



HAL
open science

Recherche d'indicateurs d'inattention en conduite automobile : apports des mesures physiologiques et comportementales

Guillaume Pepin

► **To cite this version:**

Guillaume Pepin. Recherche d'indicateurs d'inattention en conduite automobile : apports des mesures physiologiques et comportementales. Psychologie. Université de Lyon, 2018. Français. NNT : 2018LYSE2133 . tel-02071126v1

HAL Id: tel-02071126

<https://theses.hal.science/tel-02071126v1>

Submitted on 20 Mar 2019 (v1), last revised 29 Jul 2022 (v2)

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.



N° d'ordre NNT : 2018LYSE2133

THESE de DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE LYON

Opérée au sein de

L'UNIVERSITÉ LUMIÈRE LYON 2

École Doctorale : ED 476 Neurosciences et Cognition

Discipline : Psychologie cognitive

Soutenue publiquement le 10 décembre 2018, par :

Guillaume PEPIN

Recherche d'indicateurs d'inattention en conduite automobile :

*apports des mesures physiologiques et
comportementales.*

Devant le jury composé de :

George MICHAEL, Professeur des universités, Université Lumière Lyon 2, Président

Céline LEMERCIER, Professeure des universités, Université Toulouse 2, Rapporteur

Cédric GALÉRA, Professeur des universités-praticien Hospitalier, Université de Bordeaux, Rapporteur

Jean-Philippe LACHAUX, Directeur de Recherches, INSERM, Examineur

Aurélie CAMPAGNE, Maître de conférences, Université Grenoble Alpes, Examinatrice

Catherine GABAUDE, Directrice de Recherches, IFSTTAR, Directrice de thèse

Contrat de diffusion

Ce document est diffusé sous le contrat *Creative Commons* « [Paternité – pas d'utilisation commerciale – pas de modification](#) » : vous êtes libre de le reproduire, de le distribuer et de le communiquer au public à condition d'en mentionner le nom de l'auteur et de ne pas le modifier, le transformer, l'adapter ni l'utiliser à des fins commerciales.

Thèse de Doctorat

Guillaume PEPIN

Soutenance de thèse prévue le **10 décembre 2018** en vue
de l'obtention du **grade de Docteur** sous le sceau
de l'**Université Lumière Lyon 2**

École doctorale : **NSCO, Neurosciences et Cognition**
Discipline : **Psychologie**, mention **Psychologie Cognitive**

Thèse financée par l'**IFSTAR**
Conduite au sein du département **TS2**
Laboratoire **LESCOT**

Recherche d'indicateurs d'inattention en conduite automobile :
apports des mesures physiologiques et comportementales

Jury

Cédric GALERA, Professeur, Université Bordeaux 2, Victor Segalen
Céline LEMERCIER, Professeure, Université de Toulouse 2, Jean-Jaurès
Aurélié CAMPAGNE, Maître de Conférence, Université Grenoble Alpes
Jean-Philippe LACHAUX, Directeur de Recherche, INSERM
George MICHAEL, Professeur, Université Lumière Lyon 2
Catherine GABAUDE, Directrice de Recherche, IFSTAR

Rapporteur
Rapporteur
Examinatrice
Examineur
Examineur
Directrice de thèse

« La science, dans son besoin d'achèvement comme dans son principe, s'oppose absolument à l'opinion. L'opinion a, en droit, toujours tort. L'opinion ne pense pas : elle traduit des besoins en connaissances. En désignant les objets par leur utilité, elle s'interdit de les connaître. On ne peut rien fonder sur l'opinion : il faut d'abord la détruire. Rien ne va de soi. Rien n'est donné. Tout est construit. »

« Face au réel, ce qu'on croit savoir clairement offusque ce qu'on devrait savoir. Quand il se présente à la culture scientifique, l'esprit n'est jamais jeune. Il est même très vieux, car il a l'âge de ses préjugés. »

Gaston Bachelard, la formation de l'esprit scientifique (1938)

Remerciements

Ce manuscrit de thèse est l'aboutissement de trois années paradoxales d'alternance continue entre des moments savoureux et difficiles, qui ont demandé presque autant de travail personnel que professionnel. J'ai énormément appris et ai pris un plaisir inattendu à écrire le présent manuscrit. Ce travail n'aurait pu aboutir sans la participation plus ou moins directe d'une multitude d'acteurs. La présence, l'aide et le soutien de toutes ces personnes, d'une façon et avec un degré différent à chaque fois, a permis au funambule que je suis, de conserver un équilibre professionnel et personnel. La recherche est pour moi un sport collectif, dans lequel il n'y a qu'une équipe et dont le seul adversaire à battre est notre ignorance commune. Il me fallait remercier mes coéquipiers chaleureusement.

J'aimerais commencer par remercier Catherine Gabaude, avec qui j'ai travaillé pendant maintenant 5 ans et qui m'a accueilli à l'IFSTTAR dès mon stage de première année de master. Merci d'avoir créé un sujet sur mesure pour mon année de M2 et d'avoir cru en moi pour une thèse. Je suis particulièrement satisfait de l'évolution de notre relation qui, malgré certaines difficultés, a su rebondir pour nous aider à tirer le meilleur et finir sur les chapeaux de roues. J'ai grâce à vous pu appréhender un univers riche et éclectique que je ne soupçonnais pas et qui m'a permis d'être un apprenant permanent pendant ces trois ans. Ce seul fait est suffisant pour me faire voir ces trois années comme positives.

Merci à Cédric Galéra et Céline Lemercier qui ont accepté d'être rapporteurs de cette thèse, mais aussi à Aurélie Campagne et Jean-Philippe Lachaux pour avoir accepté de lire ce travail.

Au laboratoire Étude des Mécanismes Cognitif, j'aimerais remercier Jordan Navarro, pour ses enseignements, son soutien et sa bienveillance au quotidien. J'aimerais également adresser des remerciements tout particuliers à George Michael. George, c'est vous qui m'avez donné le premier, le goût de la recherche. Vous avez éveillé en moi cette curiosité et je vous en remercie chaleureusement.

J'adresse des remerciements sincères à chacun des membres LESCOT pour leur soutien et leur travail dévoué, de qualité et indispensable au bon fonctionnement du laboratoire. Un merci particulier aux Batman de la recherche, Fabien, Daniel, Bruno, Bertrand, Myriam, Hedi, Romain et d'autres, ces travailleurs de l'ombre, qui m'ont aidé et accompagné dans la mise en place et l'analyse des données des différentes études menées. Sans vos connaissances, le dixième du travail effectué n'aurait pu l'être.

Un grand merci à Christophe et Alexandra, présents au quotidien qui ont su être là pour les relectures, le design expérimental, les analyses des données, et bien plus. Merci à vous deux de m'avoir guidé et d'avoir adoucis mon séjour en tant que doctorant au LESCOT.

Je tiens également à remercier Hélène Tattegrain, directrice du laboratoire LESCOT qui nous permet au quotidien, et entres autres personnes, d'avoir des conditions de travail dont nous pouvons être fiers. Les conseils d'Hélène lors du concours de Valeo m'ont également permis de mieux appréhender certains enjeux

et certaines méthodes d'analyses. Merci également à Séverine pour son soutien lors des phases successives du concours de Valeo et son sang-froid à l'oral, lors de la phase finale.

Merci à mes collègues du LESCOT qui depuis trois ans, distillent en moi la motivation et le courage qui auraient pu, certains matins, me manquer. Merci à Franck, Caroline, Marion, Isabelle, Sébastien, Audrey, Lyess, Julien, Anaïs, Antonio, Marie, Séverine, Adolphe et Evan. J'ai puisé en vous une partie de l'énergie nécessaire pour écrire ce manuscrit et j'ai énormément appris en dehors du cadre institutionnel grâce à vous.

Merci à ma famille pour votre patience et pour m'avoir soutenu sans vraiment trop comprendre ce que je pouvais bien chercher pendant trois ans. Vous m'avez donné l'accès à la connaissance par l'envie de comprendre. Merci à vous.

J'aimerais remercier mes amis proches, Méryl et Lucie, qui m'ont toujours soutenu et encouragé avec bienveillance. Merci à Guillaume et Sébastien avec qui j'ai passé des moments mémorables. J'aimerais également remercier ceux, en qui je me reconnais malgré des murs de verre épais. Je n'oublierai jamais ce sentiment indescriptible de se sentir transpercé par vos mots. Merci à vous, Aurélien C., Ken S., Keny A., et Ségine M, frères et sœur d'une mère différente.

J'aimerais remercier une seconde fois ces personnes particulières qui nous marquent la vie, sans que l'on comprenne pourquoi et surtout sans que l'on y soit préparé. Merci à Caroline, Marie, Alex et Franck, puissions-nous nous retrouver dans une autre vie.

Je tiens, évidemment, à te remercier Kelly, toi qui m'as si souvent soutenu pendant cette thèse et en dehors. Merci pour ta gentillesse et ta force. Tu m'as porté, parfois à bout de bras, et ce travail de thèse est, par certains aspects, un peu le tien.

Même si je le voulais, je ne pourrais pas t'oublier, Alex, toi avec qui j'ai (presque) tout partagé pendant ces trois ans. Nos chemins se ressemblent et se sont croisés dès le jour de l'audition, avant même le début de ces trois années. On en aura vécu des choses, eu des débats philosophiques et imbéciles. Commencer et terminer ensemble est un de ces doux plaisirs irrésistibles. Si je devais résumer succinctement, ce que j'ai appris à tes côtés, je dirais que j'ai compris que l'histoire s'écrit en tournant les pages et qu'il ne faut pas attendre d'avoir toutes les réponses avant de se mettre en marche. J'espère que tu as pu compter et t'appuyer sur moi autant que je l'ai fait de mon côté. Cette thèse et moi-même ne serions pas les mêmes sans toi, je te le garantis. Merci, mon ami.

Table des matières

REMERCIEMENTS.....	II
TABLE DES MATIERES	IV
LEXIQUE.....	VIII
TABLE DES ILLUSTRATIONS.....	IX
TABLE DES ANNEXES.....	X
INTRODUCTION	1
ÉTAT DE L'ART	2
MODELES DE L'ATTENTION	2
<i>L'attention est-elle un filtre ?</i>	3
<i>L'attention est-elle un réservoir à capacité limitée ?</i>	4
Modèle des ressources uniques	4
Modèle des ressources multiples	5
Modèle des ressources malléables	7
<i>L'attention est-elle un ensemble de réseaux cérébraux ?</i>	9
Réseaux attentionnels proprement dits	11
Réseau par défaut	13
Réseaux de contrôle.....	15
CONDUITE ET DEFAUTS D'ATTENTION	18
<i>Facteurs de risques</i>	20
<i>Distraction et Inattention</i>	21
Rôles dans la genèse d'accidents	21
Définitions et classifications	22
Conséquences des EDA sur les conducteurs.....	24
LE VAGABONDAGE DE LA PENSEE.....	26
<i>Historique</i>	26
<i>Définitions</i>	27
<i>Caractéristiques</i>	28
Émergence du vagabondage.....	28
Bénéfices	30
Inconvénients.....	33
Au quotidien	33
En conduite	33
Découplage perceptif et performance	34

<i>Types de pensée</i>	36
<i>Contenu des pensées</i>	37
Temporalité et Émotion	37
Intentionnalité et Conscience	40
NEUROERGONOMIE.....	44
<i>Historique de la neuroergonomie</i>	44
<i>Automatisation et paradoxe</i>	46
<i>Neuroergonomie et vagabondage de la pensée</i>	49
<i>Approche et mesures en neuroergonomie</i>	51
Mesures subjectives.....	51
Méthodes rétrospectives.....	51
Méthode de l'auto-déclaration	52
Méthode du « Probe-Caught ».....	52
Mesures objectives.....	54
Systèmes nerveux.....	54
Comportement	56
Données de conduite.....	56
Comportement oculaire	57
Physiologie	58
Électrocardiographie	58
Respiration	61
EEG et Potentiels évoqués cérébraux	62
Conductance cutanée.....	66
OBJECTIFS DE LA THESE.....	69
PARTIE EXPERIMENTALE	71
ÉTUDE 1 : SIGNATURE CARDIAQUE DE L'EFFORT COGNITIF EN CONDUITE AUTOMOBILE	71
<i>Objectif et justification</i>	71
<i>Méthode</i>	74
Population	74
Simulateur.....	74
Article publié dans « le travail humain » en Janvier 2017	75
Synthèse des résultats présentés dans l'article du Travail Humain.....	96
Résultats supplémentaires.....	96
Discussion.....	98
AMELIORATION DE L'INDICATEUR D'EFFORT COGNITIF EN CONDUITE AUTOMOBILE	102
Le Valeo Innovation Challenge 2016.....	102
Objectif et justification	103
Applications possibles	104
Conclusion	105

ÉTUDE 2 : SIGNATURE PHYSIOLOGIQUE ET COMPORTEMENTALE DU VAGABONDAGE DE LA PENSÉE EN CONDUITE AUTOMOBILE..	108
<i>Objectif et Justification</i>	108
<i>Méthode</i>	110
Population	110
Simulateur de conduite	110
Oculométrie.....	110
Dispositif.....	110
Fixité du regard	110
Tâches	112
<i>Article publié dans Consciousness & Cognition</i>	113
<i>Synthèse des résultats présentés dans l'article de Consciousness & Cognition</i>	136
<i>Discussion</i>	137
ÉTUDE 3 : EFFET DU VAGABONDAGE DE LA PENSÉE ET DE SES CARACTÉRISTIQUES SUR LE TRAITEMENT DE L'INFORMATION VISUELLE EN CONDUITE AUTOMOBILE.....	139
<i>Objectif et Justification</i>	139
<i>Méthode</i>	140
Poste de conduite épuré et tâche proposée	140
EEG et traitement des potentiels évoqués cérébraux	142
Recueil des pensées vagabondes	142
Labilité électrodermale.....	144
Mémoire de Travail	145
Procédure.....	146
<i>Article soumis à la revue Neuroscience Letters</i>	148
<i>Synthèse des résultats présentés dans l'article soumis à Neuroscience Letters</i>	166
<i>Résultats supplémentaires</i>	167
Inductions.....	167
Potentiels évoqués cérébraux et données de conduite.....	168
Temporalité	169
Émotion	171
Activité frontale	173
Résultats Cardiaques	175
Labilité électrodermale.....	177
Mémoire de Travail	179
<i>Discussion</i>	180
DISCUSSION GÉNÉRALE	184
CLARIFIONS LES CONCEPTS D'INATTENTION ET DISTRACTION	185
VAGABONDAGE DE LA PENSÉE ET MODÈLES DE L'ATTENTION	189
INDICATEURS OBJECTIFS DE L'INATTENTION EN CONDUITE	192
<i>Mesure cardiaque</i>	192

Mesures oculométriques	193
Mesures cérébrales	194
PERSPECTIVES.....	198
TRAVAIL NON EFFECTUE	198
<i>Étude des états de conscience</i>	198
<i>Analyser différemment les données électroencéphalographiques</i>	199
<i>Quantification de la sensibilité et spécificité de la VaRC et de la fixité du regard</i>	200
APPLICATIONS POSSIBLES	203
<i>Remonter à la source de la consommation des ressources ?</i>	203
Les mesures physiologiques semblent intrinsèquement liées	203
Existe-t-il des indicateurs des ressources cognitives ?.....	205
<i>Vers une détection du vagabondage de la pensée en temps réel ?</i>	207
Couplage des données et neuroergonomie	207
Techniques de fusion de données pour la détection du vagabondage	209
BIBLIOGRAPHIE.....	212
ANNEXES	- 1 -

Lexique

- ADAS : Système évolué d'assistance au conducteur (Advanced Driver Assistance System)
- ANOVA : Analyse de Variance (« Analysis of variance »)
- ASR = Arythmie Sinusale Respiratoire
- ATP : Adénosine TriPhosphate
- DAN : Réseau Attentionnel Dorsal (Dorsal Attentional Network)
- DLPFC : Cortex Préfrontal Dorsolatéral (Dorsolateral prefrontal Cortex)
- DMN : Réseau par Défaut (Default Mode Network)
- EDA : Etats dégradés de l'attention
- fNIRS = spectroscopie en proche infrarouge fonctionnelle (functional Near Infra-Red spectroscopy)
- FPCN : Réseau de Contrôle Fronto-Pariétal (Fronto-Pariétal Control Network)
- GPS : Guidage Par Satellite
- IA : Intelligence Artificielle
- ICM : Interface Cerveau-Machine
- IFSTTAR : Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de L'aménagement et des Réseaux
- IRMf : Imagerie par Résonance Magnétique fonctionnelle
- LEPSiS : Laboratoire Exploitation, Perception, Simulations et Simulateurs de conduite
- MdT : Mémoire de Travail
- ONISR : Observatoire National Interministériel de la Sécurité Routière
- OR : Odd-Ratio
- PEs : Potentiels Évoqués
- RC : Rythme Cardiaque
- RCCO : Réseau de Contrôle Cingulo-Opéculaire
- SNC : Système Nerveux Central
- SNP : Système Nerveux Périphérique
- TR : Temps de Réaction
- TRIs : Pensées interférentes liées à la tâche (Task-Related Interférences)
- TLX : Indice de charge liée à la réalisation de la tâche (Task Load indeX)
- VAN : Réseau Attentionnel Ventral (Ventral Attentional Network)
- VaRC : Variation du Rythme Cardiaque
- VP : Vagabondage de la Pensée
- VRC : Variabilité du Rythme Cardiaque

Table des illustrations

<i>Figure 1 : Visualisation du modèle de l'attention à ressources multiples de Wickens (2002).....</i>	<i>6</i>
<i>Figure 2 : Lobes du cerveau, tiré de Nieoullon, Paradiso, Connors, et Bear (2016).....</i>	<i>10</i>
<i>Figure 3 : Représentation des cinq réseaux d'intérêts sur une coupe sagittale du cerveau</i>	<i>13</i>
<i>Figure 4 : Évolution de la mortalité routière en France métropolitaine entre 1970 et 2011.....</i>	<i>19</i>
<i>Figure 5 : Schéma représentant les liens entre différents états dégradés de l'attention</i>	<i>23</i>
<i>Figure 6 : Évolution de la fréquence d'apparition de recherche portant sur le vagabondage de la pensée</i>	<i>26</i>
<i>Figure 7 : Schéma montrant la relation entre la focalisation attentionnelle et le lien de la pensée avec la tâche</i>	<i>37</i>
<i>Figure 8 : Diagramme représentant la part de pensées temporellement et non orientées</i>	<i>39</i>
<i>Figure 9 : Mise à jour des liens entre différents états dégradés de l'attention après intégration de certains types et de certaines caractéristiques des pensées</i>	<i>42</i>
<i>Figure 10 : Organigramme du système nerveux humain représentant le Système Nerveux Central (SNC) et le Système Nerveux Périphérique (SNP) ainsi que ses subdivisions</i>	<i>55</i>
<i>Figure 11 : Représentation graphique d'un signal cardiaque.....</i>	<i>59</i>
<i>Figure 12 : Visualisation Biopac d'un signal respiratoire sur 160 secondes</i>	<i>62</i>
<i>Figure 13 : Représentation du montage des électrodes selon le Système International 10-20.....</i>	<i>64</i>
<i>Figure 14 : Visualisation Biopac d'un signal électrodermal sur 180 secondes</i>	<i>66</i>
<i>Figure 15 : Graphique représentant l'évolution du rythme cardiaque dans les secondes suivant la présentation d'un stimulus auditif nécessitant une tâche de comptage ou une écoute simple de la part du participant.....</i>	<i>72</i>
<i>Figure 16 : Simulateur de conduite PEUGEOT 308 présent sur le site de l'IFSTAR</i>	<i>74</i>
<i>Figure 17 : Signaux respiratoires moyennés sur tous les évènements selon la condition d'écoute simple (tâche passive) ou de comptage (tâche active)</i>	<i>98</i>
<i>Figure 18 : Représentation schématique du découpage temporel de la tâche de la seconde étude</i>	<i>109</i>
<i>Figure 19 : Illustration, selon le point de vue du conducteur, de la position absolue de son regard.....</i>	<i>111</i>
<i>Figure 20 : Installation des participants lors de l'expérimentation sur le simulateur épuré.</i>	<i>141</i>
<i>Figure 21 : Représentation schématique du scalp et de la position des électrodes du bonnet EEG</i>	<i>173</i>
<i>Figure 22 : Évolution du rythme cardiaque dans les 12 secondes entourant le freinage de la moto précédant le véhicule du conducteur</i>	<i>176</i>
<i>Figure 23 : Mise à jour de la Figure 9 entre différents états dégradés de l'attention.....</i>	<i>197</i>
<i>Figure 24 : Graphique représentant schématiquement l'évolution de plusieurs signaux</i>	<i>206</i>

Table des annexes

<i>Annexe A : Grille apprise par les participants lors de l'étude 1</i>	<i>- 1 -</i>
<i>Annexe B : Courbes de VaRC selon les 8 conditions expérimentales de l'étude 1</i>	<i>- 2 -</i>
<i>Annexe C : Document soumis pour le Valeo Innovation Challenge lors de la phase 1 (3 pages)</i>	<i>- 3 -</i>
<i>Annexe D : Document soumis pour le Valeo Innovation Challenge lors de la seconde phase (20 pages)</i>	<i>- 6 -</i>
<i>Annexe E : Poster affiché lors de la troisième et dernière phase du Valeo Innovation Challenge</i>	<i>- 27 -</i>
<i>Annexe F : Questionnaire utilisé pour obtenir le focus attentionnel et le contenu des pensées des conducteurs lors de l'expérimentation 3 de la présente thèse</i>	<i>- 28 -</i>

Introduction

Si seule notre pensée donne son existence à la réalité, sans nos capacités à penser le monde environnant, celui-ci n'aurait aucun sens. L'orientation active de notre pensée revêt ainsi, une importance primordiale. À quoi voulons-nous donner du sens ? Nous sommes parfois pleinement concentrés sur l'activité que nous sommes en train de réaliser et à d'autres moments, nous nous plaisons à imaginer d'autres lieux ou d'autres endroits. Tout cela est normal et ne serait jamais problématique si ces moments de déconnexion avec notre environnement proche n'arrivaient qu'à des moments opportuns. Dans le cadre de certaines activités nécessitant une attention soutenue et continue, penser à autre chose peut avoir de sérieuses conséquences.

La conduite automobile est une activité dynamique à forte demande attentionnelle, dont la sécurité d'un trajet repose sur les capacités du conducteur à collecter, traiter et analyser les informations pertinentes pour réagir aux événements actuels tout en anticipant les événements à venir pour conserver une conscience de la situation suffisante à une conduite sûre. Conduire en toute sécurité nécessite donc des capacités physiques pour contrôler la position et la vitesse du véhicule, mais également des capacités mentales pour surveiller l'environnement et traiter les informations extérieures afin de prendre des décisions adaptées à tout instant. Dans un environnement dynamique, une diminution de l'attention portée à l'activité de conduite peut très vite avoir de sévères répercussions.

Ce manque d'attention portée à la conduite regroupe grossièrement deux états particuliers : la distraction et l'inattention. Ces deux états, nous y reviendrons, ont des points communs et des différences. L'inattention à la conduite dont l'état de vagabondage de la pensée (VP) fait partie, correspond à une déconnexion de l'esprit du conducteur envers l'environnement de conduite. L'attention du conducteur se réoriente alors sur des pensées personnelles, augmentant le risque d'être impliqué dans un accident en limitant sa capacité à réagir promptement.

Le présent travail de thèse cherche à comprendre, en conduite simulée, les réels effets de l'inattention et plus particulièrement du VP, sur le comportement et les signaux physiologiques du conducteur. Il tentera de mettre en évidence, en conduite automobile simulée, des indicateurs objectifs de l'effort cognitif et étudiera l'effet de différents types de pensées ainsi que de leur contenu sur l'activité de conduite. Pour cela la valorisation d'une expérimentation réalisée avant la présente thèse, la participation à un concours international ainsi que deux expérimentations ont été réalisées.

État de l'Art

Modèles de l'attention

La conduite automobile est une activité dynamique qui, sous une apparente simplicité, s'avère complexe. Les situations qu'appréhende le conducteur comportent une dynamique temporelle stricte, des objectifs parfois peu clairs et conflictuels et dans certains cas un risque d'accident élevé (Van Elslande, 2003). Conduire en toute sécurité nécessite des capacités physiques pour contrôler la position et la vitesse du véhicule, mais également des capacités mentales et attentionnelles. Tout conducteur doit en effet surveiller l'environnement et traiter les informations extérieures afin de prendre des décisions adaptées à tout instant. Son objectif étant de se déplacer d'un point A à un point B, il doit collecter, traiter et analyser les informations pertinentes pour réagir aux événements actuels tout en anticipant les événements à venir afin de conserver une conscience de la situation suffisante pour ne pas perturber la sûreté du trajet (Endsley & Kiris, 1995). Notre cerveau et par extension notre système de traitement des informations, est capable de faire des prédictions sur l'état du monde. Ce système prédictif nous permet, à partir de quelques indices clés relevés en quelques coups d'œil, de présager de l'évolution de la situation à très court terme. Mais la dynamique de l'activité de conduite rend ces prédictions invalides à long terme ; le conducteur a donc à peine le temps de jeter un œil à ses rétroviseurs ou de s'autoriser une pensée sans lien avec la conduite (Lachaux, 2018). Dans un environnement dynamique, particulièrement à grande vitesse, une diminution du degré d'attention portée à la conduite peut très vite avoir de sévères répercussions sur le conducteur.

Dans les décennies qui se sont écoulées, la définition et le rôle de l'attention ont de nombreuses fois varié. Dans la partie suivante, différents modèles du fonctionnement et de la gestion de l'attention seront présentés. De nombreux modèles ont été développés afin d'appréhender cette notion d'attention et pour mieux rendre compte des données expérimentales. La liste des modèles présentés ci-après n'est pas exhaustive, mais est issue d'une sélection qui permet une articulation des différentes conceptions afin de mieux rendre compte des besoins attentionnels inhérents à l'activité de conduite.

Le conducteur devant sélectionner et prioriser les informations dignes d'intérêt dans un environnement dynamique, les modèles présentés devaient rendre compte de la notion de sélection des informations ainsi que des capacités attentionnelles humaines limitées. Enfin, puisque l'humain est fait de chair et de neurones, la mise en évidence de substrats physiques de l'attention a permis la description des structures cérébrales impliquées dans les traitements attentionnels. Ainsi, c'est en voyant l'attention comme étant sous-tendue

par des réseaux de neurones particuliers, et ayant une capacité de traitement limitée, nous obligeant parfois à sélectionner et à prioriser les informations à traiter, que la juxtaposition des modèles tentera de mieux cerner le rôle complexe de l'attention en conduite.

L'attention est-elle un filtre ?

Chacun sait, par expérience, que s'il se concentre sur un stimulus particulier dans une multitude de stimuli équivalents (se concentrer sur une voix particulière dans une foule par exemple) permet de mieux traiter ce stimulus. De par notre capacité attentionnelle limitée, les informations sont traitées de façon séquentielle. Une partie des premiers modèles de l'attention cherchait à expliquer ce phénomène en imaginant l'attention comme un filtre sensoriel précoce du traitement de l'information (Broadbent, 1958). Ainsi, les informations qui n'ont pas d'intérêt premier seraient filtrées pour permettre un meilleur traitement des informations sur lesquelles nous sommes focalisés. Le traitement serait donc réservé exclusivement aux informations attendues. Mais cette conception manichéenne du filtre attentionnel contredit certaines observations expérimentales. L'effet « Cocktail party » vient tempérer cette vision binaire.

Reprenons l'exemple de la foule, si nous nous concentrons pour écouter ce que dit une personne à l'autre bout de la salle, il est probable que nous comprendrons et mémoriserons ses propos plutôt que ceux venus d'une autre discussion à l'opposé. Toutefois, si une des personnes présentes, prononce notre nom ou notre prénom, ce mot particulier devrait, selon ce modèle, être filtré, ce qui n'est pas le cas. Nous n'écoutons pas, étions concentrés sur autre chose et pourtant nous avons précisément entendu cet élément. Les informations traitées ne seraient donc pas celles attendues, mais celles qui sont pertinentes pour l'individu et la tâche en cours. Le traitement des stimuli pertinents n'est donc pas compatible avec le modèle de Broadbent (1958). Plusieurs mises à jour de ce modèle ont été proposées notamment pour répondre à cette problématique en proposant un filtre sensoriel plus tardif. Le modèle de Treisman (1969) postule que les informations non attendues ne sont pas totalement filtrées, mais plutôt atténuées. Un stimulus personnellement pertinent (comme le nom de quelqu'un peut l'être) ou dont les propriétés physiques sont proches de celles de la cible (mot ressemblant fortement au prénom de l'individu, par exemple) sera alors traité plus profondément que les autres. Selon ces derniers modèles de l'attention, le filtre attentionnel n'est pas binaire, mais permettrait une atténuation dans le traitement des stimuli distracteurs tout en permettant la bonne sélection et priorisation des informations pertinentes (Treisman, 1969).

Lors du vagabondage de la pensée en conduite automobile, notre attention se déplace de la tâche principale vers nos pensées (Smallwood & Schooler, 2015). Le vagabondage de la pensée suppose donc qu'une tâche était en cours de réalisation et que l'attention de l'individu s'est réorientée vers ses pensées personnelles. Lorsque l'on place le vagabondage de la pensée dans le modèle précédent, notre focus attentionnel étant nos

pensées personnelles, ce sont les informations extérieures provenant de la tâche principale qui seront atténuées. Cela participerait au phénomène du découplage perceptif que nous aborderons dans la partie correspondante. La dangerosité du vagabondage pourrait en partie provenir du fait que notre attention filtre les informations externes pour ne pas déranger nos réflexions et notre flux de pensée. Nous l'avons dit, la conduite automobile nécessite une bonne coordination motrice et des capacités attentionnelles solides. Une baisse du niveau d'attention portée à la conduite dégrade les performances de conduite à bien des égards. C'est avec l'avancée des recherches que de meilleures connaissances des facteurs responsables de la dégradation des performances de conduite ainsi que de l'élévation du risque d'accident ont pu émerger. Des réflexions ont été menées afin d'élaborer de nouveaux modèles présentant l'attention comme étant subdivisée en unités non quantifiables, mais limitées, réunies dans un « réservoir » attentionnel.

L'attention est-elle un réservoir à capacité limitée ?

Effectuer une tâche supplémentaire à une tâche de conduite dégrade les performances et diminue la probabilité d'effectuer un trajet sûr. Pour conceptualiser le coût cognitif d'une tâche, les termes de ressources, attentionnelles ou cognitives sont très souvent utilisés indifféremment. Dans le présent travail de thèse, les ressources au sens général sont cognitives, mais lorsqu'elles sont allouées à la gestion de l'attention, nous parlerons de ressources attentionnelles.

Comme nous l'avons dit précédemment, nos capacités attentionnelles sont limitées. Nous ne pourrions pas effectuer, en même temps, plusieurs tâches à forte demande ; il nous faut prioriser les informations qui nous parviennent afin d'adapter la demande à nos capacités. Ainsi, seule une certaine quantité d'information peut être traitée à chaque instant.

Modèle des ressources uniques

Selon le modèle de Kahneman (1973), la performance obtenue suite à la réalisation d'une tâche cognitive est dépendante de trois facteurs : la quantité de ressources cognitive nécessaire pour réaliser la tâche, la quantité de ressources disponible et la façon dont les ressources sont distribuées par un processeur central. La quantité de ressources nécessaire pour réaliser une tâche génère une charge cognitive particulière qui varie avec le type et la difficulté de la tâche. La quantité de ressources disponible ne dépend pas que des capacités de l'individu pour la tâche, mais repose également sur l'âge, le niveau de fatigue, etc. Enfin, un système de contrôle de la distribution des ressources assure la sélection des informations prioritaires. La charge cognitive peut ainsi augmenter lorsque les ressources doivent être mobilisées ou réorientées (de Waard, 1996).

Ainsi, des modèles ont été développés pour mieux rendre compte de l'aspect limité de nos capacités attentionnelles. En proposant de voir l'attention comme étant un réservoir de ressources à capacité limitée, ces modèles ont permis de corroborer les observations empiriques menées. Selon les modèles précédents, l'attention filtre les stimuli les moins pertinents puisqu'il ne serait pas possible de traiter plus d'une information à la fois. Il semble également possible d'effectuer un nombre important de tâches pour autant que nos ressources disponibles le permettent. À nouveau, lorsque l'on intègre la problématique du vagabondage de la pensée au modèle de Kahneman (1973), les interprétations sont assez simples : le vagabondage de la pensée jouerait le rôle d'une double tâche et viendrait puiser dans les ressources cognitives disponibles du conducteur. En effet, bien que focalisé sur ses pensées, l'individu ne s'arrête pas de conduire. De façon automatique, il exerce un contrôle sur le véhicule, mais une partie de ses ressources attentionnelles doivent être consommées pour gérer l'activité de conduite. Ainsi, le conducteur aurait, lors du VP, une quantité de ressources amoindrie. Ces ressources, utilisées pour alimenter les pensées, pourraient manquer en cas d'évènement imprévu ou si la situation exige une mobilisation massive et rapide de celles-ci. Pourtant, dans les faits, il est possible, dans certaines conditions, de traiter plusieurs informations en parallèle alors qu'il est parfois impossible d'effectuer une tâche supplémentaire malgré la disponibilité des ressources. Comment alors concilier les contraintes émanant des recherches expérimentales avec ces modèles théoriques de l'attention ? Il apparaît nécessaire de réviser ce modèle pour mieux rendre compte des observations et des résultats expérimentaux.

Modèle des ressources multiples

Pour concilier ces contradictions, une mise à jour du modèle de Kahneman (1973) par Wickens (2002) a été mis au point (Figure 1). Dans ce modèle révisé, les ressources attentionnelles ne seraient pas toutes équivalentes, mais auraient des caractéristiques particulières. Ces ressources seraient divisées dans un système composé de plusieurs réservoirs. Ces réservoirs sont indépendants et basés sur quatre dimensions : les étapes de traitement, les modalités sensorielles de perception, les codes de traitement et le type de réponse.

Ce modèle conceptuel détaille les différentes étapes de traitement et prédit que des tâches de perception et de traitement complexes peuvent interférer entre elles alors qu'une réponse nécessitant beaucoup de ressources n'interférera pas avec les capacités de perception (encodage) ou de traitement. De la même façon, la dimension des modalités qui n'est associée qu'à la phase perceptive produira moins d'interférence si la présentation de deux tâches est intermodale¹. La dimension des codes du modèle de Wickens (2002) prédit qu'une réponse manuelle aurait plus tendance à interférer avec des tâches spatiales, de la même façon qu'une

¹ Deux tâches intermodales vont utiliser des systèmes sensoriels différents

réponse verbale interférerait plus avec une tâche du même type. En résumé, ce modèle des ressources attentionnelles multiples décrit différents types de ressource qui peuvent manquer lorsque deux tâches nécessitant le même type de ressource, vont être effectuées en parallèle. Ce modèle permet d'expliquer les mécanismes à l'origine de nos difficultés à simultanément écrire ou lire un texte, tout en discutant. Les ressources attentionnelles de type verbal entrent en concurrence entre deux tâches. Il nous faut donc les prioriser et effectuer ces deux tâches l'une après l'autre pour être efficaces.

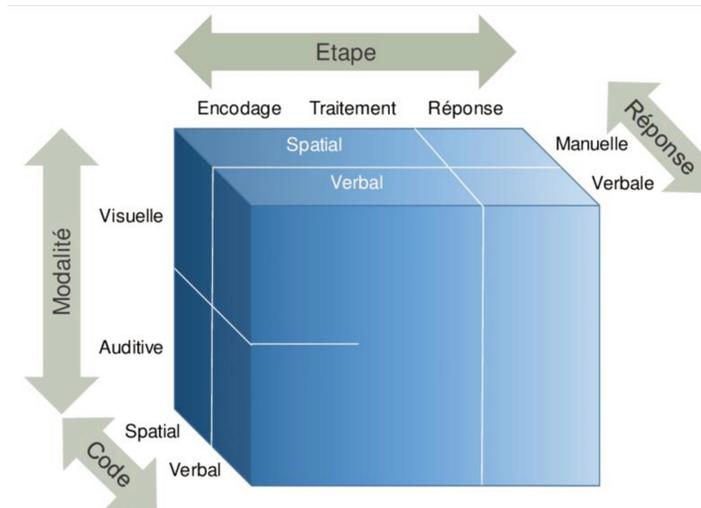


Figure 1 : *Visualisation du modèle de l'attention à ressources multiples de Wickens (2002)*

En intégrant la problématique du VP à ce modèle, avoir son attention focalisée sur ses pensées en conduite jouerait également le rôle de double tâche et viendrait puiser une certaine partie des ressources disponibles pour alimenter les pensées et les réflexions. Mais ce modèle pourrait apporter une information supplémentaire intéressante. Si la nature de deux tâches peut expliquer leurs interférences réciproques et que la conduite est une activité majoritairement visuelle, le type de vagabondage dans lequel le conducteur va s'engager pourrait-il expliquer les interférences et donc la dangerosité de cet état ? Se pourrait-il que des pensées mobilisant des représentations visuelles, qui impliquent la visualisation d'un souvenir ou d'un évènement qui devrait arriver par exemple, interfèrent plus avec l'activité de conduite que des pensées dont le contenu serait auditif ou amodal ? Nous entrevoyons déjà la possibilité d'aborder le vagabondage de la pensée, non pas comme un état uniforme, mais comme un état fluctuant dont le contenu pourrait moduler son impact sur les conducteurs.

Dans ces modèles où l'attention est un réservoir et les ressources sont limitées, seules les situations de surcharge sont exposées et discutées. En effet, ce modèle prédit correctement les performances obtenues lorsque l'individu est cognitivement dépassé par la situation, mais pas lorsque celui-ci est très peu sollicité. Dans les modèles présentés précédemment, il n'est nullement fait mention des situations de sous-charge qui sont pourtant responsables de réactions trop peu rapides et efficaces et peuvent être mises en cause lors de la chute des performances des individus (Endsley & Kiris, 1995). Dans ces cas-là, les ressources attentionnelles devraient être disponibles en grand nombre et ainsi permettre des performances adéquates voir meilleures aux tâches proposées, ce qui n'est pourtant pas le cas dans la réalité. De nouveau, il apparaît nécessaire de mettre à jour ce modèle des ressources multiples pour permettre de rendre compte des situations de sous-charge cognitive.

Modèle des ressources malléables

Une nouvelle mise à jour du modèle de Wickens (2002) a été proposée pour mieux rendre compte de ces situations de sous-charge cognitive. Ces situations pourraient être tout aussi problématiques que les situations de sur-charge, d'autant plus qu'elles pourraient être plus difficilement détectables (Hancock & Parasuraman, 1992).

L'attention, nous l'avons vu, pourrait être comparée à plusieurs réservoirs dont les ressources de chacun sont limitées et d'une nature particulière (auditive et visuelle, par exemple) (Wickens, 2002). Mais dans ce modèle du fonctionnement de l'attention mis à jour, c'est la taille du réservoir lui-même qui varierait en fonction des caractéristiques de la tâche (Young & Stanton, 2002). Le réservoir pourrait ainsi rétrécir pour grossièrement s'adapter au faible coût d'une tâche. Nous l'avons vu, manipuler les ressources attentionnelles pourrait avoir un coût (de Waard, 1996). Ne pas avoir à manipuler une quantité de ressources trop importante pour une tâche qui ne les requière pas, permettrait à l'individu de s'économiser. Ainsi, dans le cas d'une conduite traditionnelle en ville, lors de laquelle un animal traverse la route devant le véhicule, les ressources disponibles du conducteur pourraient lui permettre de réagir promptement et éviter l'accident. En revanche, la traversée de ce même animal sur une route de campagne rectiligne où le conducteur n'a rien eu à faire depuis plusieurs minutes pourrait être beaucoup plus problématique. La capacité attentionnelle du conducteur s'étant adaptée à la situation et étant donc inférieure à la normale, l'effort à fournir par le conducteur dans un laps de temps court pour réagir suffisamment tôt pourrait être trop important. Ceci entraînerait un délai supplémentaire dans le temps de réaction du conducteur et le choc pourrait ne pas pouvoir être évité.

Ce modèle de Young et Stanton (2002) permet de mieux intégrer les données de la littérature expérimentale pour expliquer le fonctionnement de l'attention, notamment les cas de sous-charge cognitive. Il peut être

mis en relation avec la théorie de la charge de l'attention (Lavie, 2010). Cette théorie postule qu'une tâche avec une forte demande attentionnelle va engager toutes les ressources de l'opérateur. Dans ce cas, les distracteurs² ne pourront être détectés puisque toutes les ressources auront été allouées à la tâche principale. Mais lors d'une tâche qui laisse à l'opérateur des ressources disponibles, ces ressources résiduelles vont permettre la détection de ces distracteurs. L'intégration des distracteurs va entraîner des erreurs dans la sélection des informations pertinentes pour la tâche, parasiter la tâche principale et faire chuter les performances. Il n'y aurait donc pas de liens linéaires entre la quantité de ressources investies et la performance qui en découle. Les capacités résiduelles peuvent parfois perturber la fluidité du traitement en orientant les ressources sur d'autres opérations, venant interférer avec le bon déroulement de la tâche principale. En revanche, les meilleures performances aux tâches seraient atteintes lorsque toutes les ressources de l'opérateur seraient engagées (Lavie, 2010).

En conduite automobile, cette conception de l'attention se trouve corroborée par plusieurs exemples. Effectuer un trajet en centre-ville nécessite une attention soutenue et un niveau d'engagement dans la tâche de conduite bien plus important qu'effectuer un trajet sur autoroute lorsque le trafic est faible. Si un élément venait faire irruption dans l'une et l'autre de ces situations et nécessitait une réaction rapide de la part du conducteur, celui-ci réagirait sans doute plus promptement dans le cas d'un trajet en centre-ville plutôt que sur l'autoroute. Dans le cas d'un trajet en ville, la taille du réservoir attentionnel serait plus importante pour permettre le traitement d'un nombre plus élevé d'informations. Ce qui ne serait pas le cas dans le cas du trajet sur autoroute lors duquel la monotonie de l'activité de conduite ne nécessite pas un contrôle important ; le réservoir de ressources se serait alors contracté, laissant peu de ressources disponibles au conducteur pour réagir à cet événement soudain.

L'état de vagabondage de la pensée s'articule également bien dans le cadre de ce modèle des ressources malléables puisque le VP peut être vu comme un état permettant de pallier la sous-charge cognitive. La théorie des ressources malléables conçoit la réserve attentionnelle comme capable de s'adapter à la demande de la situation. Cette adaptation se fera dans une certaine mesure, le réservoir attentionnel ne pourra pas se comprimer totalement. Si c'était le cas, nous n'aurions aucun mal à ne penser à rien pendant plusieurs minutes. Or il n'en est rien, il est très difficile pour le cerveau humain de ne rien faire. Il reste toujours une certaine quantité de ressources qui, lorsque la demande de la tâche sera suffisamment faible, seront utilisées en les réorientant vers des pensées ou des réflexions personnelles. Le vagabondage peut ainsi être vu comme une façon d'utiliser les ressources attentionnelles à disposition dans des situations où la demande attentionnelle de l'environnement est faible.

² Un distracteur est un stimulus servant à parasiter l'individu dans la tâche qu'il effectue en détournant son attention de la tâche principale.

Le dernier modèle de performance que nous souhaiterions présenter est celui de la charge mentale (de Waard, 1996). Ce modèle intrique les notions de charge mentale, de performance et de coût cognitif de la tâche. Il existerait deux types de traitement : ascendant ou descendant. Les premiers permettraient de faire circuler les informations des centres inférieurs au centre supérieur sans retour en arrière possible pour l'information. Les seconds permettent un flux d'information des centres supérieurs jusqu'aux centres inférieurs, tout en transmettant des connaissances issues des expériences passées (Corbetta & Shulman, 2002). Les traitements ascendants sont peu coûteux, automatiques, alors que les traitements descendants sont contrôlés et onéreux en terme de ressources. En effet, le coût du traitement cognitif varierait en fonction du degré de contrôle exercé sur la tâche (Perruchet, 1988). Selon le modèle de de Waard (1996), il existe deux types distincts d'effort mental. L'effort mental est à distinguer de la charge mentale dans le sens qu'il n'est plus une caractéristique de la tâche comme l'est la charge, mais se positionne du côté de l'opérateur pour quantifier la difficulté d'une tâche selon les capacités, la motivation et l'état de fatigue de ce dernier (Paas, 1992). L'effort peut alors être de deux types : l'effort pour les tâches qui demandent un traitement de l'information contrôlé et l'effort que l'individu doit fournir pour changer la localisation de l'allocation des ressources (Mulder, 1986). Le premier type d'effort étant référencé comme étant lié à la tâche en elle-même et le second comme étant lié à l'état de l'individu (Cnossen, 1994). Le VP étant une orientation de l'attention de l'individu vers des pensées ou des réflexions personnelles, passer d'un état attentif à un état de vagabondage et inversement nécessite de changer la cible de notre attention. Le conducteur aurait donc à remobiliser ses ressources vers la tâche principale ce qui, selon ces modèles, aurait un délai et un certain coût en ressources attentionnelles (Cnossen, 1994 ; de Waard, 1996 ; Mulder, 1986).

L'attention ne se limitant pas à un concept, elle peut également être étudiée de façon physique en s'intéressant aux zones cérébrales particulières dédiées à la gestion de notre attention. Mais alors, quels sont les supports neurobiologiques de l'attention ? Pour amorcer une réponse, il nous faut maintenant identifier les réseaux cérébraux sous-tendant l'attention.

L'attention est-elle un ensemble de réseaux cérébraux ?

Les activités motrices ou cognitives prennent généralement leurs sources dans le cerveau. Dans le cadre de la conduite, que l'on réfléchisse à l'itinéraire à prendre, que l'on actionne les pédales ou que l'on calcule combien un trajet va nous coûter, chacune de ces actions sera initiée dans le cerveau. Par économie et praticité neuronale, le cerveau n'a pas une architecture ni une fonctionnalité anarchique. Par sa morphologie, le cerveau peut être divisé en lobes (frontaux, pariétaux, temporaux et occipitaux). Chacun de ces lobes possède une structure propre et sous-tend des processus et des traitements particuliers (Figure 2). Le traitement primaire des informations visuelles se fera dans le lobe occipital alors que les informations auditives seront traitées dans le lobe temporal. Les traitements de plus haut niveau sont intégrés dans

différents lobes et il est plus difficile d'avoir une localisation précise de certains états de conscience par exemple ; différentes structures entrant en interaction. Dans une approche intuitivo-déductive et localisationniste, les travaux princeps en neurosciences ont longtemps cherché à mettre en correspondance des types de traitement particuliers avec des zones cérébrales précises. L'objectif était de cartographier le cerveau humain en partant du postulat que chaque zone cérébrale possède un rôle précis et unique.

