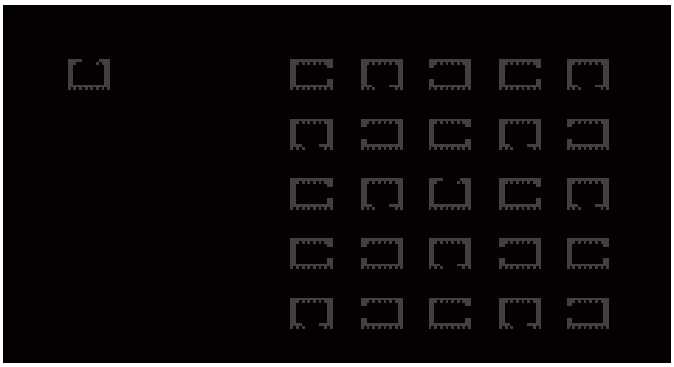


Figure 59 : Exemple de présentation des signes lors du test de balayage visuel du TAP. A gauche, le stimulus critique (cible) et à droite la matrice.

On enregistre le nombre de fausses alarmes et d'omissions. Ces résultats sont ensuite transformés en scores T.

12 Test de l'UFOV (Useful field of vision test)

Le champ de vision utile (Useful field of vision ou UFOV) est la zone dans laquelle une personne peut extraire des informations sans bouger la tête ou les yeux (Ball, Wadley, et Edwards, 2002 ; Mackworth, 1976). Avoir un UFOV dans la norme permet à un conducteur de garder ses yeux sur la route et de remarquer encore les dangers qui peuvent survenir sur le côté, comme un enfant qui court dans la rue après un ballon. Des études ont montré que l'UFOV joue un rôle clé dans la capacité d'une personne à conduire, marcher, et effectuer d'autres tâches en toute sécurité. Les personnes qui éprouvent des réductions de l'UFOV sont plus susceptibles de tomber ou d'être impliqués dans des accidents de la circulation (Clay, Wadley, Edwards, Roth, Roenker, & Ball, 2005).

On considère que la taille de l'UFOV diminue avec l'âge (Sekuler & Ball, 1986 ; Sekuler, Bennett, et Mamelak, 2000 ; Rogé & Pébayle, 2009), probablement en raison de la diminution de la vitesse de traitement des informations visuelles, des ressources attentionnelles réduites, et d'une baisse de la capacité d'inhibition (Ball et al., 2002).

Le test de l'UFOV que nous avons utilisé est un test visuel sur ordinateur contenant trois sous-tests.

- Sous-test 1 : vitesse de traitement dans le champ visuel central. On présentait un objet au centre de l'écran : soit une voiture, soit un pickup. Le participant devait indiquer en appuyant sur un bouton de quel objet il s'agissait (pas de contrainte temporelle). On faisait varier la durée de présentation du stimulus. Cela permettait de déterminer le seuil de détection d'une personne pour des stimuli discriminants présentés dans la vision centrale.
- Sous-test 2 : attention divisée entre vision centrale et périphérique. Ce sous-test était similaire au sous-test 1, mais on ajoutait une tâche de localisation de cibles périphériques concomitantes.
- Sous-test 3 : attention sélective dans le champ visuel périphérique. Ce sous-test était similaire au sous-test 2, mais on ajoutait d'autres éléments en périphérie, des distracteurs.

Le logiciel indiquait pour chaque sous-test un temps en millisecondes qui correspondait au seuil de détection. Il formulait également une recommandation : "very low risk", "moderate risk", "high risk" ou " central vision loss or slowed processing speed".

On comprend à la manière dont sont construits les sous-tests qu'un échec au premier sous-test implique nécessairement un échec aux sous-tests suivants.

ANNEXE 7 : Grille de cotation de l'auto-école ECF

FICHE D'EVALUATION CONDUITE

Date du bilan : ..... Lieu : _____

Centre : _____ Formateur : _____

RENSEIGNEMENTS GENERAUX

NOM : ..... **Prénom** ..... Né(e) le : .....

Adresse : _____

_____

_____ Tel : _____

Date d'obtention du permis : _____

Arrêt de la conduite depuis le : _____

Véhicule utilisé pour la mise en situation : _____

Aménagements :

_____

_____

_____

_____

OBSERVATION :

_____

_____

_____

_____

_____

_____

0 IMPOSSIBLE :aucune autonomie.
1 TRES DIFFICILE : Intervention du formateur lors d'une ou plusieurs situations présentant un danger ou une mise en danger (verbale ou en agissant sur les commandes).
2 QUELQUES DIFFICULTES : précisions verbales données par le formateur sur la même erreur (≥ 3) ne présentant pas de danger pour le conducteur et son environnement.
3 BON : Bonne Aptitude à la conduite

CONDITIONS DE L'EVALUATION

	OUI	NON
Jour	❒	❒
Nuit	❒	❒
Conditions atmosphériques		
Soleil	❒	❒
Pluie	❒	❒
Luminosité	❒	❒

CNRS EVALUATION PRATIQUE

1- Activités sensori-motrices

		0	1	2	3	Commentaires
11	Installation	OUI ❒		NON ❒		
12	Manipulation technique	❒	❒	❒	❒	
	Dosage accélérateur	❒	❒	❒	❒	
	Dosage frein	❒	❒	❒	❒	
	Manipulation du volant	❒	❒	❒	❒	
	Manipulation de la boite de vitesses	❒	❒	❒	❒	
13	Utilisation des accessoires (clignotants, différents moyens avertir, essuie glace …)	❒	❒	❒	❒	
14	Multi tâches (gêrer plusieurs actions)	❒	❒	❒	❒	
	SOUS TOTAL RUBRIQUE 1	❒	❒	❒	❒	

2- Utilisation/position sur la chaussée

21	Placement sur la voie de circulation (chaussée à plusieurs voies, rond point …)	❒	❒	❒	❒	
22	Maintien de la trajectoire	❒	❒	❒	❒	
	SOUS TOTAL RUBRIQUE 2	❒	❒	❒	❒	

		0	1	2	3	

3- Troubles cognitifs et conduite sociale

31	Allure (excès de vitesse et/ou vitesse excessive) En agglomération (dos d'âne, chicanes, mauvaise adaptation par rapport aux situations - préciser si trop ou pas assez)	❒	❒	❒	❒	
32	Hors agglomération (le candidat ne change pas d'allure, risque de gêner, ou celle-ci est mal adaptée : préciser si trop ou pas assez.)	❒	❒	❒	❒	
33	Anticipation (feux, passage piéton, bus ...)	❒	❒	❒	❒	
34	Appréciation des distances/vitesses (lors de prise de décision pour une insertion dans la circulation : stop cédez le passage, rond point, voie d'insertion.)	❒	❒	❒	❒	
35	Distances de sécurité longitudinale ou latérale (dépassement, croisement.)	❒	❒	❒	❒	
36	Actions tardives (temps de réaction)	❒	❒	❒	❒	
37	Respect des autres usagers - citoyenneté	❒	❒	❒	❒	
38	Respect de la signalisation (autre que la vitesse : panneaux, marquage au sol, feux)	❒	❒	❒	❒	
39	Charge attentionnelle (comportement en tenant une discussion)	❒	❒	❒	❒	
	SOUS TOTAL RUBRIQUE 3	❒	❒	❒	❒	