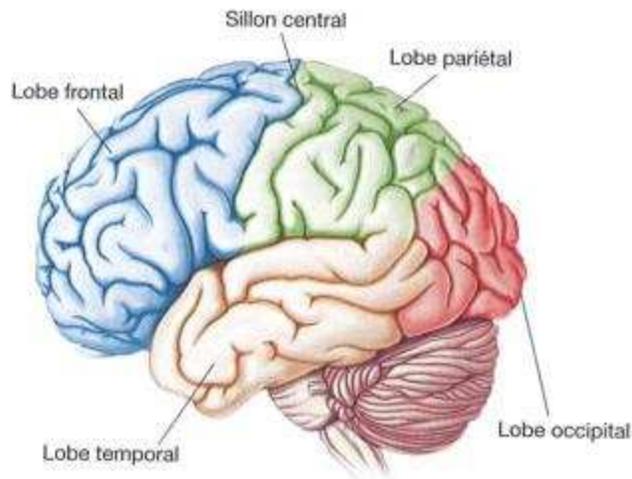


Figure 2 : Lobes du cerveau, tiré de Nieoullon, Paradiso, Connors, et Bear (2016)

Plus récemment avec les progrès techniques en imagerie cérébrale, une nouvelle façon d'appréhender les mystères du cerveau a été décrite. Il ne s'agirait plus de découper le cerveau structurellement, mais plutôt de comprendre la connectivité particulière de certaines zones. Cela a fait émerger la notion de réseau cérébral. Il existerait de multiples réseaux cérébraux composés, chacun, de sous-structures pouvant appartenir à plusieurs réseaux existants. Les réseaux seraient plus ou moins complexes et pourraient être présents dans plusieurs lobes cérébraux à la fois. L'étude du cerveau a donc longtemps été statique, mais l'émergence de nouvelles technologies a permis une étude plus dynamique de cet organe. En effet, l'avancée technique et technologique, notamment en Imagerie par Résonance Magnétique fonctionnelle (IRMf) a permis de mettre en évidence de nombreux réseaux interconnectés. Chaque réseau a une localisation particulière dont les sous-structures le composant sont, le plus souvent, spécialisées dans un certain type d'action (transmission, traitement, intégration de l'information électrique). L'approche consistant à étudier

les réseaux cérébraux a donc l'avantage de s'affranchir du découpage plus grossier³ d'une approche localisationniste.

Les réseaux cérébraux d'intérêt pour la présente thèse sont au nombre de cinq et devaient rendre compte des aspects automatiques et contrôlés de l'attention ou permettre de mieux comprendre la réorientation de l'attention lors du VP. Nous allons donc brièvement décrire deux réseaux responsables des traitements attentionnels à proprement parler : le réseau attentionnel dorsal (en anglais, Dorsal Attentional Network = DAN) et le réseau attentionnel ventral (en anglais, Ventral Attentional Network = VAN). Nous décrirons ensuite un réseau découvert un peu plus récemment : le réseau par défaut (en anglais, Default Mode Network = DMN). Pour finir, nous décrirons deux réseaux qui sous-tendraient le contrôle et la gestion des trois précédents : le réseau de contrôle fronto-pariétal (en anglais, Fronto-Parietal Control Network = FPCN) et le Réseau de Contrôle Cingulo-Opérculaire (RCCO).

Réseaux attentionnels proprement dits

Deux réseaux distincts sous-tendant des besoins différents en terme de capacité attentionnelle ont été mis en évidence (Corbetta & Shulman, 2002). Premièrement le Dorsal Attention Network (DAN) est un réseau attentionnel responsable des traitements descendant, sous-tendant la cognition dirigée par les buts. Dans ce réseau se retrouvent notamment le cortex préfrontal dorsolatéral (en anglais, Dorsolateral Prefrontal Cortex = DLPFC) qui sous-tendrait le cerveau exécutif, responsable du contrôle de l'attention et le lobe pariétal supérieur responsable de la réorientation de l'attention. D'autres structures, telles que le sulcus intra-pariétal et certaines aires de coordination oculomotrice, appartiennent au DAN et permettent le maintien de l'attention spatiale et de la mémoire de travail visuelle. Il est à noter que cette liste de sous-structures composant le DAN n'est pas exhaustive, pour la bonne raison qu'une sous-structure peut appartenir à plusieurs réseaux et s'activer, en parallèle d'un premier réseau, lors du traitement d'une information particulière et s'activer, en parallèle d'un second réseau, pour effectuer une tâche complètement différente. Pour cibler le matériel cérébral jouant un rôle dans un réseau particulier, il s'agit donc de raisonner en terme de probabilité de coactivations des sous-structures composant le réseau, plus qu'en terme de certitudes. Selon le type de tâche et l'état dans lequel se trouve l'individu, différentes structures pourraient être activées ce qui rend difficile une catégorisation rigide des sous-structures appartenant à un réseau. C'est dans cette

³ Le découpage localisationniste postule qu'une aire cérébrale spécifique aura une fonction psychique particulière et l'altération de cette aire altérerait particulièrement cette fonction (Lechevalier, 2008). Cette théorie peut donc être considérée comme grossière ou dépassée notamment à cause du fait qu'une meilleure compréhension du fonctionnement cérébral s'est faite via de nouvelles techniques d'imagerie. Pourtant certaines fonctions comme le langage ou le traitement des stimuli sensoriels (visuels et auditifs, par exemple) sont localisées dans le cerveau et ne pourront être traitées autre part. Il convient donc d'essayer d'articuler au mieux ces conceptions en prenant en compte à la fois le degré de localisation du traitement d'une fonction particulière et les éventuels réseaux cérébraux à l'œuvre.

optique que nous présentons les réseaux cérébraux pertinents et leurs rôles dans l'étude de l'attention et du vagabondage de la pensée, plus que leurs sous-structures cérébrales.

Ensemble, les structures composant le DAN exercent une influence descendante sur l'attention visuelle. Ce réseau est en étroite collaboration avec le Ventral Attention Network (VAN) qui prend en charge les traitements ascendants de l'attention. Le VAN permet également de prioriser et de traiter les informations qui nous parviennent. Ce réseau reste très peu activé pendant les traitements top-down du DAN afin de protéger l'attention dirigée par les buts et la mémoire visuelle à court terme des distracteurs non pertinents. À l'inverse, lorsque des stimuli pertinents pour la tâche en cours apparaissent de façon inattendue, l'activité du VAN sera plus importante pour permettre l'intégration de ces nouvelles informations. Ce réseau est donc responsable de l'orientation du contrôle attentionnel guidé par les stimuli et des mouvements des yeux pour diriger l'attention vers des stimuli saillants (Carretié et al., 2013). En effet, le VAN se compose notamment de la jonction temporo-pariétale, constituée de plusieurs régions distinctes (Corbetta, Patel, & Shulman, 2008), qui sous-tendrait la réorientation de l'attention et le filtre des distracteurs.

Conjointement, le DAN et le VAN gèrent l'ensemble des traitements ascendants et descendants qui ne peuvent ainsi être entièrement attribués à un seul réseau (Chica, Bartolomeo, & Valero-Cabré, 2011). L'interaction de l'activité des réseaux ventral et dorsal, qui se trouvent être amodaux (Macaluso & Driver, 2005) permet également le contrôle dynamique de l'attention selon les objectifs personnels et les stimulations sensorielles perçues (Vossel, Geng, & Fink, 2014).

Lorsque le conducteur est focalisé sur sa tâche de conduite, ces deux réseaux sont particulièrement activés afin de répondre à l'objectif de mobilité (se déplacer d'un point A à un point B : traitement descendant) et aux contraintes de la situation de conduite (collecter et traiter les informations : traitement ascendant).

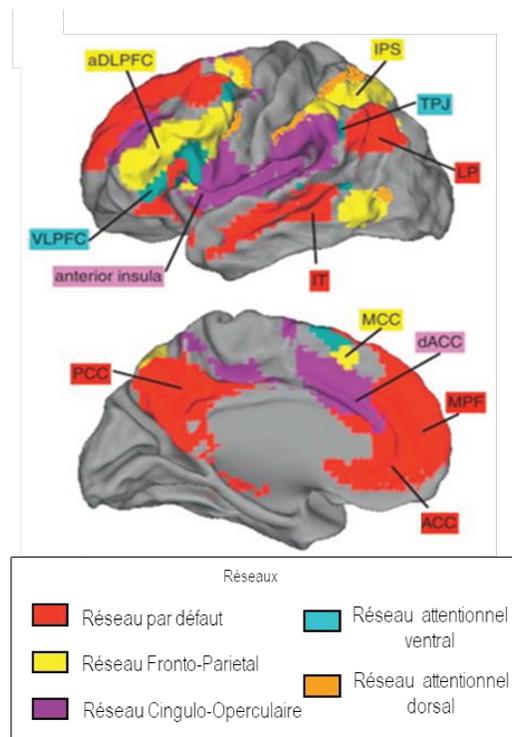


Figure 3 : Représentation des cinq réseaux d'intérêts sur une coupe sagittale du cerveau, remaniée à partir des données de Petersen et Posner (2012) et de Dosenbach et al., (2007). TPJ = Jonction Temporo-Pariétale ; IPS = Sulcus Intra-Pariétal ; SPL = Lobe Pariétal Supérieur ; FEF = Champ Visuel Frontal ; VFC = Cortex Frontal Ventral ; VLPFC = Cortex PréFrontal Ventro-Latéral ; PCC = Cortex Cingulaire Postérieur ; MCC = Cortex Cingulaire Médian ; ACC = Cortex Cingulaire Antérieur

La Figure 3 montre que les réseaux cérébraux peuvent se superposer. Cela est d'autant plus vrai que les activations de ces réseaux et leurs modulations sont dynamiques et très dépendantes de l'état et de la tâche effectuée. Une bonne coordination du fonctionnement de ces deux réseaux est ainsi nécessaire à une conduite en sécurité, mais ne semble pourtant pas pouvoir garantir au conducteur l'absence de périodes de vagabondage de la pensée.

Réseau par défaut

Le DMN est un réseau particulier lorsque l'on s'intéresse à l'inattention et plus particulièrement au vagabondage de la pensée. Ce réseau sous-tend plusieurs aspects de la cognition (Spreng, 2012) impliqués dans le traitement sémantique ou la récupération d'informations en mémoire épisodique (Rugg & Vilberg, 2013). Ce réseau par défaut aura tendance à voir son activité augmenter dans les états de repos, lorsque l'on pense à nous-mêmes (D'argembeau et al., 2005 ; Kelley et al., 2002), que l'on planifie des événements personnels (Spreng, Stevens, Chamberlain, Gilmore, & Schacter, 2010), que l'on réfléchisse à du contenu

émotionnel (Engen, 2017) ou que l'on imagine des événements futurs ou passés (Schacter, Addis, & Buckner, 2007). Les neurosciences ont fourni de nombreuses preuves de l'existence d'un tel réseau (Greicius, Krasnow, Reiss, & Menon, 2003 ; Raichle et al., 2001) et ont mis en évidence de nombreuses sous-structures le composant. Le DMN est en effet composé du cortex cingulaire antéro-ventral, du gyrus frontal inférieur, d'une partie des lobes temporaux antérieurs (Visser, Jefferies, & Lambon Ralph, 2010), du cortex préfrontal médian et du cortex cingulaire postérieur (Leech & Sharp, 2013), activés lors de réflexions sur des objectifs personnels (D'argembeau et al., 2005) et de plusieurs autres sous-structures qui ont, ici, un intérêt moindre.

Ce réseau est non seulement activé lors du vagabondage de la pensée (Stawarczyk, Majerus, Maquet, & D'Argembeau, 2011) et lorsque l'on pense à quelque chose qui revêt une importance personnelle (Gusnard, Akbudak, Shulman, & Raichle, 2001), mais son activation se trouve être anti-corrélée⁴ avec celle des régions cérébrales recrutées lors de traitements sensoriels externes (cortex visuel et auditif primaires par exemple ; (Smallwood, Beach, Schooler, & Handy, 2008). Ainsi, lorsque l'on se laisse aller à des pensées vagabondes, les régions du cortex occipitales impliquées dans le traitement perceptif voient leur activité diminuer (Gorgolewski et al., 2014). L'activité du réseau par défaut est ainsi plus ou moins opposée à celles des réseaux responsables des traitements sensoriels et il se trouve être indépendant des régions des réseaux attentionnels (Fox et al., 2005). L'activation franche du DMN lorsque les individus se disent être dans un état de VP, rend cette structure particulièrement pertinente pour étudier le VP (Christoff, Gordon, Smallwood, Smith, & Schooler, 2009 ; Greicius et al., 2003 ; Mason et al., 2007 ; Stawarczyk, Majerus, Maquet, et al., 2011). De plus, l'épaisseur des régions du cortex préfrontal médian et du cortex cingulaire antérieur, structures appartenant au DMN, serait corrélée à l'occurrence du VP chez les individus (Bernhardt et al., 2014).

Il convient d'ajouter que tous les types de pensée ne sont pas identiques. Il existe une multitude de types de pensée différents, que l'on pourrait classer selon de nombreuses caractéristiques (temporalité, intentionnalité, valence émotionnelle, conscience, but des pensées, etc.). Des pensées hors tâches intentionnelles ne seraient pas tout à fait sous-tendues par les mêmes sous-structures cérébrales que des pensées émergeant spontanément. Cette différence viendrait du fait que le contrôle des pensées et donc leur intentionnalité viendrait de l'activation simultanée des réseaux de contrôle (FCPN) et du mode par défaut (Golchert et al., 2017). Ainsi, l'attention est dirigée vers l'extérieur lorsque l'individu est « attentif » à l'activité de conduite ou à des éléments de l'environnement immédiat ; les réseaux VAN et DAN seront

⁴ L'anti-corrélation correspond à une corrélation négative entre deux dimensions. Ici, si l'activité du DMN augmente, alors l'activité des cortex sensoriels aura tendance à diminuer. L'inverse est vrai, si l'activité des cortex sensoriels augmente alors l'activité du DMN aura tendance à diminuer.

plus actifs selon le type de traitement nécessaire (traitement ascendant ou descendant). Lorsque l'on dirige notre attention vers des pensées, des sentiments ou des réflexions internes, que l'on est dans un état de repos ou occupé à des rêveries, l'activité du réseau par défaut, le DMN, serait plus élevée. Mais comment passons-nous d'un état déconnecté de l'extérieur à un état où nous sommes parfaitement prêts à répondre aux stimulations externes ? Il existerait plusieurs réseaux cérébraux qui permettent le contrôle de l'attention et le maintien en mémoire des informations.

Réseaux de contrôle

Le contrôle attentionnel descendant (top-down) est mené par un ensemble de structures cérébrales. Ces régions se trouvent principalement dans les zones préfrontale, frontale et pariétale. Compte tenu de la recrudescence et de la multiplicité des réseaux mis en évidence comme étant responsables du contrôle de l'attention, nous avons décidé de présenter dans cette partie les deux réseaux qui semblent les plus pertinents au regard de leurs liens avec ceux présentés précédemment : un réseau optimisé pour le contrôle adaptatif rapide (réseau fronto-pariétal) et un réseau permettant le maintien stable des informations (réseau cingulo-operculaire) (Dosenbach, Fair, Cohen, Schlaggar, & Petersen, 2008). Nous ne prétendons pas faire ici, une liste exhaustive des structures permettant un contrôle de l'attention et il semble très probable que d'autres réseaux de contrôle de l'attention existent et se manifestent dans certains types de tâche. Le réseau fronto-pariétal et le réseau cingulo-operculaire permettent toutefois le maintien et le contrôle conscient de l'attention dans le temps et l'espace et vont pouvoir se coupler aux autres réseaux, présentés précédemment, ce qui en fait des réseaux d'intérêt pour l'étude du VP.

Le Réseau de Contrôle Fronto-Pariétal (FPCN) permettrait d'orienter et de contrôler l'attention (Corbetta, 1998 ; Corbetta & Shulman, 2002) et également de mettre en mémoire des informations (Cabeza et al., 2003). Le réseau fronto-pariétal est constitué de plusieurs sous-structures telles que la partie antérieure de lobe pariétal inférieur, le gyrus frontal médian et le cortex préfrontal rostro-latéral, qui interviendraient dans la mémoire de travail et les traitements contrôlés. Ce réseau serait partiellement constitué de sous-structures provenant du DAN proposé par (Corbetta & Shulman, 2002) dont le cortex préfrontal dorso-latéral permettant le maintien de l'information pertinente d'une tâche pendant le délai entre deux stimuli (Miller & Cohen, 2001). Ce réseau combine donc des régions liées au contrôle attentionnel à des régions traitant la rétroaction de la performance ce qui permet d'ajuster les paramètres de contrôle (Dosenbach et al., 2007). De plus, le FPCN se situe spatialement entre le DMN et le DAN et certaines parties de ces réseaux se chevauchent. Ce réseau aurait ainsi la possibilité de se coupler avec le DAN ou le DMN selon la situation pour permettre et entretenir la cognition dirigée par les buts (Spreng et al., 2010). En plus de la compétition entre le DMN et le DAN pour utiliser les ressources, ces deux réseaux seraient en compétition pour se

coupler avec les réseaux de contrôle FPCN et le réseau cingulo operculaire. Cela explique également qu'en règle général, les niveaux d'activité du DMN et du DAN soient anti-corrélés, ils peuvent se coupler avec le FPCN pour, respectivement, organiser des trains de pensées ou traiter et intégrer des informations venant de l'extérieur (Spreng et al., 2010).

Le réseau cingulo-operculaire serait quant à lui impliqué dans certaines prises de décisions et dans le maintien des objectifs de la tâche pendant toute la durée de celle-ci. Il est composé en partie du cortex préfrontal antérieur, du thalamus et du cortex cingulaire antérieur dorsal qui interviendrait dans la prise de décision, l'anticipation de la récompense et l'engagement de l'attention (Dosenbach et al., 2008). Il est évidemment à noter que lorsque sont évoquées les activations de certains réseaux, il ne s'agit pas de quantifier cette activation, mais bien d'avoir une vue schématique des conséquences de l'activation de ces réseaux. Ainsi, lorsque le réseau par défaut sera activé, seul, le conducteur sera très probablement dans un état de vagabondage ou de rêverie (Christoff et al., 2009 ; Greicius et al., 2003 ; Raichle et al., 2001). Le vagabondage de la pensée intentionnel de l'individu se distinguerait du vagabondage de la pensée « traditionnel » lorsque le DMN est couplé à tout ou partie d'un réseau de contrôle (Golchert et al., 2017). Et lorsque nous sommes concentrés sur notre environnement, les réseaux responsables des traitements ascendants et descendants ainsi que les réseaux de contrôle qui nous permettent de contrôler et d'orienter notre attention seront activés.

Une attention toujours dirigée au plus près de l'activité de conduite serait un facteur important dans la réalisation d'un trajet sans risque. Dans la section suivante, nous aborderons l'impact d'une attention dirigée, ou non, vers la scène routière sur les conducteurs ainsi que le risque d'accidents qui peuvent être imputables à ces défauts d'attention.

Résumé : Modèles de l'attention

Notre attention nous guide dans l'ensemble de nos activités quotidiennes, définir l'attention n'est donc pas chose aisée. De nombreux modèles théoriques ont tenté de conceptualiser les mécanismes sous-jacents aux résultats expérimentaux de la littérature. Ce n'est qu'en étudiant les différentes approches et en les faisant résonner à travers différentes conceptions, que nous pouvons nous approcher d'une compréhension du rôle et des caractéristiques de l'attention.

Les modèles présentés dans cette thèse montrent que l'attention agirait comme un filtre atténuant le traitement de stimuli distrayants tout en facilitant le traitement des stimuli pertinents. Cela signifie que nos attentes influent sur nos perceptions. Mais nos capacités attentionnelles sont limitées. Il est donc possible de se représenter l'attention comme un réservoir contenant une certaine quantité de billes, que seraient nos ressources. Ces ressources sont limitées et peuvent être consommées différemment selon les caractéristiques des tâches en cours. C'est pour cela qu'il est difficile d'écrire un message tout en tenant une conversation orale, ces deux actions mobilisant le même type de ressources. De plus, les performances de l'opérateur ne seront pas les mêmes si le niveau de la demande attentionnelle de la tâche est faible ou élevé, s'il est constant ou s'il fluctue drastiquement au cours du temps. En effet, la capacité du réservoir attentionnel semble grossièrement s'harmoniser à la demande de la tâche en cours. Ainsi, s'adapter à de fortes variations de la demande de la tâche demanderait d'adapter notre niveau de vigilance et d'engagement ce qui serait également coûteux en ressources et pourrait générer de la fatigue.

Les recherches plus ou moins récentes révèlent que l'attention serait sous-tendue biologiquement par un ensemble de structures et de réseaux cérébraux. Ensemble, ces réseaux permettent de prioriser les informations et les traitements nécessaires à moindre coût et ainsi d'organiser et de contrôler le cours de nos actions. Ils nous permettent également, par l'intermédiaire du réseau par défaut de résoudre, parfois sans que nous en ayons conscience, nos problèmes personnels. L'activité, à un certain moment, de certains réseaux pourrait renseigner sur la localisation du focus attentionnel du conducteur et donc du degré d'attention porté à la conduite. L'activation particulière de certains réseaux conditionnerait ainsi l'état de l'individu tout en ne lui permettant de traiter qu'une partie des informations. Mais dans certains cas, l'attention du conducteur n'est pas dirigée sur l'activité de conduite. Le conducteur subit alors un défaut d'attention. Cela peut avoir de multiples conséquences, entraîner des erreurs et augmenter le risque d'accident.

Conduite et défauts d'attention

Lorsque nous, êtres humains, pratiquons une activité quotidiennement, nous automatisons les gestes et l'activité en question devient, à nos yeux, réalisable à moindre coût. Cela nous permet de réaliser l'activité en question à moindre coût, mais l'expérience engrangée par les conducteurs peut rapidement être prise pour de l'expertise. La conduite devient une activité familière et maîtrisée, qui semble transformer chaque conducteur en expert de la sécurité routière et des bonnes pratiques au volant. Le biais d'autocomplaisance renforce ces aspects en menant les individus à expliquer les événements positifs par des facteurs qui leur sont propres et les événements négatifs par des événements externes. En découlent des idées reçues, chacun pensant savoir ce que les autres conducteurs font mal et devraient faire pour réduire les risques d'accident. Poussé à l'extrême, ce raisonnement pourrait signifier que la pratique de la conduite remplacerait la connaissance scientifique des processus, des mécanismes et des facteurs impliqués dans la genèse des accidents. Si chacun connaissait réellement les bonnes pratiques de sécurité routière, peu de victimes devraient être à dénombrer sur les routes chaque année.

Pourtant, en 2015 et 2016, plus de 3 400 personnes ont perdu la vie sur l'ensemble des routes françaises, 75 000 personnes ont été blessées et 30 000 d'entre elles ont dû être hospitalisées. En 2016, le coût total de l'insécurité routière (regroupant les décès, les hospitalisations, les dégâts matériels, etc.) a été estimé à 47 milliards d'euros, soit 2.2 % du produit intérieur brut français. Ces chiffres exorbitants sont à mettre en regard de ceux obtenus dans les années 2000 pendant lesquelles plus de 8 000 décès étaient à déplorer chaque année. Un maximum de 18 000 décès sur les routes françaises a été atteint en 1972 (Observatoire National Interministériel de la Sécurité Routière [ONISR], 2017). Depuis, les avancées technologiques et les politiques durcies en matière de vitesse et de consommation d'alcool au volant ont permis de progressivement réduire ce chiffre et d'inverser cette courbe macabre (Figure 4). La vitesse maximale autorisée en agglomération sur les routes a été abaissée en 1974 et en 1990. Avant les années 1970, une alcoolémie de 0.8 g/L de sang était autorisée au volant. Progressivement les politiques ont diminué ce taux d'alcool autorisé pour le ramener, de nos jours, à 0.5 g/L (0.2 g/L pour les permis probatoires). Ces mesures coercitives impliquant une diminution des vitesses prescrites et un seuil de tolérance de l'alcool au volant toujours plus faible semblent permettre de maintenir le nombre de décès sous le seuil de 4 000 chaque année.

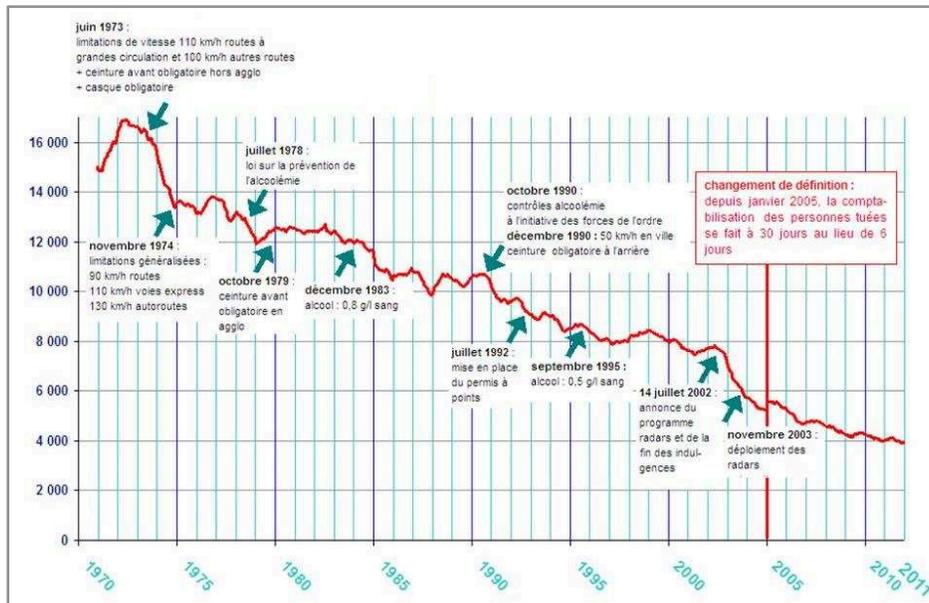


Figure 4 : Évolution de la mortalité routière en France métropolitaine entre 1970 et 2011 (moyenne glissante sur 12 mois). Source : <http://www.securite-routiere.gouv.fr>

Lorsque l'on se place du côté du conducteur et de son fonctionnement, ces mesures prennent sens. Plusieurs études montrent les effets délétères de l'alcool et de la vitesse sur le conducteur et son comportement de conduite (Hamzeie, Savolainen, & Gates, 2017 ; Vollrath & Fischer, 2017 ; Wang et al., 2018). La consommation d'alcool au volant perturbe les capacités de réactions et d'anticipation du conducteur ce qui, selon les modèles de l'attention détaillés plus tôt, laisse suggérer une diminution de ses ressources attentionnelles disponibles à chaque instant. De plus, pour un même trajet, le nombre d'informations à traiter par seconde augmente proportionnellement à l'élévation de la vitesse du véhicule. Consommer de l'alcool ou rouler à une vitesse plus élevée nécessite donc d'engager plus de ressources attentionnelles ; ressources qui pourraient s'avérer manquantes, expliquant la contribution de ces facteurs à la survenue des accidents de la route. Les mesures de sécurité routière relatives à la vitesse et au seuil d'alcoolémie avaient pour but, peut-être sans le savoir, de faire coïncider, à tout instant, les capacités des conducteurs à la demande cognitive inhérente à l'activité de conduite. En diminuant le taux d'alcoolémie autorisée et la vitesse maximale, les conducteurs avaient moins de chance de manquer de ressources attentionnelles, diminuant le risque d'être impliqué ou à l'origine d'un accident de la route.

Si, de nos jours, bon nombre de décès liés à la vitesse et à l'alcoolémie pouvaient encore être évités, d'autres facteurs semblent désormais jouer un rôle important dans la survenue des accidents. Dès le début des années 2000, il s'agissait déjà d'identifier de nouveaux facteurs contributifs des accidents de la route

(Guyot, 2002) L'objectif étant de toujours réduire le nombre de décès sur les routes françaises pour le limiter à 2 000 à l'horizon 2020. Pour cela, il nous faut cerner les différents facteurs impliqués dans la survenue des accidents afin de quantifier leurs fractions de risques dans l'objectif de développer, pour chacun d'eux, des contre-mesures efficaces.

Facteurs de risques

En premier lieu, l'erreur humaine correspondant à une erreur du conducteur et/ou celle d'un piéton serait responsable à 95 % de la survenue d'accidents (Sabey & Taylor, 1980). Outre l'âge, la fatigue physique et mentale ou les moments de la journée et de l'année (les mois de juillet et d'octobre sont particulièrement mortels pour les conducteurs) susceptibles d'augmenter le risque d'accident (Observatoire National Interministériel de la Sécurité Routière [ONISR], 2017), de nouveaux facteurs, qualifiés de néo-facteurs, semblent devoir être pris en compte lorsqu'il s'agit de décrire l'accidentologie. En effet, depuis quelque temps déjà, les études épidémiologiques pointent les États Dégradés de l'Attention (EDA) comme étant contributifs de près de 25 % à parfois presque 80 % des accidents de la route (Hendricks, Fell, & Freedman, 2001 ; Klauer, Dingus, Neale, Sudweeks, & Ramsey, 2006 ; Lee & Strayer, 2004 ; Mosedale, Purdy, & Clarkson, 2004 ; Observatoire National Interministériel de la Sécurité Routière, 2017 ; Sabey & Taylor, 1980 ; Wang, Knipling, & Goodman, 1996). Un tel écart d'estimations s'explique de nombreuses façons.

D'abord, les types d'études qui tentent d'estimer les fractions de risques attribuables aux états dégradés de l'attention sont multiples : études cas-témoin, études de cohortes, etc. Ensuite, les bases de données sur lesquelles se basent les recherches sont-elles aussi, hétérogènes : fichiers exhaustifs ou non, en métropole ou sur la France entière. Les études du rôle de certains facteurs dans la survenue d'accident sont également susceptibles d'ajouter de la variabilité selon que la responsabilité est attribuée rétrospectivement par les forces de police ou les assureurs, en se basant sur les rapports d'accidents, ou qu'elle est déclarée par les conducteurs. Tous ces facteurs empêchent une évaluation claire de l'impact des états dégradés de l'attention sur la genèse des accidents de la route. De plus, cette catégorie « *défaut d'attention* » n'est pas suffisamment précise puisqu'elle regroupe différents états altérés de l'attention. Les différentes études définissent de nombreux états comme étant un « *défaut d'attention* ». On y retrouve, en vrac, de la fatigue, de la multi-activité au volant, des coups d'œil en dehors de la scène de conduite, penser à autre chose qu'à l'activité de conduite voir même parfois, le simple fait de regarder dans les angles morts ou le compteur de vitesse (Hendricks, Fell, & Freedman, 2001 ; Klauer, Dingus, Neale, Sudweeks, & Ramsey, 2006 ; Lee & Strayer, 2004 ; Mosedale, Purdy, & Clarkson, 2004 ; Observatoire National Interministériel de la Sécurité Routière, 2017 ; Sabey & Taylor, 1980 ; Wang, Knipling, & Goodman, 1996). Ces derniers comportements (regarder les angles morts et le compteur de vitesse) s'apparentent plus à de bonnes pratiques nécessaires pour limiter les risques d'accident qu'à des défauts d'attention. Il y a donc un problème dans la définition des états

dégradés de l'attention ainsi que des comportements qui leur sont attachés. Quitter la route des yeux n'est pas forcément problématique, tout comme garder un regard fixe sur l'environnement de conduite n'est pas forcément un comportement adéquat pour assurer la sécurité d'un déplacement. Il semble nécessaire de mieux décrire les points communs et les différences de ces EDA si nous voulons atteindre l'objectif de moins de 2000 morts par an sur la route à l'horizon 2020.

Distraction et Inattention

Rôles dans la genèse d'accidents

Il apparaît difficile d'estimer avec précision la responsabilité des troubles de l'attention dans la genèse des accidents de la route (Pettitt, Burnett, & Stevens, 2005) notamment parce que notre niveau d'attention est en constante fluctuation, que le conducteur n'a pas forcément conscience de son état et que les causes d'accidents de la route peuvent être multifactorielles et donc être imputées aux facteurs les plus manifestes, tels que la vitesse. L'accident peut survenir à cause de la présence de différents facteurs, appelés cofacteurs dont la contribution respective est difficilement quantifiable à cause de la complexité de leurs articulations. Vitesse, défauts d'attention, consommation de psychotropes pourraient agir ensemble à la genèse d'accidents sans qu'il soit facile de déterminer l'impact respectif de ces facteurs. Identifier les facteurs qui sont impliqués dans la genèse d'accident est donc difficile. Des liens causaux doivent être mis en évidence avant de pouvoir aborder la question de l'origine des accidents. Il est ainsi difficile d'affirmer que tel ou tel facteur va causer un accident sans recourir à des études épidémiologiques ou à des études de conduite naturalistes (en anglais, naturalistic driving study).

De plus, il émane de la revue de littérature sur les défauts d'attention une absence de consensus quant aux sous-composantes de cette catégorie des EDA. Les deux états principaux émergeant de cette catégorie imprécise sont la distraction et l'inattention. Mais ces deux concepts souffrent du même mal que les états dégradés de l'attention. Selon le pays, la structure chargée d'effectuer l'étude ou même selon la méthodologie employée, inattention et distraction seront définis différemment, générant un flou scientifique autour de ces deux notions menant à des difficultés pour les chercheurs d'étudier de la même façon et de quantifier l'impact de ces deux états (Regan, Lee, & Young, 2008 ; Regan & Strayer, 2014). C'est pour cela que l'inattention est parfois définie comme l'ensemble des états altérés de l'attention, la distraction étant alors une sous-composante particulière de l'inattention (Regan, Hallett, & Gordon, 2011). La distraction a été définie comme une déviation de l'attention loin des activités critiques pour une conduite sécuritaire vers des activités concurrentes ; un des exemples courants étant l'utilisation du téléphone portable au volant (Strayer, Drews, Albert, & Johnston, 2001). Il existe peu de différences entre ces deux définitions alors que

ces états sont comparés sur leurs capacités à augmenter le risque d'accident. La définition actuelle de l'inattention tend à nous faire penser qu'il s'agit d'une boîte noire, utile pour les classifications, mais dont les contours restent flous. Il est ainsi nécessaire d'entrer dans les détails des définitions pour comprendre comment mettre une limite claire entre ces états d'inattention et de distraction.

Définitions et classifications

Les définitions de Klauer et al. (2006) ne semblent pas permettre de mieux comprendre les états dégradés de l'attention ; plusieurs comportements tels que regarder les angles morts ou vérifier sa vitesse étant considérés comme liés à de l'inattention envers l'environnement de conduite. La taxonomie de Regan et al. (2011) a l'avantage de tenter de réunir différents états dégradés de l'attention ensemble tels que le défaut de contrôle cognitif (Driver Neglected Attention), un compromis cognitif inopérant (Driver Cursory Attention) ou une mauvaise hiérarchie des buts (Driver Misprioritised Attention). L'inconvénient majeur d'une telle taxonomie est qu'il est difficile de comparer les sous-catégories entre elles sur la base d'une caractéristique déterminante. Par extension, certains états particuliers comme le vagabondage de la pensée peuvent à la fois perturber la hiérarchie des buts et rendre inefficace le compromis cognitif tout en divisant l'attention du conducteur (Driver Diverted Attention). Dans quelle catégorie un tel état devrait-il alors être classé ? Face à une tâche dont la caractérisation pourrait être épineuse, et pour parer ces imprécisions, certains préfèrent définir eux-mêmes leur sujet d'étude en s'affranchissant des définitions précédentes et en définissant l'état d'intérêt. Par exemple, pour étudier la réorientation de l'attention vers des pensées induites par une tâche cognitive en conduite il aurait été possible, selon la définition des concepts, de définir le sujet d'intérêt comme étant de la distraction. Mais en utilisant une définition différente, il aurait également été possible de définir cette tâche comme génératrice d'inattention. En décrivant les processus cognitifs sous-jacents, il semble plus avisé d'employer le terme de distractions cognitives (Fort et al., 2010). Dans la présente thèse afin de concilier les objectifs de précision et de clarification de ces états, il nous a semblé pertinent de nous affranchir des précédentes définitions et taxonomies.

Le présent travail ne s'est pas donné pour objectif de proposer une nouvelle taxonomie des EDA qui tenterait de corriger les défauts des précédentes. Lorsque l'individu est focalisé sur des pensées personnelles ou sur les événements de la scène routière (même si ces éléments sont sans lien avec la conduite), l'activité des réseaux cérébraux est différente. Le DMN sous-tendant l'état de VP, dirige l'attention du conducteur sur ses pensées personnelles alors que le VAN et le DAN gèrent les traitements attentionnels proprement dits et porte l'attention du conducteur sur l'environnement proche. Il semblait ainsi pertinent d'introduire la localisation de la réorientation de l'attention du conducteur sans entrer dans le détail des processus cognitifs sous-jacents. Ainsi, la distraction est l'état pour lequel l'attention du conducteur s'est réorientée, de l'activité

de conduite vers des évènements externes sans lien avec la bonne réalisation de la tâche en cours. Une attention particulière peut ainsi être portée sur une conversation avec un passager ou sur la radio (intérieur du véhicule, distraction liée à de la multi-activité au volant) ou sur un usager de la route ou un objet de l'environnement (extérieur au véhicule). Mais regarder un piéton sur le trottoir que l'on pense avoir reconnu (distraction puisque sans lien avec la bonne réalisation de l'activité de conduite) est différent de regarder un piéton qui semble s'engager sur la voie pour traverser (détournement du regard de la route nécessaire pour la sécurité de l'activité : le conducteur est attentif à la conduite). Cette définition de la distraction est donc qualitative et nécessite une prise en compte fine du contexte de conduite.

À l'inverse, l'inattention du conducteur correspond à l'état pour lequel l'attention de ce dernier a été endogènement réorientée (vers des pensées ou des sentiments personnels, par exemple). D'autres EDA particuliers tels que la perte de vigilance ou des états induits par la consommation de psychotrope ne correspondent pas à de l'inattention, puisque ces états n'engendrent pas de réorientation de l'attention de l'individu, à proprement dit. Il s'agirait plutôt de facteurs qui vont, à la fois perturber le contrôle cognitif et abaisser la quantité de ressources disponibles et donc diminuer les chances d'une conduite sûre. Il est important de garder à l'esprit que ces facteurs ne sont pas de l'inattention à proprement parler, mais peuvent faciliter la génération de vagabondage de la pensée ou de mind-blanking, par exemple. Le vagabondage de la pensée correspond à une réorientation de l'attention vers des pensées et des sentiments personnels (Smallwood & Schooler, 2015) alors que l'état de mind-blanking, correspond à une incapacité à se souvenir, après-coup, de ce à quoi nous pensions (Ward & Wegner, 2013). Dans cet état de vagabondage de la pensée, peuvent se retrouver différents états qui seront abordés plus tard dans ce document, dans la partie portant sur les différents Types de pensée.

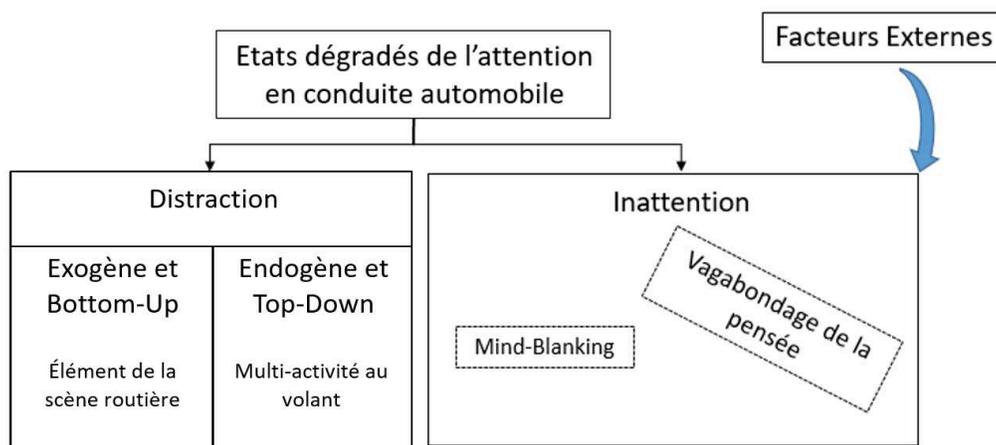


Figure 5 : Schéma représentant les liens entre différents états dégradés de l'attention. Certains facteurs tels la fatigue ou la consommation de substances psychotropes peuvent contribuer à générer de l'inattention

L'inattention et la distraction au volant vont concurrencer l'activité principale de conduite pour l'allocation des ressources cognitives et attentionnelles du conducteur, ce qui va obliger ce dernier à diviser son attention entre deux tâches. Être distrait ou inattentif est donc coûteux en termes de ressources attentionnelles puisque ces états vont puiser dans les ressources disponibles du conducteur en laissant une quantité amoindrie pour la conduite. L'adéquation entre les ressources disponibles et la demande cognitive de la tâche est alors perturbée, les performances de conduite et le niveau d'attention du conducteur sont directement impactés et le risque d'accident augmenté. Cependant, les études épidémiologiques récentes comparant les fractions de risques imputables à l'inattention et à la distraction dans la genèse d'accidents montrent que ces deux états seraient responsables d'une part quantitativement équivalente des accidents de la route (Galera et al., 2012) tout en impactant différemment les conducteurs et la gestion de leur attention (He, Becic, Lee, & McCarley, 2011; Liang, Lee, & Reyes, 2007). Une meilleure compréhension de l'inattention au volant apparaît comme un enjeu important de sécurité routière.

Conséquences des EDA sur les conducteurs

Au niveau comportemental, la distraction au volant génère une augmentation des déviations latérales de la voie (Drews, Yazdani, Godfrey, Cooper, & Strayer, 2009 ; Engström, Johansson, & Östlund, 2005 ; Jamson & Merat, 2005), une augmentation du nombre de regards hors de la route (Kaber, Liang, Zhang, Rogers, & Gangakhedkar, 2012 ; Liang & Lee, 2014 ; Liang, Reyes, & Lee, 2007), une réduction du temps inter véhiculaire et de la vitesse (Engström et al., 2005 ; Jamson & Merat, 2005). Le vagabondage de la pensée perturbe également le contrôle du véhicule par le conducteur en diminuant les micros-régulations de la vitesse et en augmentant le nombre de sorties de voie (Lemercier et al., 2014). Les temps de réaction du conducteur sont augmentés, les distances de sécurité (temps inter-véhiculaire) se raccourcissent (Yanko & Spalek, 2014) et la variabilité de la position du regard du conducteur est réduite (He, Becic, Lee, & McCarley, 2011), suggérant des capacités d'exploration visuelle altérées. L'impact différent de la distraction et de l'inattention sur le conducteur s'expliquerait par le fait que ces deux états sont sous-tendus par des réseaux cérébraux différents. Ces différents réseaux cérébraux vont différemment affecter les processus cognitifs et les capacités (Stawarczyk, Majerus, Maquet, et al., 2011) ainsi que le comportement et les performances du conducteur (Robinson & Campbell, 2006).

L'inattention correspond à l'ensemble des états dans lesquels se trouvent les conducteurs après que leur attention se soit réorientée de façon endogène. Mais dans cette catégorie se subdivisent différents sous-états dont le vagabondage de la pensée qui regroupent lui-même, nous le verrons dans la prochaine partie, une multiplicité d'expériences et de types de pensée différentes pouvant, chacune à leurs manières, perturber le conducteur.

Résumé : conduite et défauts d'attention

Compte tenu d'un nombre toujours trop élevé de décès et d'accidents corporels sur les routes, la recherche en sécurité routière continue d'étudier les situations accidentogènes ainsi que les facteurs impliqués pour développer des contre-mesures efficaces. Les évolutions législatives liées à la réduction de la vitesse et de l'alcoolémie au volant ont permis de diviser par cinq le nombre de décès sur les routes françaises en 50 ans. Mais de nouveaux facteurs responsables d'une part, désormais élevée, des accidents doivent être étudiés.

L'inattention et la distraction sont des états dégradés de l'attention qui pourraient être responsables d'un nombre moyen à très élevé d'accidents. La distraction peut être définie comme une réorientation de l'attention du conducteur vers des événements externes à celui-ci, alors que l'inattention correspond à une réorientation de l'attention du conducteur vers des éléments internes (pensées personnelles principalement). Ces deux concepts souffrent d'un manque de différenciation ce qui génère des confusions dans l'étude et la comparaison de ces états, ainsi que dans l'estimation des fractions de risque qui leur sont imputables. Inattention et distraction sont des états proches qui s'apparentent à une double tâche, mais qui semblent différemment impacter le conducteur. La différenciation de ces états revêt donc une importance particulière : les contre-mesures à mettre en place pour chacun de ces EDA pourraient ainsi être très différentes.

En prenant en compte la cible de l'attention du conducteur lorsque celui-ci n'est plus concentré sur la conduite, la présente thèse tente de mieux comprendre l'inattention au volant et plus particulièrement une de ses sous-composantes : le vagabondage de la pensée. Cet état d'inattention à la conduite automobile peut-être néfaste pour le conducteur. Il convient donc de mieux cerner sa définition et ses limites pour trouver des contre-mesures judicieuses à ses effets négatifs sur les conducteurs.

Le Vagabondage de la Pensée

Historique

Bien qu'ayant un intérêt scientifique fort à l'heure où nous écrivons ces lignes, le vagabondage de la pensée (VP) n'a pas toujours été aussi populaire dans le milieu de la recherche. Avant les années 2000, peu d'études se sont intéressées au VP, à ses caractéristiques ou à son rôle dans la baisse des performances des opérateurs dans toutes sortes d'activités. À notre connaissance, les premières études, portant sur le vagabondage de la pensée se sont d'abord focalisées sur l'étude des processus psychologiques sous-tendant la capacité de l'esprit à se déconnecter des événements extérieurs en s'extrayant de l'ici et maintenant (Desimone & Duncan, 1995 ; Posner & Petersen, 1990 ; Treisman & Gelade, 1980). Depuis, une recrudescence du nombre d'études portant sur le vagabondage de la pensée a pu être observée (voir Figure 6).

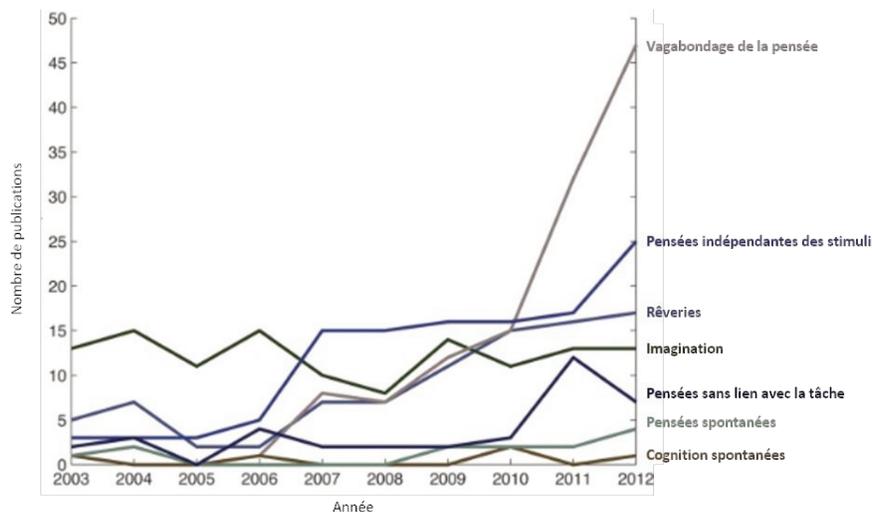


Figure 6 : Évolution de la fréquence d'apparition de recherche portant sur le vagabondage de la pensée ou sur des thèmes connexes entre 2003 et 2012. Graphique tiré de Callard, Smallwood, Golchert, & Margulies (2013)

La croissance du nombre de recherches sur ce sujet pourrait avoir plusieurs origines. D'abord, un intérêt grandissant des chercheurs pour les expériences internes, ainsi que pour des états différents de conscience telle que peut l'être la méditation a permis de voir fleurir différentes études sur le sujet. Ensuite, le développement des technologies et des connaissances dans le champ de l'imagerie et des réseaux cérébraux ont permis de mettre en lumière les différents types d'expériences internes, leurs conséquences ainsi que leurs corrélats neurobiologiques. Par ailleurs, la résolution spatiale très élevée de l'Imagerie par Résonance Magnétique fonctionnelle (IRMf) a rapidement permis de mieux décrire l'activité cérébrale lors de multiples

expériences internes. Le vagabondage de la pensée ne fait pas exception et un réseau cérébral particulièrement impliqué dans le VP a été mis en évidence au début du siècle : le DMN (Raichle et al., 2001). Mais qu'est-ce que le VP ? Peut-on résumer le vagabondage de la pensée à des activations d'une population particulière de neurones ? Où en est-on aujourd'hui de la conceptualisation, de la définition et de la compréhension de cet état ?

Définitions

Tout comme l'inattention et la distraction, le VP n'est pas défini uniformément et sa définition s'est vue progressivement modifiée au fil du temps. La première définition recensée propose de voir le VP comme un état cognitif, dans lequel les pensées qui occupent l'esprit sont focalisées sur un sujet qui n'est pas lié à la tâche en cours (Giambra, 1989). D'autres études ont défini, en d'autres mots, mais de façon équivalente cet état (Berthié et al., 2015 ; Jha, Krompinger, & Baime, 2007 ; Schooler et al., 2014). La déconnexion de l'esprit entre le contenu des pensées et la tâche que l'individu est actuellement en train d'effectuer, est la caractéristique de base du VP, qui sera conservée dans les définitions futures de cet état. Les notions de contrôle exécutif, de conscience ou d'intentionnalité sont parfois intégrées dans certaines définitions puisque cet état serait un glissement du contrôle exécutif loin de la tâche principale ce qui permettrait à l'individu de se concentrer sur des objectifs personnels. Le VP se produit souvent sans intention et sans conscience que notre attention s'est déplacée du focus attentionnel initial (Smallwood & Schooler, 2006).

Toutes ces définitions sont proches et se rejoignent. Elles sont toutefois toutes différentes. Dans la présente thèse, et de la même façon que ce qui se fait lorsque l'on parle d'états difficiles à catégoriser (Fort et al., 2010), le VP est défini comme un déplacement du contenu des pensées loin de la tâche en cours vers des pensées et des sentiments auto-générés. Cette définition, proche de celle formulée par Smallwood et Schooler (2015) aborde, sans la nommer, la problématique du déplacement attentionnel ainsi que celle du découplage perceptif qui correspond à la capacité de l'esprit à déconnecter notre attention de nos perceptions permettant aux pensées et sentiments de devenir les éléments fondamentaux et centraux de la pensée consciente (Schooler et al., 2011). Il y aurait donc deux phases dans le vagabondage de la pensée, un premier glissement de l'attention vers des pensées puis un maintien de l'attention sur le train de pensée doublée du découplage perceptif permettant de protéger l'expérience interne en cours. Au regard des modèles attentionnels, la protection de l'expérience de VP de l'environnement extérieur pourrait se faire par une sous-activation du réseau attentionnel ventral. Les informations externes étant ainsi moins bien traitées et intégrées, l'attention orientée sur les pensées de l'individu serait, au moins partiellement, immunisée du parasitage des informations environnantes. Le VP serait ainsi un état de « mindlessness » (He et al., 2011), par opposition à l'état de « mindfulness », consistant à « porter intentionnellement son attention aux

expériences internes ou externes du moment présent, sans porter de jugement de valeur » (Kabat-Zinn, 2005).

La définition du VP retenue apporte également une dimension intéressante : pour pouvoir être considérées comme du vagabondage de la pensée proprement dit, les pensées doivent être indépendantes du contexte dans lequel elles surviennent. Il ne faut donc pas confondre ce qui est de l'ordre de la distraction externe, où les pensées liées à l'épisode de distraction sont dépendantes d'informations provenant de l'environnement proche et ce qui est de l'ordre d'un amorçage des pensées par l'environnement, susceptible de générer du VP. En effet, un évènement de la scène externe peut amorcer une phase réflexive et réorienter l'attention du conducteur vers ses pensées. Le conducteur aura donc subi un épisode très court de distraction qui, par association des idées et pensées du conducteur se sera converti en VP puisque son attention ne sera plus focalisée sur l'environnement, mais sur ses pensées personnelles.

Il est ainsi difficile de faire une catégorisation parfaite des pensées du conducteur d'autant plus que ces pensées peuvent être inconscientes et nombreuses dans un court laps de temps. L'absence de littérature scientifique sur ce dernier point montre que la quantification du nombre de pensées moyennes de l'être humain par jour est plus que difficile. Dans l'histoire de la psychologie la recherche s'est préférentiellement orientée vers l'étude de « la » pensée plutôt que « des » pensées. La pensée pouvant être comparée au résultat complexe de l'activité cognitive du cerveau, il apparaît difficile de segmenter ce concept afin d'en examiner les caractéristiques.

Le vagabondage est donc à la fois un état courant, que chacun expérience au quotidien, et un état spécifique souvent amalgamé, à tort, avec d'autres états dégradés de l'attention. Afin d'éviter les difficultés de conceptualisation et pour permettre un cadre de référence fiable dans le présent travail de thèse, selon que l'attention du conducteur a été captée par des évènements externes (la radio, un piéton, etc.) ou internes (pensées personnelles principalement), c'est la localisation du focus attentionnel du conducteur qui a servi de critère de décision pour faire la distinction entre le VP et d'autres états dégradés de l'attention comme la distraction. Le VP ne se distingue pas de la distraction uniquement par la définition que l'on en donne, mais bien parce qu'il possède des caractéristiques et des conséquences spécifiques sur les conducteurs.

Caractéristiques

Émergence du vagabondage

Il est difficile d'estimer avec précision la probabilité d'émergence du vagabondage de la pensée et cela pour plusieurs raisons. D'abord, les individus ne sont pas égaux devant le vagabondage de leurs pensées ; certains l'expérience très souvent au quotidien et d'autres très peu. Le VP a tendance à être plus présent chez les

personnes jeunes et les enfants que chez les personnes âgées, mais il n’y aurait pas de différence entre les hommes et les femmes sur leurs propensions à faire l’expérience du vagabondage de la pensée (Burdett, Charlton, & Starkey, 2016 ; Giambra, 1989, 1993). La fatigue et la consommation d’alcool sont également susceptibles d’augmenter la présence de cet état (Kane et al., 2007 ; Sayette, Reichle, & Schooler, 2009). Il est également possible d’augmenter ou de réduire l’émergence du VP en stimulant certaines zones du cerveau (Axelrod, Rees, Lavidor, & Bar, 2015 ; Kajimura & Nomura, 2015). La capacité de la mémoire de travail serait susceptible de moduler la sensibilité des individus à cet état en augmentant ou diminuant l’occurrence du VP (Kane et al., 2007 ; Levinson, Smallwood, & Davidson, 2012 ; Rummel & Boywitt, 2014) alors que l’épaisseur de certaines zones cérébrales serait susceptible de prédire la propension au VP des individus (Bernhardt et al., 2014).

Ensuite, les caractéristiques de l’activité en cours seront déterminantes dans l’émergence du VP. Une tâche peu coûteuse cognitivement, qu’elle soit d’emblée facile ou qu’il s’agisse d’une tâche répétitive ou avec laquelle nous sommes familiers, risque de générer plus de VP qu’une tâche plus complexe demandant une concentration importante (He et al., 2011 ; Kam, Nagamatsu, & Handy, 2014). Au volant, l’émergence du VP augmente également avec la pratique de l’activité de conduite (Yanko & Spalek, 2013) et plus généralement avec le niveau d’expertise de l’individu (Cunningham, Scerbo, & Freeman, 2000 ; Smallwood et al., 2004). Cela pourrait expliquer pourquoi un trajet connu (faire un trajet domicile-travail en voiture, par exemple) est susceptible d’être plus dangereux qu’un trajet que le conducteur découvre (Burdett et al., 2016 ; Yanko & Spalek, 2013) ; la présence de vagabondage pendant un tel trajet pourrait rendre plus dangereuses ces situations. Comme nous l’avons vu, il y a un lien entre coût cognitif d’une tâche et présence du vagabondage. L’un et l’autre ont tendance à varier dans des sens opposés. L’hypothèse de régulation du contexte (Smallwood & Schooler, 2015) suggère que la présence de VP se limiterait à des tâches qui n’exigent pas une attention soutenue et continue. Pourtant la conduite automobile nécessite une vigilance constante et bien souvent une attention soutenue. Avec l’expérience engrangée, la conduite particulièrement chez des individus utilisant souvent leur véhicule ou ayant obtenu leur permis de conduire depuis longtemps, peut se faire de façon mécanique, sans que nous en ayons conscience. Une bonne partie des actions de conduite telles que passer les vitesses, débrayer, vérifier les rétroviseurs, etc. ne nécessite que peu de ressources, expliquant pourquoi l’émergence du vagabondage de nos pensées s’invite si souvent lorsque nous sommes au volant. Mais combien de temps passons-nous, en moyenne, à penser à autre chose qu’à l’activité que nous sommes en train de réaliser ?

Lorsque l’on veut quantifier le pourcentage de temps que nous passons à penser à autre chose que notre activité principale, des écarts importants entre les études sont à constater. Lors de certaines études avec une tâche particulière comme une tâche de mémoire, de réflexion, de lecture, etc., la présence du vagabondage

varie de 25 % (Kane et al., 2007 ; Spronken, Holland, Figner, & Dijksterhuis, 2016 ; Stawarczyk, Cassol, & D'Argembeau, 2013) à 40 % (Yanko & Spalek, 2014), 45 % (Ottaviani, Shapiro, & Couyoumdjian, 2013), 47 % (Killingsworth & Gilbert, 2010) jusqu'à plus de 50 % du temps (Kam & Handy, 2014). Ces différences peuvent provenir, comme nous l'avons vu, de populations hétérogènes, de paradigmes expérimentaux hétéroclites ou même de différentes définitions données à l'objet d'étude. Alors, comment estimer convenablement et en limitant les chances de nous tromper la présence de vagabondage ? La seule étude n'ayant pas proposé de tâche annexe, mais ayant essayé de mesurer dans l'ensemble des tâches de la vie quotidienne l'occurrence du VP est l'étude de Killingsworth et Gilbert, (2010). Plusieurs fois par jour, 2250 personnes venant de dizaines de pays différents (bien que 74 % des répondants étaient états-uniens) ont été questionnées sur leurs pensées et sur l'activité qu'ils étaient en train d'effectuer. Les personnes ont déclaré que leur attention était focalisée sur autre chose que ce qu'ils étaient en train de faire durant 46.9 % du temps. Étonnamment, ce chiffre varie peu avec le type d'activité effectuée, à une ou deux exceptions près (Killingsworth & Gilbert, 2010). Environ la moitié du temps en moyenne, l'individu n'est pas concentré sur l'activité qu'il est en train de faire. Pense-t-il à autre chose (état de VP) ou ne pense-t-il à rien (état de « mind-blanking ») ? Il est difficile dans l'état actuel des connaissances de répondre commodément à cette question.

Lorsque l'on s'intéresse à la conduite automobile, les conducteurs peuvent être dans cet état de VP entre 35 % (Berthié et al., 2015) et 63 % du temps alors que leur attention semble être activement focalisée sur la conduite pendant seulement 15 à 20 % du temps (Burdett, Charlton, & Starkey, 2017). Une telle différence d'estimations s'explique principalement par la méthode utilisée pour quantifier la présence de VP. Berthié et al. (2015) ont demandé à des conducteurs d'estimer la quantité de temps passé en VP pendant leur dernier trajet. Il s'agit donc de données obtenues rétrospectivement et donc potentiellement sensibles à de nombreux biais. Burdett et al. (2017) ont utilisé une méthode différente en demandant aux conducteurs la focalisation de leur attention à un moment bien précis. Cette méthode possède elle aussi des inconvénients (voir Méthode du « Probe-Caught »), mais n'est pas biaisée par le temps qui passe. Il y aurait donc une forte partie de l'activité de conduite qui serait utilisée par les conducteurs pour réfléchir et organiser leurs vies personnelles. Mais pourquoi nos pensées s'éloignent-elles aussi souvent de l'activité de conduite lorsque l'on connaît le potentiel effet néfaste du VP ?

Bénéfices

Pourquoi notre esprit, sachant la dangerosité de l'inattention — parce que nous la connaissons, nous savons qu'être inattentif peut, au mieux, nous faire casser un verre, ou rater une marche dans les escaliers et au pire, nous faire avoir un grave accident de voiture — se permet-il de détourner notre attention de l'activité de

conduite ? Cette prise de contrôle de notre attention, sans permission, peut ainsi sembler étonnante. Pourtant, le vagabondage de la pensée est, nous l'avons vu, très présent au quotidien. L'approche évolutionniste consiste à penser que, si une caractéristique a perduré jusque nos jours et n'a pas disparu, c'est qu'elle bénéficiait à l'individu ou n'avait aucune bonne raison de disparaître. Le vagabondage de la pensée ne semble pas faire exception.

Le VP aurait de nombreuses qualités en nous permettant d'organiser nos vies en planifiant notre soirée ou en construisant mentalement une liste de courses pendant les tâches ménagères ou un trajet travail-domicile. Einstein a dit : « Why is it I always have my best ideas while shaving? »⁵. Combien d'idées scientifiques, artistiques, politiques, etc. ont émergé en cuisinant, en conduisant ou même sous la douche ou aux toilettes. Ces différentes activités sont celles qui ont le plus tendance à être effectuées de façon automatique laissant nos pensées occuper notre attention (Killingsworth & Gilbert, 2010). Et rappelons-nous, les accidents ont tendance à arriver sur les trajets connus. Connus, donc pouvant être réalisés avec le niveau d'attention d'une personne se rendant de sa chambre à la salle de bain (Lachaux, 2018), ce qui libère des ressources pour penser. Des liens entre connaissance du trajet emprunté et émergence du vagabondage pourraient révéler un effet plus important de cet état sur les conducteurs, lorsqu'ils effectuent des trajets routiniers. En l'absence de contrainte sur notre cognition, notre esprit a tendance à s'égarer de façon relativement libre, sans que nous en ayons le plein contrôle (Jessica Andrews-Hanna, Irving, Fox, Spreng, & Christoff, 2017). Ainsi, à la question « pourquoi l'esprit ne reste-t-il pas focalisé parfaitement sur les tâches en train d'être effectuées, même sur les plus routinières ? », la réponse pourrait simplement être que l'esprit peut se le permettre et que nos cerveaux complexes ne s'autorisent que peu de repos, même si nous n'en avons pas toujours conscience.

En permettant aux individus de s'extraire très facilement de l'ici et du maintenant, le VP modifie la réalité de l'individu. Nos pensées, en prenant leur origine dans nos esprits sont difficilement partageables et compréhensibles par autrui et créent, lors du vagabondage, une réalité qui nous est propre. Et ce n'est pas parce que cela ne se passe que dans nos têtes, que cela signifie que ce que nous vivons n'est pas réel (Rowling, 2007). Lors du VP, nos pensées deviennent donc à la fois le focus direct de notre attention et le centre de notre expérience consciente et réelle (Schooler et al., 2011). Lorsque nous nous déconnectons de notre environnement proche, même sporadiquement, en passant de la tâche en cours à nos pensées plusieurs fois par minute, les épisodes de VP augmenteraient notre créativité. Le VP semble agir en tâche de fond, pendant que l'individu effectue une seconde tâche. Ainsi, une courte période de vagabondage permet de donner plus d'éléments créatifs dans une tâche d'imagination (Baird et al., 2012) ou d'être plus efficace à la résolution d'un problème complexe (Abadie, Waroquier, & Terrier, 2013). Donner à un individu, un

⁵ Traduction libre : « Pourquoi mes meilleures idées me viennent-elles toujours en me rasant ? »

moment où il aura une tâche à forte demande cognitive à effectuer, ne lui permettra pas de profiter de ce temps d'incubation. En revanche, proposer un temps de repos sans aucune tâche à réaliser permettrait de générer des pensées et de faciliter la résolution de problèmes. Le meilleur bénéfice des moments d'incubation peut être obtenu lorsque l'on présente une tâche cognitive dont la demande est faible à l'individu (Sio & Ormerod, 2009).

Le vagabondage et la pensée

Qu'est-ce que la pensée ? Une seule thèse ne serait pas suffisante pour appréhender la pensée dans son immense complexité. La pensée prend son étymologie du latin « *pensare* » qui signifie peser, juger. Pour certains, seule la pensée donne au monde son existence (d'Ormesson, 2016). Platon définit la pensée comme le « *discours intérieur que l'âme tient en silence avec elle-même* » (Cordero, 2006). La pensée pourrait donc être comparée à une capacité de réflexion voir à une caractéristique intrinsèque de l'esprit humain (la pensée des animaux non-humains ne pouvant être abordée ici), opérant en marge de sa conscience et capable de lui faire peser les caractéristiques des situations pour opérer des jugements amenant à des décisions satisfaisantes.

Qu'est-ce que le vagabondage ? Le vagabondage est l'activité pratiquée par le vagabond. L'étymologie du vagabond provient du bas latin qui signifie « *vaguer* », changer perpétuellement de lieu. Le vagabond serait imprévisible et en perpétuel mouvement. Dans ses « *Méditations Métaphysiques* », Descartes dit : « *Mon esprit est un vagabond qui se plaît à s'égarer, et qui ne saurait encore souffrir qu'on le retienne dans les justes bornes de la vérité* » (d'Albert de Luynes, 1647). La pensée vagabonde serait donc plaisante et s'opposerait à une réalité limitée, créatrice de souffrance. Descartes voyait l'esprit comme une entité ayant une existence à part entière qui aurait une volonté propre et introduisait le besoin de ce dernier de se déconnecter de l'extérieur.

Étymologiquement, le vagabondage de la pensée serait donc un état dans lequel notre pensée est changeante et dont le mouvement ne peut être prédit. Il serait une capacité de notre esprit de se déconnecter de l'extérieur, nous affranchissant momentanément des limites imposées par le monde qui nous entoure. Mais à quoi servent ces moments d'évasion ? Pourquoi s'affranchir des limites que nous nous imposons les uns aux autres ? Et pourquoi est-ce si difficile de s'empêcher de vagabonder ? Lorsque la pensée est un discours inconscient et silencieux que l'on a avec soi-même et le vagabondage une sorte de chaos, pourquoi ne pas comparer le vagabondage de la pensée à une capacité de l'esprit humain, lui permettant, parfois, de faire émerger à la conscience nos enjeux et nos besoins, restés insoupçonnés jusque-là ?

L'état de VP permettrait également d'organiser nos vies sans que nous ayons à y réfléchir activement en planifiant les futurs événements ou tentant de résoudre nos problèmes personnels (Mooneyham & Schooler, 2013 ; Smallwood & Schooler, 2015). Le vagabondage de la pensée sous-tendrait également des fonctions importantes sans lesquelles nos vies seraient différentes : cette possibilité de s'extraire de l'ici et maintenant de l'individu, d'imaginer d'autres lieux et moments (Nyberg, Kim, Habib, Levine, & Tulving, 2010), la capacité d'inférer ce que d'autres pensent ou ressentent (Frith & Frith, 2005). D'autres postulent que le VP serait indispensable à toute réflexion créative ce qui serait à la base du langage et de toute forme de cognition

complexe. Le VP serait également un moyen facile et amusant de se libérer du stress et de l'ennui (Corballis, 2015).

Le VP serait donc un état utile pour l'individu en lui permettant d'être créatif, de s'extraire de son environnement immédiat en imaginant d'autres lieux et moments ou de résoudre ses problèmes personnels en organisant sa vie, lorsque le contexte le lui permet. Mais en focalisant nos pensées sur nos problèmes personnels, nous nous déconnectons de l'environnement extérieur. Et c'est, le plus souvent, à ce moment-là, que la tâche que l'individu est en train de réaliser est impactée et que les effets néfastes du VP se dévoilent.

Inconvénients

Au quotidien

Tout d'abord, le VP est très souvent associé à une dégradation des performances dans une multitude de tâches de la vie quotidienne (Smallwood & Schooler, 2006). La plupart de nos activités se trouvent impactées par le VP qui aurait l'effet d'une tâche additionnelle. Le VP dégraderait particulièrement les performances des tâches dont la bonne réussite dépend de la supervision et de l'encodage immédiat des informations (Ruby, Smallwood, Engen, & Singer, 2013). C'est ainsi que le VP altère la compréhension lors de tâches de lecture silencieuse ou à voix haute (McVay & Kane, 2012 ; Schooler, 2004 ; Unsworth & McMillan, 2013). La conduite automobile nécessitant la collecte, le traitement et l'encodage des informations est un autre exemple. Mais les risques potentiels d'un décrochage attentionnel lors d'une lecture silencieuse ne sont rien comparés aux dommages possibles lors d'un trajet de conduite.

En conduite

De nombreuses études se sont intéressées aux liens entre pensées hors-tâche et performance, en conduite. La performance ici n'est pas associée à la rapidité, mais bien à l'accomplissement d'un trajet en toute sécurité. Ces études montrent qu'en conduite automobile, le VP semble impacter un spectre large de capacités et de compétences et aurait donc un impact négatif non négligeable sur les conducteurs.

Nous l'avons vu dans la partie précédente portant sur les EDA, les conducteurs qui se trouvent être dans un état de VP, ont tendance à suivre la voiture qui les précède de plus près et mettent plus de temps à répondre à des stimuli périphériques (Yanko & Spalek, 2014). Les conducteurs, lorsqu'ils sont concentrés sur leurs préoccupations personnelles, ont donc tendance à moins respecter les distances de sécurité et à ignorer les informations provenant des côtés de la route. De plus la vitesse du véhicule (Yanko & Spalek, 2013), les temps de réaction des conducteurs (Yanko & Spalek, 2014) ainsi que leurs variabilités (McVay & Kane,

2009) augmentent en VP. De plus, le conducteur ne serait plus capable de bien micro-réguler la vitesse et la position de son véhicule sur la voie (Lemercier et al., 2014). Cela signifie que le conducteur dont l'esprit s'est tourné vers ses pensées aura du mal à maintenir une trajectoire rectiligne et une vitesse constante. Les conducteurs réagissent ainsi moins rapidement et de façon irrégulière, ce qui peut les rendre imprévisibles pour les autres usagers de la route. Toutes ces informations se rejoignent et semblent montrer que la capacité du conducteur à superviser correctement son véhicule est perturbée. Lorsque l'on lie ses résultats issus de l'expérimentation et les modèles théoriques de l'attention (Kahneman, 1973 ; Wickens, 2002), il est probable que le VP agisse telle une double tâche en siphonnant une partie des ressources cognitives du conducteur. Le conducteur serait donc moins à même de surveiller sa vitesse ou à la position de son véhicule ; ses ressources n'étant plus allouées à la tâche de conduite, mais servant à alimenter les pensées du conducteur. Le fort degré d'émergence du VP ainsi que tous ces effets négatifs sur le conducteur et son activité de conduite, ajoutés au fait que les conducteurs ont tendance à sous-estimer la dangerosité de leurs pensées (Berthié et al., 2015), expliqueraient pourquoi être dans un état de VP augmente le risque d'être impliqué (Lagarde et al., 2004) ou responsable d'un accident (Galera et al., 2012).

La présence de vagabondage de la pensée, en impactant l'ensemble des dimensions citées précédemment, génère un sur-risque d'accident. Ce sur-risque pourrait être imputable à la déconnexion entre l'attention du conducteur et son environnement, c'est ce que l'on appelle le découplage perceptif.

Découplage perceptif et performance

Le découplage perceptif est une caractéristique fondamentale et essentielle du vagabondage de la pensée. Lors du VP, notre attention est focalisée sur nos pensées et/ou sur nos sentiments personnels. Le découplage perceptif correspond à une déconnexion de l'attention avec l'environnement extérieur et nos perceptions (Schooler et al., 2011). C'est aussi en cela que la distraction et le vagabondage de la pensée sont différents. Le VP repose sur le phénomène de découplage perceptif, pas la distraction.

Lors du VP, les ressources servent à alimenter nos pensées et cela empêche le conducteur d'avoir une représentation claire de son environnement immédiat. Dans le modèle attentionnel de Treisman (1969), l'attention est vue comme un filtre atténuant les informations non pertinentes pour la tâche. Le découplage perceptif pourrait parfaitement correspondre à cela : l'attention du conducteur étant focalisée sur ses pensées, ce sont ces dernières qui se trouvent être les plus pertinentes dans l'immédiat. Les informations provenant de l'extérieur sont donc atténuées pour ne pas perturber le flux de pensées, centre du focus attentionnel.

Le découplage perceptif est donc entretenu par l'activité de différentes structures cérébrales dédiées à différentes tâches (voir partie sur le Réseau par défaut). D'autres preuves du découplage perceptif peuvent

être révélées en examinant l'activation corticale de certaines zones du cerveau. L'activité dans les zones cérébrales corticales est réduite lors du VP (Chaparro, 2015), signifiant que le traitement de l'information, pour un même son entendu, sera plus superficiel lorsque le conducteur aura son attention focalisée sur ses pensées. Cela témoigne d'une connexion réduite entre l'individu et l'environnement extérieur.

Mais pourquoi notre attention s'éloignerait-elle de la tâche que nous réalisons pour se diriger vers des pensées qui n'ont pas de rapport direct ? Les raisons qui font que notre attention s'éloigne de la tâche en cours sont assez mystérieuses. Nous l'avons dit, le VP a un rôle évolutif de planification, d'organisation et de résolution de nos problèmes personnels (Buckner & Vincent, 2007 ; Smallwood, Nind, & O'Connor, 2009 ; Smallwood & Schooler, 2006) ; l'attention serait donc dévouée à ce qui est le plus pertinent pour l'individu à un moment donné (Randall, Oswald, & Beier, 2014). Lorsque l'esprit en éprouve le besoin et lorsque la situation le permet (lorsque la tâche est simple et peut être effectuée de façon mécanique) l'attention pourrait se réorienter sur des pensées personnelles. Cela conduirait au phénomène de découplage perceptif qui correspond à un désengagement de l'attention loin des entrées sensorielles (Smallwood & Schooler, 2015). Les ressources cognitives apparaissent comme étant nécessaires pour organiser et alimenter le train de pensées pour préserver et protéger l'expérience vécue de l'influence perturbante des événements externes (Baird, Smallwood, & Schooler, 2011). Dans le cas de la conduite automobile, ce sont les événements de l'environnement de conduite qui pourraient venir perturber la réflexion de l'individu, coupant ainsi court à l'épisode de VP.

Le découplage perceptif traduit le maintien du train de pensées et expliquerait pourquoi l'exploration visuelle du conducteur est réduite (He et al., 2011) et pourquoi certains stimuli périphériques sont ignorés (Yanko & Spalek, 2014). Cela constitue une première explication aux baisses de performances associées au VP. Mais le VP n'est pas seulement une réorientation de l'attention ; les pensées générées par cet état doivent être alimentées pour exister puis perdurer. Les pensées n'existent donc pas gratuitement, mais puisent bel et bien dans la réserve attentionnelle du conducteur. Les ressources disponibles de celui-ci sont donc diminuées lors du VP qui entre en compétition avec la tâche principale dans l'allocation des ressources (Randall et al., 2014). Le manque de ressource pour exécuter les deux tâches en même temps génère des erreurs expliquant les baisses de performance lors du VP (Smallwood & Schooler, 2006 ; Unsworth & McMillan, 2013) et l'augmentation du risque d'être responsable d'un accident dans le cas de la conduite automobile (Galera et al., 2012).

Dans l'étude de Galera et al. (2012), l'objectif était de déterminer les liens entre la présence de certains facteurs et états, dont le vagabondage de la pensée, et le risque d'être responsable d'un accident. Le VP dont le contenu serait « hautement perturbant/distrayant » multiplierait le risque d'être responsable d'un accident par 2.12 (Odd-Ratio corrigé : [1.37-3.28]). En comparaison, le VP dont le contenu serait « faiblement

perturbant/distrayant » au moment de l'accident multiplierait le risque d'être responsable d'un accident par 1.06 (Odd-Ratio corrigé : [0.79-1.42]). La présence de VP dont le contenu est hautement perturbant serait plus dangereuse que de dormir moins de 6 heures (OR = 1.98), de consommer des psychotropes (OR = 1.76), de boire de l'alcool (OR = 1.98), ou même d'être distrait (OR = 1.64). Toutes les pensées n'auraient donc pas le même niveau de dangerosité. Le fond ou la forme des pensées pourrait être un facteur essentiel dans l'estimation de la dangerosité des pensées sans lien avec la conduite. Or il existe une multiplicité des types de pensée et d'expériences vécues lors du VP. Est-il possible qu'un type particulier de pensée soit plus dangereux pour le conducteur et devrait donc être évité lors de la conduite ?

Types de pensée

Comment est-il possible de comparer des types de pensée ? Il est nécessaire de trouver des facteurs qui caractérisent différentes pensées pour les regrouper dans des catégories afin de comparer leurs impacts sur les conducteurs. Mais quels facteurs seraient les plus pertinents pour décrire des pensées ? Les premières études sur le sujet ont décrit les épisodes de pensées hors tâche comme étant uniformes en prenant comme point d'ancrage de comparaison la déconnexion avec l'environnement (Antrobus, Singer, & Greenberg, 1966 ; Giambra, 1989).

Depuis quelque temps déjà, la recherche s'emploie à mieux comprendre les points communs et les différences entre des types de pensée distincts. Des études ont proposé de classer les pensées selon deux facteurs : le lien de la pensée avec la tâche principale (Oui vs Non) et la localisation de l'attention sur le bon élément de l'environnement (Oui vs Non), voir Figure 7.

Ce diagramme postule que toutes les pensées pourraient être classées selon ces deux facteurs, générant quatre types de pensée possibles. Des pensées auto-générées ou spontanées signifient que ces pensées remplacent l'environnement externe dans la focalisation attentionnelle de l'individu. Ce changement dans le niveau de concentration et dans le contenu des pensées, n'est pas guidé par un changement dans le contenu de l'environnement, mais plutôt par un ou des changements liés à l'individu lui-même. Il serait assez simple de nous arrêter à cette étape de description des différents types de pensée et de n'en retenir que quatre. Pourtant, avec ce seul aperçu, il nous est impossible de comprendre la différence de dangerosité associée aux vagabondages hautement et faiblement perturbants (Galera et al., 2012). Quels sont donc les facteurs susceptibles d'influencer le degré d'interférence des pensées avec notre tâche principale et pouvant donc expliquer différents niveaux de dangerosité du VP ? Existe-t-il des rationnels cérébraux susceptibles de corroborer ces hypothèses ?

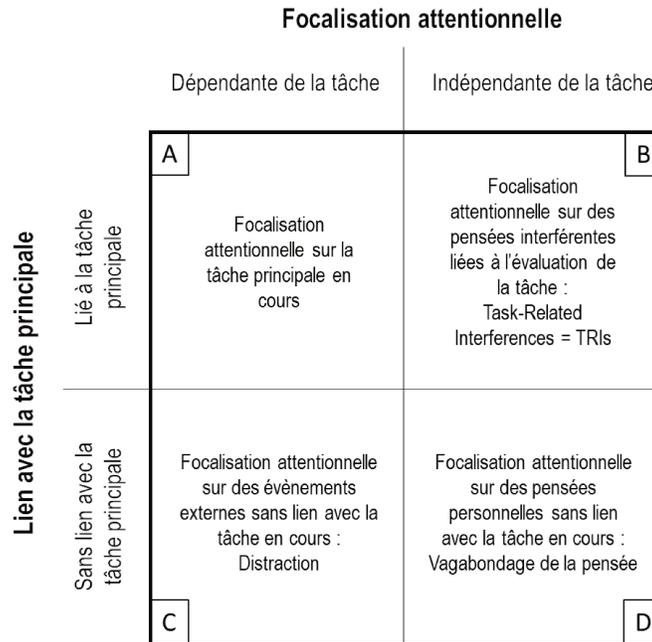


Figure 7 : Schéma montrant la relation entre la focalisation attentionnelle et le lien de la pensée avec la tâche. Selon cette théorie, quatre types d'expériences sont possibles, allant de « Concentration » (A), à du « Vagabondage de la pensée » (D), en passant par des pensées interférentes liées à la tâche (B) et des épisodes de « Distraction » (C), adapté de Stawarczyk, Majerus, Maj, Van der Linden, et D'Argembeau (2011)

Contenu des pensées

Le contenu de nos pensées renvoie au message généré par nos pensées. Lorsque nous sommes dans un certain état, d'humeur négative par exemple, nous aurons tendance à penser à des choses différentes que lorsque nous sommes dans un état plus positif. Nos pensées sont aussi spontanées qu'elles peuvent inclure un large spectre de caractéristiques et de contenus. L'hypothèse de régulation du contenu porte l'idée que le contenu des pensées et de l'expérience vécue par l'individu définiront l'impact de cet état sur les performances de la tâche en cours (Andrews-Hanna et al., 2013 ; Smallwood & Andrews-Hanna, 2013). Il serait difficile de réellement questionner l'impact des caractéristiques des pensées sur les performances et sur la dangerosité d'un trajet de conduite sans tenir compte du contenu de ces pensées.

Temporalité et Émotion

Les pensées vagabondes ont une coloration émotionnelle et une orientation temporelle qui ne semblent pas dues au hasard. Plusieurs recherches évoquent les notions de biais prospectif et rétrospectif. Il s'agit de liens

forts liant la temporalité des pensées à leur contenu émotionnel (Smallwood & O'Connor, 2011). Le biais prospectif montre qu'une majorité de pensées du vagabondage sont orientées vers le futur (Berthié et al., 2015 ; Smallwood et al., 2009). L'hypothèse admise est un rôle du vagabondage de la pensée dans la planification et la résolution de problèmes personnels (Buckner & Vincent, 2007 ; Smallwood & Schooler, 2006). La proportion de pensées dirigées vers des événements futurs varie avec les études, mais est d'environ 50 % (Baird et al., 2011 ; Berthié et al., 2015). Cela signifie, qu'en moyenne, une pensée sur deux sans rapport avec ce que l'individu fait, est dirigée vers des événements à venir. La proportion de pensées orientées vers le passé est d'environ 12 % et la proportion de pensée présente d'environ 30 % (Baird et al., 2011). Les pensées sans orientation temporelle représenteraient environ 11 % des pensées (Smallwood & Schooler, 2015) et seraient différentes des pensées présentes, temporellement orientées. Il s'agirait de pensées philosophiques ou de réflexion sur l'orthographe d'un mot, par exemple. Ces derniers types de pensée sont assez présents dans les expérimentations ; les participants peuvent avoir tendance à se demander quels sont les objectifs de l'expérimentation ou la quantité de temps restant avant la fin de celle-ci. Les pensées présentes sont souvent amalgamées avec les pensées sans focus temporel ce qui génère des imprécisions dans la quantification des pensées temporellement orientées. En règle générale, les pensées sans lien avec l'activité que réalise l'individu ont tendance à être orientées vers le futur et ces pensées-là ont tendance à être positives (Ruby et al., 2013 ; Spronken et al., 2016).

Dans ce paragraphe, nous n'avons parlé que des pensées hors-tâches. Lorsque l'on est focalisé sur notre tâche principale, il est naturel que nos pensées soient majoritairement tournées vers le présent : en moyenne 3 pensées sur 4, liées directement à l'activité réalisée sont tournées vers le présent (Andrews-Hanna et al., 2013). Ici, il ne s'agit pas de vagabondage, mais de pensées liées à la tâche en cours et ce que nous pourrions appeler des pensées interférentes (voir Figure 7). Ces pensées interférentes sont souvent dénommées Task-Related Interferences = TRI.

Un second biais régissant les liens entre émotion et temporalité, connu sous le nom de biais rétrospectif est à prendre en compte. Il se trouve que les pensées orientées vers le passé ont tendance à être négatives. On parle le plus souvent de ruminations, qui correspondent à des pensées parasites, qui reviennent souvent dans l'esprit de l'individu et qui semblent aider à la résolution de problèmes personnels. Mais ces pensées qui aideraient à surmonter les problèmes quotidiens auraient une face plus sombre, puisque les personnes venant de divorcer ou qui sont dans une situation de séparation, pourraient multiplier par quatre le risque d'être impliqué dans un accident (Lagarde et al., 2004).

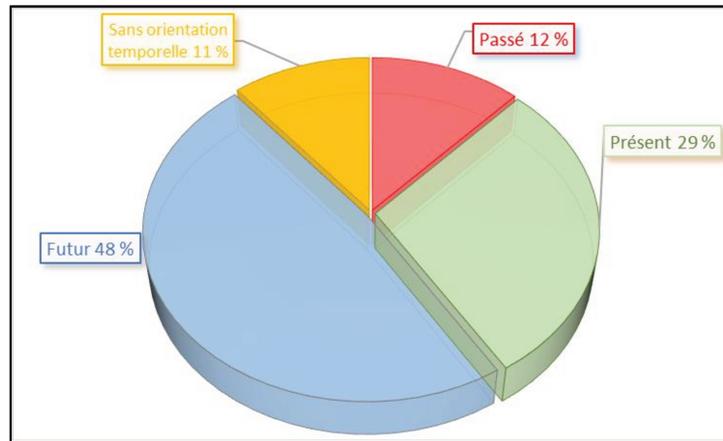


Figure 8 : Diagramme représentant la part de pensées temporellement et non orientées, d'après Smallwood et Schooler (2015)

Ainsi, la temporalité des pensées semble être un facteur prometteur dans l'explication de la dangerosité du VP. En effet, il semblerait que le VP orienté vers le passé soit susceptible d'affecter davantage les performances (Smallwood & Schooler, 2015) et les pensées orientées vers le futur et le passé ne seraient pas médiées par les mêmes sous-systèmes cérébraux (Addis, Pan, Vu, Laiser, & Schacter, 2009). Pourtant, en puisant dans les ressources de la mémoire de travail, nécessaire pour mettre à jour les informations liées à l'activité de conduite, le VP orienté vers le futur devrait également fortement interférer avec la conduite. Il convient donc de prendre en compte la temporalité et la valence émotionnelle des pensées pour mieux comprendre leurs impacts sur le conducteur. Mais d'autres facteurs peuvent venir moduler les liens entre temporalité et coloration émotionnelle des pensées.

Vagabondage et mémoire de travail

Comme nous l'avons vu, le VP est omniprésent au quotidien (Killingsworth & Gilbert, 2010) et la Mémoire de Travail (MdT) pourrait avoir un rôle important dans la génération et le maintien des pensées sans lien avec la tâche en cours (Teasdale et al., 1995). Cela pourrait provenir du fait que le VP altère la mise à jour de la mémoire de travail (Kam & Handy, 2014) et que maintenir le VP nécessite de puiser dans des ressources spécifiques : celle de la MdT (Levinson, Smallwood, & Davidson, 2012). Il y aurait donc compétition entre la tâche principale et le VP pour consommer ces ressources en particulier (Mason et al., 2007 ; Teasdale et al., 1995).

De plus, il semblerait que les personnes qui ont un empan de mémoire de travail plus important ont tendance à être plus sujettes au VP (Kane et al., 2007 ; Levinson et al., 2012 ; Rummel & Boywitt, 2014). Ce résultat est pourtant contredit par plusieurs études qui semblent montrer une relation inverse : la capacité de la MdT serait négativement corrélée à la présence de VP (Conway, Cowan, & Bunting, 2001 ; Robison & Unsworth, 2015). Une méta-analyse portant sur 49 articles et montrant, après prise en compte des particularités des études, a tranché en montrant que les personnes qui ont moins de ressources à allouer à la tâche ont tendance à plus vagabonder (Randall, Oswald, & Beier, 2014).

La relation entre ces deux dimensions reste, malgré cette méta-analyse, floue et indistincte (la taille d'effet étant très faible). D'autres facteurs pourraient venir expliquer ces différences dans les résultats obtenus en modulant l'effet de la capacité de la MdT sur la tendance au vagabondage. Il existe notamment des liens entre la capacité de la mémoire de travail et la temporalité des pensées : les individus qui auraient un empan de mémoire de travail plus important auraient tendance à s'engager plus souvent dans du vagabondage orienté vers le futur (Baird, Smallwood, & Schooler, 2011). Cela renforce encore l'idée que le VP et la MdT entretiennent des relations floues qu'il conviendrait d'étudier en conduite automobile pour mieux comprendre l'émergence du VP.

Intentionnalité et Conscience

Parmi l'ensemble des pensées sans rapport avec la tâche en cours, on trouve les « pensées spontanées », qui supplantent une attention dirigée vers la tâche pour des pensées inconscientes et inintentionnelles (Christoff, 2012). Le groupe des « pensées spontanées » n'est pas uniforme et rassemble, en son sein, le vagabondage de la pensée, les rêveries ou même des épisodes de rappel autobiographiques involontaires. Ces pensées ne sont ni conscientes (jusqu'à ce que l'individu s'en rende compte) ni intentionnelles. Par opposition à ces pensées qui font irruption spontanément dans l'esprit de l'individu, des pensées intentionnelles sans lien avec l'activité principale ont été décrites.

Le fait de se plonger intentionnellement dans des réflexions sans rapport avec notre activité principale postule, déjà, que nous nous sentons capables d'effectuer, en parallèle, deux tâches. Nous nous sentons suffisamment en confiance pour nous permettre de nous déconnecter de l'environnement et de nous plonger dans nos réflexions. L'intentionnalité des pensées semble être un facteur important dans la caractérisation des pensées vagabondes. En effet, comme nous l'avons vu dans la partie sur les réseaux cérébraux, les

pensées hors-tâche intentionnelles ne seraient pas sous-tendues par les mêmes sous-structures cérébrales que des pensées émergeant spontanément. En effet, le couplage du réseau de contrôle FPCN avec le réseau par défaut (Golchert et al., 2017) générerait des états distincts (Smith et al., 2006). Ces deux états semblent provenir d'un fonctionnement cérébral particulier, sous-tendant des processus cognitifs séparés qui pourraient être à l'origine de différents degrés d'interférences avec la tâche de conduite. L'intentionnalité des pensées pourrait donc être un facteur susceptible de mieux expliquer l'influence négative des pensées vagabondes sur la conduite.

De la même façon, les pensées hors tâches conscientes et inconscientes impliqueraient des régions cérébrales différentes (Smith et al., 2006). De plus, lorsque l'on n'a pas conscience de la présence de cet état, les effets du VP semblent être plus prononcés (Schooler, 2002). Mais que pourrait bien vouloir signifier du vagabondage conscient ? Rappelons-nous de la définition du VP : il s'agirait d'un déplacement du contenu des pensées loin de la tâche en cours vers des pensées et des sentiments auto-générés conduisant à un découplage perceptif, qui correspond à un désengagement de l'attention loin de la perception de l'environnement extérieur. Il n'est nullement question d'intentionnalité ni même de conscience des pensées. Des pensées intentionnelles ou conscientes ne correspondent pas à du VP, au sens strict. Mais comment pourrions-nous alors comparer du VP conscient et du VP inconscient ? Au sens strict, cela est impossible. Le VP n'est ni conscient, ni intentionnel. Par confort, nous utilisons, au quotidien, des abus de langage qui nous permettent de conserver nos schémas mentaux et de mieux nous comprendre. Lorsque l'on parle de comparaison entre du VP intentionnel et inintentionnel ou entre du VP conscient et du VP inconscient, il s'agit en fait de comparer du VP, donc non conscient et non intentionnel (donc spontané) avec des pensées ayant d'autres caractéristiques. Voilà pourquoi, nous finissons par comparer du VP conscient et du VP inconscient (Mind-wandering with and without Awareness ; Smith et al., 2006) alors que nous comparons du vagabondage de la pensée au sens strict (selon les définitions posées ici) avec des pensées conscientes ou intentionnelles. Une mise à jour de la Figure 5 est présentée ci-dessous pour intégrer les nouvelles informations liées aux différents types de pensée (Figure 9).

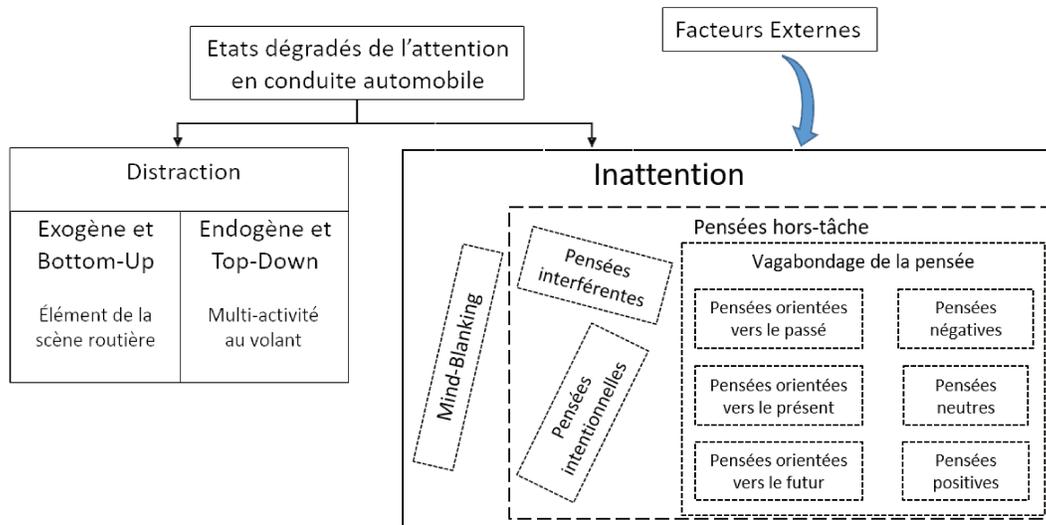


Figure 9 : Mise à jour des liens entre différents états dégradés de l'attention après intégration de certains types et de certaines caractéristiques des pensées

Il a été montré que le degré d'interférence du VP peut être différent ; les fractions de risques d'accident varient fortement selon ce degré (Galera et al., 2012). Pour mieux comprendre ce qui fait que le vagabondage de la pensée pourrait devenir profond et gênant pour le conducteur, il convient de comparer l'effet de différents types de pensée et de leurs caractéristiques pour évaluer leur degré d'interférence avec la tâche principale. Ce degré pourrait donner une indication de la dangerosité de certains types de pensée lors de la conduite. Mais comment pouvons-nous étudier l'esprit vagabond ? Nous savons maintenant que le VP a tendance à aller et venir selon les personnes, le moment de la journée, l'activité réalisée, etc. Le VP est un état fluctuant, dont la présence semble difficile à « capturer ». Il semble donc difficile d'identifier précisément les moments où l'esprit s'est déconnecté du réel. Pour ce faire, il nous faut prendre des précautions méthodologiques qui nous permettraient d'appréhender et d'étudier l'esprit vagabond. Mais dans quel cadre conceptuel pourrions-nous nous situer afin d'améliorer le contrôle expérimental nécessaire à l'étude du VP ? La neuroergonomie, discipline émergente depuis quelques années maintenant, semble prometteuse pour étudier les états internes, dont le vagabondage de la pensée.

Résumé : le vagabondage de la pensée

De prime abord, nous pourrions être tentés de relativiser l'impact néfaste du vagabondage de la pensée : cela ne peut pas être bien dangereux de penser à autre chose pendant quelques instants. Lors de la conduite automobile, si l'esprit du conducteur est focalisé sur ses pensées, le VP perturbera sa capacité à contrôler convenablement son véhicule. Ainsi, en cas de changement de l'état du monde (par exemple, un piéton masqué par un élément de l'environnement décide subitement de traverser la route), le conducteur ne pourra répondre de façon adéquate et n'aura pas le temps de mobiliser ses ressources, particulièrement si l'évènement est soudain. La présence de VP au volant augmente ainsi le risque d'accident.

Le glissement de l'attention loin de l'activité de conduite est sous-tendu par une modification d'activité de certains réseaux cérébraux (voir les Modèles de l'attention) et viendrait alors interférer avec l'activité de conduite générant ce sur-risque. Ce niveau d'interférence pourrait être modulé par le type de pensées dans lequel nous sommes investis ou même selon les caractéristiques de ces pensées. Ainsi, se poser des questions qui ne servent pas directement à la résolution de la tâche, mais qui nous aident à appréhender notre environnement, telles que sont les pensées interférentes (voir *TRI*) pourraient être plus ou moins dangereux pour l'activité de conduite que des pensées liées à de l'organisation telle que construire mentalement une liste de courses ou penser à ne pas oublier d'aller chercher les enfants à l'école. Ces dernières pensées pourraient elles-mêmes, être plus ou moins gênantes selon la coloration émotionnelle de celles-ci (positive ou négative) ou la temporalité dans laquelle elles s'inscrivent. Plusieurs facteurs sont donc à examiner pour évaluer le degré d'interférences de ces pensées non orientées vers la tâche en cours.