		0	1	2	3	Commentaires
4- Activités visuelles/contrôles						
41	Mobilité du regard (balayage du regard : carrefours, rues - conduite défensive : prévoir, anticiper)	❒	❒	❒	❒	
42	Espaces latéraux (notion de gabarit, manœuvres, rues étroites)	❒	❒	❒	❒	
43	Contrôles périphériques (rétroviseurs)					
	Gauche	❒	❒	❒	❒	
	Droit	❒	❒	❒	❒	
	Intérieur	❒	❒	❒	❒	
44	Regard (lors d'une conduite commentée)					
	Lointain	❒	❒	❒	❒	
	Mobile	❒	❒	❒	❒	
	Fixe	❒				
	Proche	❒				
45	Angle mort (en sortie de rond point, changement de file, voir d'insertion, dépassement)	❒	❒	❒	❒	
46	Compensation (si connaisance de la pathologie) (possede t'il une maîtrise de son handicap)	❒	❒	❒	❒	
	SOUS TOTAL RUBRIQUE 4	❒	❒	❒	❒	
5- Activités visuelles/Analyses						
51	Observation de l'environnement : détecter/percevoir (recherche d'indice)	❒	❒	❒	❒	
52	Acquisition de l'information (analyse, décision, action)	❒	❒	❒	❒	
53	Notions directionnelles (droite, gauche)	❒	❒	❒	❒	
54	Suivre un itinéraire (lecture panneaux directionnels)	❒	❒	❒	❒	
	SOUS TOTAL RUBRIQUE 5	❒	❒	❒	❒	
	TOTAL GENERAL	❒	❒	❒	❒	

BILAN GENERAL DE CONDUITE

ITINERAIRE UTILISE

PRECONISATION

PARTIE RESERVEE AU MEDECIN

OBSERVATION

RAPPEL :

Le formateur ne peut pas donner l'autorisation ou pas de reprise de conduite.
Il fait le bilan technique et comportemental au vu de ce que le patient effectue pendant l'évaluation ou la mise en situation de conduite.
La décision de reprise est effectuée par les médecins de la commission médicale des permis de conduire et peut être complétée par l'avis du délégué de la circonscription (inspecteur principal).
En cas d'aménagement du véhicule, une régularisation du permis de conduire est obligatoire.
cf :
liste des incapacités physiques incompatibles avec l'obtention ou la maintien du permis de conduire et aspects médico-légaux et administratifs).

ANNEXE 8 : Détail des plans expérimentaux

1 Plan expérimental général

Le plan expérimental général est un plan multifactoriel mixte puisqu'il comprend 4 groupes emboîtés (Co, PA, CR et CA) qui réalisent chacun toutes les conditions expérimentales. Ainsi, l'écriture du plan utilisé est le suivant :

P<G4>*T3

Avec :

- P : participants.
- G : groupe, 4 modalités (Co, PA, CR, et CA), intergroupe.
- T : test, 3 modalités (conduite sur simulateur, tests neuropsychologiques et conduite sur route), intragroupe.

En d'autres termes, les participants, appartenant chacun à un groupe et un seul, effectuent toutes les évaluations.

En réalité, le groupe PA n'est composé que d'un participant. Nous ne pourrons donc pas analyser ses résultats en tant que groupe, mais seulement individuellement. Nous ne mentionneront donc pas PA dans les groupes, même si ses résultats seront analysés. Le facteur Groupe ne contient réellement que 3 modalités. Le plan expérimental général réel est donc :

P<G3>*T3

Avec G : groupe, 3 modalités (Co, CR, et CA), intergroupe.

2 Plans expérimentaux de l'évaluation sur simulateur

Le plan expérimental de l'évaluation sur simulateur consiste en plusieurs plans multifactoriels mixtes puisqu'ils comprennent 3 groupes emboîtés (Co, CR et CA) qui réalisent chacun toutes les conditions expérimentales. Pour les variables d'intérêts suivantes, voici chaque plan expérimental associé.

1/ Analyse des panneaux publicitaires : P<G3>*E2*D2

Avec :

E : excentricité de l'objet, 2 modalités (peu excentré, très excentré), intragroupe

D : distracteur auditif, 2 modalités (base, charge auditive,), intragroupe

2/ Pour l'étude des événements critiques, on analyse chaque parcours séparément.

- événements critique en ville : P<G3>
- événements critique en campagne de jour : P<G3>
- événements critique en campagne de nuit : P<G3>

3/ Toutefois, on s'attend a des différences :

- entre le parcours en campagne et le parcours en ville (P<G3>*T2 ; avec T : type de parcours, 2 modalités (campagne, ville), intragroupe)
- entre le parcours en campagne et le parcours de nuit (P<G3>*T2 avec T : type de parcours, 2 modalités (campagne, nuit), intragroupe)

4/ Pour les scénarios expérimentaux, il y a deux plans distincts.

- étude des consignes : P<G3>*C3 (consigne vitesse vs. consigne sécurité vs. scénario de base).
- étude de la charge auditive : P<G3>*D2 (charge auditive vs. scénario de base)

Avec

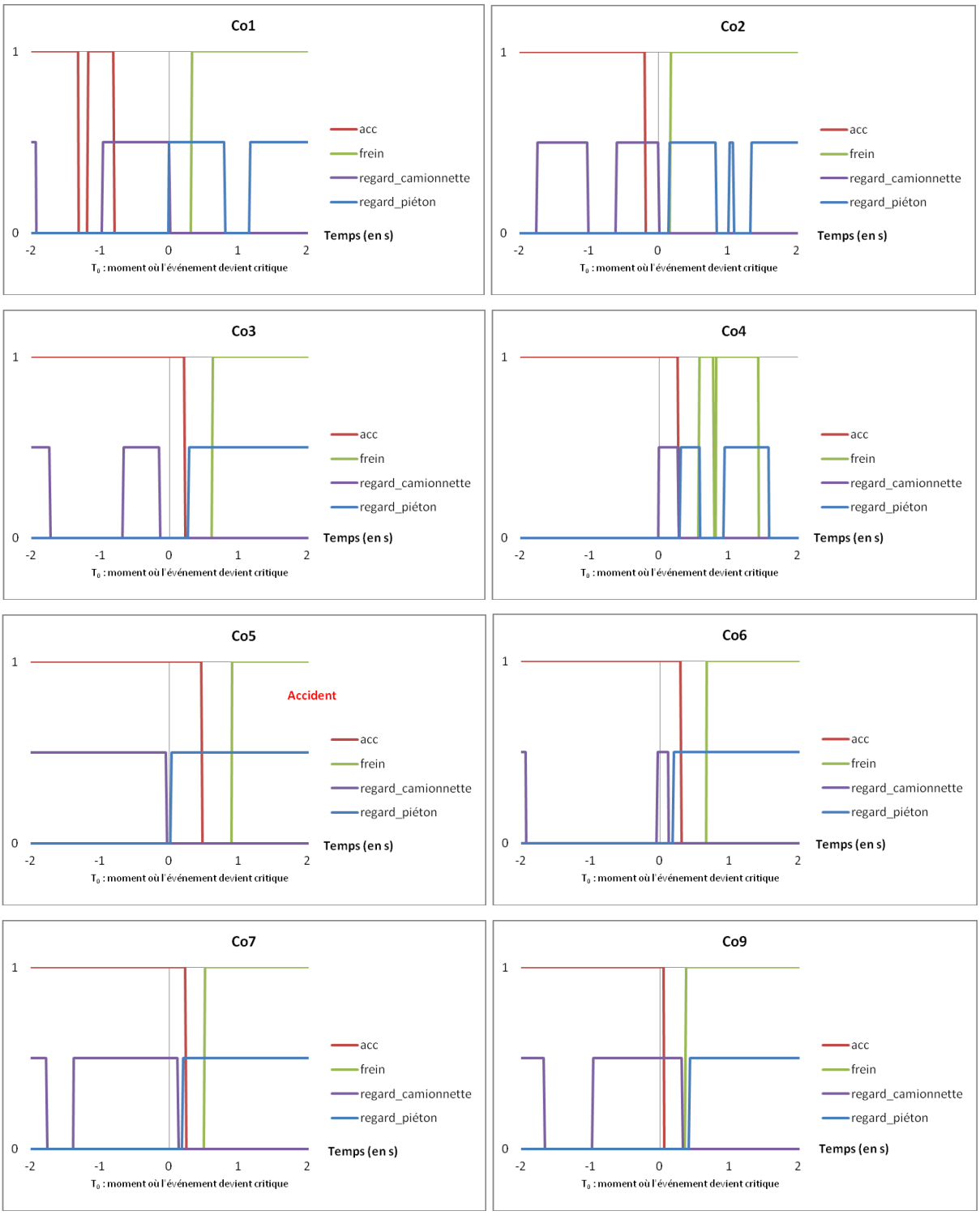
D : distracteur auditif, 2 modalités (avec charge auditive, sans), intragroupe