Pour cela, une méthodologie particulière ainsi que des mesures susceptibles de nous éclairer sur la présence du vagabondage de la pensée en conduite doivent être recherchées à travers un cadre conceptuel robuste. En utilisant les déclarations subjectives pour caractériser la présence de différents facteurs (temporalité, émotion, conscience, etc.), il semble tout à fait possible d'évaluer l'impact de différents types de pensée sur l'activité de conduite. Une méthodologie de couplage dans la collecte de différentes sources de données a été mise en place. Dans la présente thèse, la méthodologie employée et le recueil des données se sont référés à un cadre conceptuel particulier, celui de la neuroergonomie.

Neuroergonomie

Historique de la neuroergonomie

La neuroergonomie a émergé au début du troisième millénaire en réponse à un besoin particulier : réunir concrètement deux disciplines complémentaires. L'ergonomie et les neurosciences semblent, a priori, être des champs disciplinaires éloignés. Pourtant, leurs conceptions actuelles prennent leur ancrage sur l'humain et son fonctionnement au travail, l'une visant sa santé et son efficacité, l'autre s'employant à comprendre les mécanismes cérébraux à l'œuvre. Les neurosciences étant elles-mêmes une discipline éclectique, elle voit ses nombreuses branches avoir, entre-elles, des frontières disciplinaires relativement floues (neurosciences cognitives, neurologie, neuropsychologie, neurosciences computationnelles, neurosciences sociales, etc.). Les neurosciences ancrent leurs racines dans de nombreux domaines et, pendant longtemps, les chercheurs ont critiqué l'ergonomie et les neurosciences à cause de leurs défauts respectifs sans penser à les réunir. Les neurosciences étaient décrites comme déconnectées du monde réel lorsque l'ergonomie était déconnectée du cerveau (Brehmer & Dörner, 1993). Jusqu'à très récemment, l'ergonomie se trouvait sans cerveau et les neurosciences sans esprit (Durantin, 2015 ; Parasuraman, 2003).

En 2003, Raja Parasuraman propose de réunir ces deux champs disciplinaires en un seul pour mieux étudier et comprendre la gestion et le traitement des tâches complexes de la vie de tous les jours par le cerveau humain (Parasuraman, 2003). Il manquait à l'ergonomie une compréhension des processus sous-jacents aux actions étudiées et aux neurosciences une application de ces processus dans le monde réel (Durantin, Dehais, & Delorme, 2015). La neuroergonomie, en mettant en interaction dynamique les deux disciplines qui la composent, compense les manques de chacune d'elles. Au vu des progrès techniques récents, la réunion des neurosciences et de l'ergonomie s'est vite imposée comme nécessaire pour mieux comprendre et mettre en relation, l'engagement des individus et les processus cognitifs mis en jeu dans divers types de tâche.

Comme il l'a été précédemment énoncé, l'inattention et la distraction sont des états différents. La distraction implique, le plus souvent des regards hors de la route qui, couplés avec des données de conduite, rendent possible sa détection par des algorithmes (Liang & Lee, 2014 ; Liang, Reyes, et al., 2007). Il se trouve que l'inattention ne possède pas ce type de signature ; nous devons donc chercher d'autres signes susceptibles de nous renseigner sur la présence de l'inattention et plus particulièrement du vagabondage de la pensée.

La distraction pourrait être un échec dans la hiérarchie des buts du conducteur ; ce dernier n'est pas concentré sur la bonne source d'information, mais n'est pas non plus totalement déconnecté de l'environnement immédiat. Il est dans un état apte à traiter les informations provenant de l'extérieur, mais ne focalise pas son attention sur la bonne cible. L'individu dans un état de VP aurait quant à lui orienté son

attention sur ses pensées personnelles. Les processus sous-jacents à la distraction et au vagabondage de la pensée pourraient ainsi être différents. Une étude a d'ailleurs montré que les sous-systèmes cérébraux soutenant ces deux états étaient différents. Cela expliquerait pourquoi la distraction et le VP impactent différemment les performances (Robison & Unsworth, 2015).

La neuroergonomie ne s'intéresse pas seulement à l'inattention et à la distraction, mais également aux différents niveaux de charge mentale et d'engagement des opérateurs dans les tâches proposées. La neuroergonomie pourrait permettre d'ouvrir le capot du conducteur pour mieux comprendre comment fonctionne son moteur (Navarro, 2017). La problématique du vagabondage de la pensée en conduite s'articule parfaitement dans ce cadre-là, puisque cet état perturbe l'engagement du conducteur dans la tâche de conduite en réorientant son attention vers des pensées personnelles. En agissant comme une tâche additionnelle à la conduite, le VP est également susceptible d'augmenter l'effort cognitif nécessaire à la bonne réalisation des deux tâches ou à l'élaboration d'une manœuvre d'urgence. Rappelons-nous, dans les modèles cognitifs, l'attention peut être assimilée à un réservoir dont les ressources sont limitées (Kahneman, 1973 ; Wickens, 2002 ; Young & Stanton, 2002). Effectuer n'importe quelle tâche cognitive en plus de la conduite utiliserait des ressources, ce qui augmenterait l'effort cognitif à fournir par le conducteur. De plus, les deux objectifs princeps de la neuroergonomie énoncés par Parasuraman sont (1) utiliser les connaissances obtenues de l'étude des performances humains et des fonctions cérébrales pour créer des technologies et des environnements de travail plus sûrs et (2) aller toujours plus en avant dans la compréhension des mécanismes et des fonctions cérébrales impliquées dans des tâches en situations réelles (Parasuraman, 2003). La neuroergonomie apparaît donc adaptée à l'étude des états internes, que ce soit pour évaluer l'inattention ou le vagabondage de la pensée ou la distraction du conducteur.

Durant ces dernières années, la neuroergonomie n'a pas émergé seule, d'autres domaines se sont développés en parallèle. Depuis de nombreuses années maintenant, l'Intelligence Artificielle (IA) croît et ancre ses racines profondément dans de nombreux champs disciplinaires tels que la santé, les transports, la sécurité, l'industrie de manière générale ou même la reconnaissance d'image. L'industrie automobile ne fait pas exception et le développement poussé de l'IA dans ce domaine pourrait métamorphoser nos habitudes de mobilités. Une IA étant conçue pour être moins faillible, avoir de meilleures capacités de réaction et d'anticipation et ainsi pallier les faiblesses humaines responsables d'une part très élevée d'accidents (Sabey & Taylor, 1980), le bénéfice potentiel d'une automatisation totale de l'activité de conduite permettrait d'alléger considérablement les lourds bilans matériels et humains. Par sa potentielle capacité à réduire les risques liés aux facteurs humains, un engouement s'est créé autour de l'arrivée de l'automatisation dans le domaine des transports.

L'activité de conduite telle que nous la connaissons pourrait être amenée à changer. Elle a d'ailleurs déjà commencé : de plus en plus de véhicules sont équipés de dispositifs automatisés d'assistance à la conduite (National Highway Traffic Safety Administration, 2013). De tout temps, les êtres humains ont tenté d'augmenter leur efficacité dans leurs tâches quotidiennes en améliorant les outils à leurs dispositions. En ce qui concerne la conduite automobile et compte tenu de la part d'accidents imputable à l'erreur humaine, estimée à plus de 90 % (Sabey & Taylor, 1980), l'automatisation de toute ou partie de l'activité de conduite est attendue pour réduire les trop lourds bilans, de l'accidentologie. En effet, comme nous l'avons vu, en 2016 plus de 3 600 décès chaque année sont recensés sur les routes de France. Presque 30 000 personnes sont hospitalisées pour un coût total valorisé à environ 38 milliards d'euros chaque année (Observatoire National Interministériel de la Sécurité Routière [ONISR], 2017), calculé grâce aux valeurs tutélaires permettant une quantification des coûts liés aux accidents. Une diminution du nombre d'erreurs humaines entraînant des accidents par une automatisation intelligente de l'activité de conduite, aurait donc des répercussions humaine et économique non négligeables.

Automatisation et paradoxe

L'automatisation de certaines fonctions semble être, dans certaines disciplines, l'objectif final pour limiter la faillibilité humaine et réduire les coûts et risques d'accident. L'automatisation peut être définie comme l'exécution par une machine, d'une fonction originellement prévue pour être réalisée par l'Homme (Parasuraman & Riley, 1997). Bien qu'une automatisation complète des véhicules aura des répercussions sur l'environnement, sur la congestion du trafic ou même sur la mobilité des personnes âgées et handicapées, nous ne développerons pas ces points particuliers ici, et nous nous concentrerons sur les progrès accessibles par le développement de l'automatisation des véhicules.

Compte tenu du nombre de situations de conduite possibles et de leurs complexités, le risque zéro ne semble pas pouvoir exister. Un nombre d'accidents nul sera très certainement impossible à atteindre. Lors de l'automatisation de certaines fonctions, des défaillances du système, des mésusages, des détournements d'usage et des abus du système sont attendus (Parasuraman & Riley, 1997). Il n'y a pas de raison particulière pour que l'automatisation des véhicules fasse exception. Il semble donc hautement improbable d'éradiquer définitivement les accidents de la route. En revanche, l'automatisation complète des véhicules, qu'ils soient personnels et professionnels, permettra très certainement une réduction drastique du nombre d'accidents et de victimes (Mobility Nation, 2017). Dans cette dernière phrase, le terme « complètement » est le plus important. En terme de conception de systèmes, il existe un monde séparant l'automatisation partielle de l'automatisation complète des véhicules.

Selon la National Highway Traffic Safety Administration (2013) et la Société des Ingénieurs Automobiles (SAE = Society of Automotive Engineers, 2014), 6 niveaux d'automatisation peuvent être distingués allant du niveau 0, c'est-à-dire sans automatisation, jusqu'au niveau 5, dans lequel l'automatisation du véhicule est totale. Il y a donc trois catégories de véhicule possibles : les véhicules non automatisés dits traditionnels, les véhicules semi-automatisés, du niveau 1 au niveau 4 selon les classifications, dans lesquels le « conducteur » doit surveiller l'automatisation et est amené à réintégrer la boucle de contrôle du véhicule en reprenant en main le véhicule lorsque cela est nécessaire. Enfin, il existe un dernier niveau dans lequel le conducteur sort de la boucle de contrôle et n'intervient ni physiquement sur le véhicule ni même pour surveiller le bon déroulement du trajet (niveau 5).

Pour le moment, les véhicules complètement automatisés sont en phase de test. Faire parcourir le plus de dizaines de milliers de kilomètres à ces véhicules d'une nouvelle génération, permet de récolter suffisamment de données pour améliorer les algorithmes et les technologies embarquées. Dans l'objectif d'être capable de créer des algorithmes robustes pour améliorer les conditions d'utilisation et la sécurité des véhicules de demain et ainsi faire la preuve de leur efficacité, les véhicules automatisés sont ainsi confrontés à toutes sortes de conditions (luminosité, trafic, marquage au sol, etc.). En attendant que ces véhicules soient opérationnels, d'autres progrès devront être faits notamment en terme de législation et de sécurité des véhicules. L'arrivée de l'intelligence artificielle dans les véhicules de demain ne sera pas sans risque. Les risques de piratage et de prise de contrôle à distance sont réels si bien que l'actualité a démontré qu'il a été possible d'infiltrer le logiciel embarqué d'un véhicule et de modifier les instructions de celui-ci. Lorsqu'un obstacle est normalement détecté, le véhicule est programmé pour ralentir. Dans le cas d'une prise de contrôle à distance, il a été possible de faire accélérer le véhicule jusqu'à impact avec l'obstacle à grande vitesse. Ce test effectué par des pseudo-hackers n'a pas eu de conséquences importantes, mais démontre la nécessité d'une sécurité informatique à toute épreuve. En plus de ces nouveaux besoins émergents de sécurisation informatique des nouveaux véhicules, certaines lois et conventions devront être modifiées pour permettre à ce type de véhicule de circuler. L'article 8 de la convention de Vienne du 8 novembre 1968 stipule que « Tout véhicule en mouvement ou tout ensemble de véhicules en mouvement doit avoir un conducteur ». Des progrès juridiques sont en train d'être accomplis pour permettre à ces véhicules d'être testés en vue d'un déploiement plus général.

C'est progressivement que des dispositifs automatisés dit (P) ADAS = (Partially) Advanced Driver Assistance System ont émergé dans les véhicules. Ces automatisations ont débuté en améliorant le confort des utilisateurs par les vitres électriques, la fermeture centralisée, les phares antibrouillards automatiques, etc. Ces phases d'automatisation se sont peu à peu étendues à des actions plus proches de la conduite. Certains ADAS tels que le freinage (Muhrrer, Reinprecht, & Vollrath, 2012) ou l'évitement d'urgence

(Heesen et al., 2014) permettent déjà de réduire le risque d'accidents sur les routes. Il existe donc de plus en plus de systèmes d'assistance ; le niveau d'automatisation des véhicules est donc en augmentation progressive et le rôle du conducteur pourrait bien être sur le point de changer (Damböck, Weißgerber, Kienle, & Bengler, 2012).

Dans un futur proche dans lequel une machine contrôle certaines actions ou parties de l'activité de conduite, le conducteur pourrait avoir pour tâche de surveiller ce système. Lorsque cela s'avère nécessaire, l'automatisation pourra décider qu'il est temps que l'opérateur humain reprenne le véhicule en main, des interactions harmonieuses entre l'Homme et la machine éviteront très probablement des situations accidentogènes. Une augmentation du niveau d'automatisation entraîne, bien souvent, une diminution de la charge mentale pour les conducteurs (Parasuraman & Riley, 1997). Or, la sous-charge cognitive entraîne un défaut de surveillance du système, une augmentation de l'émergence du VP (Casner & Schooler, 2014 ; He et al., 2011) et une moins bonne conscience de la situation (Young & Stanton, 2002). De plus, les systèmes automatisés mal ou moyennement bien conçus peuvent conduire à des situations pouvant se résumer à « 99 % d'ennui, 1 % de terreur » (Marquart, Cabrall, & de Winter, 2015). Cette maxime renvoie au fait que le conducteur ayant pour tâche de superviser le système va être confronté à une sous-charge mentale constante pendant 99 % du temps et à la terreur à cause d'une soudaine surcharge dans les cas d'urgence. Lors d'une situation de sous-charge, la taille du réservoir attentionnel des conducteurs serait réduite (Young & Stanton, 2002), générant une quantité faible de ressources disponibles, ce qui engendrerait des situations de terreur pour les conducteurs lors d'événements soudains. Ces situations d'urgence peuvent correspondre à la nécessité d'une reprise en main rapide par l'opérateur humain. Cette reprise en main (pour les niveaux d'automatisation compris entre 1 et 3) implique une transition entre l'activité annexe de l'opérateur et la prise de contrôle du véhicule. L'opérateur pourrait alors ne plus avoir les ressources suffisantes pour ramener son attention sur la conduite afin de pouvoir réintégrer correctement la boucle de contrôle. Cela pourrait engendrer de nombreux accidents d'autant plus que la propension au vagabondage de la pensée augmente avec une tâche dont la demande est plus faible (He et al., 2011). Alors comment peut-on demander aux conducteurs utilisant ces systèmes automatisés, d'être prêts à reprendre le véhicule en main à n'importe quel moment tout en sachant que le vagabondage de la pensée sera plus fréquent et donc plus difficile à gérer ? Il s'agit là d'un paradoxe de l'automatisation.

Et qu'en est-il des situations de conduite inattendues ou d'urgence ? Face à un danger imprévisible ou à une défaillance du système, l'automatisation de niveau 3 sera très certainement programmée pour déléguer le contrôle du véhicule à l'opérateur. Ce dernier devra rapidement abandonner son activité secondaire (écouter de la musique, lire un livre, vagabonder en pensées, etc.) pour être capable de reprendre en main le véhicule dans une temporalité stricte. Mais comment une personne qui, au mieux, supervise le système et dont

L'attention pourrait ne plus se situer sur l'activité de conduite, pourrait reprendre convenablement et en toute sécurité le contrôle du véhicule ? Il a été montré à maintes reprises, les effets néfastes du vagabondage de la pensée ainsi que certains effets pervers de l'automatisation. En effet, le risque de collision par l'arrière est quatre fois plus élevé lorsque l'automatisation est mal conçue, qu'avec une conduite manuelle (Stanton, Young, Walker, Turner, & Randle, 2001) et la reprise en main est très souvent associée à des freinages et des mouvements de volants tardifs (Dambock, Weißgerber, Kienle, & Bengler, 2013 ; Merat & Jamson, 2009).

Comme nous l'avons expliqué précédemment, le VP est un état pouvant perturber la conduite et la reprise en main d'un véhicule (Young & Stanton, 2002). Lorsque l'esprit du conducteur vagabonde, ce dernier n'est plus à même d'avoir une bonne représentation de la situation, les efforts cognitifs qu'il fournit sont au service de ses pensées auto-générées. Le coût cognitif supplémentaire engendré pour ramener son attention vers l'activité principale et reprendre le véhicule en main pourrait ainsi devenir trop important notamment lors de fortes contraintes temporelles. Ce coût cognitif important associé à une situation d'urgence pourra faire échouer la reprise en main et provoquer un accident. Des études rapportent que les informations sont moins bien traitées lorsque le véhicule est partiellement automatisé. En effet, l'amplitude de l'onde P300 des potentiels évoqués cérébraux auditifs était réduite ce qui indiquerait une quantité de ressources moindre à allouer au traitement des stimuli visuels (Solís-Marcos, Galvao-Carmona, & Kircher, 2017). Ces résultats sont en adéquation avec les liens de proportionnalité existants entre émergence du VP et degré d'automatisation (Solís-Marcos et al., 2017).

Que le conducteur soit perdu dans ses pensées lors d'une conduite manuelle ou automatisée, les potentiels effets néfastes du VP ne sont plus à démontrer. Nous l'avons vu, le VP n'a pas besoin de l'automatisation pour poser des problèmes aux conducteurs (Galera et al., 2012). Le vagabondage de la pensée, de par sa capacité à mobiliser ou à détourner notre attention et à puiser dans le réservoir de ressources du conducteur, l'étude du vagabondage de la pensée en conduite est un sujet d'étude convaincant pour la neuroergonomie (Durantin, 2015 ; Durantin et al., 2015 ; Roy, Gateau, Bovo, Dehais, & Ponzoni Carvalho Chanel, 2016).

Neuroergonomie et vagabondage de la pensée

Nous l'avons rappelé au début de ce manuscrit, environ 95 % des accidents de la route surviennent à cause d'une erreur humaine, que ce soit celle du conducteur ou d'un piéton (Endsley & Kiris, 1995). Ces erreurs semblent le plus souvent provenir d'une inadéquation entre les capacités du conducteur à chaque instant et la demande inhérente à l'activité de conduite. Un rapport harmonieux et proportionné entre le coût de la tâche et les capacités du conducteur à chaque instant ainsi qu'un niveau d'engagement constant et suffisant semblent être les meilleurs prédicteurs d'un trajet sûr. C'est également pour cela que la charge mentale et

l'engagement dans les tâches sont au cœur des problématiques en neuroergonomie. De nombreuses études ont ainsi étudié, principalement en conduite automobile et dans l'aéronautique, les corrélats cérébraux de l'engagement (Durantin et al., 2015), les signatures physiologiques et comportementales de certains états internes pour mieux les comprendre (Ahn, Nguyen, Jang, Kim, & Jun, 2016 ; Gabaude, Baracat, Jallais, Bonniaud, & Fort, 2012 ; Ottaviani et al., 2014).

La neuroergonomie ancre ses racines dans les corrélats et les mécanismes cérébraux liées aux états internes ainsi que leurs interdépendances avec la performance, lorsque le cerveau est en action. Pour mieux comprendre comment le VP interfère avec l'activité de conduite ainsi que les liens entre présence de VP, mécanismes cérébraux à l'œuvre et les performances obtenues, l'utilisation de mesures physiologiques permet l'obtention d'informations plus ou moins directes sur le fonctionnement du cerveau ainsi que sur l'état dans lequel se trouve le conducteur. La neuroergonomie reconnaît donc deux types de mesure physiologiques : les mesures directes, celles qui sont collectées directement à partir de l'activité cérébrale et les mesures psychophysiques, plus indirectes et éloignées, qui doivent apporter la preuve de leur lien avec l'activité cérébrale (Parasuraman, 2003). Le premier type de mesure, en donnant des informations directes sur l'activité du cerveau, sera toujours privilégié au détriment du second. Les mesures physiologiques indirectes (rythme cardiaque, pression sanguine, conductance cutanée, etc.) permettent d'obtenir des indices moins complexes à collecter. Mais ces mesures peuvent être considérées comme un raccourci et devront être mises en correspondance avec l'activité du système nerveux central pour attester de leurs rationnels cérébraux. Il s'agit là d'une différence majeure entre la neuroergonomie et la psychophysique (Parasuraman, 2003).

Plusieurs étapes doivent être franchies avant de pouvoir interpréter et comprendre les états internes des conducteurs en utilisant des mesures objectives (psychophysiques et comportementales). Chercher des marqueurs spécifiques du VP avec une méthodologie adaptée est nécessaire. La neuroergonomie, par ses aspirations conceptuelles et par sa méthodologie, se prête assurément à l'étude du VP. La philosophie de la neuroergonomie pousse les chercheurs à combiner différents types de mesure pour avoir un aperçu représentatif de ce qui se passe pour l'individu lorsque son cerveau est dans un certain mode d'action. Les mesures cérébrales peuvent, en effet, fournir plus d'information lorsqu'elles sont couplées avec des mesures comportementales (temps de réaction, taux d'erreur, etc.) ou psychophysiques (rythme cardiaque, conductance cutanée, etc.). Il est donc important de combiner différentes mesures pour obtenir à la fois une vue d'ensemble représentative de la situation et des indices cérébraux et psychophysiques sensibles et précis. La neuroergonomie cherche donc toujours à se rapporter à des mesures liées au fonctionnement du cerveau et du système nerveux central, tout en ne négligeant pas les mesures plus périphériques, susceptibles d'apporter des informations précieuses et complémentaires sur l'état du conducteur.

Ainsi, la visée à long terme est l'anticipation des épisodes potentiellement accidentogènes, pouvant trouver son origine dans le vagabondage de la pensée du conducteur. Pour cela, faire de la supervision des conducteurs et pilotes est une méthode qui apparaît efficace (Brookhuis & de Waard, 2010 ; Liang et al., 2007 ; Liang & Lee, 2014) et qui pourrait être appliquée au VP pour mieux comprendre son impact sur les conducteurs. Pour cela, l'utilisation des connaissances et des mesures issues de la neuroergonomie pourraient permettre d'obtenir des signatures précises dans les signaux physiologiques et les données comportementales du conducteur lorsque celui-ci se trouve dans un état de VP, ce qui pourrait permettre par l'utilisation de telles mesures de connaître l'état de l'individu. Cette méthode de couplage permet, par la collecte simultanée de données subjectives, physiologiques et comportementales d'inférer les états mentaux et leurs signatures objectives (Smallwood & Schooler, 2015).

Approche et mesures en neuroergonomie

Mesures subjectives

La façon la plus classique d'évaluer le niveau de charge mentale, d'engagement ou le degré d'attention porté à une tâche consiste à demander à l'individu, ses impressions et ressentis. Ainsi de nombreux questionnaires et échelles ont été construits pour permettre aux individus d'auto-évaluer le niveau de charge mentale, les émotions ressenties ou le degré d'attention portée à l'activité de conduite.

Comme nous l'avons déjà dit, les niveaux d'attention et de vigilance d'un individu fluctuent fortement selon un nombre important de facteurs. Les recherches sur le VP ont tenté de trouver des parades à ces fluctuations d'attention et de niveaux de conscience en proposant des méthodologies adaptées afin d'indiquer avec le plus de précision possible, la présence de cet état. Les données subjectives sont soumises au paradoxe de l'introspection : les expériences internes sont subjectives et indiscutables pourtant elles sont empiriquement impénétrables (Schooler & Schreiber, 2004). Plusieurs possibilités pour obtenir des informations sur le niveau d'attention ou sur les caractéristiques des pensées des conducteurs ont été proposées afin de contourner, au mieux, ce paradoxe.

Méthodes rétrospectives

Historiquement, les premières recherches sur le VP ont utilisé des méthodes rétrospectives. Des questionnaires et/ou entretiens sont utilisés à la fin de la tâche proposée et laissent toute latitude au participant d'une expérimentation de renseigner son degré d'attention ou le type de pensées dans lequel il était impliqué (Baird et al., 2011). Ces questionnaires ont été utilisés de tout temps dans de nombreux paradigmes afin de caractériser l'état interne de l'individu (niveau de charge mentale ou de stress, émotions,

etc.). Il est donc possible d'utiliser des informations dites subjectives, issues de l'auto-déclaration, pour caractériser les dernières secondes, minutes voire même les heures écoulées. Une telle approche a l'avantage de laisser indemne la dynamique de la tâche en n'interrompant pas le participant (Barron, Riby, Greer, & Smallwood, 2011). Cette méthode n'est pas parfaite et peut-être fortement biaisée si la tâche est longue ; les participants peuvent ne plus se souvenir précisément des informations d'intérêt et avoir tendance à les déformer. D'autres méthodes sont venues compléter ces déclarations a posteriori, pour pallier ses faiblesses.

Méthode de l'auto-déclaration

La méthode de l'auto-déclaration est également une méthode d'étude du VP subjective, puisqu'il est demandé au participant de notifier (verbalement ou par un appui bouton, par exemple) le moment lors duquel, il se rend compte que son attention s'est déplacée sur ses pensées au détriment de l'activité de conduite. Cela présuppose que la déclaration effectuée ne pourra se faire que lorsqu'il aura pris conscience du décrochement de son attention avec l'extérieur. Avec ces seules informations, nous pouvons savoir à quel moment la personne s'est rendu compte de son VP, mais il n'est pas possible de savoir quand l'épisode de VP a commencé ni combien de temps cela a duré. Pour savoir cela, l'utilisation de questionnaires plus explicites afin d'obtenir des informations plus précises est nécessaire. Cette méthode de l'auto-déclaration a l'avantage de mettre le participant au centre de la mesure, en le conviant à déclarer le glissement de son attention vers ses pensées personnelles en temps réel. Cette méthode permet également de ne pas perturber la dynamique du protocole, mais ne peut appréhender que les épisodes de VP qui ont émergé à la conscience du conducteur.

Méthode du « Probe-Caught »

La dernière méthode utilisée pour tenter d'attester la présence ou non de VP est celle du « Probe-Caught » qui est difficilement traduisible dans notre langue et qui consiste à arrêter de façon aléatoire ou pseudo-aléatoire les participants dans leurs tâches afin de leur demander leur niveau de concentration, de fatigue, d'émotions, etc. Ainsi, l'expérimentateur peut, toutes les dix secondes ou après plusieurs minutes arrêter la tâche et demander au conducteur où était focalisée son attention. Cette méthode a l'inconvénient de stopper la dynamique de la tâche en cours, mais permet d'avoir des informations précises, qui ne sont pas biaisées ou oubliées si elles n'avaient été rappelées qu'à la fin de l'expérimentation. Cette méthode a également l'avantage de pouvoir capturer tous les types de pensée hors-tâche, ne se contentant pas uniquement des pensées ayant atteint un niveau de conscience suffisant pour pouvoir être rapporté par le participant.

Il est à noter que ces trois méthodologies expérimentales de capture du VP se basent sur des données et des appréciations subjectives. Ces mesures diffèrent sur la méthode et sur la consigne donnée au participant

avant le début de l'expérimentation. Si l'on souhaite utiliser la méthode rétrospective, aucune consigne particulière n'est donnée à l'individu qui devra, après la tâche proposée, renseigner au mieux, son niveau de vigilance, de charge mentale, etc. La méthode de l'auto-déclaration nécessite de demander à l'individu d'appuyer sur un bouton ou de déclarer verbalement ses pensées vagabondes. Enfin, la méthode du probe-caught nécessite, avant le début de l'expérimentation, d'expliquer à l'individu, qu'à chaque fois qu'il entendra un son particulier ou qu'une certaine image apparaît, il devra renseigner la localisation de son attention (son niveau de fatigue ou la valence émotionnelle ressentie, selon l'objectif de l'étude) au moment de la stimulation sensorielle.

Ainsi demander aux conducteurs d'auto-déclarer leurs pensées vagabondes est différent de les interrompre pendant la conduite. La dynamique de la tâche est modifiée, mais pas seulement : la nature même de ce que l'on mesure change selon la méthode employée. Dans le cas où le participant déclare ses pensées, il ne pourra déclarer que les pensées dont il a conscience, qui ont, à un moment, accédé à un niveau de conscience suffisant pour qu'elles puissent être déclarées. À l'inverse, arrêter la tâche pour demander au conducteur le contenu de ses pensées permet d'avoir accès à du vagabondage qui n'a pas atteint un tel niveau de conscience. La méthode employée pour « capturer » la présence du vagabondage doit donc être adaptée à ce que l'on souhaite investiguer.

De plus, lorsque l'on étudie les états internes, il est impossible de connaître l'état dans lequel se trouve l'individu sans lui demander ce qu'il ressent et expérience⁶ durant son activité. Il est donc indispensable d'utiliser ce type de méthode. Ces mesures ne sont pas inutiles, au contraire. Mais, dans l'objectif de faire de la surveillance du conducteur afin d'anticiper des épisodes de VP potentiellement perturbants, les mesures subjectives devront être laissées de côté au profit de mesures plus directes, les mesures objectives. Si l'objectif à long terme est la supervision du conducteur, il serait aberrant d'utiliser les déclarations du conducteur pour connaître son état en temps réel. Pourtant, les mesures subjectives sont indispensables dans toutes les étapes nécessaires pour atteindre cet objectif de supervision du conducteur. Lorsque l'on souhaite connaître l'état du conducteur à partir de mesures objectives, la mise en correspondance entre des patterns des données objectives et des déclarations subjectives pourraient permettre, à terme de se passer des données subjectives et de n'utiliser que les données objectives directes pour caractériser l'état du conducteur.

⁶ Le verbe « expérier » n'existe pas, ou pas encore, dans la langue française. Certains philosophes s'interrogeant sur le langage aiment à montrer que le verbe « expérier » est manquant dans notre langue. Son sens serait différent du verbe « expérimenter » qui traduit une action ou un ensemble d'actions actives et contrôlés. Le sens du terme « expérier » traduit l'immédiateté de l'expérience qui s'impose à l'individu et ne peut être toujours remplacé par « faire l'expérience de » (Madelrieux, 2012). Il a donc été décidé d'utiliser ce terme dans la présente thèse pour mieux rendre compte de l'expérience vécu par l'individu lorsque son esprit s'éloigne de la conduite automobile.

Mesures objectives

Les mesures objectives s'opposent par définition aux mesures subjectives qui nécessitent l'évaluation d'une personne sur son propre état. Les mesures objectives peuvent être plus difficiles à collecter, il ne suffit plus de poser des questions, mais bien d'aller mesurer plus directement les informations d'intérêts. Lorsque l'on souhaite connaître des informations provenant du cerveau du conducteur, l'outillage et la méthodologie seront plus complexes que lorsque l'on souhaite quantifier son temps de réaction, par exemple. Les mesures objectives qu'il est possible de collecter sur le conducteur afin d'obtenir des signatures de certains états internes sont principalement comportementales et psychophysiologiques. Ces mesures peuvent être plus ou moins complexes à collecter selon leurs natures.

Avant d'aborder les différents types de mesure comportementales et psychophysiologiques, et afin de respecter les consignes inhérentes au cadre conceptuel de la neuroergonomie (Parasuraman, 2003), il apparaît indispensable d'aborder succinctement les différents systèmes nerveux et leurs rôles respectifs afin de faire le lien entre l'activité cérébrale et l'activité périphérique de certains organes. La neuroergonomie a toujours pour but de rendre compte des états internes et de leurs liens avec l'activité cérébrale. L'étude du vagabondage de la pensée et de ses caractéristiques doit donc se faire dans ce cadre bien précis en comprenant mieux comment le système nerveux fonctionne lors du vagabondage et pourquoi certains processus physiologiques et psychophysiologiques ou certains comportements sont susceptibles de renseigner la présence de cet état.

Systèmes nerveux

Les animaux, pour pouvoir interagir avec leur environnement, ont besoin d'intégrer et de comprendre les informations qui leur arrivent avant de pouvoir y apporter une réponse, quelle qu'elle soit. Chez l'ensemble des vertébrés, se distinguent les systèmes nerveux centraux et périphériques. Le Système Nerveux Central (SNC) regroupe l'encéphale (cerveau, tronc cérébral et cervelet) et la moelle épinière (ou cordon médullaire). Le rôle du SNC est multiple et permet notamment de réceptionner, de traiter et d'émettre les messages nerveux. Le système nerveux périphérique (SNP) est constitué de l'ensemble des nerfs issus du système nerveux central, principalement du tronc cérébral et de la moelle épinière et qui se terminent au niveau d'un ou plusieurs organes.

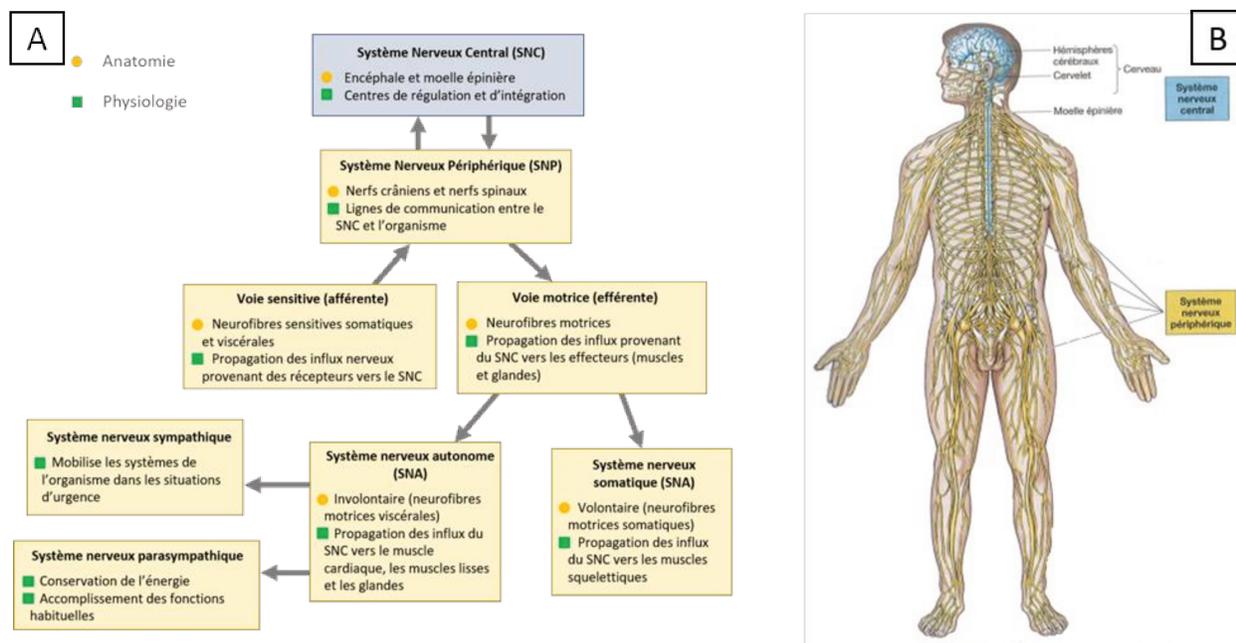


Figure 10 : Organigramme du système nerveux humain représentant le Système Nerveux Central (SNC) et le Système Nerveux Périphérique (SNP) ainsi que ses subdivisions (A). *D'après Marieb et Hoehn (2014), Anatomie et Physiologie humaines, 9^e Ed., 2014), organisation anatomique des systèmes nerveux, central et périphérique (B), d'après Nieoullon, Paradiso, Connors, et Bear (2016)*

Dans le cerveau, le cortex cérébral est la zone dont la surface est la plus importante et est associé à différents rôles fonctionnels fondamentaux tels que la sensibilité, la régulation émotionnelle, la motricité volontaire, les fonctions exécutives, certains états de conscience, etc. Tous les cortex cérébraux appartiennent au système nerveux central, rattaché au système nerveux périphérique. Le SNP est constitué du système nerveux somatique (contrôlé) et du système nerveux végétatif (autonome). Cette dernière branche du SNP se subdivise en système nerveux sympathique et parasympathique. Ces deux systèmes sont différents sur de nombreux plans notamment au niveau de la distribution et de l'étendue des ramifications des neurones. Nous pouvons donc grossièrement subdiviser le système nerveux en deux : une partie qui fonctionne de façon autonome et qui sous-tend la digestion, l'équilibre homéostatique et qui nous permet également de respirer la nuit, et une seconde qui traduit un contrôle volontaire de l'individu et qui nous permet de contracter nos muscles, d'explorer visuellement l'environnement ou de prendre volontairement le contrôle de notre respiration.

Le comportement d'un individu ou d'un groupe d'individus correspond le plus souvent à l'ensemble des actions visibles pour un observateur extérieur (Parot & Richelle, 1992). Cette définition première reste peu précise, l'observable se trouvant être très relatif. Nous pourrions observer la dilatation de la pupille d'un

individu si nous avons, avec lui, une proximité suffisante. De la même façon, nous pourrions observer son activité cérébrale avec les outils adéquats. Pourtant, la dilatation pupillaire et l'activité cérébrale semblent relever du physiologique. Mais comment faire la différence entre ce que l'on considère comme étant de l'ordre du comportemental et ce qui serait de l'ordre du physiologique ?

Dans la présente thèse, nous appellerons « physiologique », l'ensemble des processus biologiques qui font intervenir le système nerveux autonome, aussi connu sous le nom de système nerveux végétatif. À l'inverse, nous appellerons « comportemental », l'ensemble des processus biologiques sous la dépendance du système nerveux somatique. Nous verrons que cette catégorisation peut présenter des imprécisions notamment pour les processus biologiques qui sont sous la dépendance des deux systèmes nerveux. Cette thèse n'a pas pour objectif de proposer de nouvelles définitions des termes « comportemental » et « physiologique » (ou psychophysiologique ; pour mieux comprendre la différence entre ces termes, voir la partie sur la Neuroergonomie et vagabondage de la pensée), mais plutôt d'ouvrir la réflexion sur ce que qualifient vraiment ces deux termes, leurs frontières et leurs recouvrements⁷ et de définir les termes employés afin d'éclaircir la compréhension de ces deux notions.

Comportement

Données de conduite

Comme cela a été mentionné précédemment, la quantité de ressources attentionnelles disponibles est réduite si une tâche additionnelle est effectuée en parallèle de la conduite (Kahneman, 1973 ; Wickens, 2002). Le vagabondage de la pensée du conducteur a donc des répercussions sur l'activité et les performances de conduite. Le conducteur ayant à diviser son attention entre les deux tâches, pourrait voir son comportement être modifié. Ainsi, lors du vagabondage de la pensée, sont attendus une augmentation des Temps de Réaction (TR) (Drews et al., 2009 ; Yanko & Spalek, 2014) et/ou un écart à la vitesse prescrite plus élevé

⁷ Poser ces définitions du comportement et de la physiologie n'est pas simple ; ces deux concepts sont étroitement liés et ont, l'un sur l'autre, une influence réciproque. Le cœur et la respiration en sont un bon exemple : le cœur étant uniquement sous la dépendance du système nerveux autonome, il n'est pas possible de modifier directement son rythme cardiaque. La respiration étant sous la dépendance des deux systèmes nerveux, nous n'avons pas besoin de penser à respirer, mais nous pouvons choisir de respirer intentionnellement. Afin de réguler son niveau de stress, par exemple, il est possible de ralentir son rythme cardiaque en exploitant ces liens entre rythme cardiaque et respiration : il s'agit de la cohérence cardiaque. La cohérence cardiaque permet à l'individu de ralentir son rythme cardiaque en modifiant intentionnellement sa fréquence et ses amplitudes de respiration (il s'agit là d'un comportement respiratoire, selon notre définition, puisqu'il s'agit d'une activation du système nerveux volontaire et de muscles respiratoires différents de ceux qui sont contrôlés par le système nerveux autonome lorsque la respiration est automatique). L'individu modifiant son rythme et ses amplitudes respiratoires va impacter indirectement son rythme cardiaque (physiologique) en exploitant les liens existants entre l'activité cardiaque et la respiration.

Il apparaît difficile de qualifier de totalement physiologique ou de totalement comportemental certains mécanismes, mais une utilisation répétée de ces termes dans le présent travail de thèse nécessitait de les définir, même de façon imparfaite afin que leur utilisation soit homogène tout au long du document.

traduisant une gestion dégradée de la vitesse (Engström et al., 2005 ; Jamson & Merat, 2005). Le VP, en puisant dans les ressources du conducteur va interférer avec l'activité de conduite et perturber le comportement du conducteur.

Les simulateurs de conduite permettent d'enregistrer à une fréquence élevée, l'ensemble des variables liées au contrôle du véhicule et permettraient ainsi de confirmer ou d'infirmer l'effet de différents facteurs sur ces dimensions. L'effet du VP sur le comportement du conducteur pourrait donc être attesté. La littérature montre que le VP diminue les micro-régulations de la vitesse et augmente les déviations de trajectoire du véhicule (Lemerrier et al., 2014). Ces indicateurs pourraient d'ores et déjà être utilisés pour tenter de détecter la présence de VP du conducteur. D'autres paramètres liés au comportement de conduite pourraient également venir enrichir ces indicateurs afin de maximiser les chances de détection d'un vagabondage de la pensée qui serait perturbant pour le conducteur.

Ainsi, en augmentant les temps de réaction ou en perturbant la gestion de divers facteurs liés à la conduite (position sur la voie, vitesse du véhicule, etc.), les données de conduite sont susceptibles de donner une indication du degré d'interférence du VP avec la tâche de conduite. Mais l'activité de conduite ne serait pas la seule à être impactée par le VP ; d'autres éléments comportementaux comme l'activité oculaire pourraient être modifiés lorsque l'attention du conducteur est dirigée sur ses pensées plutôt que sur l'activité de conduite.

Comportement oculaire

L'activité de conduite est une activité nécessitant des capacités motrices, visuelles et attentionnelles importantes. L'activité oculaire du conducteur est indispensable pour collecter les informations venant de la route, inspecter les rétroviseurs, vérifier les angles morts, etc. La part d'accidents liés à un état dégradé de l'attention (Galera et al., 2012 ; Hendricks et al., 2001 ; Observatoire National Interministériel de la Sécurité Routière [ONISR], 2017) interroge le comportement oculaire du conducteur. Si toutes les informations de la scène routière sont convenablement collectées et traitées afin de permettre une conscience de la situation suffisante, comment pourrait-il y avoir autant d'accidents de la route liés à de l'inattention ?

La perception visuelle est la source d'information principale en conduite automobile et l'attention est déterminante pour la perception visuelle (Recarte & Nunes, 2000). L'attention joue un rôle essentiel dans l'inspection visuelle d'une scène, dans les stratégies de mouvements oculaires pour rechercher des informations (Henderson, 1993). Les mouvements des yeux sont souvent considérés comme l'interface entre l'attention et la prise d'information. Ces mouvements d'yeux pourraient donc refléter l'état attentionnel du conducteur ainsi que ses fluctuations (Recarte & Nunes, 2000). Dans des activités complexes telle que la conduite, il semble justifié d'interpréter des changements dans l'inspection visuelle de la scène routière ou

des patterns particuliers dans l'activité oculaire comme étant des indicateurs de changements dans l'allocation de l'attention visuelle (Kahneman, 1973). L'activité oculaire pourrait donc renseigner le degré d'attention portée à la conduite ainsi que la présence du VP. Une première étude a permis de montrer que l'exploration visuelle du conducteur est réduite lors du vagabondage de la pensée (He et al., 2011). Il apparaît donc pertinent d'approfondir la recherche d'indicateurs oculaires qui pourraient s'avérer sensibles au VP.

De nombreux indices comportementaux sont susceptibles de nous éclairer sur la présence de VP en conduite ainsi que sur le degré d'attention portée à la tâche. Mais les signaux psychophysiques, desquels peuvent être dérivés des indicateurs, sont tout aussi susceptibles de fournir des indices pertinents et sensibles de la présence du VP en conduite.

Physiologie

Comme il a été défini précédemment, la physiologie correspond, dans la présente thèse, à l'ensemble des processus biologiques sous la dépendance des systèmes nerveux central et autonome. Dans ces parties, nous présenterons succinctement les signaux physiologiques susceptibles de renseigner la présence de pensées sans lien avec l'activité de conduite, dans l'esprit du conducteur ou à l'inverse que l'attention du conducteur est bien dirigée vers la conduite. En revanche, les méthodes de calcul des indicateurs qui sont dérivés de ces signaux ne seront explicitées que dans la Partie Expérimentale.

Électrocardiographie

Le cœur est un des organes essentiels de la régulation homéostatique et de la distribution du sang et de ses composants dans l'ensemble du corps humain. Il pèse entre 250 et 350 grammes et bat en moyenne 2.5 millions de fois au cours d'une vie. Le cœur est un muscle composé de quatre cavités, deux oreillettes et deux ventricules. Ces cavités se relaient dans la distribution du sang dans le corps en envoyant le sang oxygéné vers les organes par l'artère aorte et en récupérant le sang désoxygéné par la veine cave pour l'envoyer vers les poumons afin de procéder aux échanges gazeux. C'est le cœur qui s'adapte aux besoins et aux demandes corporelles transmises par le système nerveux.

Il est à noter que le cœur possède une innervation double qui lui permet d'être autonome quant à son activité spontanée tout en permettant une régulation par le système nerveux central. Le cœur possède deux nœuds de cellules particulières qui se trouvent dans le nœud sinusal (ou sino-atrial dans l'oreillette droite) et dans le nœud atrio-ventriculaire. Ces nœuds initient la révolution cardiaque et les battements de cœur à proprement parler en déchargeant des potentiels d'action qui vont se propager dans l'ensemble du myocarde. Le cœur est donc potentiellement capable de battre seul, sans être rattaché aux systèmes nerveux, ce qui

explique que l'on puisse voir battre spontanément un cœur, après qu'il ait été séparé du corps humain. Les liens étroits entre le cœur et le cerveau d'un individu sont exposés dans tous les modèles de l'intégration neuroviscérale (Durantin, 2015). En effet, différentes régions cérébrales interconnectées, notamment des zones préfrontales vont avoir une influence sur le Rythme Cardiaque (RC) en diminuant ou maintenant le contrôle du SN parasympathique sur l'activité cardiaque (Smith, 2016 ; Thayer & Lane, 2009). Nous n'entrerons pas dans les détails des structures impliquées dans ces variations, ni des ondes et des processus de polarisation/dépolarisation du cœur, mais nous arrêterons sur les battements de cœurs qui permettent de déterminer le rythme cardiaque ainsi que sur la variabilité de celui-ci qui correspond à sa capacité à fluctuer pour répondre aux besoins énergétiques de l'organisme.

Le cœur fonctionne par cycle ou révolution qui correspond à une systole (contraction ventriculaire) et une diastole (relaxation ventriculaire). C'est au moment de la diastole que les ventricules se remplissent de sang et au moment de la systole que les ventricules se contractent et éjectent le sang dans le système artériel. Toutes les phases qui composent une révolution cardiaque sont visibles sur le tracé du signal cardiaque : l'électrocardiogramme (voir Figure 11). À partir de cet électrocardiogramme, le RC moyen correspond à la moyenne de temps écoulé entre deux contractions des ventricules, aussi connu sous le nom d'intervalles RR. Ainsi, si le cœur se contracte une fois par seconde, la taille moyenne des intervalles RR sera de 1 seconde ce qui correspond à un rythme cardiaque moyen de 60 bpm sur la période de temps donnée. Il est également possible de calculer une nouvelle valeur du RC à chaque battement cardiaque en calculant le temps écoulé entre deux pics R des complexes QRS d'une révolution cardiaque.

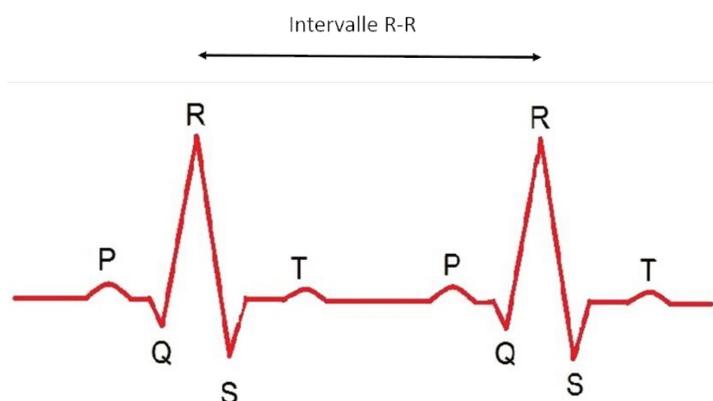


Figure 11 : Représentation graphique d'un signal cardiaque laissant apparaître les diverses composantes de deux révolutions cardiaques ; le rythme cardiaque se calculant grâce à la valeur de l'intervalle RR

Le rythme cardiaque ou fréquence cardiaque du sujet au repos subit des fluctuations autour d'une valeur moyenne relativement stable. Dès que survient un changement d'état, une modification du niveau d'activité de l'organisme, ou que le sujet ne se trouve plus dans des conditions d'environnement habituelles, son RC

se modifie. Ces fluctuations sont liées au fait que le RC est un élément majeur de régulation du débit cardiaque et que de nombreuses afférences informent à tout moment les centres cardiorégulateurs de l'état de l'organisme et de ses besoins : d'un côté le système nerveux sympathique et d'un autre, le système nerveux parasympathique. Le premier agit par l'intermédiaire de nerfs cardio-accélérateurs ; alors que le second opère par le biais de nerfs cardio-modérateurs (nerf vagal par exemple). Dans les conditions habituelles de repos, le tonus des centres végétatifs cardio-modérateurs est beaucoup plus élevé que le tonus des centres cardio-accélérateurs. Le cœur est donc ralenti en permanence par ce que les physiologistes appellent le frein vagal (Pellissier, 2013). Ces deux systèmes sont en interaction constante et permettent par régulation de maintenir le rythme cardiaque à une valeur optimale, pour satisfaire les besoins en énergie et en oxygène de l'organisme à chaque instant.

La Variabilité du Rythme Cardiaque (VRC) correspond aux irrégularités naturelles entre les battements cardiaques successifs. Le cœur n'est pas une machine et sa régularité n'est pas parfaite puisque c'est à lui de s'adapter aux besoins de l'organisme. Cette variabilité est à différencier de la variation du rythme cardiaque (en anglais, HRC = Heart Rate Change). La première correspond aux fluctuations naturelles du rythme cardiaque, la seconde étant une méthode d'analyse particulière du RC que nous détaillerons dans la Partie Expérimentale. La variabilité du RC est également définie comme étant une propriété des systèmes de régulation interdépendants qui opèrent à différentes échelles de temps pour s'adapter aux différents enjeux et besoins du corps (McCraty & Shaffer, 2015).

Le VP aurait un impact sur le RC qui augmenterait lorsque l'attention du conducteur est orientée sur ses pensées (Smallwood et al., 2004). Il apparaît, pour le moment, assez difficile de comprendre comment cet état peut modifier le RC du conducteur ; de nombreuses pistes explicatives sont possibles. Cette augmentation du RC lors du VP pourrait provenir d'un changement de posture de l'individu qui pourrait se répercuter dans les données cardiaques. Il est également possible que le VP augmente la charge mentale ce qui aurait pour conséquence d'élever le RC. Lorsque l'on prend en compte les liens entre émotions et VP, une modification de la coloration émotionnelle des pensées ou une élévation de l'arousal de celles-ci, peut également expliquer cette élévation du RC lors d'épisodes de VP (Kreibig, 2010).

L'activité du cœur est fortement liée à celle de la respiration. L'interaction entre le système cardiaque et le système respiratoire sous-tend le phénomène d'Arythmie Sinusale Respiratoire (ASR). L'ASR correspond à une modification du rythme cardiaque selon l'activité respiratoire. La levée temporaire du tonus parasympathique pendant l'inspiration conduit à une élévation du rythme cardiaque et par conséquent à un raccourcissement des intervalles RR. Pendant l'expiration, le système nerveux parasympathique est stimulé ce qui conduit à une augmentation du temps entre deux contractions cardiaques et donc à une diminution

du RC (Berntson, Cacioppo, & Quigley, 1993). Le système nerveux sympathique est ainsi responsable de l'élévation du RC et de la pression artérielle lorsque le système nerveux parasympathique a un effet inverse.

Respiration

La respiration⁸ est un cas particulier puisque le contrôle de l'activité respiratoire est sous la dépendance de deux Systèmes Nerveux (SN) : le SN autonome et le SN somatique. Il s'agirait de zones cérébrales différentes qui contrôlèrent la respiration automatique et la respiration contrôlée (Berger, Mitchell, & Severinghaus, 1977). Différents muscles seraient contractés pour créer le mécanisme d'inspiration et d'expiration selon le système nerveux impliqué. Selon notre définition des concepts de comportement et de physiologie, la respiration pourrait être, tour à tour, un mécanisme comportemental ou physiologique. Il a été décidé de présenter la respiration dans la partie portant sur la physiologie pour une raison simple : les êtres humains respirent très rarement par l'intermédiaire de leur SN somatique. Penser constamment à inspirer et à expirer serait bien trop coûteux, particulièrement lorsque l'on effectue une tâche annexe comme la conduite automobile. Ici, la respiration est considérée comme un processus physiologique sur lequel il est possible de « reprendre la main » en contrôlant nos fréquences et amplitudes de respiration par l'intermédiaire du système nerveux somatique (Butler, 2007), ce qui correspondrait, dans ce cas précis, non plus à une respiration physiologique, mais à une respiration comportementale.

⁸ La respiration est également appelée ventilation pulmonaire afin d'éviter toute confusion avec le processus de respiration cellulaire correspondant à la création d'énergie nécessaire à tout mouvement ou processus biologique du corps. Cette respiration cellulaire permet, par l'intermédiaire du cycle de Krebs, la création d'Adénosine TriPhosphate (ATP), molécule hydrolysée pour libérer l'énergie contenue dans la dernière liaison covalente de cette molécule. Le corps humain ne contiendrait à chaque instant que 250 grammes d'ATP en moyenne, mais produirait et consommerait chaque jour son propre poids en ATP. Il est donc particulièrement important de ne pas confondre la respiration cellulaire et la ventilation pulmonaire, trivialement appelée respiration.

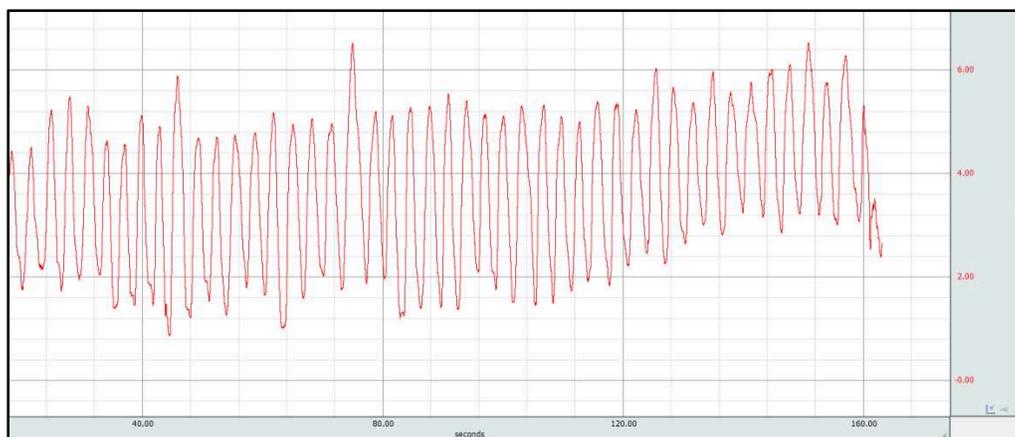


Figure 12 : *Visualisation Biopac d'un signal respiratoire sur 160 secondes. L'élévation des valeurs du signal correspond aux inspirations et la diminution des valeurs du signal aux expirations*

La respiration est un processus biologique permettant les échanges gazeux entre le sang et l'environnement externe par diffusion. L'oxygène présent dans les poumons intègre alors le milieu interne du corps, qui se trouve débarrassé de son gaz carbonique (CO_2). La respiration est essentiellement permise par la contraction et la relaxation du muscle diaphragme qui permet d'augmenter et d'abaisser la pression de l'air dans les poumons afin de renouveler leur contenu. De nombreux autres muscles accessoires tels les muscles scalènes, intercostaux, sterno-cléido-mastoïdiens et abdominaux sont également impliqués dans la respiration automatique ou volontaire. Il n'est pas question ici de comprendre quels sont les rôles de quels muscles, ni d'identifier leurs liens respectifs avec tel ou tel SN. Il est en revanche nécessaire de comprendre que les caractéristiques du signal respiratoire peuvent être modifiées selon un nombre important de facteurs comme la demande en oxygène de l'organisme, tout comme l'est le rythme cardiaque. L'objectif pour ces deux systèmes étant de toujours répondre aux besoins corporels pour éviter l'hypoxie ou l'acidose du corps.

Diverses informations peuvent être extraites du signal respiratoire (pour un exemple de signal respiratoire, voir Figure 12) en étudiant le rythme respiratoire, correspondant au nombre de cycles respiratoire (inspiration + expiration) par unité de temps, l'amplitude moyenne des cycles respiratoires par exemple ou par des analyses en gammes de fréquences.

EEG et Potentiels évoqués cérébraux

Les potentiels évoqués cérébraux correspondent à une mesure dérivée des données électroencéphalographiques (EEG) et permettent notamment d'indiquer la qualité du traitement d'une information sensorielle. L'électroencéphalographie (EEG) consiste à mesurer, à la surface du scalp,

l'intensité des courants électriques émis par les neurones. Le principe de base étant que l'activité synaptique des neurones, lorsqu'ils sont synchronisés en assez grand nombre, générera un champ électrique suffisamment important pour traverser la paroi crânienne et être mesurable au niveau du scalp (voir Luck, 2014). En effet, les neurones des zones corticales à la surface du scalp sont orientés dans la même direction et produisent un champ magnétique suffisant pour être mesuré par les électrodes.

Le neurone étant l'entité fonctionnelle du système nerveux, il joue le rôle d'émetteur et de propagateur du message nerveux et d'unité fondamentale du traitement de l'information (Figley & Stroman, 2011). L'homéostasie cellulaire du SNC et par extension de chacun des neurones le composant, n'est maintenu que par un apport constant en oxygène et en glucose (Perrey, 2013). Dans le cerveau, la concentration en glycogène sanguin est faible et les neurones sont entourés par un ou plusieurs capillaires permettant l'apport des éléments nutritifs (Zlokovic, 2008) notamment en glucose, principal substrat oxydé (Zauner, Daugherty, Bullock, & Warner, 2002) dont l'apport est perpétuel via le flux cérébral (Bruder, Velly, & Cantais, 2011). C'est par ce substrat carboné qu'est possible la synthèse d'Adénosine Triphosphate (ATP), le carburant cellulaire. Le débit sanguin, en permettant l'apport d'oxygène et de glucose, indispensable au bon fonctionnement des neurones, régulerait l'homéostasie et permettrait le bon traitement des informations nous provenant (Mandrick, 2013).

L'avantage majeur de la technique des potentiels évoqués est qu'il n'y a quasiment aucun délai entre la génération et la mesure du signal, ce qui rend l'utilisation de l'EEG particulièrement puissante pour observer l'activité physiologique à l'échelle de la milliseconde (Woodman, 2010). Cette finesse d'observation temporelle fait de l'EEG un outil propice à l'étude de la dynamique attentionnelle. Toutefois, la mesure EEG, qui s'exprime en microvolts, est très sensible aux champs électriques pouvant parasiter le signal enregistré. Par exemple, les appareils électriques placés à proximité du participant, l'activité musculaire ou les clignements des yeux sont autant de sources potentielles de perturbations de l'activité électrique mesurée sur la surface de la tête. Ainsi les électrodes du bonnet EEG (Figure 13), placé sur la tête du participant vont principalement capter ces mouvements et activités parasites, qui ont des amplitudes plus élevées que celles des signaux cérébraux. Il est ainsi nécessaire de répéter la présentation des stimulations au maximum pour éviter que les modifications dues aux présentations des stimuli ne soient noyées dans l'activité cérébrale spontanée. Cette répétition, par participant, permet d'améliorer le ratio signal/bruit en postulant qu'un nombre suffisant de répétitions noiera l'activité parasite pour ne révéler que l'activité d'intérêt. On obtient donc un tracé moyen par sujet qui sera, le plus souvent, comparé au tracé moyen obtenu, pour ce même sujet, lors d'une autre condition expérimentale, nous affranchissant ainsi des variations inter-individuelles. Les représentations graphiques des courbes sont ensuite moyennées sur l'ensemble des participants des groupes.

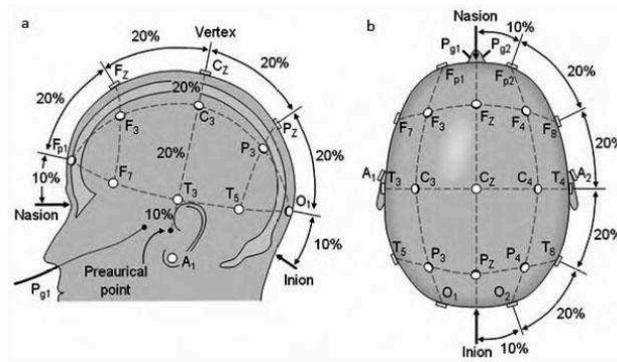


Figure 13 : Représentation du montage des électrodes selon le Système International 10-20 (a) sur l'hémisphère gauche et (b) vue de dessus. D'après Jasper (1958) et Bueno, Fabrigoule, Deleurence, Ndiaye, et Fort (2012)

Ainsi, on enregistre la réponse évoquée à la présentation d'un stimulus et on quantifie l'amplitude des potentiels liés à l'évènement (en anglais, Event-Related Potentials = ERPs). En complément de cette technique, plusieurs techniques d'imagerie cérébrale (Imagerie par Résonance Magnétique fonctionnelle, tomographie par émission de position) peuvent être utilisées pour observer les structures anatomiques impliquées dans la réalisation d'une tâche attentionnelle. Cependant, leur résolution temporelle étant faible, elles ne permettent pas d'observer finement la dynamique temporelle du traitement attentionnel. L'EEG, en mettant à profit la vitesse de propagation de l'influx nerveux (jusqu'à 100 m/s) et en ayant une précision temporelle inférieure à la milliseconde, s'avère un outil sérieux pour cela.

À partir de la présentation d'un stimulus particulier, qu'il soit auditif ou visuel, apparaissent de nombreuses composantes donnant chacune une information spécifique selon le protocole utilisé. Les deux composantes les plus étudiées sont la N1, qui est une onde négative qui apparaît aux alentours de 100 ms après la présentation d'un stimulus auditif et entre 150 et 200 ms pour la modalité visuelle, s'observe bien, sur l'ensemble des zones responsables du traitement sensoriel (variables selon la modalité de présentation de l'information). Cette composante traduit le traitement sensoriel, précoce, de l'information ainsi que la focalisation attentionnelle vers la zone de présentation du stimulus (Luck, 2014). C'est pour cela que l'amplitude de l'onde N1 sera plus importante pour un individu si son attention est focalisée sur le côté d'apparition du stimulus sur un écran (localisation attendue) que si son attention est focalisée sur l'autre côté de l'écran (localisation inattendue).

Une seconde onde particulièrement importante est la P3, qui apparaît environ 300 millisecondes après un évènement et renseigne sur le degré d'attention portée sur la tâche en cours (Polich, 2007). L'amplitude de la P3 est également dépendante de la fréquence d'apparition des stimuli. Par phénomène d'habituation, plus le stimulus proposé apparaît fréquemment, moins cette composante aura une amplitude élevée. La latence

de la P3 peut être augmentée par tout traitement ou manipulation mentale qui retarde la catégorisation du stimulus cible (Luck, 2005). Au moins deux sous-composantes peuvent s'associer pour former la P3 : la P3a et la P3b qui traduisent respectivement la présence de stimuli rares et non pertinents pour la tâche et la présence de stimuli rares, mais pertinents pour la tâche.

Au niveau du traitement de l'information, les états dégradés de l'attention (nous ne parlerons à nouveau que de la distraction et de l'inattention) ont des signatures électroencéphalographiques proches. Lors d'une tâche de conduite avec présentation de distracteurs, l'amplitude de la composante N1 des potentiels évoqués était réduite (Bueno et al., 2012). Le vagabondage de la pensée va également diminuer l'amplitude de la composante N1 (Broadway, Franklin, & Schooler, 2015 ; Chaparro, 2015 ; Kam, 2010), suggérant un traitement précoce des informations sensorielles plus superficiel. L'amplitude de la composante P3 est également réduite lors du VP (Baldwin et al., 2017 ; Barron et al., 2011 ; Kam, 2010 ; Macdonald, Mathan, & Yeung, 2011 ; Smallwood et al., 2008), tout comme elle l'est lors d'épisodes de distraction (Strayer & Drews, 2007).

Lors du VP, le découplage perceptif tend à isoler le conducteur de son environnement proche, l'activité des cortex sensoriels diminue, ce qui expliquerait la diminution d'amplitude de la composante P3 (Smallwood et al., 2008). Comme nous l'avons vu, le VP puise une partie des ressources de l'individu pour alimenter ses pensées. Ensemble, ces résultats suggèrent que la division de l'attention, que ce soit vers des sources externes ou internes génère un effet de double tâche, des informations traitées de façon plus superficielle et une augmentation de la charge mentale. Cette augmentation entraîne un abaissement des ressources disponibles, pour répondre aux sollicitations de la conduite, générant une diminution de l'attention allouée à la tâche principale. Cela a comme conséquences une diminution de l'amplitude des ondes reflétant les deux niveaux du traitement de l'information (N1 = sensoriel et P3 = cognitif).

Ces résultats montrent que l'inattention et la distraction ont des points communs notamment au niveau de la concurrence entre ces états et l'activité principale dans l'allocation des ressources attentionnelles, ce qui pourrait expliquer notre facilité à les confondre. Pourtant l'EEG et plus particulièrement les potentiels évoqués ont montré des différences au niveau de la latence de la P3 qui peut être retardée lors de la distraction (Demeter, De Albuquerque, & Woldorff, 2016) et qui ne semble pas l'être dans les résultats d'études portant sur le VP (Baldwin et al., 2017). La méthode des potentiels évoqués, de par sa grande résolution temporelle, permet de mieux appréhender la dynamique attentionnelle et de pouvoir mieux décrire différents états sur ce qu'ils partagent, mais également sur leurs différences. Cette technique pourrait ainsi permettre de mettre en lumière certains facteurs liés à la dangerosité du vagabondage en conduite.

Conductance cutanée

L'activité électrodermale est une manifestation électrophysiologique biologique, qui rend compte de l'activité du système nerveux sympathique. La conductivité électrique de la peau est un indicateur sensible à différents processus mentaux sous contrôle du système nerveux central tels que l'émotion, la charge mentale ou l'attention. L'activité électrodermale correspond à l'activité des glandes sudorales de type eccrine, qui sécrètent une sueur hydrique abondante et non odorante, par opposition à la sueur des glandes apocrines, épaisse et odorante. Les glandes eccrines ont un rôle dans la thermorégulation ce qui explique la vasomotricité survenant simultanément. Cependant, les neurones assurant cette vasomotricité ne sont pas les mêmes que ceux responsables de la sudation. Cela explique l'existence de la « sueur froide » : sudation en l'absence de vasomotricité. Cette sueur froide, émotive, est spécifique de certaines régions du corps. Les glandes eccrines sont nombreuses sur toute la surface du corps et notamment sur la face palmaire des mains (environ 400/mm², Critchley, 2002). Ces glandes sont constituées d'un glomérule et d'un canal excréteur qui débouche par un pore au niveau de la peau. L'activation sympathique conduit à une augmentation de la sueur primitive extraite du plasma sanguin. Il y a ensuite une réabsorption de ce liquide au niveau du canal sécréteur aussi connu sous le nom de canal sudorifère⁹.



Figure 14 : Visualisation Biopac d'un signal électrodermal sur 180 secondes recueilli pendant le présent travail de thèse, laissant apparaître plusieurs pics d'activation traduisant la libération d'une quantité plus importante de sueur froide sur un intervalle de temps court

La couche superficielle de la peau étant électriquement neutre, ce sont les pores remplis de sueur qui vont diminuer la résistance sur cette couche superficielle. Ces variations de concentration génèrent des dipôles,

⁹ L'excrétion et la réabsorption de liquide au niveau de la face palmaire de la main sont parfaitement visibles au microscope et plusieurs vidéastes amateurs ou professionnels se sont passionnés à observer ce phénomène (pour un exemple, voir : <https://www.youtube.com/watch?v=OtBYXxnJvEQ>)

responsables des variations de potentiel enregistrables. Ainsi, chaque glande active se comporte comme un circuit électrique branché en parallèle de sorte que l'augmentation de la conductance cutanée est proportionnelle au nombre de glandes actives. Ainsi, c'est le nombre croissant de glandes actives qui est privilégié plutôt qu'une augmentation d'activité de chaque glande. La mesure de la conductance cutanée est assez simple puisqu'il s'agit d'amplifier la différence de potentiel spontané recueillie entre deux électrodes placées sur la surface cutanée appropriée (palmaire ou plantaire). Cela se fait via des électrodes que l'on pose simplement sur la face palmaire des doigts ou au niveau de la paume de la main. Ces électrodes amplifient le potentiel électrique permettant d'obtenir un signal électrodermal (voir Figure 14).

Dans la partie portant sur le VP, nous avons vu les aspects positifs et négatifs de cet état sur les individus et avons explicité en quoi le VP est particulièrement problématique lors de l'activité de conduite. Le conducteur devant porter une attention soutenue à la route, la présence de VP a de nombreux impacts sur sa vitesse, le bon maintien de son véhicule sur la voie, ses temps de réaction, etc. Ce travail se propose donc d'étudier les corrélats comportementaux et physiologiques du VP dont les signatures permettraient de créer des algorithmes de détection de cet état en temps réel. Cela pourrait permettre au conducteur de reprendre ses esprits lorsque le vagabondage devient trop intrusif et d'adopter les bons comportements que ce soit lors d'une conduite manuelle ou au volant d'un véhicule automatisé.

Il est possible de relever de nombreux indices comportementaux ou physiologiques susceptibles de renseigner l'état du conducteur. Le rythme cardiaque, l'activité oculaire et cérébrale ainsi que la vitesse ou la position du véhicule sur la voie permettent de mieux comprendre comment certains états internes affectent le conducteur. Chacune de ces variables pourrait être affectée par la présence du vagabondage de la pensée en conduite et ainsi trahir sa présence. Un regroupement des indicateurs sensibles au VP pourraient ainsi être opérés afin de maximiser, par un algorithme, une potentielle détection de cet état en conduite. Pour cela, la mise en commun de données de différents types (subjectives, objectives et psychophysiologiques) permet d'abord d'augmenter le contrôle expérimental pour mettre en évidence des signatures physiologiques et comportementales de certains états, et permettrait dans un second temps, d'amorcer une réflexion pour la création d'un algorithme de détection.

Résumé : Neuroergonomie

La neuroergonomie est un champ disciplinaire émergeant qui étudie les états mentaux pour améliorer la performance et l'efficacité humaine. L'objectif est d'aller toujours plus en avant dans la compréhension des mécanismes et des fonctions cérébrales impliquées dans des tâches en situations réelles. Appliquée au domaine des transports et particulièrement à la conduite automobile, la neuroergonomie cherche à mieux comprendre l'effet de certains états internes sur les performances de conduite afin de développer des contre-mesures adaptées à ces états.

Pour le vagabondage de la pensée, différentes méthodologies permettent de capter cet état en conduite. Les méthodes d'auto-déclaration et de rappel rétrospectif permettent, tout en plaçant le conducteur au centre de la dynamique de la tâche de conduite, de laisser cette dernière intacte. Le recueil de données subjectives de l'état du conducteur permet de caractériser les moments précis où le conducteur estime avoir vu son attention se détourner de l'activité de conduite vers des pensées personnelles. Dans le cas du vagabondage de la pensée, il serait possible de voir si des patterns particuliers apparaissent dans les données psychophysiologiques ou comportementales dans ces moments précis en mettant en correspondance les données physiologiques et comportementales avec les moments d'inattention déclarés par les conducteurs. Si des patterns particuliers étaient retrouvés dans certains signaux psychophysiologiques ou si des signatures comportementales étaient mises en évidence lors du VP, différentes techniques pourraient permettre la détection de cet état en conduite.

La détection du vagabondage de la pensée en conduite en temps réel est un des objectifs à très long terme de la recherche en sécurité routière. Ce travail de thèse se situe en amont de cela et n'a pas pour objectif de tester la capacité de différents indicateurs à détecter le vagabondage, mais bien de commencer à inventorier les indicateurs sensibles au VP en conduite automobile.

L'arrivée progressive de l'automatisation des véhicules va très probablement venir modifier le rôle du conducteur, nécessitant un cadre conceptuel solide pour mieux appréhender et compenser les défauts de supervision et d'attention des futurs opérateurs. Les phases de transition du contrôle du véhicule entre la machine et l'humain posent également de nombreuses questions. La collecte de différents types de donnée (subjectives, psychophysiologiques et comportementales) ainsi que l'utilisation et de la neuroergonomie comme cadre méthodologique apparaissent convaincants pour étudier, le VP et ses indicateurs objectifs.

Objectifs de la thèse

Nous sommes tous différemment soumis au phénomène, parfois parasitant, de Vagabondage de la Pensée (VP) et parfois, tenter de s'empêcher de penser à autre chose, est vain. Le vagabondage a un rôle efficace et nécessaire, de planification et de résolution de problèmes, qui nous permettrait à la fois d'éviter l'ennui et d'organiser le cours de nos existences. Pourtant, dans le cadre de la conduite automobile, bien qu'il s'agisse d'une activité apparemment simple et souvent effectuée de façon automatique, orienter son attention sur ses pensées personnelles peut avoir de sérieuses conséquences. Contrairement à la distraction, le vagabondage de la pensée ne possède pas de signatures physiques (tels des mouvements de têtes ou des gestes) facilement identifiables ce qui rend difficile, pour le moment, sa détection par des algorithmes de surveillance. Cette thèse a pour objectif principal de mieux décrire l'impact de l'inattention et plus spécifiquement du VP en conduite automobile sur les variables physiologiques et comportementales du conducteur.

Si, à long terme, l'objectif est de développer des contre-mesures efficaces pour limiter l'impact du VP en conduite automobile, il apparaît important de mettre en évidence des patterns comportementaux et psychophysiologiques sensibles à cet état. Mieux comprendre les modifications dans les stratégies oculaires ou dans l'évolution du rythme cardiaque lors de décrochages attentionnels du conducteur, permettrait de commencer à inventorier les indicateurs sensibles et pertinents pouvant intégrer un algorithme de détection du VP.

Le VP étant un état complexe, il semble perturber le conducteur à plusieurs niveaux. Premièrement, et parce que la conduite automobile est une activité principalement visuelle, il convient de comprendre quelles sont les étapes du traitement de l'information qui sont affectées par le VP. Deuxièmement, ne pas porter son attention sur l'environnement de conduite, générerait un paradigme de double tâche, ce qui puiserait dans les ressources disponibles du conducteur. La présence de VP pourrait donc augmenter l'effort cognitif à fournir pour réagir à un événement, ce qui nuirait à l'activité de conduite. Il apparaît donc nécessaire de rechercher des indicateurs de l'effort cognitif afin d'investiguer les liens entre effort cognitif et vagabondage de la pensée en conduite automobile. Enfin, les données récentes montrent que toutes les pensées n'auraient pas le même impact ; certaines pourraient avoir un degré d'interférence avec la tâche de conduite plus élevé. Il convient ainsi d'explorer l'impact de différents types de pensée ainsi que de leurs contenus, susceptibles d'expliquer différents niveaux de profondeur du VP et qui pourraient ainsi générer un risque plus élevé d'être responsable d'un accident de la route.

En résumé, cette thèse porte un objectif principal, celui de mieux décrire l'impact de l'inattention et plus spécifiquement du VP en conduite automobile sur les variables physiologiques et comportementales du

conducteur. Le présent travail cherchera également à mettre en évidence, en conduite automobile simulée, des indicateurs objectifs de l'effort cognitif (étude 1) et à étudier l'effet de différents types de pensée (étude 2) ainsi que de leur contenu (étude 3) sur l'activité de conduite. Pour répondre à ces objectifs, quatre phases successives ont été menées : la valorisation des résultats de l'expérimentation réalisée l'année avant le début de la présente thèse (étude 1), la participation à un concours international ainsi que deux expérimentations permettant de décrire plus en détails les conséquences du VP (études 2 et 3). Ces travaux sont présentés ci-après dans la Partie Expérimentale.

Partie Expérimentale

Étude 1 : Signature cardiaque de l'effort cognitif en conduite automobile

Le Vagabondage de la Pensée (VP) en réorientant l'attention du conducteur sur des préoccupations personnelles, engendre un découplage entre l'individu et son environnement proche. Ce découplage pourrait être particulièrement problématique si le conducteur doit revenir en urgence à sa tâche de conduite. Le coût cognitif engendré et donc l'effort cognitif à fournir par le conducteur pour répondre à un évènement imprévu pourrait être plus élevé si l'individu est dans un état de vagabondage, que si son attention est déjà orientée vers l'environnement de conduite. Le VP pourrait donc être comparé à un paradigme de double tâche pouvant empêcher le conducteur de réagir adéquatement à certaines situations. Pour comprendre l'impact du VP sur la consommation des ressources du conducteur, il nous faut investiguer les liens entre effort cognitif et vagabondage de la pensée en conduite. Pour cela, une première étude a cherché à mettre en évidence un indicateur sensible à l'effort cognitif en conduite automobile sur simulateur.

Objectif et justification

La recherche d'indicateurs objectifs de l'effort cognitif se révèle nécessaire pour étudier la consommation des ressources cognitives des individus lors de différentes tâches. Dans le cas du vagabondage de la pensée, les ressources cognitives et attentionnelles étant limitées et devant être partagées entre l'ensemble des actions effectuées par le conducteur (Kahneman, 1973 ; Wickens, 2002), penser à autre chose qu'à l'activité de conduite puiserait dans le stock de ressources et aurait donc un coût cognitif qu'il conviendrait de quantifier pour éviter les situations de stress et de surcharge. L'orientation et la réorientation du focus attentionnel pourraient également puiser dans ce stock (de Waard, 1996). Il convient donc d'explorer les mesures objectives susceptibles de donner des indications sur l'effort cognitif investi par les participants ou sur leurs ressources mobilisables afin d'estimer si le conducteur est à même de gérer certaines situations.

À notre connaissance, la première étude ayant utilisé un paramètre cardiaque pour mettre en évidence un indicateur d'effort cognitif remonte à un peu plus de vingt ans (Kaiser, Beauvale, & Bener, 1996). Les auteurs ont identifié la Variation du Rythme Cardiaque (VaRC), qu'ils nomment réponse cardiaque évoquée comme étant un indicateur sensible à l'effort cognitif. Cette méthode d'analyse du rythme cardiaque consiste à évaluer l'effet de la présentation d'un stimulus et/ou de son traitement sur le rythme cardiaque. Elle est similaire aux potentiels évoqués cérébraux qui consistent à évaluer l'impact de la présentation d'un stimulus

sur l'évolution de l'activité électrique d'une partie du cortex cérébral en moyennant les valeurs obtenues sur un nombre élevé d'essais. Les potentiels évoqués sont moyennés sur une fenêtre de temps inférieure à une seconde alors que, dans des protocoles de réponse cardiaque évoquée, la VaRC est moyennée dans les 6 secondes suivant l'apparition du stimulus (Kaiser et al., 1996 ; Lawrence & Barry, 2009).

Les participants ont simplement écouté ou compté des bips sonores (tâche de comptage vs tâche d'écoute simple). Toutes les 40 à 60 secondes, un stimulus auditif s'apparentant à un bip (60 dB, 1 000 Hz, durée d'une seconde et temps de montée et de descente du son, fixés à 20 msec) était présenté aux participants qui devaient les compter ou les écouter selon la condition. Dans la condition d'écoute, le rythme cardiaque des participants a légèrement diminué (composante ECR1) puis est revenu à son niveau de base sans passer au-dessus de la valeur initiale. Dans la condition comptage, le rythme cardiaque, diminue rapidement et légèrement (composante ECR1) avant d'augmenter plus intensément (composante ECR2) puis revient à son niveau de base (voir Figure 15).

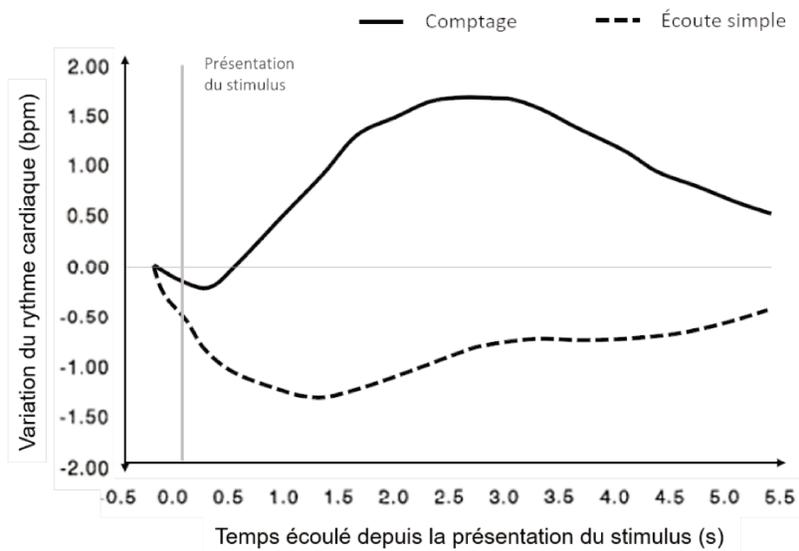


Figure 15 : Graphique représentant l'évolution du rythme cardiaque dans les secondes suivant la présentation d'un stimulus auditif nécessitant une tâche de comptage ou une écoute simple de la part du participant

La VaRC se révèle donc sensible à l'effort cognitif dans une tâche de laboratoire. Ainsi, en moyennant les données cardiaques sur un nombre conséquent d'évènements (un évènement correspondant à la présentation d'un stimulus auditif), il est possible de discriminer une tâche de comptage d'une tâche d'écoute simple en utilisant la VaRC seule. Pour avancer dans la compréhension des mécanismes sous-jacents à l'augmentation de la VaRC, une seconde étude a cherché à montrer des liens directs entre la VaRC et l'activité cérébrale.

Afin de mettre en correspondance ces mesures et de mieux comprendre les liens entre activité cardiaque et activité cérébrale lors du traitement de stimuli auditifs, Lawrence et Barry, (2009) ont proposé de mesurer de manière synchrone, la VaRC et les potentiels évoqués cérébraux. Premièrement, les résultats précédents ont été corroborés par cette étude : la composante ECR1 seule est observée lors de la condition d'écoute et se trouve supplantée par une composante ECR2 lorsque les bips sonores doivent être comptés. La plus-value de cette étude se trouve dans la collecte et l'analyse simultanée de réponses cérébrales et cardiaques. Les composantes ECR1 et N1 et les composantes ECR2 et P3 seraient deux paires de composantes appariées, montrant de fortes similitudes dans leurs modulations lors du traitement des stimuli auditifs (Lawrence & Barry, 2009). Ainsi, la VaRC serait un indicateur sensible à l'effort cognitif et pourrait refléter certaines actions cérébrales lors du traitement de l'information, nécessaire pour pouvoir être considérée comme un indicateur pertinent selon le point de vue de neuroergonomie (Parasuraman, 2003). De plus, l'utilisation de la VaRC permettrait de recueillir des données objectives et pertinentes pour l'étude de l'effort cognitif tout en bénéficiant d'une méthode de recueil moins contraignante que celle de l'activité cérébrale.

L'objectif de l'étude présentée ci-après, réalisée avant et valorisée pendant le début de la présente thèse, était d'abord de répliquer les résultats précédents en mettant en évidence une élévation du rythme cardiaque lors de la condition de comptage et une simple diminution du RC lors de la tâche d'écoute. Ensuite, afin de vérifier que cet indicateur est sensible à l'effort cognitif en conduite automobile sur simulateur, la moitié des conditions se sont effectuées avec une tâche de conduite additionnelle et l'autre moitié sans. Enfin, afin d'explorer la possibilité que la VaRC soit susceptible de discriminer différents niveaux de charge mentale, deux tâches ont été proposées : une tâche facile et une tâche difficile. La tâche facile était identique à la tâche proposée dans les études précédentes lors desquelles les individus devaient compter une série de bips sonores présentés de façon pseudo-randomisée. La tâche difficile nécessitait la mémorisation préalable d'une grille de 5x5 cases (voir Annexe A), composées chacune d'un chiffre. Le stimulus auditif était une indication de direction demandant au participant de se déplacer mentalement dans la grille (en partant du centre de celle-ci) et d'ajouter le nombre se trouvant dans la nouvelle case au résultat précédent.

Ainsi, 3 facteurs intra-individuels à deux modalités ont été manipulés : la tâche cognitive (tâche active vs tâche passive), l'activité de conduite (avec vs sans) et la difficulté de la tâche (facile vs difficile). Chacun des participants a donc effectué $2^3 = 8$ conditions expérimentales.

Méthode

Population

Dix-huit personnes (8 femmes) ont participé à cette étude (moyenne d'âge : 22.7 ± 1.4 ans). Tous possédaient leur permis de conduire depuis au moins 3 ans. Tous les participants ont déclaré avoir une vue normale ou corrigée à la normale par des lunettes ou des lentilles de contact et ne pas avoir de maladie cardio-vasculaire. Les participants ont donné leur consentement écrit pour participer à cette étude sur simulateur de conduite.

Simulateur

Lors de l'ensemble de la passation, les participants étaient assis sur le siège conducteur du simulateur de conduite, une cabine fixe de Peugeot 308.



Figure 16 : Simulateur de conduite PEUGEOT 308 présent sur le site de l'IFSTTAR, Bron

Ce simulateur développé à l'IFSTTAR par le LEPSIS (Laboratoire Exploitation, Perception, Simulateurs et Simulations) est entouré de 8 écrans fonctionnels ce qui donne un champ de vision suffisamment large aux participants (270° horizontaux et 48° verticaux) pour permettre une expérience de simulation la plus réaliste possible.

Article publié dans « le travail humain » en Janvier 2017 ([10.3917/th.801.0051](https://doi.org/10.3917/th.801.0051))



Towards real-time detection of cognitive effort in driving: contribution of cardiac measurement

Guillaume Pepin, Christophe Jallais, Alexandra Fort, Fabien Moreau, Jordan Navarro, Catherine Gabaude

► **To cite this version:**

Guillaume Pepin, Christophe Jallais, Alexandra Fort, Fabien Moreau, Jordan Navarro, et al.
Towards real-time detection of cognitive effort in driving: contribution of cardiac measurement.
Le travail humain, Presses Universitaires de France, 2017, 80, 21 p. <hal-01469240>

HAL Id: hal-01469240

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01469240>

Submitted on 16 Feb 2017

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

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

PEPIN, Guillaume, JALLAIS, Christophe, FORT, Alexandra, MOREAU, Fabien, NAVARRO, Jordan, GABAUDE, Catherine,
2017, Towards real-time detection of cognitive effort in driving: contribution of cardiac measurement , Travail Humain, 80, Presses
Universitaires de France

EMPIRICAL RESEARCH

Title: TOWARDS REAL-TIME DETECTION OF COGNITIVE EFFORT IN DRIVING:
CONTRIBUTION OF CARDIAC MEASUREMENT.
Short Title: TOWARDS REAL-TIME DETECTION OF COGNITIVE EFFORT IN
DRIVING

Guillaume Pepin¹, Christophe Jallais¹, Alexandra Fort¹, Fabien Moreau¹, Jordan Navarro², &
Catherine Gabaude¹

¹ *IFSTTAR-TS2-LESCOT, Bron, France*

² *Laboratoire d'Etude des Mécanismes Cognitifs, Université de Lyon, Bron, France*

Authors:

Guillaume Pepin
IFSTTAR-TS2-LESCOT
25, Avenue François Mitterrand
69675 BRON Cedex, France
Email: guillaume.pepin@ifsttar.fr

Christophe Jallais
IFSTTAR-TS2-LESCOT
25, Avenue François Mitterrand
69675 BRON Cedex, France
Email: christophe.jallais@ifsttar.fr

Alexandra Fort
IFSTTAR-TS2-LESCOT
25, Avenue François Mitterrand
69675 BRON Cedex, France
Email: alexandra.fort@ifsttar.fr

Fabien Moreau
IFSTTAR-TS2-LESCOT
25, Avenue François Mitterrand
69675 BRON Cedex, France
Email: fabien.moreau@ifsttar.fr

Jordan Navarro
Laboratoire d'Etude des Mécanismes Cognitifs (EMC EA 3082)
Institut de Psychologie
Université Lyon 2
5, Avenue Pierre Mendès-France
69676 Bron Cedex, France
Email: jordan.navarro@univ-lyon2.fr

Catherine Gabaude
IFSTTAR-TS2-LESCOT
25, Avenue François Mitterrand
69675 BRON Cedex, France
Email: catherine.gabaude@ifsttar.fr

PEPIN, Guillaume, JALLAIS, Christophe, FORT, Alexandra, MOREAU, Fabien, NAVARRO, Jordan, GABAUDE, Catherine.
2017, Towards real-time detection of cognitive effort in driving: contribution of cardiac measurement . Travail Humain, 80, Presses
Universitaires de France

ABSTRACT

In 2013, attention deficits accounted for 40 to 50 % of injury accidents. Recent studies have succeeded in detecting impaired states of attention, with a view to assisting the driver, and provide a new opportunity to increase road safety. This study focuses on the detection of drivers' cognitive effort and seeks, through the study of heart rate change (HRC), to identify a sensitive indicator of cognitive effort in short time windows.

Eighteen young drivers participated in the study and took part in 8 experimental sessions where they performed a passive or active cognitive task (counting) while driving or not. The counting task had two difficulty levels (counting of beeps vs visuospatial skills and number adding). Participants' heart rates were monitored during all tasks.

Previous results recorded in laboratory conditions have been replicated during driving: during the first seconds after a cognitive effort, there is a slight deceleration and a sharp acceleration in heart rate. Conversely, in the absence of cognitive effort, simple cardiac deceleration was observed. Our study confirms that it is possible to distinguish HRC in response to a cognitive effort over short time windows by observing the grand mean of evoked cardiac responses at 0.5 s intervals from stimulus onset when averaged over a significant number of episodes. The new opportunities offered with this cognitive effort indicator are discussed. Recent literature data show that the removal of respiratory influence from heart rate is feasible. With such correction, it seems possible to improve the sensitivity of HRC, and HR acceleration should be observed without averaging the HRC over many trials. If this proves effective, using an algorithm to detect cognitive effort in real time, future assistance devices could warn drivers or overcome their mistakes when they no longer control driving activity because of a cognitive effort.

Keywords: Heart Rate Change, Cognitive Effort, Driving, Evoked Cardiac Response

I. INTRODUCTION

Driving is a visual attentional expensive activity requiring a constant cognitive control and a constant management of the allocation of attentional resources by adopting different cognitive compromises. These compromises refer to adjustments to achieve a satisfactory, albeit not optimal, performance, while limiting the cognitive cost of the task (Hoc & Amalberti, 2007). Attention is a multidimensional concept referring to a state in which there is an optimal level of activation to select and prioritize information in controlling the ongoing activity (Rueda, Pozuelos, & Combita, 2015). As individual's attentional resources capacities are limited for paying attention (Wickens, 1980), performing an additional task while driving divides attentional resources so the driver can perform both tasks in parallel, which leads to deterioration in driving performance. A cognitive load is generated by the cognitive activities expected from the driver who, drawing on his/her own resources, makes a cognitive effort to perform the required mental processing (Amalberti, 2001). Recent advances in cognitive neuroscience offer new opportunities to improve our understanding of how this cognitive control operates.

In 2003, Parasuraman introduced a new interdisciplinary field called "neuroergonomics," which aspires to be the best tool for studying the "brain at work". The idea is that the interaction between ergonomics and neuroscience would improve understanding of the brain in action and that the human operator could be monitored using direct data from the neurosciences. A passive brain-computer interface would connect brain activity to a system able to provide the operator with feedback on his/her status (Roy, 2015), leading to safer interactions between the system and the operator. In practical terms, neuroergonomics can lead to the design of more efficient and safer working conditions. The potential beneficiaries include the owners of the systems in which the technologies are used. For example, a passive brain-computer interface could provide useful information to drivers, who are increasingly exposed to impaired attentional states.

In the last decade, epidemiological studies have shown that two types of impaired attentional states are contributing factors in about 40 to 50% of road accidents (Galéra, Orriols, M'Bailara, Laborey, Contrand, Ribéreau-Gayon et al., 2012; Mosedale, Purdy, & Clarkson, 2004):

- Inattention to driving is defined as a state inducing endogenous shift of attention (Lemerrier & Cellier, 2008). The emergence of inattention can be promoted by various factors including fatigue, medication or mind wandering (MW), which corresponds to unintentional thoughts unrelated to the task (Galéra et al., 2012). MW is also defined as a shift in the contents of thought away from an ongoing task to self-generated thoughts and feelings (Smallwood & Schooler, 2015). These factors will reduce the driver's ability to operate sufficient cognitive control and thus promote the emergence of inattention.
- Distraction is defined as a diversion of attention away from critical activities to competitive activities not linked with the ongoing activity; an example is cell phone use while driving (Strayer, Drews, Albert, & Johnston, 2001). Distraction consists of

PEPIN, Guillaume, JALLAIS, Christophe, FORT, Alexandra, MOREAU, Fabien, NAVARRO, Jordan, GABAUDE, Catherine, 2017, Towards real-time detection of cognitive effort in driving: contribution of cardiac measurement , Travail Humain, 80, Presses Universitaires de France

exogenous orientation of attention to external events inside or outside the vehicle. This presents a risk for the driver since it contributes to a significant number of road accidents (Wang, Knipling, & Goodman, 1996; Wilson & Stimpson, 2010).

Recently, it has been shown that MW while driving is detrimental since it degrades the driver's control of the vehicle, with a decrease of speed micro-regulations and larger deviations in the vehicle's lateral position (Lemercier, Pécher, Berthié, Valery, Vidal, & Paubel et al., 2015). MW also increases the risk of being considered responsible for a road accident (Galéra et al., 2012). Some authors consider that this higher risk is due to a failure to scan or monitor the environment (He, Beauvale, & Bener, 2011). Several techniques have been used to identify MW episodes using eye gaze (Uzzaman & Joordens, 2011) and variability in lane position (Gabaude, Baracat Jallais, Bonniaud, & Fort, 2012). Nevertheless, it seems easier to spot a distraction than inattention. Distraction can be detected when the driver looks away from the road while interacting with elements in the environment or when there is interference from a manual activity. Inattention, on the other hand, involves no easily identifiable behavioral activity. Within this framework, physiological data therefore seem to be the most able to shed light on this cognitive state.