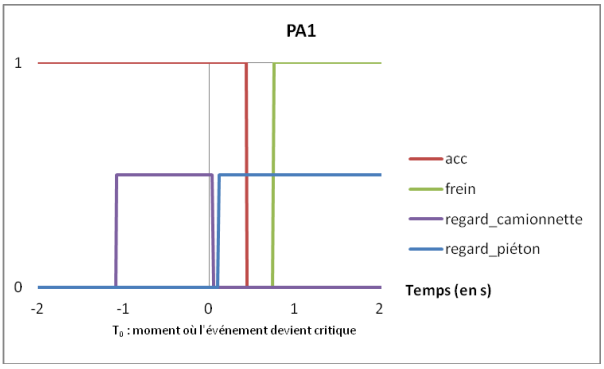
C : consigne, 3 modalités (pas de consigne, vitesse, sécurité), intragroupe

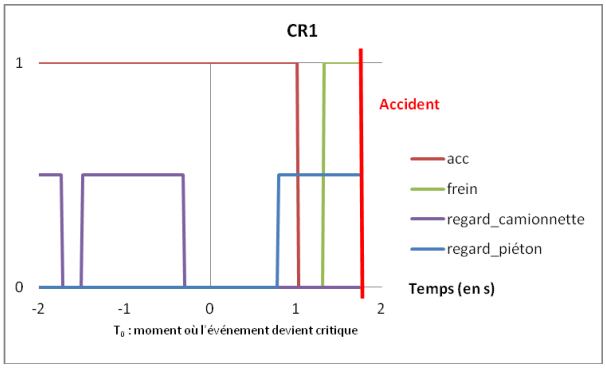
4/ Pour l'étude de la rapidité de traitement : P<G3> (scénario stop)

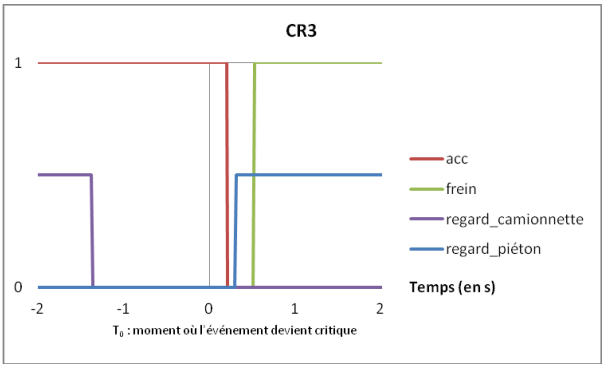
L'ordre des parcours est fixé et est toujours le même pour les initiations, les parcours avec événements critiques et le parcours stop. Un carré latin nous indique l'ordre dans lequel les participants devaient effectuer les parcours expérimentaux A à D, comme présenté dans le chapitre 4 (section 3.1, tableau XI). L'ordre des scénarios est fixé et est le même pour tous. Nous ne nous intéresserons pas à l'effet d'interaction entre le parcours et le scénario.

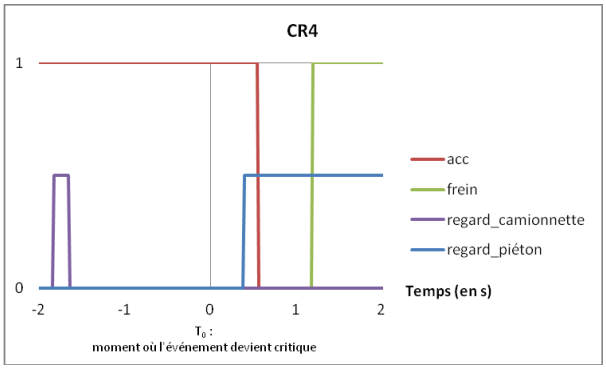
Annexe 9 : Regards sur la camionnette et le piéton et actions sur les pédales d'accélérateur et de frein en fonction du temps chez tous les participants (exceptés Co8 et CR2) pour l'événement 3 en ville.

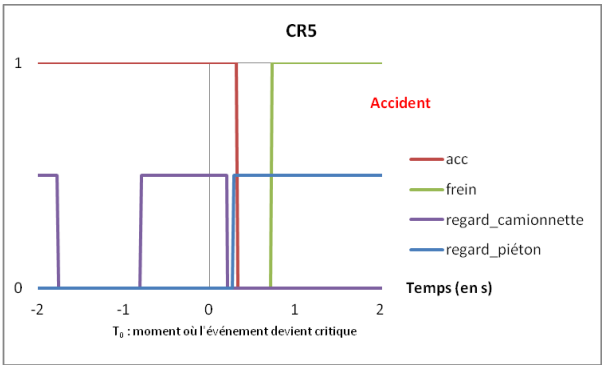


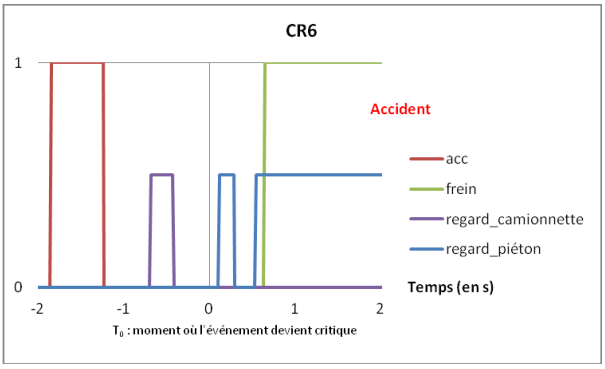

PA1
1
0
-2
-1
0
1
2
T_0 : moment où l'événement devient critique
acc
frein
regard_camionnette
regard_piéton
Temps (en s)