To understand how the cognitive effort is managed by an operator, it is important to distinguish the concepts of effort and cognitive load. Cognitive load is impersonal, it corresponds to what is required by the ongoing task; effort is what the participant agrees to allocate as resources for the processing of this task, it's the investment made (Paas, 1992). In other words, the cognitive load is subjected to external constraints (dependent on the task) and effort is subjected to internal ones (dependent on the abilities, skills and motivation of the driver). So, depending on internal factors, the cognitive effort made by two people performing the same task may differ.

Studies of cognitive effort while driving could help drivers avoid exposure to cognitive overload, which is a state where the effort made exceeds the available resources required to perform the task correctly. By highlighting a real-time indicator of cognitive effort, it would seem possible to anticipate potential overload while driving. Impaired attentional states behind the wheel being ubiquitous, the indicator of cognitive effort while driving must therefore be universal. There are already several methods for recording cognitive effort in driving, especially using questionnaires as the NASA-TLX (Hart & Staveland 1988). However, the use of introspective questionnaires does not allow real-time detection of the cognitive effort made by drivers. Moreover, questionnaires raise the problem of subjectivity and the reliance on self-report measures. These kind of introspective measures are still needed but have to be corroborated by objective and external measures such as physiological data to avoid self-report biases (Schooler & Schreiber, 2004; Smallwood & Schooler, 2015). Indeed in order to monitor drivers in real-time, in accordance with the neuroergonomics approach, indicators have to be objective and continuous to detect unconscious mental state such as mind-wandering. In addition, measures of lateral deviation and vehicle speed seem to be linked to the cognitive cost of a task, but are not sensitive enough to provide a rapid response regarding the presence of a cognitive effort. The indicator selected should be sufficiently

PEPIN, Guillaume, JALLAIS, Christophe, FORT, Alexandra, MOREAU, Fabien, NAVARRO, Jordan, GABAUDE, Catherine. 2017. Towards real-time detection of cognitive effort in driving: contribution of cardiac measurement. *Travail Humain*, 80, Presses Universitaires de France

sensitive to the presence of a cognitive effort within a strict timeframe. The purpose of this study is to highlight an indicator of cognitive effort that can be used in real time while driving. Our indicator takes into account physiological measures, particularly heart rate (HR) and its change. Previous studies have tried to highlight the driver's cognitive effort in real driving situations (Gabaude, Baracat Jallais, Bonniaud, & Fort, 2012). Participants were asked to perform various cognitive tasks in parallel with a main driving activity. HR variability was studied conducting frequency-domain analysis over a 300 s time window to reach a sensitive indicator of cognitive effort. Various authors have highlighted cognitive effort indicator conducting frequency-domain analysis such as Low Frequency / High Frequency ratio of heart rate variability (Durantin, Gagnon, Tremblay & Dehais, 2014; Hjortskov, Rissén, Blangsted, Fallentin, Lundberg & Søgaard, 2004). Even if these studies highlighted a cognitive effort indicator, they conducted frequency-domain analysis on time window in the order of one to several minutes. Considering the complexity of the driving activity, a one minute time window is too large to detect the cognitive effort in real time. To reach this goal, the indicator has to be able to detect a cognitive effort in only few seconds. Therefore, while driving, a real-time detection of the cognitive effort cannot be done through that kind of analysis but has to be done through time-domain analysis using indicators such as the heart rate change (HRC).

The extent of cognitive effort using a HRC measurement has already been demonstrated in laboratory tasks using 6 s windows (Kaiser, Beauvau, & Bener, 1996; Kaiser, Wronka, Barry, & Szczudlik, 1999; Lawrence & Barry, 2009). Various authors working on change in HR have reported differences in HRC patterns, known as response patterns, between a passive and an active cognitive task (Kaiser et al., 1996, Kaiser et al., 1999 Lawrence & Barry, 2009). In the active task condition, participants were asked to count beeps while in the passive task they were asked to ignore the sounds heard and relax. In the passive task, simple deceleration of the HR was observed. In contrast, the active task showed a biphasic response: an early very short HR deceleration (ECR1) followed by acceleration (ECR2). In order to determine whether cardiac acceleration during cognitive processing was linked to an effort, the authors conducted a complementary study. They reproduced the same experimental conditions as previously but included patients with amyotrophic lateral sclerosis (ALS), a motor neuron disease that does not interfere with executive behavior, but impairs cognitive function. Partial losses of synaptic connections is involved, mainly in the frontal lobe. There was no difference between groups in the passive task, whereas a less pronounced, significant HR acceleration was found in the active task for ALS patients (Kaiser et al., 1999). This study corroborates the hypothesis that the ECR2 component is the manifestation of cognitive effort, this process being altered in the ALS group. In summary, cardiac deceleration in passive tasks (and slightly present in active tasks) can be associated with automatic processing of a stimulus, without any need to become involved. This is a passive and not controlled process. Conversely, the strong HR acceleration in active tasks is correlated with executive control processes involving the frontal cortex and requiring active and conscious processing (Lawrence et al., 2009). Moreover, HR acceleration seems more pronounced when the cognitive effort is greater. These results should be confirmed in order to explore the sensitivity of such an indicator because various questions are unanswered: will the ECR2

PEPIN, Guillaume, JALLAIS, Christophe, FORT, Alexandra, MOREAU, Fabien, NAVARRO, Jordan, GABAUDE, Catherine, 2017, Towards real-time detection of cognitive effort in driving: contribution of cardiac measurement , Travail Humain, 80, Presses Universitaires de France

component change with a more difficult cognitive task? Will the change be in amplitude and/or delay? Will the final cardiac acceleration be greater with a difficult cognitive task than with an easy one? Manipulation of the difficulty of the cognitive task would allow the links between cognitive effort and HRC to be specified.

According to Lawrence & Barry (2009), these hypotheses on the recording and processing of information during active and passive cognitive tasks have been confirmed with other neurobiological correlates, and a parallel has been drawn with simultaneous brain variations. Using the same experimental protocol, the authors demonstrated strong correlations between event-related potentials (ERPs) and ECR. In this way, they concluded that the auditory N1 component (early component specific to the stimulus sensory modality) and P300 (late component nonspecific to the stimulus sensory modality) are to ERPs what the ECR1 and ECR2 components are to ECR. Another study confirmed that the slightly deceleration of HR in passive tasks is due to unintended resource allocation (Schröger, 1997; Volosin & Horvath, 2014). This automatic allocation corroborates the hypothesis that the ECR1 component is passive and uncontrolled. Conversely, the ECR2 and P300 components reflect the cognitive effort made by the participant.

As previously mentioned, the neuroergonomics approach offers to link ergonomics and neuroscience data to improve understanding of the brain in action (Parasuraman, 2003). Cardiac markers (ECR1 and ECR2) obtained studying HRC are highly correlated with brain markers appearing simultaneously (Lawrence & Barry, 2009). HRC seems to provide a relatively stable measure of cognitive effort through a near-instantaneous objective measurement. The present study had several objectives: first, to confirm that the use of HRC can distinguish active and passive conditions; second, HRC needs to be sensitive enough to show greater HR acceleration as task difficulty increases: when an additional cognitive task is performed, a larger HR acceleration is expected compared with conditions without an additional task. The main objective of this study, using analysis of the HRC, was to highlight a cognitive effort indicator usable while driving. Ultimately, a sensitive cardiac marker would allow an automatic driver system to monitor the real-time states of drivers (Roy, 2015).

II MATERIALS AND METHODS

1. Participants

An online procedure was used to recruit 18 healthy volunteers from the University of Lyon (10 males, age 22.7 ± 1.4). All of them reported normal or corrected to normal visual acuity and had been holders of a valid driving license for at least 3 years. Before starting the experiment conducted at IFSTTAR Bron, participants were asked about their health status and only those without any declared cardiovascular diseases were included. All participants gave written consent and received no financial support for their participation. Throughout the experiment, participants were seated in a car wearing an ambulatory measurement system of cardiac activity.

PEPIN, Guillaume, JALLAIS, Christophe, FORT, Alexandra, MOREAU, Fabien, NAVARRO, Jordan, GABAUDE, Catherine, 2017, Towards real-time detection of cognitive effort in driving: contribution of cardiac measurement , *Travail Humain*, 80, Presses Universitaires de France

2. Experimental design

Four factors were studied: one repeated measurement (mean HRC in a 0.5 s window; 13 consecutive measurements recorded to analyze the shape of the response) and three within-subject factors (cognitive activities: active vs passive; tasks: single vs dual; and difficulty levels: easy vs difficult). Each participant took part in each condition of the independent variables. In the dual task condition, while dealing with the cognitive activity, drivers also had to maintain the car speed at 70 Km/h and stay in the center of the lane.

In order to manipulate the intensity of the cognitive effort, two mental calculation cognitive tasks were implemented. In the easy cognitive task, auditory stimuli were presented and, according to the cognitive activity (active vs passive), participants had to count them or not. The protocols software was used to implement beeps according to the specification provided by Kaiser et al. (1996). In the difficult cognitive task, participants memorized beforehand a grid of 25 digits or numbers (presented in 5 columns and 5 rows; in order to facilitate memorization, the units increased from one column to another and the tens from one row to the other). Direction instructions (up, down, left, right) were presented orally and the participant, in the active condition, had to move mentally within the grid and add the new number to the results previously obtained.

To ensure the successful completion of the cognitive task, in each condition, the number of stimuli varied between 7 and 13. In checking the accuracy of the answers, we checked that the cognitive task was performed correctly. All experimental conditions were partially counterbalanced. In order to avoid a learning effect (e.g., automatic counting sounds), for each task, the four passive conditions were performed before the active ones. Four groups were formed by balancing the tasks and the difficulty levels. All participants heard 77 stimuli during the experiment. In total, across all participants, 1386 events were collected in this study (Table 1).

Table 1: Number of items recorded and used in statistical analyses

	Number of events by subject and by condition	Number of events by condition	Number of usable events
Easy/DI/Pas	7	126	94
Easy/DI/Act	12	216	212
Easy/ST/Pas	13	234	215
Easy/ST/Act	11	198	185
Diff/DI/Pas	10	180	168
Diff/DI/Act	8	144	141
Diff/ST/Pas	9	162	150
Diff/ST/Act	7	126	114
Total	77	1386	1279

Diff = Difficult, DI = Dual Task, ST = Single Task, Pas = Passive and Act = Active

PEPIN, Guillaume, JALLAIS, Christophe, FORT, Alexandra, MOREAU, Fabien, NAVARRO, Jordan, GABAUDE, Catherine. 2017. Towards real-time detection of cognitive effort in driving: contribution of cardiac measurement. *Travail Humain*, 80, Presses Universitaires de France

Precautions were taken to allow the making of cognitive efforts even if a mistake was made in counting: a one point margin of error was allowed for the easy counting task; when using mental displacement in the grid (difficult counting task), participants had to move in the 9 central squares of the 25-square grid they had memorized; if a participant announced being outside the grid, the current trial was canceled. No participants made more than one mistake per condition. Therefore, all conditions were retained. Concerning the passive task conditions, participants were seated in the car and were asked not to pay attention to the sounds presented.

3. Procedure

Before the experiment started, participants were informed about the experiment and asked to give their consent. They were informed that they could stop the experiment at any time if necessary. Then, the 3 electrodes were applied and participants sat in the simulator cabin. A 5 min baseline measurement of HR was made for each participant prior to the experimentation. Following this baseline measurement, a short training session (2 to 5 min) was performed, after which participants had to learn the calculation grid during 5 min. Using three mental displacements in the grid, the experimenter checked that the difficult counting task was understood and feasible. When ready to perform the cognitive tasks, participants were then exposed to the 8 experimental conditions (each lasted from 5 to 9 min) in a counterbalanced order. The whole experiment lasted nearly one and a half hours. After each active cognitive task, participants were asked to give the target count to the experimenter. At the end of the experiment, a debriefing session was performed.

4. Material and apparatus

a. Driving simulator

The driving simulator consisted of a Peugeot 308 (Peugeot S.A., Paris, France; length = 4.27 m; width = 1.81 m) surrounded by seven video projection screens (covering a total angular space of 270° and vertical angular size of 47.5°). Participants drove in a straight line and curves in an urban residential zone with sparse traffic. The vehicle was equipped with a manual transmission, and the steering wheel had a force feedback system. A system of sound restitution was used for motor sounds and the instructions given to participants. A microphone, inside the car, was used to record the participants' responses.

b. Heart rate measurement and pre-processing

HR was measured using 3 electrodes via a wireless physiology solution (Biopac, MP150 using Bionomadix transmitters) in each experimental condition and during the baseline measurements. Each participant wore three electrodes connected to the Bionomadix device. The positive electrode was placed under the last left rib, the negative electrode on the manubrium of the sternum, and the ground electrode on the right side, just on top of the hip. In a test phase, it has been checked that this positioning satisfies the main conditions to collect correct cardiac signal during driving: compromising with the length of the wires and avoiding a noisy signal due to muscular activity.

PEPIN, Guillaume, JALLAIS, Christophe, FORT, Alexandra, MOREAU, Fabien, NAVARRO, Jordan, GABAUDE, Catherine, 2017, Towards real-time detection of cognitive effort in driving: contribution of cardiac measurement , Travail Humain, 80, Presses Universitaires de France

An off-line cardiometer method, recently published by Guerra et al (2016), was used to identify interbeat intervals (IBI) before running an extraction procedure to obtain an evoked cardiac response. The ECGLab tool box developed in MATLAB language (Azevedo de Carvalho, Da Rocha, De Oliveira Nascimento, Souza Neto, Junqueira, 2002) have been used to run an automatic detection of the R-R intervals in order to define IBI corresponding to the time between two peaks of R waves. At this step, the user can inspect the ECG and correct mistakes in the detection process, and also identify ectopic beats. All data sets were manually checked for outliers (1386 events) to eliminate trials (107 events) from which the cardiac signal was noisy. On average, 71 (± 8) evoked cardiac responses were analyzed for each participant; half in active and half in passive conditions (see Table 1). Then, off-line transformation of the IBI into HR in beats/min was done to obtain a continuous signal. HR and IBI are defined as follows:

$$IBI_n = r_n - r_{n-1}$$
$$HR_n = \frac{60,000}{IBI_n}$$

where IBI_n is the interval between two peaks at a given time in milliseconds (ms), r_n is the time of the n^{th} R peaks and HR_n is the heart rate in beat per minute (bpm) at the same time (Roy, 2015).

As a last step to obtain the heart rate change (HRC) every 0.5 s, the transformation formula have been calculated as follows:

$$HRC = HR(t) - HR(t_0)$$

where HRC is the change in heart rate in beat per minute (bpm), $HR(t)$ is the heart rate at any time in the time window and $HR(t_0)$ is the heart rate at the beginning of the time window. Indeed, each time window lasted 6 s corresponding to 13 successive HRC values including the first and the last data point. Therefore, an event-related response corresponding to HRC was obtained for each time window. It should be noted that a brief HR deceleration (ECR1) reflects stimulus recording, whereas the following HR acceleration (ECR2) reflects a cognitive load that is absent if the subject is not making a cognitive effort.

5. Statistical analyses

The ECR was analyzed using repeated measure ANOVA to examine response trends in the 6 s following stimulus onset relative to the pre-stimulus HR value (13 HRC measurements). The analysis examined cognitive activities (active vs passive), tasks (single vs dual) and difficulty levels (easy vs difficult) as within-subject factors in the design. Simple (linear, quadratic, cubic) trends over time were used to define response effects. As mentioned by Lawrence and Barry (2009), generally, a brief phasic cardiac response is indicated by a quadratic trend over a short time period and/or a cubic trend if the response is not symmetrical in the time period. This cubic trend may be supplemented/replaced by a linear trend if the response is incomplete in the time period. To specify differences between conditions, paired

PEPIN, Guillaume, JALLAIS, Christophe, FORT, Alexandra, MOREAU, Fabien, NAVARRO, Jordan, GABAUDE, Catherine. 2017, Towards real-time detection of cognitive effort in driving: contribution of cardiac measurement, *Travail Humain*, 80, Presses Universitaires de France

samples Student's *t*-tests were calculated comparing HRC values for each time step. These *t*-tests have not been corrected for multiple comparisons.

III RESULTS

As described in Table 1, 1279 events were exploited across all conditions after removing events for which the cardiac signal was unsuitable for analysis. The results of statistical analyses are summarized in Table 2. For these analyses, all interactions between repeated measurements and our three factors of interest are presented.

Table 2: Results of statistical analyses

Source	Trends	F (1, 11)	P-value
Acti	Linear	12.65	p<.01**
	Quadratic	15.77	p<.01**
	Cubic	2.82	p=.12;NS
Acti*Task	Linear	0.17	p=.69;NS
	Quadratic	2.17	p=.17;NS
	Cubic	3.91	p=0.074
Acti*Diff	Linear	0.18	p=.68;NS
	Quadratic	7.86	p<.05*
	Cubic	0.08	p=.79;NS
Acti*Diff*Task	Linear	1.47	p=.25;NS
	Quadratic	0.06	p=.80;NS
	Cubic	0.41	p=.54;NS

Acti = Activity and Diff = Difficulty

1. Effect of cognitive effort on HRC

The ECRs averaged across active and passive conditions are presented in Figure 1. The impact of the activity on the response patterns gave rise to a significant linear ($F(1,11) = 12.65, p < .01$) and quadratic trends ($F(1,11) = 15.77, p < .01$). The response patterns followed both quadratic and cubic trends. No conclusion could be drawn from this analysis since two trends were significant. From a purely descriptive point of view, response patterns differ depending on the activity. In passive tasks, simple HR deceleration was observed while in active conditions a deceleration and an acceleration of HR were clearly visible. The two ECR components (ECR1 and ECR2) were identified.

PEPIN, Guillaume, JALLAIS, Christophe, FORT, Alexandra, MOREAU, Fabien, NAVARRO, Jordan, GABAUDE, Catherine, 2017, Towards real-time detection of cognitive effort in driving: contribution of cardiac measurement, Travail Humain, 80, Presses Universitaires de France

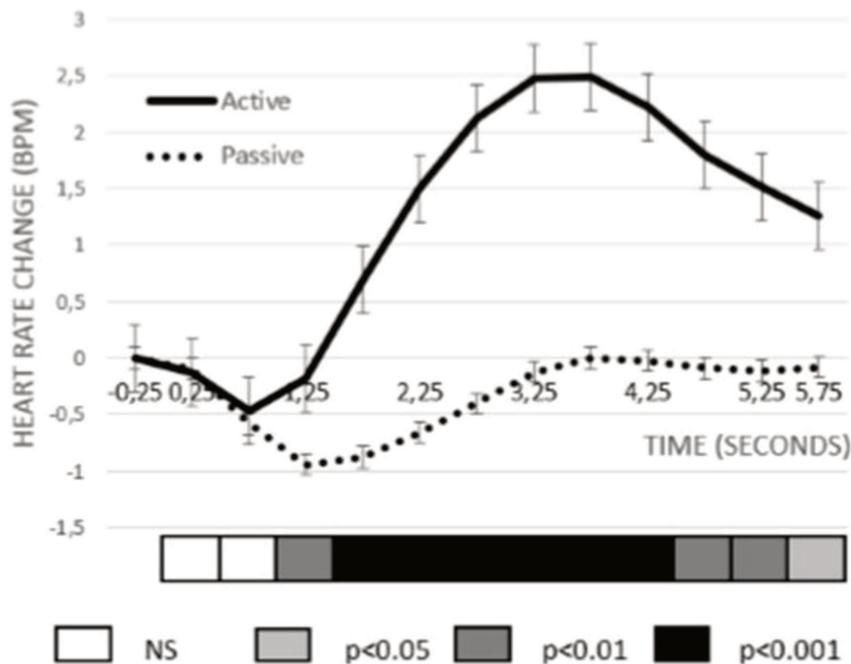


Figure 1 : Grand mean evoked cardiac responses at 0.5 s intervals from stimulus onset (obtained from raw data), ECR averaged across active vs passive conditions and statistical significance for Student's *t*-tests comparing mean HRC values between active and passive conditions.

To specify differences between active and passive tasks better, a paired samples Student's *t*-tests were calculated comparing HRC values between conditions for each time step. It has to be noted that all *t*-tests have not been corrected for multiple comparisons. The first significant difference occurred 1.25 s after stimulus onset (4th data point). At this time, the HRC value for the active conditions was -0.18 and -0.94 for the passive task. The difference was statistically significant $t(17) = 2.90$, $p < .01$. For points 5 to 13 (1.75 s after stimulus onset to 5.75 s), the calculated differences in HRC values between active and passive tasks were significant until the 13th data point. *T*-values were respectively 4.81, 4.70, 4.72, 5.14, 5.56, 5.31, 4.10, 3.09 and 2.86.

2. Effect of cognitive effort and additional task on HRC

A near-significant two-way interaction was found according to the activity (active vs passive) and task (simple vs dual) for the cubic trend ($F(1,11) = 3.91$, $p = .074$) presented in Figure 2. Interactions between activity and task for linear and quadratic trends were not significant. Even though these results are not significant, the initial HR deceleration was greater with an additional driving task during the passive task condition. In active conditions, cardiac acceleration was greater during the dual task conditions than during the simple task.

PEPIN, Guillaume, JALLAIS, Christophe, FORT, Alexandra, MOREAU, Fabien, NAVARRO, Jordan, GABAUDE, Catherine, 2017, Towards real-time detection of cognitive effort in driving: contribution of cardiac measurement, Travail Humain, 80, Presses Universitaires de France

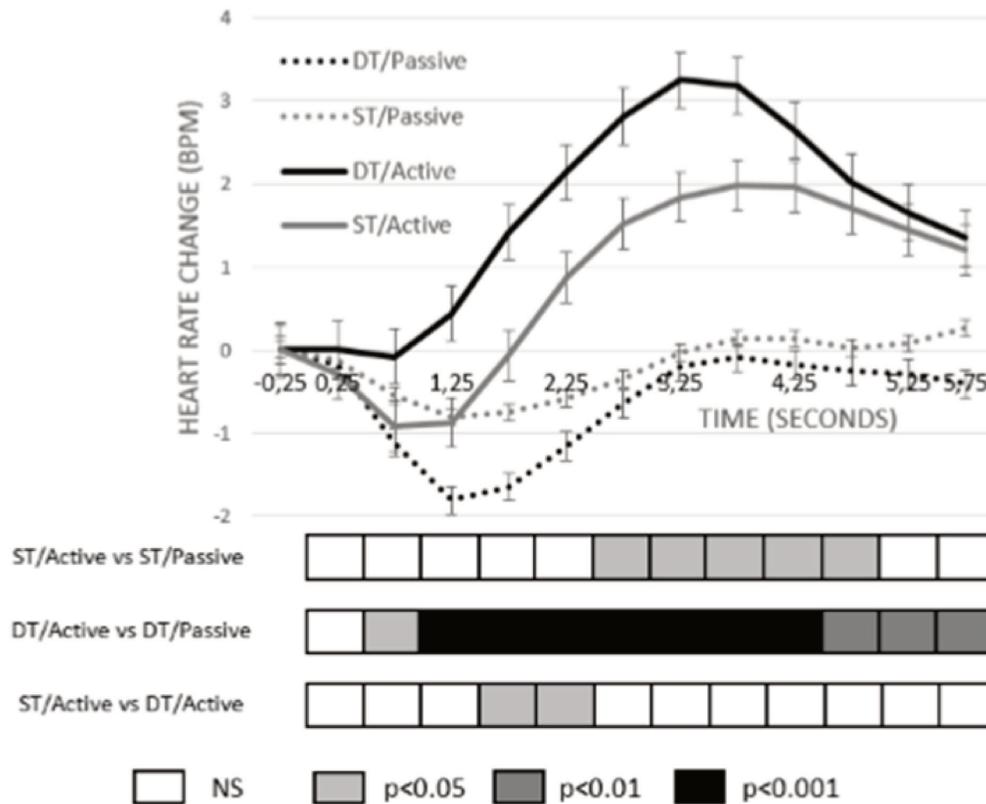


Figure 2: Grand mean evoked cardiac responses at 0.5 s intervals from stimulus onset, ECR averaged across active vs passive conditions, simple vs dual task and statistical significance for Student's *t*-tests comparing mean HRC values between ST/Active conditions and ST/Passive conditions, DT/Active conditions and DT/Passive conditions.

Regarding Student's *t*-tests, the first significant difference occurred between the 6th and 7th data point (2.75 s after stimulus onset). The HRC value for active conditions was 1.52 and -0.34 for the passive task: the difference was statistically significant $t(17) = 2.14$, $p < .05$. The differences were significant until the 11th data point included (4.75 s). For points 8 to 11, *t*-values were respectively 2.35, 2.67, 2.80 and 2.47.

Considering HRC differences obtained in the dual task (with an additional driving task) for active and passive conditions, the first significant difference occurred at the 3rd data point (0.75 s after stimulus onset). The HRC value for the dual task was -0.08 in active conditions and -1.11 in passive conditions, the difference being statistically significant $t(17) = 2.46$, $p < .05$. For points 4 to 13 (1.25 s after stimulus onset to 5.75 s), the differences calculated in HRC values between active and passive tasks were all significant. The *t*-values for points 4 to 13 were respectively 4.42, 5.21, 5.14, 5.06, 4.77, 4.63, 4.56, 3.90, 3.51 and 3.43.

PEPIN, Guillaume, JALLAIS, Christophe, FORT, Alexandra, MOREAU, Fabien, NAVARRO, Jordan, GABAUDE, Catherine, 2017, Towards real-time detection of cognitive effort in driving: contribution of cardiac measurement, Travail Humain, 80, Presses Universitaires de France

3. Effect of cognitive effort and difficulty on HRC

A significant two-way interaction was found according to the activity (active vs passive) and task difficulty (easy vs difficult) for the quadratic trend ($F(1,11) = 7.86, p < .05$): Figure 3. For linear and cubic trends, the results were not significant. These results suggest that the shape of the response is not the same according to condition and task difficulty. Thus, in passive conditions, HR returned to its baseline faster for the difficult task than for the easy one. There was even a slight HR acceleration (HRC for this task exceeded the 0 threshold in the second half of the time window). In active conditions, a larger HR initial deceleration was visible in the easy task. The HR acceleration following this deceleration was present for both easy and difficult tasks, but was greater for the difficult one.

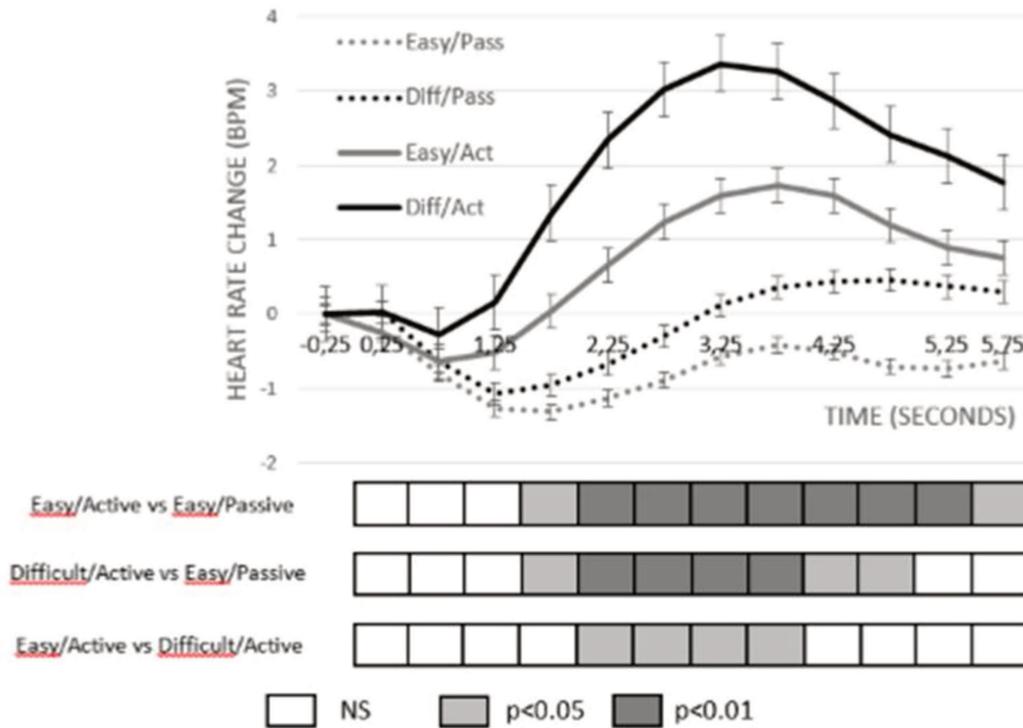


Figure 3: Grand mean evoked cardiac responses at 0.5 s intervals from stimulus onset, ECR averaged across active vs passive conditions, easy vs difficult level and statistical significance for Student's *t*-tests comparing HRC between easy/active conditions and easy/passive conditions, difficult/active conditions and difficult/passive conditions and easy/active conditions and difficult/active conditions

Student's *t*-tests were performed to specify differences between results obtained in the easy task for active and passive conditions. The first significant difference occurred at the 5th data point (at 1.75 s after stimulus onset). HRC values during the easy task for the active conditions was -0.06 and -1.49 for the passive conditions, the difference being statistically significant $t(17) = 2.66, p < .05$. The differences remained significant until the 13th data point included. Calculated *t*-values for points 6 to 13 were respectively 3.01, 3.24, 3.23, 3.34, 3.72, 3.61 and 2.99.

PEPIN, Guillaume, JALLAIS, Christophe, FORT, Alejandra, MOREAU, Fabien, NAVARRO, Jordan, GABAUDE, Catherine, 2017, Towards real-time detection of cognitive effort in driving: contribution of cardiac measurement, *Travail Humain*, 80, Presses Universitaires de France

Considering HRC differences obtained in the difficult task for active and passive conditions, the first significant difference also occurred in the 5th data point (1.75 s after stimulus onset). HRC values were 1.54 for the active task and -0.94 for the passive task, the difference being statistically significant $t(17) = 2.75, p < .05$. For points 6 to 11 (from 2.25 s after stimulus onset to 4.75 s), the calculated differences in HRC values for the difficult task between active and passive conditions were significant. Calculated t -values were respectively 3.25, 3.43, 3.45, 3.37, 2.81 and 2.26.

4. Results by Participant

After applying the decision criteria explained above, 9 of 18 participants (50%) had HRC values in agreement with our assumptions for active and passive conditions. Conversely, 2 participants did not match our assumptions for active and passive tasks. The remaining 7 participants had one condition that matched our assumptions and another that did not. Among these 7 participants, 6 had passive conditions that did not match our assumptions and one who had active conditions that did not match our assumptions. Figure 4 and Figure 5 present results obtained from respectively a participant on which the indicator is sensitive enough to show ECR1 and ECR2 components and a participant on which the indicator is not sensitive enough

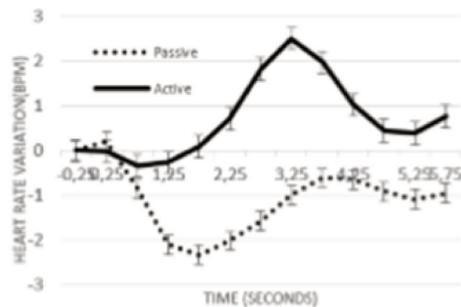


Figure 4: Example of results obtained with a participant on which the indicator is sensitive enough

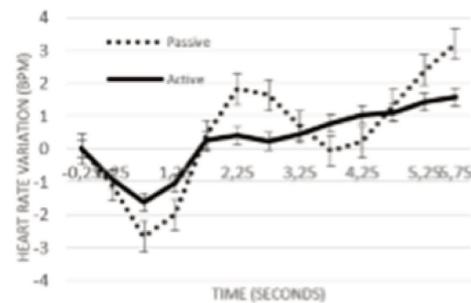


Figure 5: Example of results obtained with a participant on which the indicator is not sensitive enough

IV. DISCUSSION

The main objective of this study was to identify, through HRC analysis during short time windows, an indicator of cognitive effort usable in driving. As a reminder, 18 participants performed cognitive tasks in 8 experimental conditions. Four factors were studied: one repeated measure (grand mean evoked cardiac response with 0.5 s intervals from stimulus onset) and three within-subject factors (cognitive activities: active vs passive, tasks: single vs dual and difficulty levels: easy vs difficult). The effects of cognitive activity on HRC and the interactions between the difficulty levels and the driving task on HRC are discussed before considering between-subject differences and finally the prospects for the use of such an indicator.

Cognitive activity had different effects on HRC: linear and cubic trends of the response pattern appeared significantly different between active and passive conditions. Visually, the

recorded results corroborate those obtained by other authors (Kaiser et al, 1996; Kaiser et al, 1999; Lawrence et al, 2009). Results shown in Figure 1 suggest that the shape of HRC curves differs according to the nature of the cognitive activity. The biphasic response expected while performing a cognitive activity in response to auditory stimuli was highlighted. This biphasic response is composed of the ECR1 component corresponding to HR deceleration and the ECR2 component corresponding to HR acceleration. In the active conditions, a slight HR deceleration, followed by a sharp acceleration reflecting the cognitive effort was noticeable. Supplementary analyses were conducted to describe differences in HRC pattern. Student's *t*-tests were calculated at each time step, and differences between the two activity conditions were revealed from the fourth data point. This cognitive effort indicator has been sensitive enough to rapidly distinguish effort conditions from rest conditions (from 1.25 s after stimulus onset). Thus, it has been possible to highlight HR acceleration reflecting the driver's cognitive effort using HRC over short time windows.

The interaction between activity and the task's difficulty highlighted the impact of the cognitive task difficulty level on the shape of HRC. The interaction showed that the quadratic trend pattern appeared significant in the analysis of variance. The shape of HRC curves differed according to activity and task difficulty levels. In the active task conditions, the amplitude of the ECR2 component of HRC curve was larger for the difficult task than for the easy one. This result confirms that the two tasks used in this study have generated two different cognitive efforts. Counting sounds required a moderate cognitive effort while the second task (which was more complex and involved mental displacement, memory recall and mental calculation) required greater cognitive effort. Moreover, to our knowledge, no study had investigated the effect of the lexical processing of words on HRC. Thus, it is possible that these stimuli had a different impact on cognitive effort than beeps. Indeed, words are more complex stimuli than simple beeps and lexical treatment required could change the depth of processing of these stimuli. Just hearing words may lead to additional cognitive processing related to the extraction of their meaning. Yet the return of HRC to its baseline in the passive conditions was faster for the difficult task than for the easy task, but HRC also went above the baseline (Figure 3). Thus, increasing the task difficulty level led to changes in the shapes of HRC: the ECR2 component was more pronounced between 1.75 s and 3.25 s after stimulus onset, when the difficulty level increases. The impact of the types of stimuli on HRC is not clearly established in the literature and these possible variations will have to be taken into account in future studies. Further studies should explore the impact of lexical processing on the ECR1 and ECR2 components and thus sharpen understanding of the links between HRC and cognitive effort. Such a study could help understanding why the return to the baseline was faster in passive conditions for the difficult task than for the easy one. Two types of stimuli were used in this study and in both cases HRC was sensitive enough to distinguish active and passive conditions. With such an indicator (obtained in a very short period of time), if the driving situation requires a supplementary cognitive effort, we can imagine that cognitive overload will be detected and so can be managed.

The activity (active vs passive) and task (single vs dual) interactions allowed us to study the feasibility of the driver's cognitive effort assessment even during driving. Statistical analyses

showed a significant cubic trend in the HRC pattern. By comparing curves obtained according to activity and task, there was a larger recorded HR acceleration while performing a dual task than a single task. There was an additive effect of the driving task: the cognitive effort was greater when an added task (e.g., driving) was required simultaneously, which is consistent with our hypothesis. From a purely descriptive standpoint, the shape of HRC differed between active and passive conditions, whether with or without additional driving activity. The ECR2 component was more pronounced in active task conditions, while the ECR1 component was more pronounced in passive task conditions. Calculated *t*-values in active and passive conditions for the simple task showed a significant difference from 2.75 s after stimulus onset. This means that without any additional driving task, it was possible to highlight the difference between active and passive conditions in less than three seconds after the beginning of the cognitive effort. Focusing on HRC differences obtained while performing an additional driving activity for active and passive conditions, the first significant difference occurred at the 3rd data point (0.75 s after the stimulus onset) and persisted until the end of the time window. Thus, despite a low number of participants (e.g., 18), it is possible to differentiate active from passive conditions while driving in less than a second after the stimulus onset.

In active conditions, the extent of HR acceleration was greater with an additional driving task than without, although this effect was not significant (Figure 2). It is therefore likely that the intensity of HR acceleration in active conditions reflected the "amount" of effort made by the participant. This leads to the assumption that the greater the effort made by the participant to solve the task the more the HR accelerates. Another result seemed to corroborate this assumption: the ECR2 component for the difficult task was more pronounced (sharper HR acceleration) than the ECR2 component for the easy task (Figure 3). Accordingly, *t*-tests shown statistical differences between an active easy task and an active difficult one between 1.75 and 3.25 s after the stimulus onset. On the only basis of HRC, the effect of the task difficulty can be seen less than 2 seconds after the beginning of the tasks. Thus it seems possible that the heart rate change might be a quantitative indicator of the driver's cognitive effort and could provide information on the amount of effort produced. Nevertheless, effort reflects not only the participant's motivation but also his or her capacities. A person who has strong mental calculation abilities should, logically, furnish a smaller cognitive effort in solving tasks. To test this assumption on the proportionality between effort and HR acceleration, in future studies, a mental calculation test associated with a subjective evaluation of task difficulty collected through the NASA-TLX questionnaire (Hart & Staveland, 1988) should be proposed to each participant to control for these variables.

Averaging HRC by participant highlighted substantial differences between individuals in evoked cardiac responses. These differences might be due to the impact of breathing, disparity in attention resources or disparity in motivation and personal goals. Indeed, heart rate and breathing have close links that should be taken into account¹ (Choi & Gutierrez-Osuna,

¹ Each breath slightly changes HR: inspiration accelerates it and expiration decreases it. This phenomenon is called respiratory sinus arrhythmia. The temporary lifting of parasympathetic tone during inspiration explains this HR acceleration and therefore the shortening of R-R intervals. Thus, respiratory data have to be taken into account in order to use online correction of HR.

2011). In this first study conducted in a driving context without recording breathing, it was impossible to understand the respective influence of these two factors. It is accepted that breathing impacts HR (Marieb & Hoehn, 2014), but there are also individual differences in attention capacities (Rueda et al., 2015). The allocation of attentional resources and attentional capacities seem to be linked to some motivational processes according to the task demands: the higher the task demand the higher the motivation (Braver, 2015). In the same vein, Young and Stanton (2002) showed that a reduction of mental workload while using automation in driving could have shrunk the ability to devote appropriate levels of attention to a secondary task. Other internal factors such as emotions can have some effects on the allocation of attention. For example, Techer et al. (2015) demonstrated that anger could increase the alerting network, while happiness could impair the executive control (Mitchell & Phillips, 2007). Thus, it could be useful, for further studies, to take into account questionnaires that assess personal factors such as motivation, emotions so as to enlighten results obtained by physiological data, cardiac response being supplemented by galvanic skin response for example.

If the evoked cardiac response is influenced by cognitive abilities then these individual differences could impact HRC and therefore the participant's response patterns. How can we be sure that these different response patterns will not hinder the detection of cognitive effort? By studying the results per participant according to the activity (active vs passive), eleven of the thirty-six experimental conditions² (30.6 %) showed HRC patterns consistent with our assumptions. But with the data collected in the present study, it was impossible to understand if these variations were due to breathing or disparity in attentional resources. So, in a future study, it would be interesting to compare the individual differences in response patterns according to activity (active vs passive) before and after the removal of the influence of breathing on HR. This can be realized using a cardiorespiratory model for paced breathing (Choi et al., 2011). We hypothesize that the influence of breathing is greater than the influence of individual differences in attention resources. Thus, in our opinion, removing the influence of breathing on HR would drastically reduce individual variability, and so our cognitive effort indicator would become more sensitive. Nevertheless, the question regarding the impact of resources allocation still remains.

Finally, it appears that measurement of cognitive effort was possible by analyzing HRC over short time windows averaged for a large number of events. About 70% of active and passive conditions obtained after averaging per participant were consistent with the assumptions made. In the literature, it is accepted that HR and breathing are closely linked (Choi et al., 2011; Marieb et al., 2014). In future studies, to define a method to detect the driver's cognitive effort in real time it will be necessary to take into consideration the respiratory data. In order to subsequently perform an HR correction using these respiratory data, inspiratory and expiratory volumes can be recorded using the method suggested by Choi & Gutierrez-Osuna (2011). In our future works, a correction algorithm (an autoregressive moving average with an

² 18 participants performed cognitive tasks in 8 experimental conditions. The HRC values were averaged for active and passive conditions. This led to 36 trials.

PEPIN, Guillaume, JALLAIS, Christophe, FORT, Alexandra, MOREAU, Fabien, NAVARRO, Jordan, GABAUDE, Catherine, 2017, Towards real-time detection of cognitive effort in driving: contribution of cardiac measurement, *Travail Humain*, 80, Presses Universitaires de France

exogenous inputs model) will be used to remove the respiratory influence from the cardiac data and improve the sensitivity of the HRC indicator.

With the gradual automation of vehicles, a device to monitor attentional states could eventually pinpoint times when the driver's cognitive effort increases. In the light of the number of victims each year of road crashes caused by driver inattention, cognitive load management could be a sustainable solution. The cognitive effort indicator highlighted here constitutes the foundations of such a solution.

Acknowledgments

Special thanks to Daniel Ndiaye and LEPSIS for their help in the preparation of the simulated driving scenarios.

Références

- Amalberti, R. (2001). *La Conduite de systèmes à risques*, 2e édition. Paris: Presses Universitaires de France - PUF.
- Azevedo de Carvalho, J.L., Ferreira da Rocha, A., Assis de Oliveira Nascimento, F., Souza Neto, J., & Junqueira Jr., L.F. (2002). Development of a MatLab Software for Analysis of Heart Rate Variability. In: 6th International Conference on Signal Processing Proceedings, 1488-1491.
- Bornstein, M., & Bradley, R. (2003). *Socioeconomic Status, Parenting, and Child Development*. New York: Routledge.
- Braver, T. (2015). *Motivation and cognitive control*. Psychology Press: New York, NY.
- Choi, J., & Gutierrez-Osuna, R. (2011). Removal of respiratory influences from heart rate variability in stress monitoring. *IEEE Sensors Journal*, 11(11), 2649-2656.
- Gabaude C., Baracat B., Jallais C., Bonniaud M., Fort A. (2012). Cognitive load measurement while driving. In D. de Waard, K. Brookhuis, F. Dehais, C. Weikert, S. Röttger, D. Manzey, S. Biede, F. Reuzeau, & P. Terrier (Eds.) (2012). *Human Factors: a view from an integrative perspective*. Proceedings HFES Europe Chapter Conference Toulouse, 67-80. ISBN 978-0-945289-44-9. Available from <http://hfes-europe.org>.
- Galéra, C., Orriols, L., MBailara, K., Laborey, M., Contrand, B., Ribéreau-Gayon, R., Masson, F., Bakiri, S., Gabaude, C., Maury, B., Lemercier, C., Cour, M., Bouvard, M., & Lagarde, E. (2012). Mind wandering and driving: responsibility case-control study. *BMJ*, 345(dec13 8), e8105-e8105.
- Guerra, P. M., Sánchez-Adam, A., Miccoli, L., Polich, J., & Vila, J. (2016). Heart rate and P300: Integrating peripheral and central indices of cognitive processing. *International Journal of Psychophysiology: Official Journal of the International Organization of Psychophysiology*, 100, 1-11.

PEPIN, Guillaume, JALLAIS, Christophe, FORT, Alexandra, MOREAU, Fabien, NAVARRO, Jordan, GABAUDE, Catherine, 2017, Towards real-time detection of cognitive effort in driving: contribution of cardiac measurement , *Travail Humain*, 80, Presses Universitaires de France

- Hart, S. G., & Steveland, L. E. (1988). Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research. In P. A. Hancock & N. Meshkati (Eds.) *Human mental Workload*. Amsterdam: North Holland Press.
- He, J., Becic, E., Lee, Y., & McCarley, J. (2011). Mind wandering behind the wheel: performance and oculomotor correlates. *Human Factors*, 53(1), 13-21.
- 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.
- Kahneman, D. (1973). *Attention and effort*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
- Kaiser, J., Beauvale, A., & Bener, J. (1996). The evoked cardiac response as a function of cognitive load in subjects differing on the individual difference variable of reaction time. *Acta Neurobiologicae Experimentalis*, 56(1), 209-213.
- Kaiser, J., Wronka, E., Barry, R. J., & Szczudlik, A. (1999). Evoked cardiac response components in cognitive processing: differential effects of amyotrophic lateral sclerosis. *Acta Neurobiologicae Experimentalis*, 59(4), 329-334.
- Lawrence, C. A., & Barry, R. J. (2009). ERPs and the evoked cardiac response to auditory stimuli: Intensity and cognitive load effects. *Acta Neurobiologicae Experimentalis*, 69(4), 552-559.
- 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.
- Lemercier, C., Pêcher, C., Berthié, G., Valéry, B., Vidal, V., Paubel, P.-V., Cours, M., Fort, A., Galéra, C., Gabaude, C., Lagarde, E., Maury, B., 2014. Inattention behind the wheel: how factual internal thoughts impact attentional control on driving. *Safety Science*, 62, 279-285.
- Lundwall R. A., Guo D. C., Dannemiller J. L. (2012). Exogenous visual orienting is associated with specific neurotransmitter genetic markers: A population-based genetic association study. *PLoS One* 7(2).
- Marieb, Elaine., Hoehn, Katja (2014). *Anatomie et physiologie humaines*. Adaptation de la 9e édition américaine.
- Mitchell, R.L.C., & Phillips, L.H. (2007). The psychological, neurochemical and functional neuroanatomical mediators of the effects of positive and negative mood on executive functions. *Neuropsychologica*, 45, 617-629.
- Mosedale, J., Purdy, A., & Clarkson, E. (2004). *Contributory factors to road accidents*. Transport Statistics: Road Safety. London: Department for Transport.

- Paas, F. G. (1992). Training strategies for attaining transfer of problem-solving skill in statistics: A cognitive-load approach. *Journal of Educational Psychology*, 84(4), 429-434.
- Parasuraman, R. (2003). Neuroergonomics: Research and practice. *Theoretical Issues in Ergonomic Science*, 4(1-2), 5-20
- Rosario Rueda, M., P. Pozuelos, J., M. Cómbita, L. (2015). Cognitive Neuroscience of Attention From brain mechanisms to individual differences in efficiency. *AIMS Neuroscience*, 2(4), 183-202.
- Roy, R.N. (2015). Etude des corrélats électrophysiologiques pour la discrimination d'états de fatigue et de charge mentale : apports pour les interfaces cerveau-machine passives. Thèse de Doctorat, Université de Grenoble, Alpes, France.
- Schröger, E. (1997). On the detection of auditory deviations: A pre-attentive activation model. *Psychophysiology*, 34(3), 245-257. <http://doi.org/10.1111/j.1469-8986.1997.tb02395.x>
- Smallwood, J., & Schooler, J. W. (2015). The science of mind wandering: empirically navigating the stream of consciousness. *Annual review of psychology*, 66, 487-518.
- Strayer, D. L., Drews, F. A., Albert, R. W., & Johnston, W. A. (2001). Cell phone induced perceptual impairments during simulated driving. In D. V. McGehee, J. D. Lee, & M. Rizzo (Eds.).
- Techer, F., Jallais, C., Fort, A., & Corson, Y. (2015). Assessing the impact of anger state on the three attentional networks with the ANT-I. *Emotion*, 15(3), 276-280
- Uzzaman, S., & Joordens, S. (2011). The eyes know what you are thinking: eye movements as an objective measure of mind wandering. *Consciousness and Cognition*, 20(4), 1882-1886.
- Volosin, M., & Horváth, J. (2014). Knowledge of sequence structure prevents auditory distraction: An ERP study. *International Journal of Psychophysiology*, 92(3), 93-98.
- Wang, J.-S., Knipling, R. R., & Goodman, M. J. (1996). The role of driver inattention in crashes: New statistics from the 1995 Crashworthiness Data System. In 40th Annual proceedings of the association for the advancement of automotive medicine (p. 377-392).
- Wilson, F. A., & Stimpson, J. P. (2010). Trends in fatalities from distracted driving in the United States, 1999 to 2008. *American journal of public health*, 100(11), 2213-2219.
- Young, M. S. & Stanton, N. A. (2002). Malleable Attentional Resources Theory: A new explanation for the effects of mental underload on performance. *Human Factors*, 44(3), 365-375

Synthèse des résultats présentés dans l'article du Travail Humain

Cette étude a d'abord permis de corroborer le fait que la VaRC est sensible à l'effort cognitif. L'apport de cette étude réside principalement dans l'application de cette méthode d'analyse à la conduite automobile. Les études précédentes montraient la sensibilité de la VaRC à l'effort cognitif dans des environnements très contrôlés. Il apparaît que la VaRC est également sensible à l'effort cognitif en conduite sur simulateur. Pour voir l'ensemble des courbes de VaRC pour les huit conditions expérimentales, se référer à l'Annexe B.