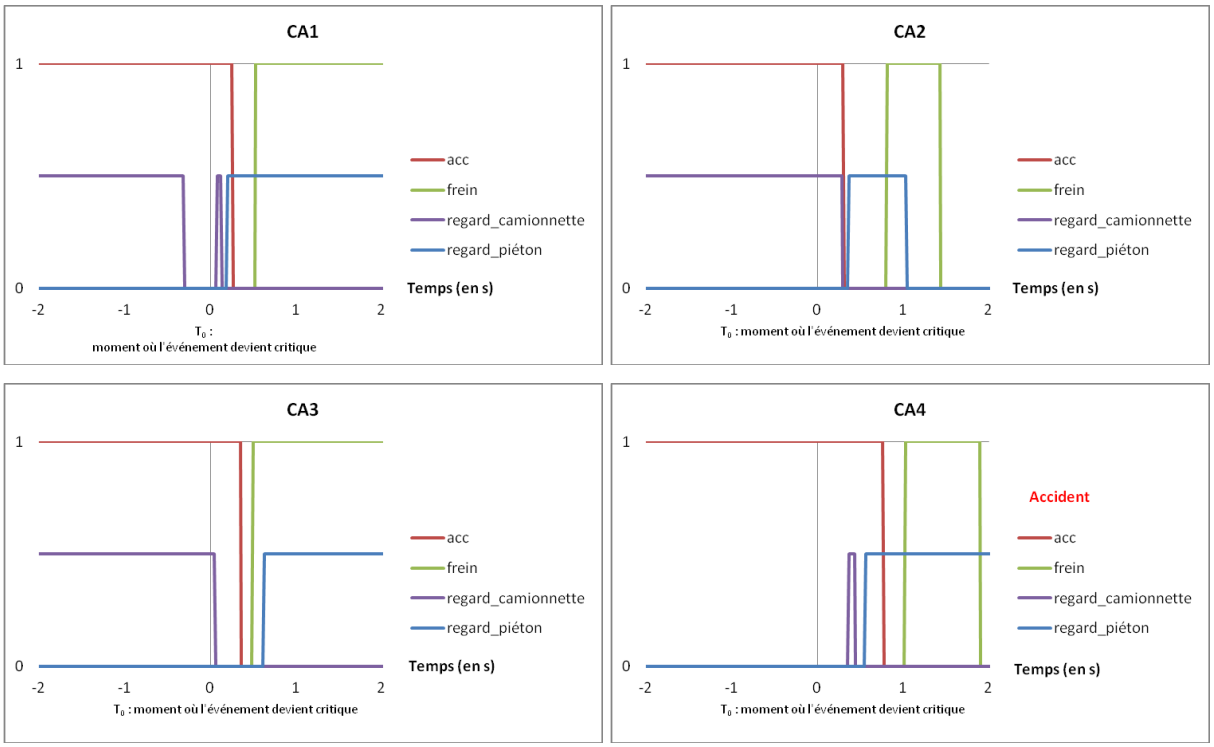

CR1
1
0
Accident
-2
-1
0
1
2
T_0 : moment où l'événement devient critique
acc
frein
regard_camionnette
regard_piéton
Temps (en s)


CR3
1
0
-2
-1
0
1
2
T_0 : moment où l'événement devient critique
acc
frein
regard_camionnette
regard_piéton
Temps (en s)

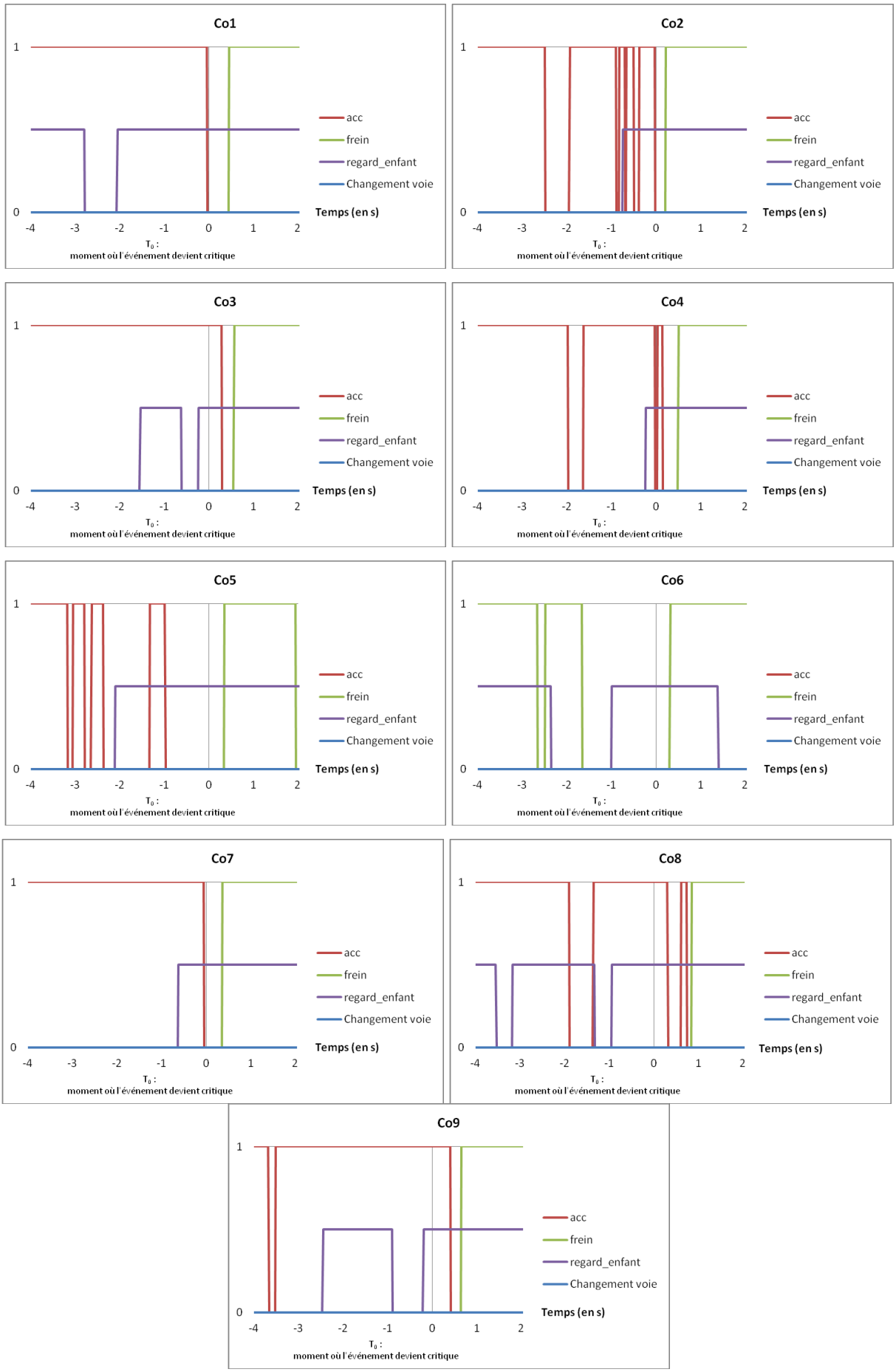

CR4
1
0
-2
-1
0
1
2
T_0 :
moment où l'événement devient critique
acc
frein
regard_camionnette
regard_piéton
Temps (en s)

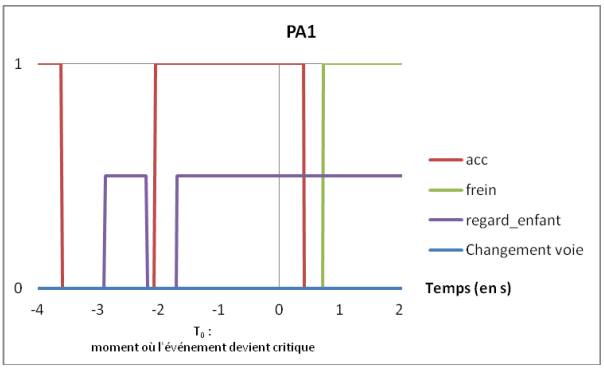

CR5
1
0
Accident
-2
-1
0
1
2
T_0 : moment où l'événement devient critique
acc
frein
regard_camionnette
regard_piéton
Temps (en s)

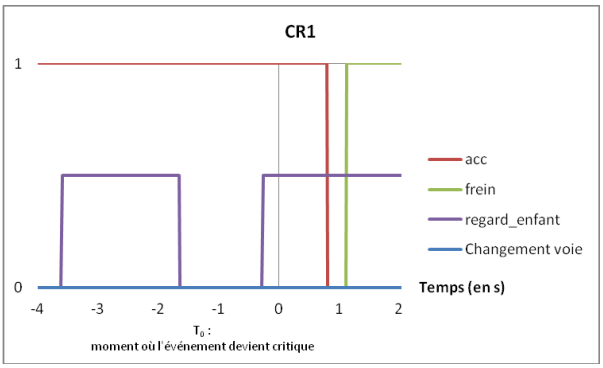

CR6
1
0
Accident
-2
-1
0
1
2
T_0 : moment où l'événement devient critique
acc
frein
regard_camionnette
regard_piéton
Temps (en s)

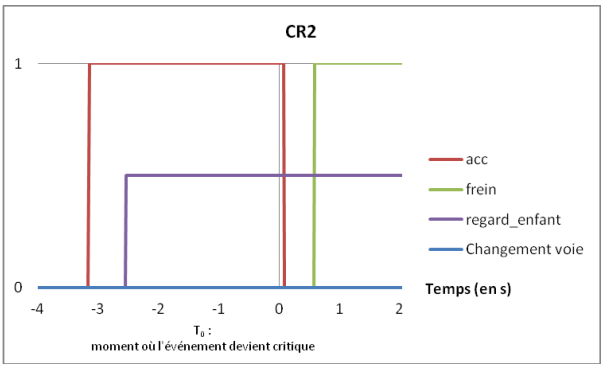

CA1
1
0
-2
-1
0
1
2
T_0 :
moment où l'événement devient critique
acc
frein
regard_camionnette
regard_piéton
Temps (en s)
CA2
1
0
-2
-1
0
1
2
T_0 : moment où l'événement devient critique
acc
frein
regard_camionnette
regard_piéton
Temps (en s)
CA3
1
0
-2
-1
0
1
2
T_0 : moment où l'événement devient critique
acc
frein
regard_camionnette
regard_piéton
Temps (en s)
CA4
1
0
-2
-1
0
1
2
T_0 : moment où l'événement devient critique
Accident
acc
frein
regard_camionnette
regard_piéton
Temps (en s)

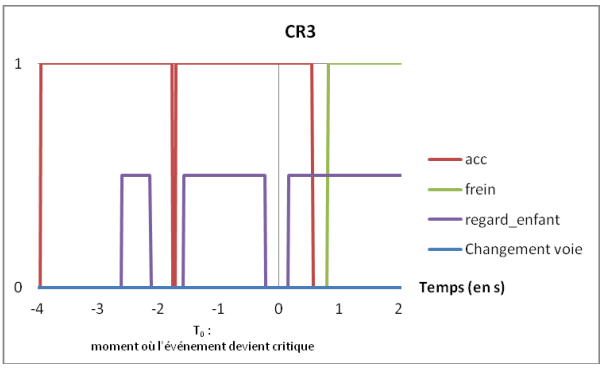
Annexe 10 : Regards sur l'enfant et actions sur les pédales d'accélérateur et de frein en fonction du temps chez tous les participants pour l'événement 4 en ville.

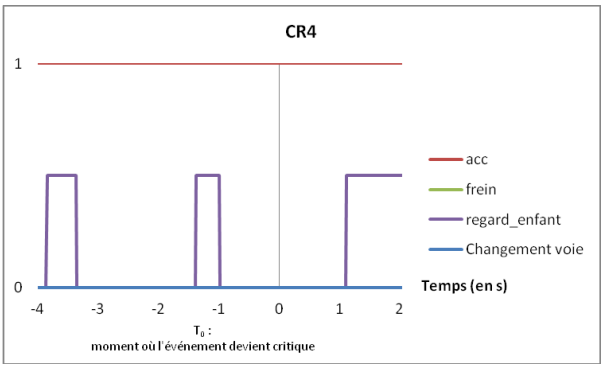


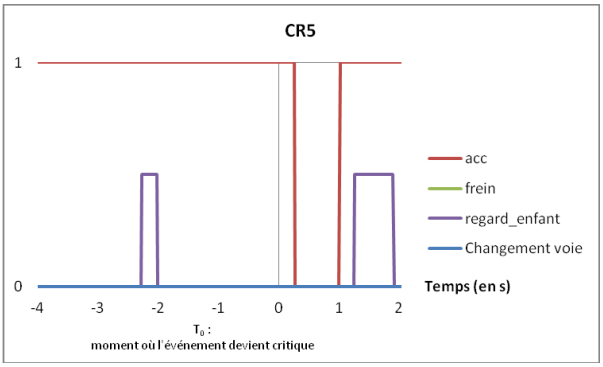

PA1
1
0
-4
-3
-2
-1
0
1
2
acc
frein
regard_enfant
Changement voie
Temps (en s)
T0 :
moment où l'événement devient critique

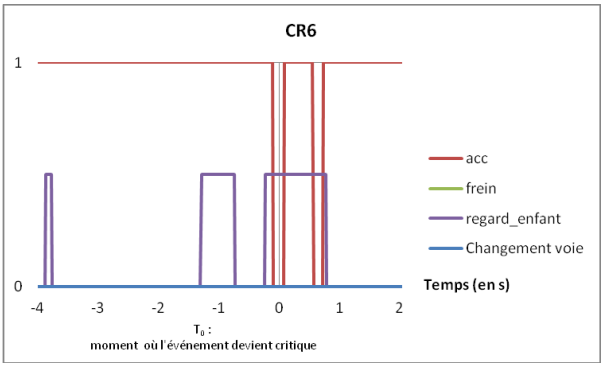

CR1
1
0
-4
-3
-2
-1
0
1
2
acc
frein
regard_enfant
Changement voie
Temps (en s)
T0 :
moment où l'événement devient critique