La VaRC est donc un indicateur susceptible de nous indiquer, en conduite automobile, si un conducteur a eu à effectuer des tâches cognitives en plus de son activité de conduite si et seulement si, le début de la tâche cognitive est parfaitement identifiable. De plus, il apparaît que l'amplitude de la VaRC serait modulée par la difficulté de la tâche proposée. En effet, cet indicateur pourrait également révéler l'intensité de l'effort cognitif consenti par le participant pour résoudre une tâche. Plus la tâche est difficile, plus la VaRC augmenterait sur une fenêtre de temps de quelques secondes. Pour une même tâche cognitive, la VaRC augmente plus si une tâche de conduite est effectuée en parallèle que sans. L'évolution de la VaRC serait donc dépendante du contexte et pourrait refléter la quantité d'effort cognitif qui a été nécessaire pour résoudre la tâche cognitive. Faire une tâche plus complexe ou effectuer une tâche en parallèle nécessiterait plus de ressources et se traduirait ainsi par une amplitude de VaRC plus élevée.

Résultats supplémentaires

Après publications de l'article présenté précédemment dans le travail humain, des analyses plus traditionnelles ont été conduites pour mieux comprendre l'effet d'une tâche cognitive sur la VaRC. Après nous être intéressés à la forme de la réponse de la VaRC à travers les coefficients des courbes et à des comparaisons point par point de ces réponses, nous avons voulu explorer un type d'analyse plus traditionnel que l'on retrouve le plus souvent dans l'analyse des potentiels évoqués cérébraux : l'analyse de l'amplitude et de la latence des pics des courbes de VaRC. Ce type d'analyse apparaît pertinent puisque nous étudions l'évolution d'un signal suite à la présentation d'un stimulus.

Nous avons donc cherché à étudier l'influence de l'effort cognitif, de l'activité de conduite et de la difficulté de la tâche sur l'amplitude et la latence de la réponse de la VaRC. Comme cela est fait pour les analyses en potentiels évoqués et afin de s'affranchir de la variabilité interindividuelle en comparant chaque participant à lui-même dans deux conditions différentes, nous avons comparé la moyenne pour chaque participant la valeur maximum de la réponse (amplitude) et le moment où apparaît ce maximum (latence) pour les facteurs précédemment décrits. Ces valeurs ont été calculées pour les huit conditions expérimentales et ont permis

de comparer l'effet de la tâche cognitive, l'effet de la tâche de conduite additionnelle et l'effet de la difficulté de la tâche sur l'amplitude et la latence de la VaRC après présentation des stimuli.

Il apparaît que l'amplitude de la VaRC est plus élevée lors de la tâche active (écoute d'un stimulus et tâche cognitive associée) ($m = 3.68$, $ET = 1.28$) que lors de la tâche passive (écoute simple) ($m = 1.79$, $ET = 1.02$), $F(1, 17) = 23.29$, $\eta^2 = .58$, $p < .001$. La latence du maximum obtenu s'est trouvée être plus tardive en tâche active ($m = 3.46$, $ET = 0.77$) qu'en écoute simple des stimuli ($m = 2.53$, $ET = 1.30$), $F(1, 17) = 5.78$, $\eta^2 = .25$, $p < .05$.

En ce qui concerne les tâches actives, l'amplitude de la VaRC n'est pas, avec ce type d'analyse, modulée par la conduite : $F < 1$. En revanche, le temps de latence de la VaRC est plus court sans tâche de conduite ($m = 2.50$, $ET = 1.09$) qu'avec ($m = 3.05$, $ET = 0.60$), $F(1, 17) = 7.46$, $\eta^2 = .31$, $p < .05$.

L'amplitude de la VaRC est impactée par la difficulté de la tâche proposée. L'amplitude de la VaRC de la tâche facile ($m = 2.10$, $ET = 0.83$) est significativement inférieure à l'amplitude de la VaRC de la tâche difficile ($m = 3.37$, $ET = 1.40$), ($F(1, 17) = 12.80$, $\eta^2 = .43$, $p < .01$). La latence de la VaRC n'est, en revanche, pas impactée par la difficulté de la tâche ($F(1, 17) = 3.69$, $p > .05$).

Le fait que différents stimuli aient été utilisés pour générer deux niveaux distincts de difficultés pourrait expliquer les résultats obtenus précédemment. Pour vérifier que le type de stimulus n'a pas impacté la VaRC, une dernière analyse a été conduite où nous avons comparé, en condition passive, l'effet de la présentation de bip et l'effet de la présentation de mot. Il apparaît que ni l'amplitude ($F(1, 16) = 1.22$, $p > .05$) ni la latence ($F(1, 16) = 0.03$, $p > .05$) de la VaRC ne sont impactées par le type de stimulus présenté.

Ensuite, le phénomène d'arythmie sinusale respiratoire pourrait générer des changements dans le rythme cardiaque basé sur un rythme respiratoire différent de l'individu lors de la présentation des stimuli auditifs. Lorsque l'individu inspire, son RC augmente légèrement et diminue lorsqu'il expire. La quantification de l'intensité et du délai de ces changements est, au jour d'aujourd'hui, difficile. Pourtant, afin de vérifier que ce n'est pas ce phénomène qui serait à l'origine des patterns de VaRC obtenus nous avons tenu à observer les courbes de respiration (pour un exemple, voir Figure 12). Le module permettant l'acquisition des données cardiaques permet également l'enregistrement des données respiratoires ce qui a permis d'explorer la possibilité que les résultats cardiaques obtenus puissent être en partie dus à des modifications dans l'amplitude et/ou le rythme respiratoire.

En visualisant les signaux respiratoires des participants, il semblerait qu'en moyenne, l'amplitude des inspirations soit comprise entre 2 et 5 volts en moyenne¹⁰. Cette différence d'amplitude de respiration pourrait s'expliquer par des différences interindividuelles entre les individus au niveau de leur corpulence, leur capacité volumique de leurs poumons ou même selon que leur respiration soit automatique ou intentionnelle. En comparaison, les signaux respiratoires moyennés lors de la tâche de comptage et lors de la tâche d'écoute simple n'excèdent pas 0.2 volt en moyenne (voir Figure 17). Il apparaît donc peu probable que les effets obtenus dans les données de la VaRC puissent provenir de modifications dans le rythme ou dans l'amplitude de respiration des conducteurs.

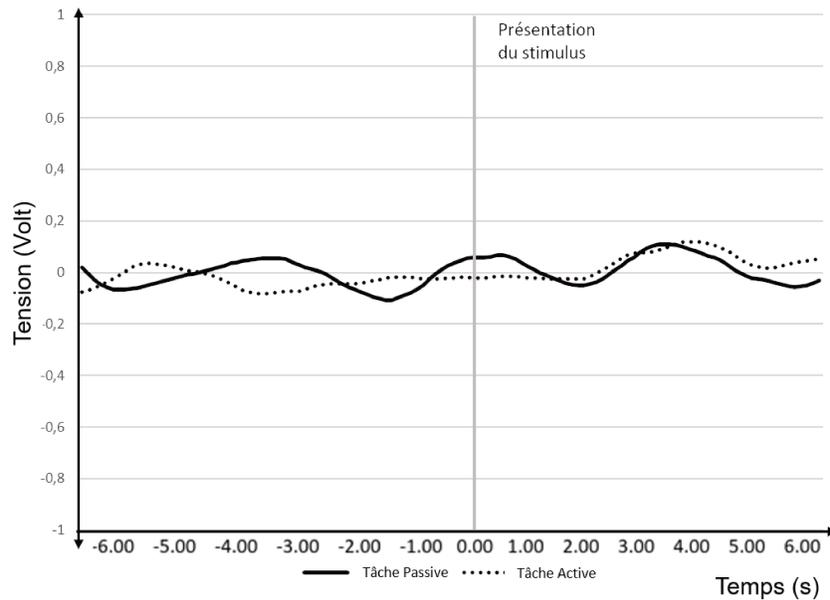


Figure 17 : Signaux respiratoires moyennés sur tous les évènements selon la condition *d'écoute simple* (tâche passive) ou de comptage (tâche active) dans les 12 secondes autour de la présentation du stimulus

Discussion

Avec la même méthode d'analyse utilisée habituellement dans le paradigme des potentiels évoqués dans lequel une réponse particulière est attendue après la présentation d'un stimulus, les analyses supplémentaires

¹⁰ L'unité du signal respiratoire est en volt puisque le signal se calcule grâce à la tension de la ceinture de respiration exercée sur un capteur.

ont permis d'utiliser l'amplitude et la latence de la VaRC pour mieux interpréter les résultats publiés dans un numéro spécial¹¹ de « Le Travail Humain ».

Premièrement, l'amplitude des réponses cardiaques évoquées est plus importante lorsqu'une tâche cognitive suit la présentation d'un stimulus que lors de l'écoute simple de ce même stimulus. Cela signifie que le cœur a tendance à battre plus rapidement dans les secondes qui suivent la réalisation d'un calcul, que sans tâche de calcul associée à la présentation d'un stimulus auditif. Ce résultat est loin d'être étonnant puisqu'une augmentation de la VaRC a été mise en évidence dans plusieurs études lors d'un effort cognitif ; augmentation absente pour la condition d'écoute simple (Kaiser et al., 1996 ; Lawrence & Barry, 2009). Au niveau de la latence, nous observons également un effet de la tâche cognitive. Ce résultat s'explique simplement par le fait qu'il n'y a pas d'accélération cardiaque lorsqu'il n'y a pas d'effort cognitif. Le pic d'amplitude apparaît donc comme statistiquement différent entre ces deux conditions.

Ensuite, l'amplitude de la VaRC n'est pas significativement impactée par l'activité de conduite. Ceci est un résultat qui va à l'encontre de nos résultats précédents dans lesquels nous retrouvions un effet de l'activité de conduite supplémentaire sur la VaRC ; l'augmentation de la VaRC étant plus importante pour une même tâche cognitive lorsqu'une tâche de conduite était effectuée en parallèle. Ce résultat pourrait être dû à des biais méthodologiques et statistiques. Nos premières analyses statistiques, des t de Student, n'ont pas été corrigées pour réaliser des comparaisons multiples. Ce résultat ne signifie pas que la VaRC n'est pas sensible à l'effort cognitif en conduite, mais bien que cet indicateur n'est pas sensible à l'activité de conduite seule. En effet, comme nous l'avons vu précédemment, la VaRC est suffisamment sensible à l'effort cognitif que ce soit avec ou sans activité de conduite. De plus, l'effet de l'activité de conduite sur la latence de la VaRC a montré que le temps de latence de la RCE était plus court sans activité de conduite secondaire qu'avec. L'activité de conduite pourrait avoir un rôle de distracteur pour la tâche cognitive ce qui retarderait le pic de la RCE. En effet, lors de la présentation des stimuli nécessaires à la réalisation de la tâche cognitive, l'attention du conducteur se doit d'être portée sur le stimulus en question. Effectuer une tâche de conduite supplémentaire pourrait ainsi générer de la distraction cognitive au sens où l'attention et les ressources du conducteur doivent être partagées entre les deux tâches, ce qui pourrait expliquer le retard de la latence de la VaRC lorsque l'individu conduit le simulateur par rapport à une condition de simple tâche.

De plus, les modèles décrivant l'attention comme un réservoir postulent qu'effectuer une tâche supplémentaire puiserait dans les ressources disponibles de l'individu ce qui augmenterait le coût cognitif (Kahneman, 1973 ; Wickens, 2002). Partager son attention entre une tâche cognitive et une tâche de conduite aurait donc deux conséquences : un effet distrayant des tâches cognitives et de conduite l'une sur l'autre et

¹¹ Titre du numéro spécial du travail humain de janvier 2017 : « *Neuroergonomics: measuring the human operator's brain in ecological settings* »

un coût cognitif plus important lié à la réalisation simultanée de tâches concurrentes. Les deux résultats explicités précédemment tendent ainsi à corroborer ces modèles.

Un troisième résultat tend à valider ces interprétations : le fait que l'amplitude de la VaRC soit plus élevée lors de la tâche cognitive difficile que facile, montre que cet indicateur pourrait refléter l'intensité de l'effort cognitif consenti par le participant pour résoudre la tâche cognitive. Ce résultat est corroboré par les analyses précédentes et également par le fait que, pour une même tâche cognitive, l'augmentation de la VaRC soit plus importante lorsqu'il y a une tâche de conduite additionnelle que sans.

La Figure 17 montrant les tracés des signaux respiratoires révèle que la présentation du stimulus n'impacte pas significativement l'amplitude et la fréquence respiratoire, de sorte qu'il n'entraîne pas un nouveau rythme respiratoire chez les individus. La présentation des stimuli, en générant du stress pour la tâche active, aurait pu synchroniser les cycles respiratoires après la présentation du stimulus entraînant un impact sur le RC qui aurait pu lui-même expliquer les résultats obtenus sur la VaRC lors de cette étude. L'ordre de grandeur des amplitudes moyennées des signaux respiratoires (moins de 0.3 V) se trouve être dérisoire par rapport aux amplitudes de chacune des respirations des conducteurs (comprises entre 2 et 5 V ; voir Figure 12), il apparaît hautement improbable que les courbes de VaRC obtenues aient eu comme origine des modifications dans le rythme et les amplitudes respiratoires des conducteurs.

Au terme de cette étude, la VaRC apparaît comme un indicateur sensible à l'effort cognitif en conduite automobile. Cet indicateur pourrait être utilisé comme le reflet de la quantité d'effort investi par les conducteurs lors de la réalisation de tâches cognitives. Une limite de la présente étude est la non-prise en compte des capacités des participants en calcul mental. Il aurait été plus qu'intéressant de mettre en correspondance les capacités des participants et l'intensité d'augmentation de la VaRC. Compte tenu des résultats mis en évidence à la suite de cette étude, il est probable que des personnes ayant eu de hautes capacités en calcul mental auraient obtenu, pour une même tâche, des VaRC moins élevées que les personnes qui auraient eu des capacités de calcul mental plus faible. En effet, la VaRC refléterait l'effort investi dans la tâche et l'effort à fournir pour résoudre une tâche cognitive diminue avec nos capacités. Ainsi et pour trancher sur cette question, les prochaines études portant sur les liens entre la VaRC et l'effort cognitif devront prendre en compte les capacités des participants pour le type de tâche qui leur sera proposé. Prendre en compte les capacités des participants pourrait, de plus, ne pas être suffisant ; la motivation, le niveau de fatigue ou même l'engagement dans la tâche pourrait être des facteurs susceptibles de moduler l'effort cognitif et donc l'amplitude de la VaRC. Coupler différents types de données par l'utilisation de questionnaires pourrait permettre de contrôler ces variables afin d'étudier leur impact sur l'évolution de la VaRC. De la même façon, répliquer l'étude afin d'étudier l'association entre des modifications de

motivation, de stress ou d'engagement dans la tâche et les changements d'évolution de la VaRC pour une même personne permettrait de sonder l'impact de ces facteurs dans les patterns de VaRC obtenus.

Lorsqu'on essaye de faire les liens entre coût cognitif et vagabondage de la pensée, il est difficile d'imaginer que la VaRC puisse montrer un effort cognitif lié à cet état. L'inconvénient majeur de l'étude du vagabondage de la pensée repose sur ses fluctuations constantes. Il est donc assez difficile d'imaginer qu'une augmentation de la VaRC traduise la présence de VP. Pourtant cet indicateur pourrait permettre de mieux comprendre les liens entre effort cognitif, engagement, focalisation attentionnelle dans la tâche de conduite, et vagabondage de la pensée. En effet, l'évolution du rythme cardiaque pourrait informer de la consommation de ressources cognitives à un moment donné. Si le VP puise bel et bien dans les ressources du conducteur, ces changements pourraient être plus élevés ; la VaRC devant plus augmenter lors du VP que lorsque l'attention du conducteur est dirigée vers la conduite.

En conclusion, en ne prenant que la VaRC en compte, nous pourrions discriminer une condition d'effort cognitif d'une condition de repos lorsque les résultats sont moyennés sur un nombre important d'évènements. Il est, pour le moment, impossible d'évaluer l'effort cognitif sur la base d'un seul évènement. En étudiant la VaRC, nous étudions directement les fluctuations de la fréquence cardiaque, nécessaires pour répondre aux besoins homéostatiques de l'organisme et parfois à l'effort cognitif. C'est pour cela que la VaRC est, pour le moment, trop peu sensible pour montrer un effort cognitif sur quelques évènements et est loin de pouvoir permettre une visualisation de l'effort cognitif en temps réel. Pour pallier cela et améliorer cet indicateur, nous avons, en creusant dans la littérature, vu que des liens forts existaient entre la respiration et le rythme cardiaque. Nous avons donc décidé de proposer une solution pour améliorer la sensibilité de la variation du rythme cardiaque à détecter un effort cognitif. Nous avons décidé de proposer une telle solution dans un concours international : le Valeo Innovation Challenge.

Amélioration de l'indicateur d'effort cognitif en conduite automobile

Le Valeo Innovation Challenge 2016

Le Valeo Innovation Challenge (VIC) est un concours international annuel ouvert aux étudiants du monde entier. En 2016, le VIC en était à sa troisième édition. L'objectif est de permettre à des étudiants de se regrouper en équipes de 2 à 5 personnes afin de proposer une innovation technologique ou une nouvelle façon de voir et d'appréhender les véhicules de demain. En 2016, il y avait donc deux concours en parallèle : le concours de la meilleure innovation technologique et celui de la meilleure nouvelle façon d'imaginer les véhicules du futur. Plus de 70 pays ont participé en proposant au moins un projet porté par une équipe d'étudiants.

Le VIC se déroulait en trois phases. Lors de la première, un résumé du problème soulevé, des solutions actuelles et de la solution proposée en moins de 1500 mots devait être soumis. Un premier filtre sélectif a retenu 23 équipes sur les 1344 ayant participé à la phase 1. Les résultats à l'issue de cette première phase ont été annoncés le 17 mars 2016 aux 23 équipes sélectionnées. Ces équipes ont reçu 5 000 euros pour mettre sur pied leur maquette et envoyer une preuve de concept de leur idée ou innovation. Lors de la seconde phase, un document de 20 pages maximum devait être envoyé avant le 15 juillet (4 mois entre la fin de la première phase et le rendu de la phase 2) de la même année pour détailler l'état de l'art concernant le problème soulevé ainsi que le descriptif de la solution envisagée. Les équipes devaient faire la preuve de concept de leur idée. À l'issue de cette seconde phase, l'annonce des 8 équipes sélectionnées a été annoncée le 16 septembre 2016. Ces équipes devaient présenter, lors de la troisième phase se déroulant du 12 au 14 octobre 2016, la proposition soumise au VIC par une présentation orale devant un jury d'experts¹² et par la présentation d'un poster. L'équipe gagnante de chaque concours remportait 100 000 euros et les finalistes 10 000 euros. Notre équipe intitulée MONITOR et composée de moi-même et de Séverine Malin, étudiants, à l'époque à l'université Lyon 2, est allée jusqu'à la phase finale, mais n'a pas été récompensée par un prix lors de cette dernière phase. Les 5 000 euros obtenus à l'issue de la première phase ont permis de réunir un budget de fonctionnement pour la présente thèse, que ce soit pour payer des déplacements afin de présenter des travaux dans des conférences internationales ou pour indemniser une partie des participants ayant pris part aux expérimentations. Du matériel informatique personnel a également pu être financé par ce biais.

En ce qui concerne le contenu de notre proposition et de notre idée pour améliorer la sécurité des véhicules du futur, nous sommes repartis des conclusions de l'étude 1, tout en nous projetant dans l'évolution possible

¹² Le jury du Valeo Innovation Challenge 2016 était composé de Jacques ASCHENBROICH, Bruno BONNEL, André CHIENG, Yotam COHEN, Guillaume DEVAUCHEL, Gérard FELDZER, Claudie HAIGNERÉ, Hans-Peter KUNZE, Jacques LEWINER, Christophe PERILLAT et Cédric VILLANI.

et probable des véhicules de demain. L'objectif affiché à long terme étant une possible supervision des états internes du conducteur par des mesures physiologiques.

Objectif et justification

Pour rappel, après l'analyse des résultats de l'expérimentation précédente, il ressort que, suite à la présentation d'un stimulus, une augmentation de la VaRC, moyennée sur un nombre conséquent d'évènements traduirait un effort cognitif alors que sa décélération traduirait un état plus passif par rapport à ce stimulus. La VaRC serait donc capable de faire la différence entre une condition d'effort cognitif et une condition de repos lorsqu'un nombre important d'évènements est utilisé pour moyenner les données. Dans l'étude précédente, chaque courbe de VaRC a été moyennée sur plus de 90 évènements. Mais dans l'objectif d'être capable d'évaluer l'effort cognitif du conducteur le plus rapidement possible pour éviter des états de surcharge cognitive, il est impossible d'attendre un tel moyennage pour avoir une idée de l'état du conducteur. Mais la VaRC pourrait-elle catégoriser correctement les conditions de l'expérimentation précédente pour chaque évènement ? Pourrions-nous, avec les données dont nous sommes dotés, surveiller, en temps réel, le niveau de charge cognitive du conducteur ? Compte tenu de la variabilité importante du rythme cardiaque, il est impossible de faire un diagnostic de l'effort cognitif si le nombre d'évènements utilisés pour les analyses est inférieur à dix. Il apparaît ainsi nécessaire d'améliorer la sensibilité de cet indicateur pour permettre une meilleure détection de l'effort cognitif des conducteurs. Dans l'objectif de faire de la surveillance des états internes du conducteur, il est inconcevable de devoir effectuer des moyennes pour obtenir un indicateur fiable.

Les recherches dans la littérature ont montré qu'il existe des liens physiologiques entre les fluctuations du rythme cardiaque et la respiration (Berntson et al., 1993). L'arythmie sinusale respiratoire génère une augmentation de la variabilité du rythme cardiaque en augmentant celui-ci de quelques battements lorsque l'on inspire et une diminution de quelques battements lorsque l'on expire. Ainsi, l'arythmie sinusale respiratoire augmente le ratio signal/bruit et vient parasiter les données cardiaques, ce qui diminue la sensibilité de la VaRC pour l'effort cognitif. Mieux comprendre les liens entre RC et respiration pourrait permettre de supprimer l'influence de la respiration sur les données cardiaques et ainsi augmenter la sensibilité de la VaRC pour l'effort cognitif. Il serait donc possible de discriminer une condition d'effort cognitif d'une condition de repos en moyennant sur un nombre bien moins important d'évènements. Pour approcher, voire permettre, une telle différenciation en temps réel, il est indispensable d'améliorer la sensibilité de la VaRC.

La participation au Valeo Innovation Challenge (VIC) de l'année 2016 avait pour objectif premier de quantifier les liens entre le rythme cardiaque et la respiration afin de proposer une méthode permettant de

corriger le RC pour réduire le nombre d'événements moyennés. Une telle méthodologie pourrait améliorer la sensibilité de la VaRC à détecter un effort cognitif en utilisant les liens existants entre deux signaux physiologiques. Si la faisabilité d'une telle démarche venait à être démontrée, de plus amples recherches pourraient permettre de corriger le rythme cardiaque de nombreux facteurs afin de potentiellement être capable de révéler un effort cognitif sur un unique événement grâce à la VaRC. L'objectif à long terme, serait de permettre une détection en temps réel d'une surcharge cognitive éventuelle.

Nous avons donc proposé une méthode qui pourrait permettre d'améliorer la capacité de la VaRC à détecter un effort cognitif dans le but de faire de la surveillance du conducteur. Le problème que nous avons soulevé, les solutions existantes actuellement ainsi que notre proposition sont présentés dans l'Annexe C, soumis lors de la première phase du VIC.

Lors de la seconde étape du VIC et afin de faire la preuve de concept, l'objectif affiché était de quantifier l'impact de certaines variables issues du signal respiratoire sur le rythme cardiaque. Une matrice de corrélation a permis d'exclure les variables qui apparaissaient non sensibles ou qui semblaient redondantes. Dans un second temps, des arbres de décision ont permis de prédire, dans les données d'intérêts, les changements dans le rythme cardiaque à partir des modifications dans les données respiratoires. La seconde étape était d'utiliser ces classifications dans un algorithme, pour corriger le rythme cardiaque initial. Si l'arbre de décision prévoyait, à partir des données respiratoires, une augmentation du rythme cardiaque de 3 battements, l'algorithme diminuait artificiellement sa valeur de 3 battements. Les détails du travail réalisé ainsi que les biais et les limites auquel il est soumis, sont présentés dans l'Annexe D.

Suite à la soumission de ce document, nous avons été sélectionnés pour la phase finale lors de laquelle il s'agissait de présenter notre travail devant un jury. Ne pouvant joindre dans le présent document le support de la présentation orale, l'Annexe E présente le poster affiché après la conférence de presse qui a suivi l'annonce des résultats.

Ce travail de correction du rythme cardiaque par les données respiratoires s'inscrit dans une dynamique plus large de meilleure compréhension des signaux physiologiques et de leurs influences respectives. Plusieurs applications à ces travaux sont envisageables.

Applications possibles

Depuis de nombreuses années maintenant, l'intelligence artificielle croît et ancre ses racines profondément dans de nombreux champs disciplinaires. L'industrie automobile ne fait pas exception et le développement poussé de l'IA dans ce domaine pourrait métamorphoser nos habitudes de mobilités. Une intelligence artificielle étant moins faillible et ayant des capacités de réaction et d'anticipation bien meilleures qu'un

opérateur humain, le bénéfice potentiel d'une automatisation totale de l'activité de conduite permettrait d'alléger considérablement les lourds bilans matériels et humains issus de l'accidentologie. Par sa potentielle capacité à réduire les risques liés aux facteurs humains, un engouement s'est créé autour de l'arrivée de l'automatisation dans le domaine des transports. Mais nous l'avons vu, une automatisation partielle pourrait être délétère aux conducteurs, notamment à cause du paradoxe de l'automatisation.

La surveillance du conducteur apparaît comme pertinente afin de lisser la courbe de charge mentale des conducteurs en évitant la surcharge cognitive lors des phases de transition du contrôle entre la machine et l'opérateur, dans le cas des véhicules automatisés de niveau 1 à 4. Mais pour obtenir une idée du niveau de charge mentale ou d'effort cognitif en temps réel et permettre d'alerter le conducteur, la sensibilité de la VaRC à détecter un effort cognitif doit être améliorée. Dans ce Valeo Innovation Challenge, nous avons donc proposé de mieux rendre compte des liens entre rythme cardiaque et respiration pour abaisser le nombre de répétitions nécessaires à la VaRC pour détecter un effort cognitif, permettant d'améliorer sa sensibilité et potentiellement d'approcher une détection de l'effort cognitif en temps réel.

À terme et en utilisant les connaissances obtenues à l'issue de ce VIC, il serait possible d'identifier, de prédire et peut être même de prévenir des efforts cognitifs trop importants pour le conducteur afin d'éviter des épisodes de surcharge cognitive pouvant entraîner des accidents. Ainsi, la VaRC pourrait être utilisée afin de reconnaître et de détecter ces épisodes de danger potentiel via des mesures en continu du RC. Un système pourrait ainsi être activé lorsqu'il reçoit des informations selon lesquelles la VaRC dépasse un seuil critique. Ce système pourrait décider d'alerter le conducteur pour qu'il redirige son attention sur la conduite ou dans le cas d'un véhicule automatisé, décider de ne pas déléguer le contrôle voir prendre le contrôle du véhicule dans les cas d'urgence. Ainsi, avec une sensibilité suffisante, il est théoriquement possible d'obtenir des indications en temps réel. L'avantage de donner des informations au conducteur sur son propre état permettrait de le maintenir dans la boucle de contrôle du véhicule tout en laissant au système la possibilité de corriger l'erreur lorsqu'elle survient (Parasuraman, 2003).

L'objectif, à terme, serait d'être capable de détecter un effort cognitif trop important pour harmoniser les interactions entre l'humain et la machine notamment dans le cadre des véhicules automatisés dans lesquels le conducteur pourrait avoir à reprendre le contrôle. En effet, nous l'avons vu, l'automatisation des véhicules a déjà progressivement débuté et le conducteur pourrait voir son rôle changer dans les prochaines années.

Conclusion

Au terme des analyses effectuées après la phase 2 du VIC 2016 sur les liens entre les données cardiaque et respiratoire, il apparaît que la correction du rythme cardiaque proposée permet d'améliorer la sensibilité de la VaRC. Les résultats sont toutefois loin d'être suffisant puisqu'après correction, un algorithme de

traitement est arrivé à classifier les conditions d'effort et les conditions de repos avec une précision de 67 %. Mais 46 % de fausses détections sont toujours à déplorer : l'algorithme en extrayant les caractéristiques d'intérêts du signal cardiaque, conclut qu'il y a un effort cognitif alors que ce n'est pas le cas, dans près d'un cas sur deux. Ces résultats ne sont donc pas encore suffisants pour approcher une détection de l'effort cognitif en temps réel. Pourtant notre correction semble avoir légèrement amélioré la sensibilité de la VaRC. Ces résultats sont encourageants, mais restent insuffisants. En effet, il est hautement improbable que notre correction du rythme cardiaque pour supprimer l'influence de la respiration ait été totale. De plus, il nous a manqué, dans ce challenge, un peu de recul sur la correction proposée. Il est très difficile de savoir si la correction apportée a permis de « nettoyer » le signal cardiaque du parasitage des données respiratoires ou si nous avons diminué le ratio signal/bruit. Les résultats semblent aller dans le sens d'une amélioration, même légère. Pour avoir plus de recul sur cela, il faudrait mieux comprendre les liens entre ces deux signaux. Pour cela, il serait possible d'utiliser certaines méthodes d'apprentissage supervisé pour extraire les facteurs responsables des changements dans le RC.

Dans l'objectif de supprimer pleinement l'influence du signal respiratoire sur les données cardiaques, plusieurs étapes semblent nécessaires. Dans une première étape, il faudrait collecter en parallèle les signaux cardiaque et respiratoire et demander à des participants de respirer en suivant un rythme particulier (pour un exemple, voir Choi & Gutierrez-Osuna, 2011) ce qui permettrait de faire varier la fréquence respiratoire, l'amplitude des respirations, etc., et ainsi de quantifier l'impact de ces facteurs sur le RC et particulièrement sur ses variations. D'autres facteurs tels, les mouvements, le niveau de stress et d'engagement ou la posture pourraient également être évalués afin de quantifier leurs impacts sur le RC.

Après correction totale de tous les facteurs modifiant le rythme cardiaque, excepté l'effort cognitif, ce dernier devrait être constant ou quasi-constant. Ainsi, une élévation de celui-ci ne pourrait traduire qu'un effort cognitif. Pour cela, l'impact de chacun des facteurs doit être évalué et quantifié pour permettre une correction du RC afin de développer des systèmes capables de détecter un effort cognitif trop important notamment par l'utilisation de boucle biocybernétiques et des interfaces entre l'humain et la machine. Pour éviter d'avoir à étudier et quantifier l'effet de chacun de ces facteurs, collecter des données de différentes sources permettrait d'améliorer la qualité de l'indicateur finale. En prenant en compte d'autres indicateurs dérivés de signaux physiologiques et des mesures comportementales, la détection de certains états par des algorithmes serait moins complexe et plus efficace à mettre en place. Une compréhension réciproque du but et de l'état de l'automatisation et du conducteur, semblent être les prédicteurs d'interactions harmonieuses entre l'humain et la machine (Horrey, Lesch, Mitsopoulos-Rubens, & Lee, 2015). À terme, ces modèles de détection pourraient améliorer la connaissance qu'a le conducteur de son propre état, et dans le cas d'un véhicule automatisé, la machine pourrait également se servir de ces informations pour savoir quand déléguer

le contrôle à l'opérateur ou comment l'avertir lorsqu'il se trouve dans ses pensées, afin qu'il reprenne le contrôle du véhicule.

Une seconde possibilité serait de coupler différentes mesures et de les utiliser ensemble pour obtenir, en sortie, une meilleure sensibilité de l'indicateur final. En obtenant des indicateurs comportementaux sensibles de l'effort cognitif, notamment grâce aux données de conduite et en les couplant à la VaRC, la capacité de détection de l'effort cognitif pourrait être fortement améliorée. Le travail réalisé dans le cadre de ce concours a permis de montrer la faisabilité d'étudier les liens entre différents signaux physiologiques et encourage d'autres recherches sur ce sujet afin d'obtenir un ou plusieurs indicateurs capables de détecter en temps réel un effort cognitif trop important, qui pourrait venir perturber l'activité de conduite et générer un risque important de sécurité.

Étude 2 : Signature physiologique et comportementale du vagabondage de la pensée en conduite automobile

Objectif et Justification

Comme annoncé dans la partie portant sur les objectifs, nous souhaitons inventorier les indicateurs objectifs de l'effort cognitif et du Vagabondage de la Pensée (VP). Le VP pouvant puiser dans les ressources disponibles du conducteur, l'expérience 1 et la participation au VIC 2016 ont permis de montrer la faisabilité de détecter l'effort cognitif en conduite automobile à l'aide d'un indicateur cardiaque et de proposer une méthode pouvant améliorer la qualité de cet indicateur.

Lors de cette seconde étude, nous avons cherché à mieux décrire les signatures comportementales et physiologiques du VP en conduite automobile simulée. Une des premières recherches à s'être intéressée aux corrélats physiologiques et comportementaux du vagabondage de la pensée en conduite est l'étude de He et al. (2011). Cette étude a permis de montrer que le comportement oculaire des conducteurs est différent lorsque le conducteur porte son attention sur ses pensées plutôt que sur la route. Les conducteurs en VP exploreraient moins l'environnement lors du VP. Pour arriver à cette conclusion, les auteurs ont demandé aux conducteurs de déclarer les moments d'inattention (méthode de l'auto-déclaration) et ont mesuré l'écart type du balayage horizontal du regard (He et al., 2011). Ainsi, il a été possible d'étudier le comportement oculaire des conducteurs sur des fenêtres de temps de 13 secondes à 4 secondes avant la déclaration des pensées sans lien avec l'activité de conduite. Les périodes de VP ont été comparées à des périodes d'attention envers la conduite qui se situaient de 20 à 29 secondes après la déclaration du VP. Les auteurs ont postulé que dans la fenêtre de temps comprise entre + 20 et + 29 secondes après que les conducteurs aient constaté le vagabondage de leurs pensées, leur attention serait à nouveau dirigée vers la conduite. Cette hypothèse est contestable puisque le degré d'attention porté à la conduite fluctue énormément. Il est difficile d'être certains que l'attention des conducteurs ne s'était pas déjà éloignée à nouveau de la conduite, plus de vingt secondes après la déclaration de pensées vagabondes. Comment garantir que l'attention des conducteurs soient dirigée vers la conduite lors de ce laps de temps ?

Dans la présente expérimentation, afin de mettre en évidence des patterns physiologiques et comportementaux du VP, le choix de comparer des fenêtres de temps plus proche du moment où les conducteurs déclaraient leurs pensées vagabondes a été fait. Cela a été possible par un découpage temporel différent (Figure 18). Ainsi, des fenêtres de temps de 12 secondes, en miroir, ont été construites autour du moment où le conducteur déclarait s'être rendu compte qu'il était plongé dans ses pensées. Nous avons ainsi pu comparer ce que nous avons appelé des moments de vagabondage de la pensée entre [- 6 ; 0] s et des

moments où le conducteur avait à nouveau focalisé son attention sur l'activité de conduite [0 ; + 6] s ; le moment 0 correspondant à l'instant où le conducteur a fait un appel de phare pour déclarer qu'il venait de se rendre compte du vagabondage de ses pensées. De la même façon, nous ne pouvions être certains que l'attention des conducteurs était focalisée sur la conduite dans les 6 secondes suivant la déclaration de pensées, mais l'erreur possible semble moindre par rapport à une comparaison analyses proposées dans l'étude de He et al. (2011).

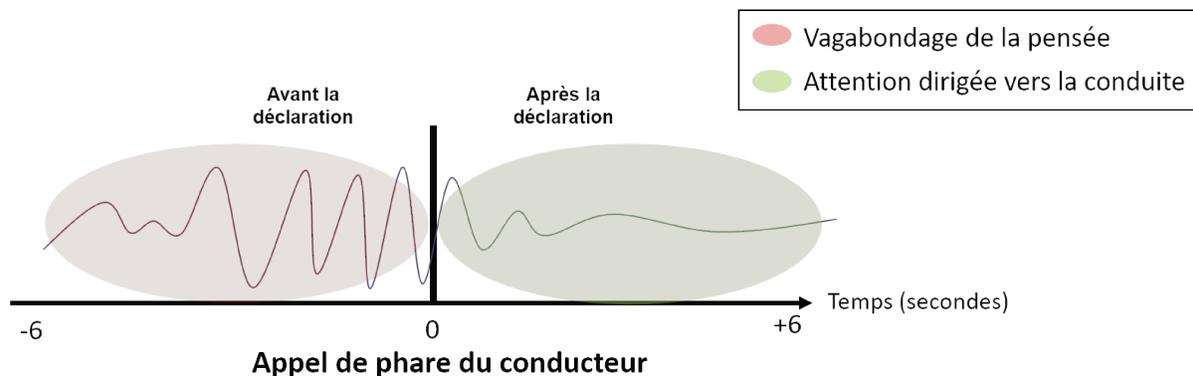


Figure 18 : Représentation schématique du découpage temporel de la tâche de la seconde étude. Dans les six secondes précédant la déclaration des pensées sans lien avec la tâche de conduite effectuée par un appel de phare, le conducteur était considéré comme étant en vagabondage de la pensée *et dans les six secondes après l'appel de phare, le conducteur était considéré comme ayant son attention portée sur la conduite*

De précédentes études ont montré que des pensées avec différentes caractéristiques pourraient être soutenues par des régions cérébrales légèrement différentes (Golchert et al., 2017 ; Smith et al., 2006). Avoir intentionnellement des pensées sans lien avec l'activité de conduite et être dans un état de VP pourrait alors avoir des conséquences différentes sur les conducteurs ce qui pourrait expliquer différents niveaux d'interférences de ses pensées avec l'activité de conduite (Kopp, D'Mello, & Mills, 2015). La recherche d'indicateurs physiologiques et comportementaux pour différents types de pensées pourrait ainsi permettre de mieux évaluer leurs degrés d'interférence respectifs avec l'activité de conduite. Il est donc apparu pertinent de rechercher des signatures comportementales et physiologiques différentes du VP et de pensées générées intentionnellement.

L'objectif de la présente expérimentation était donc de mieux comprendre la dynamique des signaux physiologiques et des indicateurs comportementaux lors de la prise de conscience et de la déclaration des pensées vagabondes et de pensées intentionnelles. Examiner l'évolution du rythme cardiaque, du comportement oculaire et de conduite permettrait (1) de confirmer que l'activité oculaire est affectée par le VP, (2) d'examiner si d'autres mesures pourraient s'avérer sensible à la présence de VP et (3) de vérifier si

les marqueurs comportementaux et physiologiques sont les mêmes pour deux types de pensée sans lien avec l'activité de conduite.

Méthode

Population

Vingt personnes (10 femmes) ont participé à cette étude (moyenne d'âge : 34.15 ± 11.93). Tous possédaient leur permis de conduire depuis au moins trois ans. Tous les participants ont déclaré une absence de déficit sensoriel et attentionnel ou de dysfonctionnement cardiaque. Leurs vues étaient normales ou corrigées à la normale par des lunettes ou des lentilles de contact. Les participants ont donné leur consentement écrit pour participer à cette étude.

Simulateur de conduite

Le même simulateur a été utilisé pour la présente étude que pour l'expérimentation 1 (voir Figure 16).

Oculométrie

Dispositif

Le choix de l'oculomètre pour cette étude s'est porté sur les lunettes Tobii de première génération. Ces lunettes, comme la plupart des oculomètres actuels fonctionnent par la mesure de la réflexion de la lumière infrarouge sur l'œil du participant (Jacob & Karn, 2003). Ces lunettes enregistrent la position de l'œil toutes les 33 ms. Les données brutes de la position des yeux ont permis la construction d'un indicateur traduisant l'absence d'exploration visuelle : la fixité du regard.

Fixité du regard

Suite aux travaux de He et al., (2001), montrant que le comportement oculaire du conducteur était impacté par la présence de VP et dans l'objectif de trouver des indicateurs objectifs et temps réels du VP, la création d'un indicateur de fixité du regard est apparue indispensable.

L'indicateur de fixité du regard a été créé lors de cette thèse en s'inspirant de la définition des fixations (position de l'œil relativement stable à l'intérieur d'un seuil de dispersion d'environ 2° d'angle visuel pendant un temps minimum variable selon la tâche effectuée) et de la durée du regard (durée cumulée et localisation spatiale moyenne d'une série de fixations consécutives dans une aire d'intérêt particulière) (Jacob & Karn, 2003). La fixité du regard a été créée à partir des données oculométriques brutes fournies

par l'oculomètre. L'objectif était d'avoir un indicateur permettant de renseigner l'ampleur de l'exploration visuelle du conducteur. Dans le cas du vagabondage de la pensée, il s'agissait d'évaluer dans quelles proportions, l'exploration visuelle des conducteurs était parasitée par la présence de pensées sans lien avec l'activité de conduite. L'indicateur devait être capable de renseigner rapidement un changement d'état du conducteur ; la fenêtre glissante utilisée pour calculer la fixité ne devait donc pas excéder une seconde. Pour pallier l'impossibilité de l'algorithme à transformer les données brutes de la position du regard du conducteur en indicateur de fixité à cause de la perte éventuelle de données, seulement 90 % des données oculaires brutes devaient être contenu dans une zone de deux degrés d'angle visuel pour que le regard soit considéré comme fixe sur cette période. Le regard était donc considéré comme étant fixe (1 = présence de fixité) ou non (0 = absence de fixité), voir Figure 19. L'indicateur de fixité était donc mis à jour, à chaque nouvelle valeur de la position du regard fourni par l'oculomètre (toutes les 33 ms).

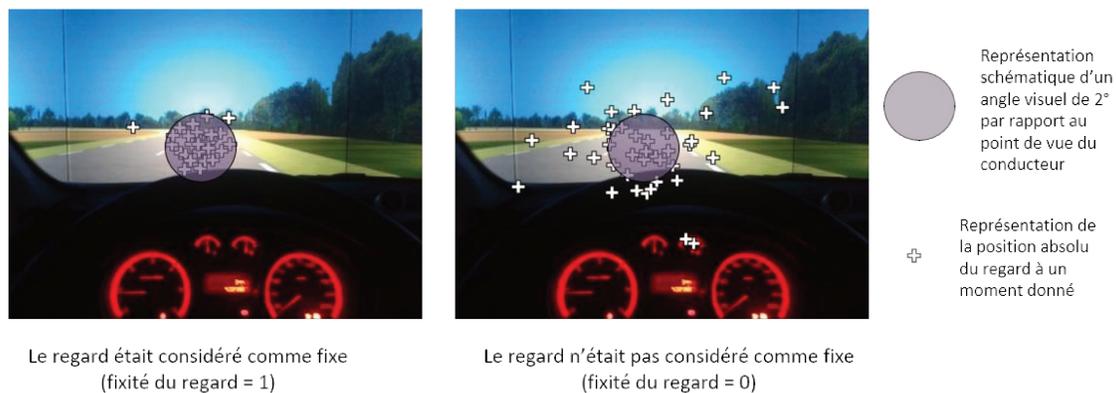


Figure 19 : Illustration, selon le point de vue du conducteur, de la position absolue de son regard pendant environ une seconde fournie par l'oculomètre selon que le regard était considéré comme fixe ou non par un algorithme de transformation

Ainsi, nous avons développé un algorithme qui a permis de transformer les données brutes de la position de l'œil fournies par l'oculomètre (en pixel) en indicateur binaire de fixité du regard. Le regard du conducteur était considéré comme étant fixe, si au moins 90 % des positions absolues du regard du conducteur sur une seconde étaient contenues dans une surface de 2° d'angle visuel. L'oculomètre fournissant un échantillonnage des données à 30 Hz, la fixité du regard était présente si au moins 27 des 29 prochaines valeurs absolues de la position du regard (correspondant à une seconde de données) fournies par l'oculomètre étaient contenues dans une surface inférieure ou égale à 2° d'angle visuel.

Tâches

Dans l'objectif de comparer deux types de pensée dont les caractéristiques sont différentes, deux tâches ont été proposées aux participants lors de cette expérimentation.

Premièrement, afin de ne pas perturber ou interrompre la tâche de conduite, les participants avaient pour consignes de se concentrer, du mieux qu'ils pouvaient, sur l'activité de conduite et de faire un appel de phare lorsqu'ils se rendaient compte que leur attention n'était plus focalisée sur la conduite, mais sur des réflexions ou des problématiques personnelles. L'accent a été mis sur la définition du vagabondage de la pensée et il était explicitement demandé aux conducteurs de ne pas faire d'appel de phare lorsqu'ils se contentaient de jeter un œil en dehors de la scène routière ou qu'ils pensaient simplement à la qualité de la base visuelle du simulateur. Les conducteurs ne devaient faire un appel de phare que lorsqu'ils se rendaient compte que leur attention s'était éloignée de l'activité de conduite, pour des pensées liées à des événements personnels.

Lors du second type de tâche proposé, les conducteurs devaient, en parallèle de l'activité de conduite, réfléchir à des innovations possibles dans plusieurs champs disciplinaires tels que le handicap, la mobilité, le sport ou la politique. Les conducteurs devaient envisager des solutions possibles et qui n'existaient pas déjà. Dès que le conducteur pensait avoir terminé de réfléchir sur son innovation, il devait le déclarer verbalement. Cela déclenchait un marqueur dans les données et permettait de comparer l'évolution des mesures physiologiques et des indicateurs comportementaux dans la fenêtre de temps décrite ci-dessus : [- 6 ; + 6] sec.

La mesure en parallèle, des déclarations des conducteurs pour alerter de la prise de conscience d'un épisode de VP ou lorsqu'ils avaient terminé la réflexion sur les innovations (données subjectives), des données oculométriques (données comportementales) et des données cardiaques (données physiologiques) permet le couplage dans la collecte de données, telle que défini par (Smallwood & Schooler, 2015).