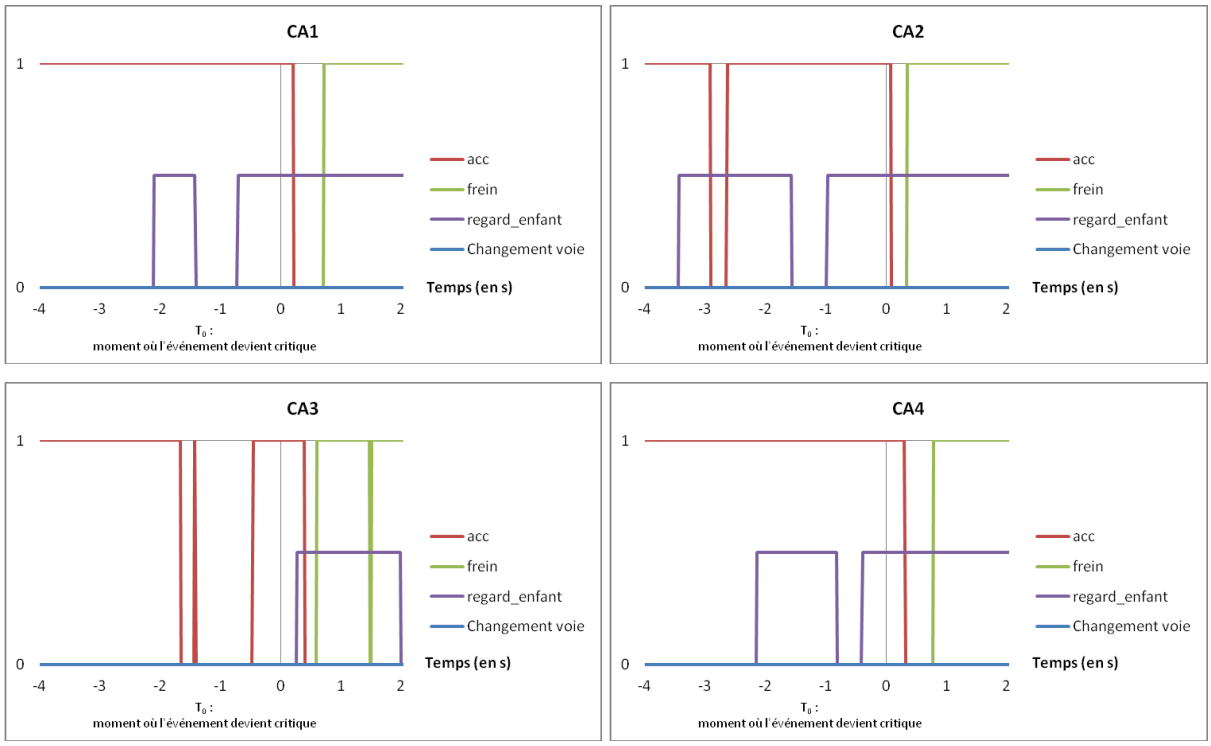

CR2
1
0
-4
-3
-2
-1
0
1
2
acc
frein
regard_enfant
Changement voie
Temps (en s)
T0 :
moment où l'événement devient critique


CR3
1
0
-4
-3
-2
-1
0
1
2
acc
frein
regard_enfant
Changement voie
Temps (en s)
T0 :
moment où l'événement devient critique

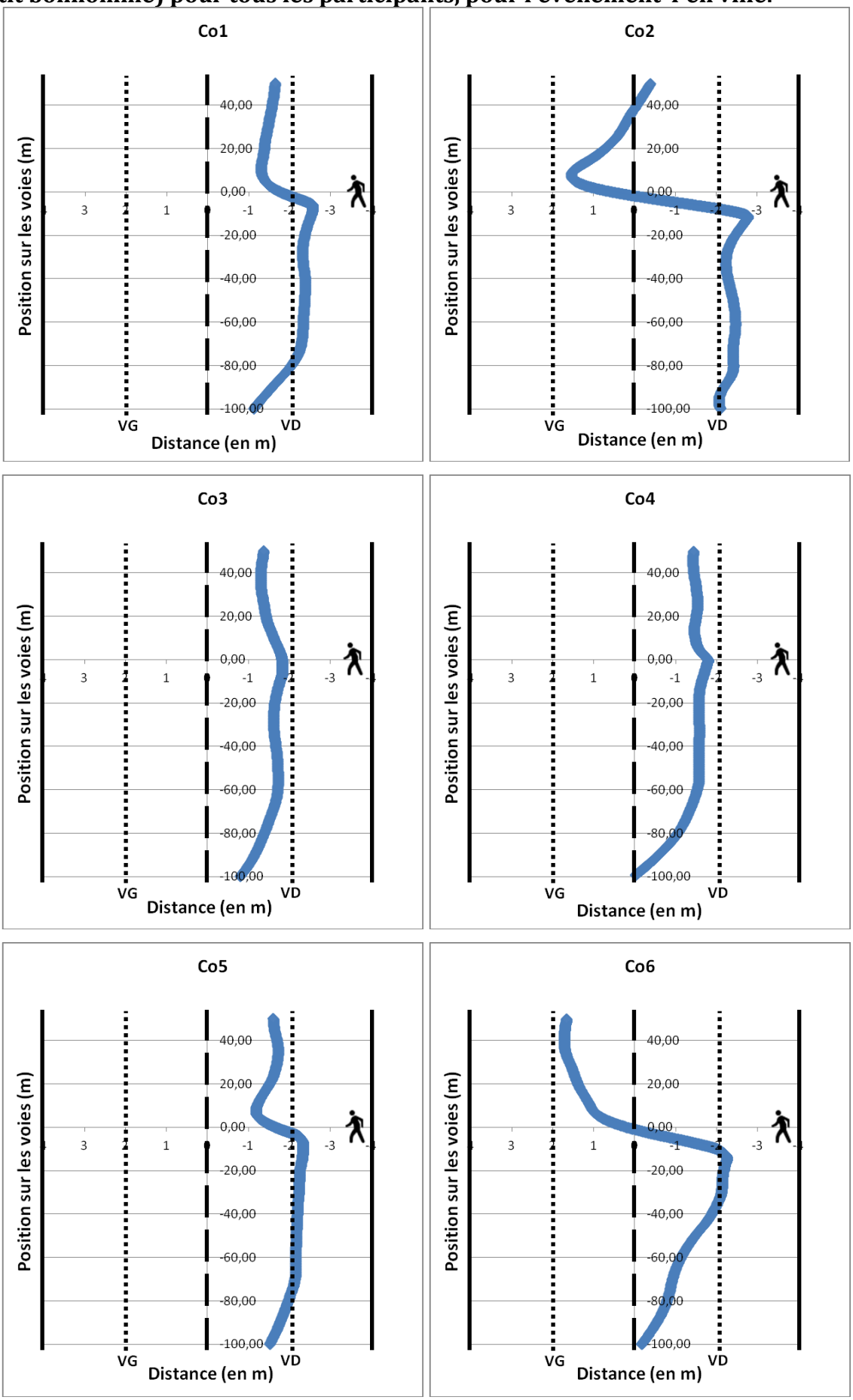

CR4
1
0
-4
-3
-2
-1
0
1
2
acc
frein
regard_enfant
Changement voie
Temps (en s)
T0 :
moment où l'événement devient critique

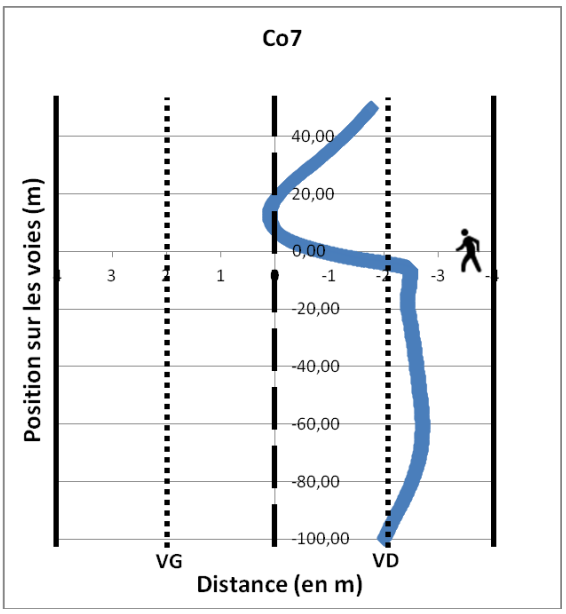

CR5
1
0
-4
-3
-2
-1
0
1
2
acc
frein
regard_enfant
Changement voie
Temps (en s)
T0 :
moment où l'événement devient critique

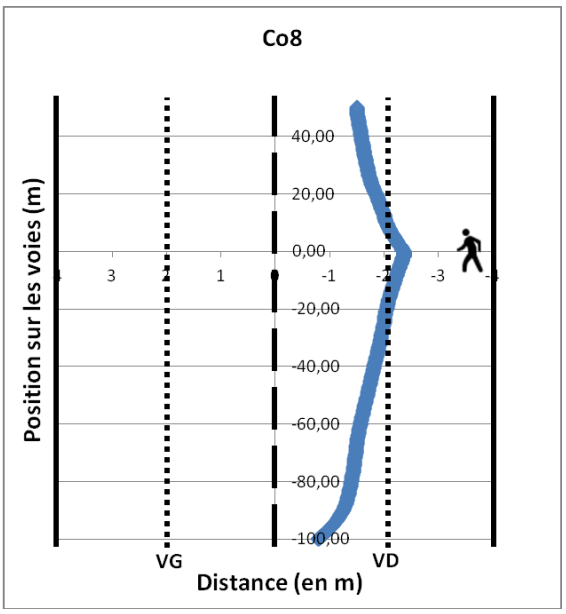

CR6
1
0
-4
-3
-2
-1
0
1
2
acc
frein
regard_enfant
Changement voie
Temps (en s)
T0 :
moment où l'événement devient critique

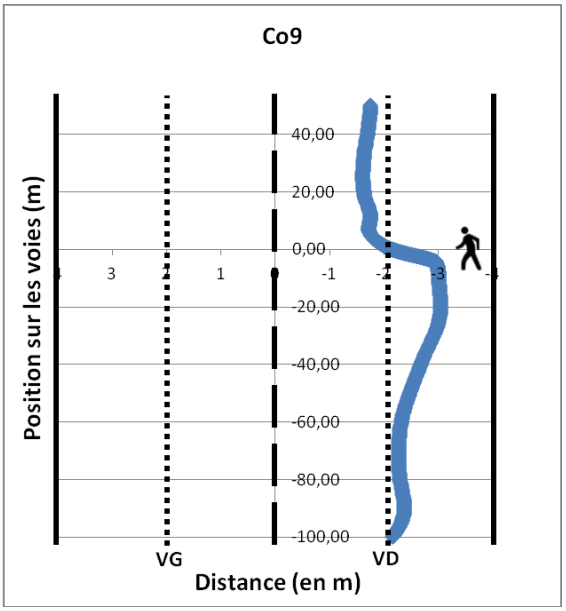

CA1
1
0
-4
-3
-2
-1
0
1
2
T0 :
moment où l'événement devient critique
acc
frein
regard_enfant
Changement voie
Temps (en s)
CA2
1
0
-4
-3
-2
-1
0
1
2
T0 :
moment où l'événement devient critique
acc
frein
regard_enfant
Changement voie
Temps (en s)
CA3
1
0
-4
-3
-2
-1
0
1
2
T0 :
moment où l'événement devient critique
acc
frein
regard_enfant
Changement voie
Temps (en s)
CA4
1
0
-4
-3
-2
-1
0
1
2
T0 :
moment où l'événement devient critique
acc
frein
regard_enfant
Changement voie
Temps (en s)

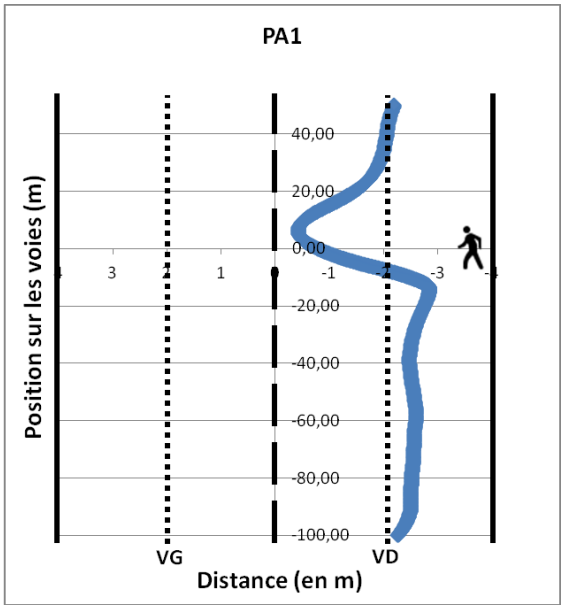
Annexe 11 : Trajctoire du participant en fonction de la sitance à l'enfant (considéré au lieu de collision possible) et position finale de l'enfant (matérialisée par le petit bonhomme) pour tous les participants, pour l'événement 4 en ville.

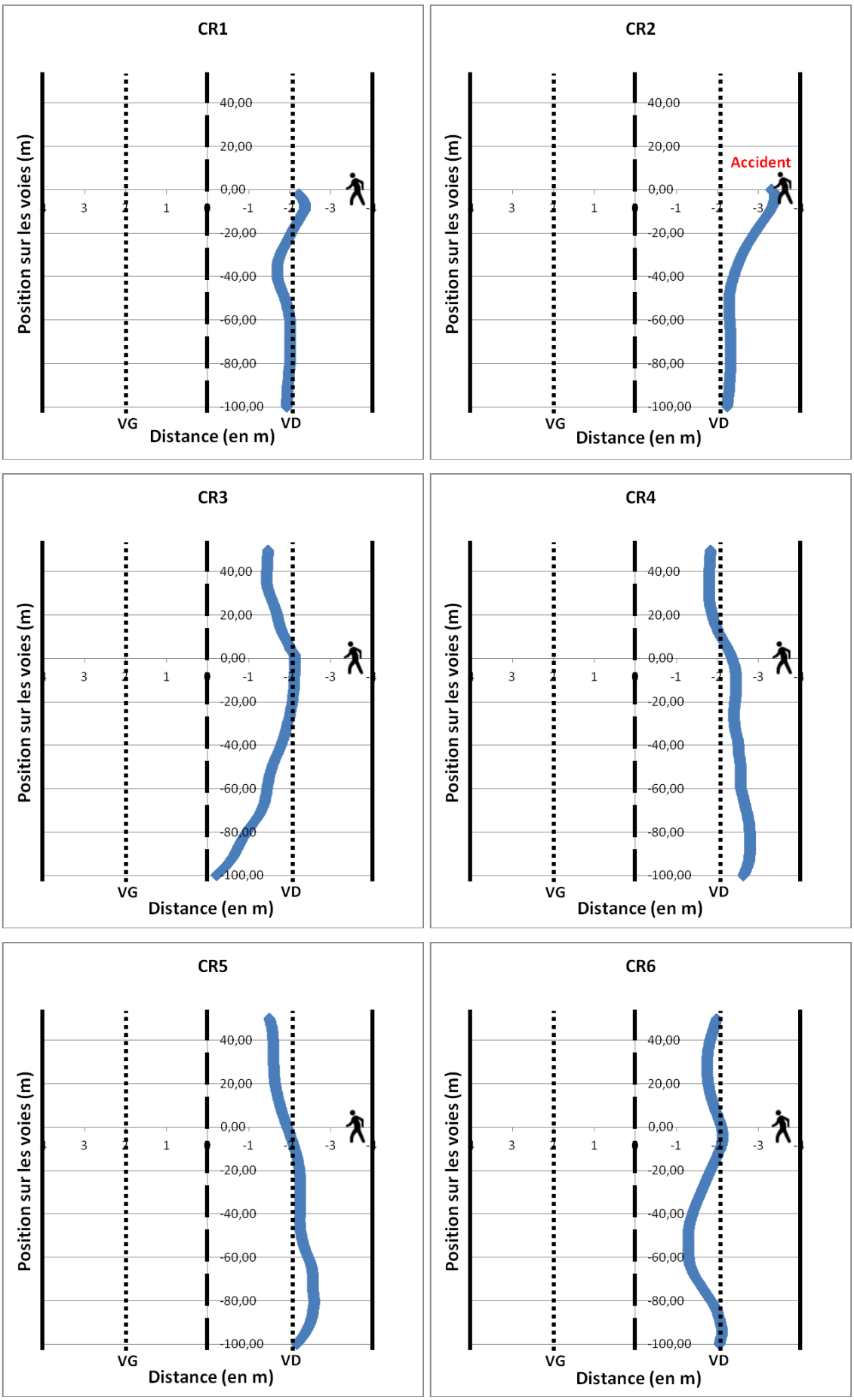


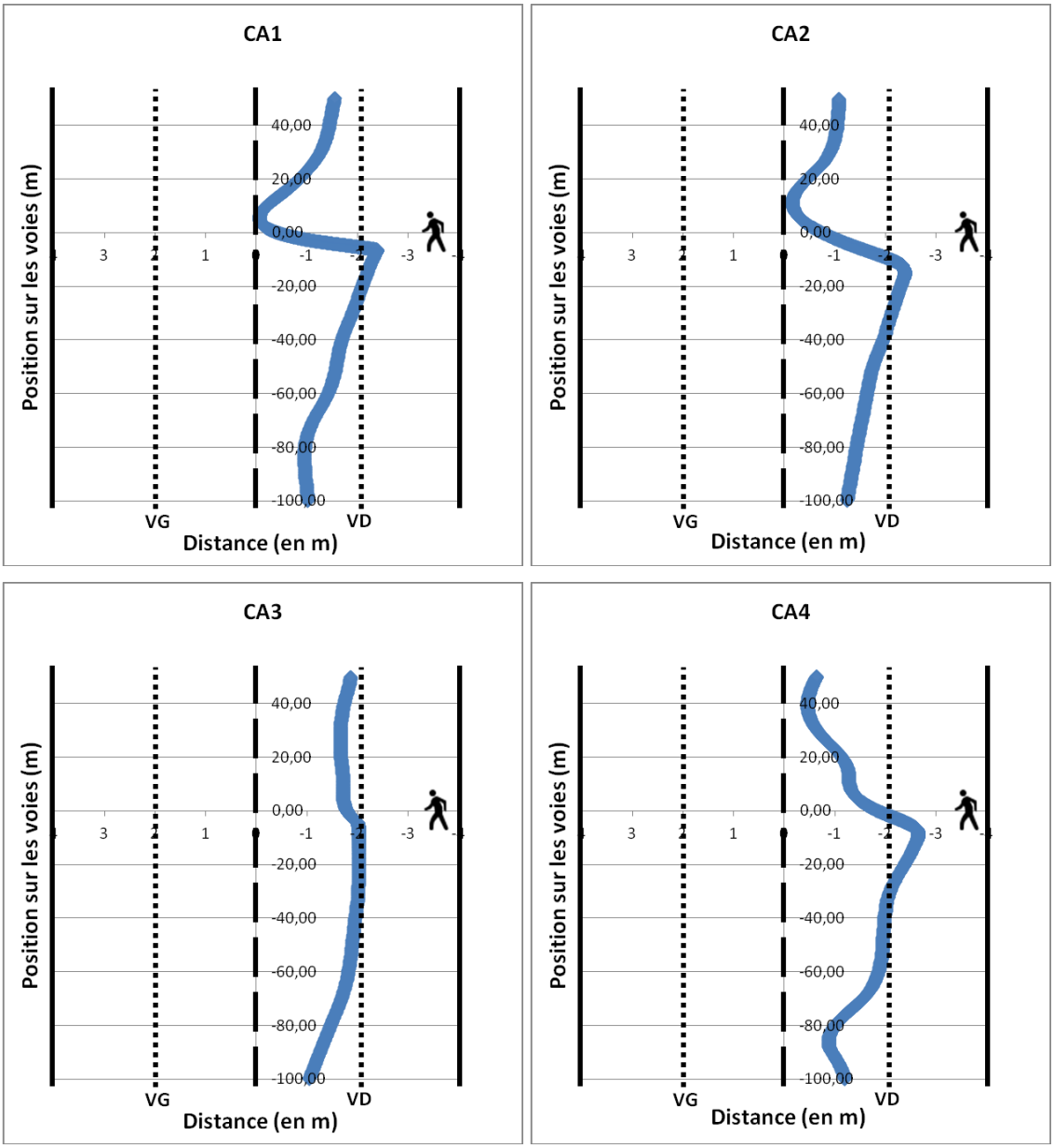

Co7
Position sur les voies (m)
40,00
20,00
0,00
-20,00
-40,00
-60,00
-80,00
-100,00
3
2
1
0
-1
-2
-3
-4
VG
VD
Distance (en m)


Co8
Position sur les voies (m)
40,00
20,00
0,00
-20,00
-40,00
-60,00
-80,00
-100,00
3
2
1
0
-1
-2
-3
-4
VG
VD
Distance (en m)


Co9
Position sur les voies (m)
40,00
20,00
0,00
-20,00
-40,00
-60,00
-80,00
-100,00
3
2
1
0
-1
-2
-3
-4
VG
VD
Distance (en m)


PA1
Position sur les voies (m)
40,00
20,00
0,00
-20,00
-40,00
-60,00
-80,00
-100,00
3
2
1
0
-1
-2
-3
-4
VG
VD
Distance (en m)


CR1
CR2
Accident
CR3
CR4
CR5
CR6
Position sur les voies (m)
Distance (en m)
VG
VD
40,00
20,00
0,00
-20,00
-40,00
-60,00
-80,00
-100,00
3
2
1
0
-1
-2
-3
-4


CA1
CA2
CA3
CA4
Position sur les voies (m)
40,00
20,00
0,00
-20,00
-40,00
-60,00
-80,00
-100,00
3
2
1
0
-1
-2
-3
-4
VG
VD
Distance (en m)