Article publié dans *Consciousness & Cognition* en Juillet 2018

([10.1016/j.concog.2018.04.006](https://doi.org/10.1016/j.concog.2018.04.006))

1 Title: Do distinct mind wandering differently disrupt drivers? Interpretation of physiological
2 and behavioral pattern with a data triangulation method

3

4 Guillaume Pepin¹, Séverine Malin², Christophe Jallais¹, Fabien Moreau¹, Alexandra Fort¹,
5 Jordan Navarro^{2,4}, Daniel Ndiaye³, & Catherine Gabaude¹

6

7 *1 Univ Lyon, IFSTTAR, TS2, LESCOT, F-69675, LYON, France*

8 *2 Laboratoire d'Etude des Mécanismes Cognitifs, Université de Lyon, Bron, France*

9 *3 Université Paris-Est, COSYS, LEPSIS, IFSTTAR, F-77447 Marne-la-Vallée, France*

10 *4 Institut Universitaire de France, Paris, France*

11

12

13 Keywords: Mind-wandering, Task-unrelated thoughts, Driving simulation, Heart rate, Ocular
14 behavior, Neuroergonomics

15 1. INTRODUCTION

16 In absence of a specific task demand, it is extremely difficult to prevent our minds to wander
17 (Corballis, 2013). Even during our daily living activities, our minds commonly escape from the
18 here and now (Killingsworth & Gilbert, 2010). Mind-wandering, also known as off-task
19 thoughts, is a remarkable evolutionary achievement allowing to plan self-relevant events or
20 remember memorable contents. But although this state can be beneficial, it can also be
21 detrimental by impairing current task performance (McVay & Kane, 2009). For this reason, it
22 is damaging for tasks requiring sustained and divided attention, as can be the driving activity.
23 Recent findings seemed to be indicating that all mind wandering may not be equal (Burdett,
24 Charlton, & Starkey, 2016; Galera et al., 2012; Golchert et al., 2017). The present paper intends
25 to delve into characteristics of off-task thoughts to assess their respective detrimental impacts
26 on driving.

27 1.1 Attention and driving

28 Since a decade now, epidemiological studies have indicated that drivers' inattention and
29 distraction accounted for 25 to 50% of road accidents (Mosedale, Purdy, & Clarkson, 2004).
30 Inattention and distraction have been described as states with different impacts on drivers while
31 they would be responsible for an equivalent part of accidents (Galera et al., 2012). Although
32 different taxonomies have been proposed to better understand and distinguish these states and
33 their respective impacts on drivers, they are still inconsistently defined. Indeed, the relationship
34 between them remains unclear, generating serious difficulties for researchers to study and
35 measure same phenomenon. In the present study, despite the taxonomy of (Regan & Strayer,
36 2014), inattention is defined as a state in which attention have endogenously slid from the main
37 activity to thoughts and feelings. However, inattention does not really exist per se; our mind is
38 always focused on something but not necessarily on the main activity and people are not all
39 time aware of where their thoughts are focused. Considering the constant fluctuations of
40 people's mind and conscious, it could be hard to spot the different moments when they are no
41 longer focused on the main activity. These fluctuations go from being fully on-task to being in
42 a mind-blanking state (Ward & Wegner, 2013) by going through a wide range of inattentive
43 states. This is why inattention is not a homogeneous state and can be differently critical for safe
44 driving.

45 Inattention gathers several states including Mind-Wandering (MW) which corresponds to a
46 shift in the content of thoughts away from an ongoing task to self-generated thoughts and
47 feelings (Smallwood & Schooler, 2015). But even with a specific definition of MW, it remains
48 difficult to unbendingly categorize driver's thoughts and, more broadly, driver's states. Indeed,
49 MW is by nature an unprompted, constantly fluctuating state, which presence varies
50 spontaneously over time (Chaparro, 2015). MW does not correspond to all off-task thoughts
51 but to self-generated and stimulus-independent thoughts (SITUTs). For example, thinking to
52 the next step of our trip is not considered as MW because it is related to the driving task. But in
53 a different context, it could be considered as MW showing the difficulty to categorize driver's
54 thoughts. Assessing the presence of MW is even more essential since it represents between 30
55 to 50% of our daily life thoughts and this phenomenon occurs frequently in all forms of activity

56 (Berthié et al., 2015; Bixler & D'Mello, 2014; Killingsworth & Gilbert, 2010). It is also a
57 recurring phenomenon in driving: four drivers out of five declare having being aware of their
58 wandering thoughts during their last journey and felt being in this state for more than a third of
59 the time (Berthié et al., 2015). The occurrence of MW is also negatively correlated with task
60 demand (Braboszcz & Delorme, 2011; He, Becic, Lee, & McCarley, 2011). As an ubiquitous
61 state whether in driving or in everyday life, MW can have serious consequences.

62 1.2 Consequences of MW behind the wheel

63 MW, as defined across studies, has adaptive and useful roles in our life such as autobiographical
64 planning, creative thinking or self-reflection (Baird, Smallwood, & Schooler, 2011;
65 Mooneyham & Schooler, 2013; Smallwood et al., 2011). But it is a detrimental state in driving
66 since it interferes with the driving activity. MW with high disrupting content multiplies by 2.12
67 the risk to be responsible for a road accident (i.e., 1.98 for sleep deprivation, 1.76 for
68 psychotropic drug use and 1.06 for MW with little disrupting content; (Galera et al., 2012). This
69 higher crash risk could be explained by the perceptual decoupling (Smallwood, McSpadden, &
70 Schooler, 2008) which could underlie the looked-but-failed-to-see phenomenon (Brown, 2005).
71 Perceptual decoupling corresponds to the capacity for the mind to flexibly disengage attentional
72 processes from perception (Smallwood & Schooler, 2015). Besides, changes in the brain during
73 MW (Christoff, Gordon, Smallwood, Smith, & Schooler, 2009; Greicius, Krasnow, Reiss, &
74 Menon, 2003; Raichle et al., 2001) will affect driver behavior.

75 MW might degrade the driver's control of the vehicle, with a decrease of speed micro-
76 regulations and larger lane departures (Lemercier et al., 2014). In addition, it seems to increase
77 the reaction time variability and decreases safety distances (Yanko & Spalek, 2014). MW also
78 might cause a failure to scan the environment because of a visual attention focused narrowly
79 on the road ahead (He et al., 2011). Although people control the location of where they are
80 looking, it is physically impossible for drivers to control or manipulate fixations and saccades
81 (Rayner, 1998). Such lack of control suggests that gaze behavior might provide a relevant
82 behavioral marker of directed attention and seems responsive to MW (He et al., 2011). In sum,
83 perceptual decoupling leads to changes in driver's behavior leading to higher frequency of
84 errors, which may explain the important role of MW on the occurrence of accidents. MW also
85 leads to changes in drivers' physiological functions. It increases heart rate (Smallwood et al.,
86 2004) and leads to changes in several cardiac markers (Ottaviani et al., 2014). It seems therefore
87 appropriate to investigate MW by using behavioral and physiological measurements.

88 But, in the light of previous results (Galera et al., 2012), it seems that all kind of mind-
89 wandering are not equal and could generate different level of risk for drivers. Consequently, it
90 seems appropriate to investigate factors involved in the dangerousness of MW. Indeed, a
91 wandering mind can suffer from a higher crash risk because of a highly disrupting content or
92 not. In the driving context, to further improve road safety, it is therefore relevant to investigate
93 how our attention is drawn from the main activity and how the kind of thought would differently
94 affect drivers and potentially increase their level crash risk.

95 1.3 Different kinds of thought

96 As already said, inattention is difficult to assess regarding its spontaneous fluctuation. And this
97 state seems even more complicated to study since it is not uniform. Indeed, inattention
98 corresponds to Task-Unrelated Thoughts (TUTs) gathering all the kinds of inattentive thoughts
99 such as Task-Related Interferences (TRIs) or Stimulus-Independent Task-Unrelated Thoughts
100 (SITUTs) (Lemercier et al., 2014; Stawarczyk, Majerus, Maj, Van der Linden, &
101 D'Argembeau, 2011). SITUTs correspond to the typical MW experience. In the past decade,
102 MW has been popularized and drawn scientists' attention to better understand the stream of
103 thoughts and consciousness. Research on this topic has seen a substantial increase boosted by
104 many studies (for a review, see Smallwood & Schooler, 2015). Mind-wandering is generally
105 conceptualized as a two steps state. The onset phase represents the initial moment when the
106 mind drifted away from task focus to off-task focus. The maintenance phase represents the
107 cognitive experience and duration of the off-task episode (Smallwood, 2013). This last phase
108 could be maintained due to failures in attentional disengagement which might be due to the
109 attentional tunneling phenomenon (Dehais, Causse, & Tremblay, 2011). During the onset phase
110 of MW, a first self-generated drift of attention toward an off-task focus occurs. Then, cognitive
111 resources are drawn to sustain the MW state. Different kinds of thought can be generated from
112 these resources.

113 It appears that each thought owns specific features considering its willfulness (intentional vs.
114 self-generated), awareness (aware vs. unaware), content: temporality (past, present or future),
115 emotional valence (positive vs. negative) etc... Internal mental task as well as mentally solving
116 problems can not be considered as MW at once; thoughts features should be dug deeper to
117 classify the kind of thought although all inattentive thoughts belong to the TUTs category. For
118 example, intentional TUTs such as Problem Solving Thoughts (PSTs) (Golchert et al., 2017),
119 and unintentional TUTs such as MW are different states and are characterized by distinctive
120 neural networks (Smith et al., 2006). Moreover, at a brain level, what researchers call MW
121 (unaware and unintentional) arise with an activation of the default mode network (DMN) alone
122 while intentional off-task thoughts such as PSTs arise from an activation of the DMN with a
123 region of grey matter associated with intentional off-task thoughts (Golchert et al., 2017). For
124 this reason, the impact of intentionality of TUTs has to be assessed to explain the disruptiveness
125 of MW (Seli, Ralph, Konishi, Smilek, & Schacter, 2017). Moreover, MW experience are
126 unaware (during the onset phase) and self-generated (not primed by an external element) while
127 PSTs are aware and intentional. Those features shape the kind of thought (Spronken, Holland,
128 Figner, & Dijksterhuis, 2016) and the intentionality of MW seems promising to explain
129 different impacts of TUTs (Kopp, D'Mello, & Mills, 2015) on drivers' behavior and
130 physiological signals, and more broadly on their respective dangerousness. Indeed, intentional
131 and unintentional off-task thoughts are underpinned by distinct neural networks which could
132 explain different level of dangerousness (Smith et al., 2006). Considering links between MW
133 and oculometric indicators (He et al., 2011) and the fact that intentional processes are often
134 regulated by executive control allowing operators to regulate their state, it could then generate
135 a higher level of gaze fixity or larger lane departures for MW than for PSTs. More gaze fixity
136 or lane departures might reflect a higher level of dangerousness for the driver. But, when

137 investigating MW or off-task thoughts in general, studies can suffer from a too low
138 experimental control because of the multiplicity of features, thoughts and experiences lived by
139 participants. It is therefore necessary to be cautious on this particular regard and improve the
140 experimental control to avoid biases (Smallwood & Schooler, 2015).

141 1.4 The neuroergonomics approach

142 In 2003, Parasuraman introduced a new interdisciplinary field called "neuroergonomics," which
143 aspires to be the best methodological approach for studying the "brain at work". The interaction
144 between ergonomics and neurosciences would improve our understanding of the brain in action
145 and our ability to study internal states. Using objective and direct data drew from neurosciences
146 or related to it (Parasuraman, 2003) would allow to enhance knowledge about internal mental
147 states. By highlighting behavioral and/or physiological pattern of MW, the first stone of a
148 detection model of MW would be laid. Indeed, it is already possible to use datamining
149 methodology on objective data to detect an internal mental state (Liang, Reyes, & Lee, 2007;
150 Liang & Lee, 2014). Previous authors managed to build and prove the worth of a detection
151 model of distraction. In the same vein, a detection model could be proposed to detect MW while
152 driving. Considering that notable behaviors such as eyes-off the road are not sensitive enough
153 to spot inattention, the search of MW indicators should focus on physiological data and on
154 leaner behavior, almost impossible to control. To achieve this goal, a data triangulation
155 methodology has been set up, whereby we use the confluence of behavioral, physiological and
156 self-report data (J. W. Schooler & Schreiber, 2004) to improve the experimental control,
157 essential to study MW (Smallwood & Schooler, 2015). Such method allow validating each
158 dimension as measures of "what they say they measure" (Seth, Dienes, Cleeremans, Overgaard,
159 & Pessoa, 2008).

160 Given a detection model of disruptive MW as a long-term objective, we need to expand our
161 understanding of MW, delving the characteristics underlying this state. More specifically, we
162 need to understand if the intentionality of TUTs will affect the disruptiveness of MW. To do
163 so, it is relevant to investigate how the kind of thought differentially disrupts driver's behavior
164 (speed, lane departure) and impact physiological signatures. Subjective data on the other hand
165 allow classifying drivers' state and then make comparisons between on-task and off-task
166 moments using physiological and behavioral metrics. It could therefore be possible to better
167 understand the most deleterious aspect of MW in order to detect it during risk situations while
168 permitting the mind to wander when the driving demand is low.

169 1.5 Aim of the paper

170 There are three main objectives for the present study. First, it intends to assess the physiological
171 and behavioral correlates of Task-Unrelated Thoughts (TUTs) in driving. Second, it intends to
172 explain the differences between intentional (PSTs) and unintentional (MW) off-task thoughts
173 by making a clear distinction between these kinds of thought to better describe their respective
174 impacts on drivers. Third, with the use of a data triangulation methodology, it aims at
175 highlighting different physiological and behavioral signatures for Problem-Solving Thoughts
176 (PSTs) and (MW) while driving.

177 2. MATERIALS AND METHODS

178 2.1 Participants

179 Twenty healthy volunteers (10 males; age 34.15 ± 11.93) consented to participate in the present
180 study. Before starting the experiment, participants were asked about their health status and none
181 declared cardiovascular disease, attentional or sensorial deficit or any comprehension difficulty
182 were included. All of them reported normal or corrected to normal visual acuity and had been
183 holders of a valid driving license for at least 3 years. All participants gave written consent and
184 received 30 euros for their participation. No participant declared having consumed coffee,
185 alcohol or drug the day of experiment.

186 2.2 Experimental design

187 One repeated measure (temporal-windows: [-5.5s; +5.5s]) and one within-subject factor (the
188 kinds of thought: MW and PSTs) were studied.

189 In order to evaluate the impact of the kind of thought on behavioral and physiological
190 measurement, two tasks were proposed. For the first one, participants were told to keep their
191 attention on the driving task as much as possible and to indicate whenever they realized that
192 their attention had drifted away to MW. For that they had to push the headlights close to self-
193 report (SR) their MW episodes. MW was defined for participants as “when you are thinking
194 about something that has nothing to do with driving. For example, something you were doing
195 before the experiment, something you will do later or thinking about people or a particular
196 person” (Burdett et al., 2016). Each time they pushed the headlights, participants declared
197 unintentional off-task thoughts. Participants then had to focus on the driving activity. The
198 second task consisted in asking participants to find innovations on specific topics while driving
199 (for instance: “how to improve mobility for disabled or older persons”). Innovations should not
200 exist yet and had to be as sophisticated as possible. Participants had to say “Stop” when they
201 considered their ideas were elaborated enough. Such task allowed generating Problem Solving
202 Thoughts (PSTs) whose characteristics are close to MW except that thoughts are intentional.
203 Moreover, participants were not asked to think about a personal goal or issue to control the
204 content of thought (temporal orientation and distance, emotional valence...). By saying “Stop”
205 at the end of each PSTs phase, participants declared having intentional off-task thoughts.

206 In each PST phase, participants were given instructions about a specific area (e.g., educational
207 system, sport etc.). They then had to elaborate one innovation. In each scenario, 3 topics were
208 proposed and all participants were asked to reflect upon 6 different innovations during the
209 whole experiment. Instructions about each innovation were previously recorded and
210 broadcasted in the simulator cabin at the beginning of each PST phase. The end of each PST
211 phase was also announced by instructions broadcasted in the cabin. Then, a new MW phase
212 started and participants were reminded they had to push the headlights whenever they realized
213 that their mind wandered. Each MW phase lasted 1 min and a half and each PST phase lasted
214 2 minutes. All participants had the same order of conditions presentation which was MW-PST-
215 MW-PST-MW-PST-MW for both scenarios. Considering the changing aspect of MW,
216 alternating tasks appeared to be the more realistic way to create an enabling environment for

217 the emergence of MW. For this reason four phases of self-reported MW were alternated with
218 three phases of reflections on innovations (PSTs). Each scenario began and ended with a MW
219 phase.

220 The really nature of the two tasks that participants were asked to perform would lead to a
221 different number of events for each kind of thought. During MW phases, participants were able
222 to self-report several MW episodes while they had to think about one innovation during the
223 PST phase.

224 Moments when participants self-reported their wandering thoughts or said “stop” after
225 reflecting upon innovations were considered as “events”. Physiological and behavioral data
226 were compared before and after self-report events and before and after participants said “stop”
227 after thinking on innovations. Therefore, it was possible to compare temporal window
228 designated as inattention interval (before) and temporal window designated as an attentive
229 interval (after) (He et al., 2011).

230 2.3 Material & Apparatus

231 2.3.1 Driving simulator

232 The driving simulator used in this experiment was a Peugeot 308 cabin (length = 4.27 m;
233 width = 1.81 m) surrounded by seven video projection screens (covering a total angular space
234 of 270° and vertical angular size of 47.5°). Participants drove in a straight line interrupted by
235 right and left curves in an urban residential zone. It was a two-way country road with only few
236 vehicles coming from the opposite direction of the participant vehicle so as to enable the
237 emergence of MW (He et al., 2011). To remain coherent with Braboszcz & Delorme, 2011 and
238 He et al., (2011), the driving environment was purposely refined to encourage MW. The road
239 contained long straights lines interrupted by right and left curves. Participants completed 2
240 scenarios of 12 min using the same visual base. They had a break between the two scenarios to
241 avoid any fatigue effect.

242 2.3.2 Physiological and behavioral measurements and pre-processing

243 2.3.2.1 Cardiac measurement

244 Heart rate was measured using 3 electrodes (Biopac, MP150 using Bionomadix transmitters)
245 during the whole experiment. The positive electrode was placed under the last left rib, the
246 negative electrode on the manubrium of the sternum, and the ground electrode on the right side,
247 just on top of the hip. In a test phase, it has been checked that this positioning satisfies the main
248 conditions to collect correct cardiac signal during driving: compromising with the length of the
249 wires and avoiding a noisy signal due to muscular activity.

250 Heart Rate (HR) values were computed using equations provided by Roy, (2015) and illustrated
251 by Pepin et al., (2017). From the cardiac signal, several time-domain indices bringing
252 information about heart rate variability have been calculated from IBI such as the Root Mean
253 Square Successive Differences of NN intervals (RMSSD) and proportion of the number of
254 interval differences of successive NN intervals greater than 50 ms (pNN50).

255 *2.3.2.2 Oculometric measurement*

256 Eye movements were sampled at 30 Hz with an eye-tracking device (Tobii Glasses v1). To
257 analyze the visual information gathering while driving, a gaze fixity rate indicator has been
258 designed. The gaze fixity was present if at least 90% of eye absolute positions were contained
259 in a visual angle area of 2° for more than 1 s. So, the gaze fixity is a binary indicator and then
260 can take only 2 values (1 when there is gaze fixity and 0 when there is not). An algorithm has
261 been set up to transform the absolute position towards gaze fixity for each time step. In order
262 to convert the absolute gaze position into the gaze fixity, such process has been carried out for
263 each time step for each participant throughout a sliding window conversion. This algorithm,
264 coded 1 if 90% of the 29 next gaze absolute positions (corresponding to 1 sec) were contained
265 in a 2° of visual angle area. The gaze fixity rate is the mean of gaze fixity across all events of
266 each condition.

267 *2.3.2.3 Driving data*

268 The driving simulator provided several driving measures such as the speed (in kilometer per
269 hour), the lateral position compared to the center of the lane (in meter) and the steering wheel
270 angle (in degree). Measures of driving performance were sampled at a mean rate of 60 Hz and
271 were synchronized with cardiac data through the BioPac MP150 and with the Tobii Glasses 1.

272 *2.3.2.4 Questionnaire*

273 Participants had to fill in a questionnaire about personal details (age, gender, driving habits,
274 driving experience, attentional and auditory disorder, drug consumption etc...).

275 After each scenario participants had to fill a survey about the content of MW and PSTs. Items
276 enlighten the temporal focus of MW (past, present or future), its emotional valence and its
277 subjective impact on driving performance. For each proposal, participants had to indicate the
278 number of wandering thoughts they remembered having for each dimension.

279 **2.4 Procedure**

280 Prior to the experiment, participants were informed about the content of the experiment and
281 asked to give their informed consent. They were also aware that they could stop the experiment
282 at any time. Cardiac electrodes were affixed. Then, participants sat in the simulator cabin and a
283 5 min baseline measurement of HR was recorded. A short training session on the driving
284 simulator was performed to familiarize him/herself with the simulator and the driving
285 environment. Then, participants were equipped with the eye-tracker glasses and the calibration
286 phase started. Prior to the beginning of the first scenario, participants were instructed about
287 PSTs and MW conditions. Participants were asked to maintain the car speed at 70 Km/h and
288 stay in the center of the lane. After the first scenario, they completed the « Mind Wandering »
289 questionnaire about their attentional focus and the content of their thoughts. After a break, they
290 performed the second scenario. Then, they completed the MW questionnaire once again and
291 the survey about personal information. Finally, at the very end of the experiment, a debriefing
292 session was performed to explain the purpose of the study and answer participants' questions.

293 2.5 Statistical analyses

294 Physiological and behavioral data were compared before and after MW moments and before
295 and after PST moments. Such comparisons allow to make within-subject comparisons. It
296 assumes that participants were in a MW state or were reflecting upon innovation before
297 participants SR their wandering thoughts or said stop after reflecting upon innovation.
298 Moreover, it assumes that they were refocused on the main activity (i.e., driving) after it.
299 Considering temporal windows used in a previous study(He et al., 2011), [-5.5s; 0s] and
300 [0s; +5.5s] temporal windows were chosen here to study and compare respectively off-task
301 (PSTs or MW) and on-task thoughts. This decision is based on assumptions that in the 5.5
302 seconds prior to the event participants were in MW or focus on their PSTs while their attention
303 in the 5.5 seconds following the event was redirected towards driving. These assumptions seem
304 more likely to be verified than with the use of temporal windows used in other studies (He et
305 al., 2011).

306 Statistical analyses were conducted to address two experimental questions in particular:

- 307 1) What are the behavioral and physiological correlates of inattentive thoughts
308 towards driving?
309 2) Is it possible to distinguish problem solving thoughts and stimulus-independent
310 and task-unrelated thoughts (MW)?

311 The first step was to check distributions normality using the Kolmogorov–Smirnov test.
312 Depending on this result, ANOVAs, Wilcoxon were conducted to compare 1) changes between
313 before and after, 2) changes between before and after according to the kind of thought and t-
314 tests were conducted to compare 3) differences during before and after according to the kind of
315 thought.

316 3. RESULTS

317 Overall, 285 events were collected across all conditions and through all participants. Grand
 318 mean responses have been computed by averaging data over all events. Different numbers of
 319 events from cardiac and oculometric metrics have been removed resulting in different numbers
 320 of event suitable for analysis. It appears that 13.68% of eye-tracking data, 7.37% of cardiac data
 321 and 0% of driving data have been removed. Events were removed from analyses either because
 322 temporal windows were overlapping other events or because data were unsuitable for analysis.
 323 It is also possible that participants did not said “stop” because did not complete their innovation
 324 within the allocated time. The number of each event for each variable is presented in Table 1.

325 *Table 1: Number of usable events, mean, standard deviation and p-value of the difference for each variable. MW*
 326 *= Mind-wandering; PST = Problem-Solving Thought*

	MW									PST								
	Number of participant with usable data	Mean of usable events by participant	SD of usable events by participant	Sum of usable events	Mean for [-5,5; 0] time-window	SD for [-5,5; 0] time-window	Mean for [0; +5,5] time-window	SD for [0; +5,5] time-window	p-value	Number of participant with usable data	Mean of usable events by participant	SD of usable events by participant	Sum of usable events	Mean for [-5,5; 0] time-window	SD for [-5,5; 0] time-window	Mean for [0; +5,5] time-window	SD for [0; +5,5] time-window	p-value
Class Fixity	20	10,00	4,68	200	0,52	0,15	0,41	0,19	<.001	15	2,40	1,82	48	0,46	0,24	0,41	0,22	>.05
Heart Rate	20	9,55	4,02	191	72,51	13,72	73,51	14,40	<.001	17	2,35	1,57	47	73,25	15,00	74,13	15,74	<.01
Speed	20	11,1	5,17	222	70,72	2,26	71,46	2,65	<.05	19	2,70	1,45	54	72,52	4,14	72,27	4,38	>.05

327 3.1 Questionnaires

328 Participants declared having more future-oriented (47.64%) than past-oriented (13.19%)
 329 thoughts ($T = 56, z = 3.89, p < .0001$). Considering thoughts emotional valence, participants
 330 declared having less negative thoughts (15%) than neutral (44.47%) ($T = 74, z = 3.69, p < .001$)
 331 or positive thoughts (40.53%) ($T = 88, z = 3.29, p < .001$).

332 3.2 Comparisons Before/After for TUTs

333 Cardiac data

334 The only significant result among cardiac measurement concerned Heart Rate (HR) which was
 335 higher after ($m = 73.34, SD = 13.29$) TUTs than before ($m = 72.33, SD = 12.53$)
 336 ($F(1, 19) = 11.57, p < .01$). RMSSD and pNN50 metrics appeared non-significant with
 337 Wilcoxon tests ($p > .05$).

338 Eye-tracking data

339 The difference in gaze fixity rate between before ($m = 0.495, SD = 0.25$) and after
 340 ($m = 0.511, SD = 0.17$) gave rise to a significant effect in the [-5.5s; +5.5s] temporal window
 341 ($F(1, 19) = 10.15, p < .01$).

342 3.2.3 Driving data

343 A trend appeared for the vehicle speed is different between before ($m = 71.07, SD = 2.36$) and
 344 after ($m = 71.83, SD = 3.14$) and it gave rise to a significant effect in the [-5.5s; +5.5s] temporal
 345 window ($F(1, 19) = 3.84, p = .065$).

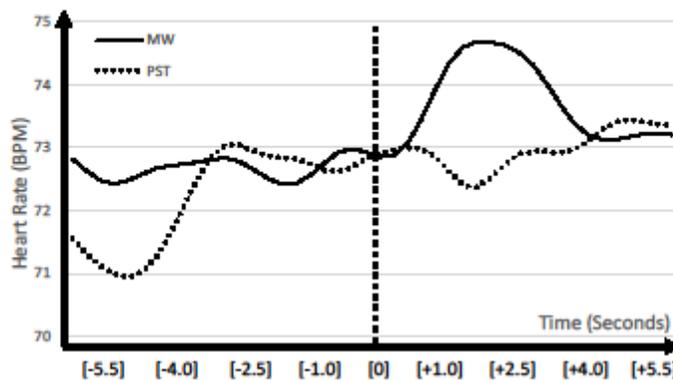
346 The lateral position and the steering wheel angle comparisons appeared both non-significant
 347 ($p > .05$).

348 3.3 Comparisons Before/After for MW and PST

349 3.3.1 Cardiac data

350 HR appeared significantly different between before ($m = 72.51$, $SD = 13.72$) and after
 351 ($m = 73.51$, $SD = 14.40$) for the MW condition: $F(1, 19) = 10.85$, $p < .01$.

352 HR averaged across all participants in the $[-5.5s; +5.5s]$ temporal window according to the kind
 353 of thought is presented in Figure 1.



354

355 *Figure 1: Evolution of grand mean heart rate (obtained from raw data) within 11 seconds*
 356 *surrounding the event, data depict MW and PST conditions.*

357 For PST, a trend appeared for HR between the inattentive phase ($m = 73.25$, $SD = 15.00$) and
 358 the attentive phase ($m = 74.13$, $SD = 15.74$), for the PST thoughts ($F(1, 19) = 3.109$, $p = .093$).

359 3.3.2 Eye-tracking data

360 The gaze fixity rate was higher during MW ($m = 0.522$, $SD = 0.15$) than during attentive
 361 moments ($m = 0.413$, $SD = 0.19$) in the $[-5.5s; +5.5s]$ temporal window
 362 ($F(1, 19) = 10.95$, $p < .01$).

363 Conversely, the difference in the gaze fixity rate for the PST condition in the $[-5.5s; +5.5s]$
 364 temporal window was not significant ($F < 1$).

365 Gaze fixity rates according to the type of tasks are presented in Figure 2 and Figure 3.



Figure 2: Grand mean of gaze fixity in the 11 seconds surrounding a MW self-report. Data averaged over 200 events



Figure 3: Grand mean of gaze fixity in the 11 seconds surrounding a PST event. Data averaged over 46 event

366

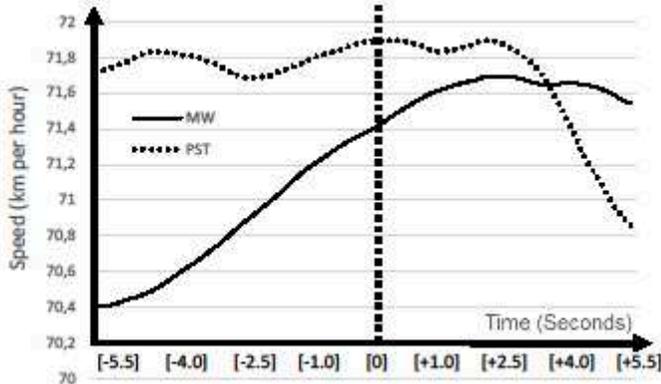
3.3.3 Driving data

367 Concerning MW results, differences concerning lateral position as well as the steering wheel
368 angle appeared non-significant ($p > .05$) between before and after MW.

369 A trend appeared for the car speed between before ($m = 70.72$, $SD = 2.56$) and after for the MW
370 condition ($m = 71.46$, $SD = 2.65$) in the $[-5.5s; +5.5s]$ temporal window
371 ($F(1, 19) = 4.01$, $p = .060$).

372 Concerning PST, neither the lateral position, nor the steering wheel angle, nor the vehicle speed
373 was significantly different between before and after moments.

374 Car speeds according to the kind of task are presented in Figure 4.



375

376 Figure 4: Grand mean of vehicle speed in the 11 seconds surrounding events, data depict MW
377 and PST conditions.

378

379 4. DISCUSSION

380 The objectives of the present study was to (1) make a clear distinction between intentional
381 (Problem Solving Thoughts = PSTs) and unintentional (MW) off-task thoughts, (2) assess the
382 physiological and behavioral signatures of TUTs (both MW and PSTs) and (3) compare MW
383 and PST. Participants had to 1) Self-Report (SR) their wanderings thoughts when they realized
384 their mind drifted away from driving and 2) intentionally generate PST. For this, one repeated
385 measure (temporal-windows: [-5.5s; +5.5s]) and one within-subject factor (the kinds of
386 thought: MW and PSTs) were studied.

387 4.1 MW features

388 Concerning the features of thoughts that participants declared (MW condition), the prospective
389 bias showed in previous studies has been replicated: 48% of SR thoughts were future-oriented
390 while only 13% were past-oriented. These findings support the view of an important role of
391 MW to enable anticipation and planning of personally relevant future goals (Baird et al., 2011;
392 Stawarczyk, Cassol, & D'Argembeau, 2013). Proportion of interfering thoughts related to the
393 task (39% in the present study) is also consistent with prior findings (Gonçalves et al., 2017;
394 Stawarczyk et al., 2011). Moreover, considering links between temporality and valence, the
395 high proportion of neutral or positive thoughts (85%) is also consistent with the prospective
396 bias highlighted here. Results obtained from questionnaires indicate that 1) MW own a useful
397 planning role in our lives and 2) that participants generated ecological off-task thoughts
398 comparable to MW generated during other studies.

399 4.2 TUTs signatures

400 Physiological data analysis showed that Heart Rate (HR) was significantly lower during Task-
401 Unrelated Thoughts (TUTs) than in the following seconds, during attentive driving. It means
402 that TUTs could have an impact on HR even on a 11s time-window. No difference has been
403 found for heart rate variability indicators (RMSSD and pNN50). This result is not in line with
404 Smallwood et al., (2004) since HR was found to be higher during TUTs. Such different results
405 could be explained by differences in the dynamic of the tasks the participants had to achieve
406 (computer task vs. driving). TUTs moments could consequently be distinguished from attentive
407 moment (on-task thoughts) using heart rate. This potential distinction would be more effective
408 by taking the kind of thoughts into account (see next section).

409 Behavioral data analysis showed that the gaze fixity was higher during TUTs than during
410 attentive driving for on 11s time-window. As drivers' gaze is focused narrowly on the road
411 ahead during TUTs, gaze fixity seems to be a sensitive indicator of TUTs. Our results, in line
412 with He et al., (2011), showed that drivers' visual scanning is reduced their during TUTs.
413 Moreover, it means that TUTs damage their road sides scanning leading to impaired
414 information collection and processing coming from there. This could explain the part of the
415 higher crash risk associated to TUTs and particularly to MW. Considering driving data, the
416 vehicle speed appeared to be lower during TUTs episodes than after strengthening the impact
417 of TUTs on drivers' behavior. So, in line with previous findings, TUTs should have an impact
418 on drivers' behavior and physiological signals (Baird et al., 2011; He et al., 2011; Lemerrier et

419 al., 2014; Smallwood et al., 2004). In order to better understand such impact, it is necessary to
420 categorize the kind of thought drivers are involved in. In the next part, the relative impact of
421 each kind of thought is described by comparing the Stimulus Independent and Task-Unrelated
422 Thoughts (SITUTs = MW) and Problem Solving Thoughts (PSTs).

423 4.3 Comparisons between MW and PSTs signatures

424 4.3.1 Cardiac data

425 Considering cardiac measurement, it appears that heart rate is significantly lower during MW
426 than after being aware of it in the [-5.5s; +5.5s] temporal window. Such significance, which has
427 not been highlighted in previous study, is due to a specific pattern in HR in seconds following
428 participant's SR (Figure 1). This special pattern could be explained by the dynamic of the task
429 in which drivers were involved. Indeed, participants were asked to be focus on the driving task
430 and self-report their MW episodes. This means that in the seconds prior to self-reports, drivers
431 were focused on their personal thoughts rather than driving. Thus, when they became aware of
432 their inattentive state, corresponding to a gain in meta-consciousness (Schooler, 2002)
433 participants declared their thought and were instructed to focus back on the driving task.
434 However, MW impairs the working memory update (Kam, Nagamatsu, & Handy, 2014) by
435 drawing attentional resources from it to feed thoughts (Levinson, Smallwood, & Davidson,
436 2012). This means that drivers could no longer be able to refresh their situational awareness,
437 which corresponds to the state of knowledge about the elements in a dynamic environment
438 (Endsley, 1995). Hence, as soon as they became aware of a wandering thought, drivers seemed
439 to seek information (their speeds, the location of others vehicles etc...), processed it and
440 integrated it to quickly recover a clear and accurate situational awareness. If they did so, they
441 had to spend cognitive resources to shift between the default and the attentional mode (Yanko
442 & Spalek, 2014). This switchover could have a cost in terms of attentional resources. Yet, a
443 recent study has showed the feasibility of detecting the cognitive effort generating by a
444 cognitive demand of a task through heart rate measurement (Pepin et al., 2017). It appears that
445 the specific pattern found here after participants self-reported their MW episodes could
446 correspond to a cognitive effort pattern. Time-windows used for this experiment and in Pepin
447 et al., (2017) are similar. As previously explained, it seems likely that this increase in HR is
448 responsible for the statistical significance highlighted here. The difference is therefore due to
449 an increase in HR, which could come from a cognitive cost. This cognitive cost could have be
450 necessary to shift from a wandering mode underlain by the default mode network (Christoff et
451 al., 2009) to an attentive mode (Mason et al., 2007) underlain by the dorsal attentional network
452 (Vincent et al., 2006) generating the special pattern in [+1s; +4s] following the SR.

453 The special pattern spelt out here is not present for the PST condition in the same time-window.
454 Nevertheless, different fluctuations in HR have been highlighted between PSTs and attentive
455 driving meaning that PSTs could have a cardiac signature while the only difference for the MW
456 conditions have been found during the attentive driving period (Figure 1). Even if the difference
457 for MW and PSTs is not significant regardless time-window (before and after), this cardiac
458 pattern could be discussed regarding results outlined above. Indeed, the need to reorient our
459 attention to driving could have generated a small cognitive effort, insufficient to reach

460 significance. With a less refine environment and more vehicles, the reorientation of attention
461 could have been more expensive in cognitive resources inducing a larger HR acceleration. The
462 present study has not been able to highlight a cardiac signature of MW or PSTs but found that
463 the reorientation of drivers' attention after a MW episode gets a cognitive cost that could be
464 detectable by averaging heart rate values.

465 4.3.2 Ocular behavior

466 Considering oculometric measurement, the gaze fixity rate was higher during MW episodes
467 than after. The difference is significant in the [-5.5s; +5.5s] time-window. Conversely, no
468 difference has been found for PST conditions. Such results support the previous hypothesis in
469 which the specific cardiac pattern is due to a need for drivers to reorient attention towards
470 driving after a MW episodes. Indeed, drivers' gaze appeared to be fixed during MW episodes
471 meaning that the amplitude of their visual scanning is reduced. Drivers do not seem to be as
472 efficient to collect and process information as they were when focusing on driving. Hence, to
473 update their situational awareness, drivers scanned the environment in a broader way after
474 having self-reported their MW episodes (Figure 2). It has already been proven that MW leads
475 to a reduction in drivers horizontal visual scanning (He et al., 2011) but an increase in drivers
476 gaze fixity during MW means that drivers' gaze get stuck straight ahead. A parallel could be
477 made with failure in attentional disengagement among aircraft pilots (Dehais et al., 2011).
478 Indeed, MW could prevent attentional disengagement from drivers' thoughts to driving. This
479 failure in attentional disengagement would lead to a staring gaze and then increase the risk of
480 an accident.

481 Now, considering PST, no difference has been found for the gaze fixity rate. Such result might
482 be the fact that 200 events were averaged to analyze MW while only 46 events have been
483 averaged for PST (Figure 3). Still, it appears that there are substantial differences between MW
484 and PST. Indeed, the gaze is more fixed during MW than during PST. More than 60% of drivers
485 gaze during MW events were fixed in the second before the SR while it barely raise 45% for
486 PSTs (it has to be noted that the gaze fixity baseline reaches 37%). MW impact gaze behavior
487 by reducing the visual scanning and generating an impaired visual attention while the gaze
488 fixity seems to be non-sensitive to PSTs under current experimental conditions.

489 4.3.3 Driving behavior

490 Considering driving behavior, the vehicle speed tends to be lower during TUTs than during
491 attentive driving moments. However, in the present study, vehicles' speed gradually increase
492 while it has been shown to decrease while having off-task thoughts (Yanko & Spalek, 2014).
493 When having a closer look and taking into account the kind of thought, it appears that the
494 vehicle speed is lower during MW than during attentive driving but tends to gradually increase
495 up to approximately 1 second after drivers self-reported their wandering thoughts (Figure 4). It
496 could correspond to the necessary time for drivers to reorient their attention towards driving,
497 update information and rectify their speed. While drivers were asked to maintain the speed of
498 their vehicle as close as possible to 70km per hour, it seems that they did not have enough
499 cognitive resources to be focus on their thoughts and control lateral and longitudinal positions
500 of their vehicle. Drivers seemed to experience a failure in their executive control leading to

501 higher speeds, which could partly explain the higher crash risk imputable to MW (Galera et al.,
502 2012). Some reservations should be made with the present interpretation since only a trending
503 effect have been highlighted.

504 Conversely, no statistical significance has been found for the vehicle speed between PSTs and
505 attentive driving moments and between PST and MW for the vehicle lateral position, steering
506 wheel angle or speed. Similarly, no statistical significance has been found after having TUTs,
507 during attentive driving moments, for MW and PST conditions, meaning that the driving
508 behavior seems to be affected by TUTs but globally unaffected by the intentionality of TUTs.
509 Drivers were aware that they were having off-task thoughts during PSTs so they could have
510 been able to set up strategies. Those strategies could have been absent for MW explaining that
511 speed gradually increased at that time. The absence of statistical significance for the lateral
512 position of the vehicle and the steering wheel angle could be partially explained by the presence
513 of curves during driving sessions. Indeed, several events (self-report mind wandering and
514 reflection upon innovation) happened during curves leading to high steering wheel angle values
515 and high variation in the lateral positions values of the vehicle. These alterations of data
516 occurred sometimes during TUTs and sometimes during attentive driving moments. To be able
517 to conclude about the impact of the kind of thoughts on the lateral position of the vehicle and
518 the steering wheel angle, the use of a different task with straight lines and no curve should have
519 been used. To conclude about speed, it is also likely that the vehicle speed management is
520 affected by MW while the lateral position and the steering wheel angle are not. Indeed,
521 managing speed requires drivers a constant cognitive resources allocation management. To do
522 so, drivers have to periodically check the speedometer, keep in mind the information and then
523 adapt their behavior. Nevertheless, with an increase in the gaze fixity and an impossibility to
524 update their working memory, drivers fail to process such information generating a
525 perseverative behavior and a gradual speed increase. In conclusion, MW seems to impair
526 drivers' executive control leading to a persistent behavior. During MW, drivers are no longer
527 able to keep watch their speed. This could be problematic, especially under real driving
528 conditions with strong time pressure (Merat, Jamson, Lai, Daly, & Carsten, 2014).

529 4.4 Conclusion

530 The question of how various off-task thoughts might impact drivers is a topic of increasing
531 concern not only for road safety but also for human performance and comprehension. The
532 present study intended to make a distinction between intentional (PSTs) and unintentional
533 (MW) thoughts. Being more specific about the features of thought allow to better understand
534 inattention and to take effective countermeasures to ensure drivers' safety. The present study
535 highlighted behavioral and physiological signatures of Task-Unrelated Thoughts (TUTs).
536 During TUTs, the gaze fixity is higher and the speed of the vehicle is lower than during attentive
537 driving moments. When taking the kind of thought into consideration, it appeared that heart
538 rate and speed are affected by both MW and PSTs while the gaze fixity is only sensitive to MW.
539 For this reason, the gaze fixity appeared as a sensitive indicator of MW. Indeed, MW draws on
540 working memory resources (Kam et al., 2014) to trigger and feed self-generated thoughts
541 (Levinson et al., 2012). MW and PSTs seem to have different oculometric signatures
542 strengthening the need to distinguish the kind of thought when studying off-task thoughts. The

543 following perseverative behavior and staring gaze prevent drivers to properly scan the
544 environment. And even if they collect a part of available information, evidences coming from
545 neurosciences have showed that sensory cortices are less active and information are less well-
546 processed during MW (Smallwood, Beach, Schooler, & Handy, 2008). Oculometric
547 measurements should therefore be considered more closely when researchers study MW.
548 Consistent with previous findings (McVay & Kane, 2009; Smallwood, 2010), behavioral
549 outcomes showing that gaze fixity and speed increase during TUTs unveil a failure in executive
550 control and in resources allocation management. This leads to incapacity to both maintain TUTs
551 and manage speed. Nevertheless, and this is the first limitation of the present study, changing
552 the response mode between MW and PSTs add some variability in data which could explain
553 this difference. Indeed, flashing headlights and say “stop” are two different output modes,
554 which could have influence the gaze fixity. Secondly, MW and PST conditions were not
555 averaged over the same number of events leading to more accurate interpretations and
556 conclusions for MW than for PSTs. Moreover, when participants were asked to self-report their
557 wandering thoughts we assume that we can only study MW that became, at a certain moment,
558 conscious. Participants cannot report an unconscious wandering thought and can only wait for
559 this thought to become conscious before being able to report it. This is why the present study
560 only considered unintentional and, in the first place, unaware thoughts that became, at one time
561 aware. Such off-task thoughts might be different from thoughts that would never become aware.

562 This study has not been capable to demonstrate strong differences between PST and MW. But
563 recent findings seemed to direct research towards more specific thoughts features (Golchert et
564 al., 2017) such as awareness (Smith et al., 2006), temporal focus (Smallwood & Schooler,
565 2015), temporal distance (Spronken et al., 2016), emotional valence (Killingsworth & Gilbert,
566 2010), relevance of the thought to the individual (Andrews-Hanna et al., 2013) and task demand
567 (He et al., 2011). A better understanding of the respective impact of these features could be
568 very useful to identify detrimental thoughts responsible for the “disruptive mind-wandering”
569 state doubling the risk to be responsible for a car accident (Galera et al., 2012). But the
570 importance of each factor is difficult to measure considering strong and winding links between
571 them (Ruby, Smallwood, Engen, & Singer, 2013; Smallwood & Schooler, 2015; Stawarczyk et
572 al., 2011). As it has been done with the intentionality in the present study, future research should
573 therefore have to bring to light the impact of temporal focus, emotional valence and subjective
574 relevance of the current thought, which seem to be the most promising thought features to
575 explain that MW while driving is detrimental or not. Indeed, it seems that the temporality and
576 the occurrence of MW are related: the more people have future-oriented thoughts, the more
577 they wander (Baird et al., 2011). It also seems that emotional valence and temporality are linked
578 (Smallwood & Schooler, 2015) and a bidirectional relationship between negative emotion and
579 MW have been highlighted (Smallwood & Schooler, 2015; Techer, 2016). When we consider
580 that the emotional valence of off-task thoughts affect cognitive performances (Banks, Welhaf,
581 Hood, Boals, & Tartar, 2016), all mind wandering seem not be equal. Considering links
582 between temporality and other thoughts features, it is therefore highly likely that the content of
583 a wandering thought and particularly its temporality seems promising to explain a higher
584 disruptive effect on drivers (Lemerancier et al., 2014).

585 Finally, once links between thoughts features and their impacts on drivers will be questioned
586 and spelled out, a detection algorithm of MW could be developed. The idea is to use the gaze
587 fixity and others relevant behavioral (e.g., deviations in the vehicle's lateral position: Lemerrier
588 et al., 2015) and physiological (e.g., pupil dilation: Konishi et al., 2017) indicators to assess the
589 presence of MW. The final objective being to merge it together to improve the ability of an
590 algorithm to spot MW when it is disruptive. To do so, the selected indicators must be evaluated
591 on their sensitivity, specificity and robustness. It could be also possible to take into account the
592 driving context to better prevent car crash risk. The objective is to monitor drivers' attentional
593 states and pinpoint times when driver's mind dangerously drifts away. Such solution is entirely
594 in continuation with work achieved years ago on distraction using a layered algorithm, dynamic
595 bayesian networks and supervised clustering (Liang et al., 2007; Liang & Lee, 2014). It is
596 therefore critical to collect both physiological and behavioral data to expand our understanding
597 of MW through a data triangulation method, use these data mining methodologies to detect MW
598 while driving and then still improve road safety.

599 Conflict of interest

600 All authors declare they have no conflict of interest

601 5. REFERENCES

- 602 Andrews-Hanna, J. R., Kaiser, R. H., Turner, A. E., Reineberg, A., Godinez, D., Dimidjian,
603 S., & Banich, M. (2013). A penny for your thoughts: dimensions of self-generated thought
604 content and relationships with individual differences in emotional wellbeing. *Frontiers in*
605 *psychology*, 4, 900.
- 606 Baird, B., Smallwood, J., & Schooler, J. W. (2011). Back to the future: autobiographical
607 planning and the functionality of mind-wandering. *Consciousness and Cognition*, 20(4),
608 1604-1611. <https://doi.org/10.1016/j.concog.2011.08.007>
- 609 Banks, J. B., Welhaf, M. S., Hood, A. V. B., Boals, A., & Tartar, J. L. (2016). Examining the
610 role of emotional valence of mind wandering: All mind wandering is not equal.
611 *Consciousness and Cognition*, 43, 167-176. <https://doi.org/10.1016/j.concog.2016.06.003>
- 612 Berthié, G., Lemercier, C., Paubel, P.-V., Cour, M., Fort, A., Galéra, C., ... Maury, B. (2015).
613 The restless mind while driving: drivers' thoughts behind the wheel. *Accident; Analysis and*
614 *Prevention*, 76, 159-165. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2015.01.005>
- 615 Bixler, R., & D'Mello, S. (2014). Toward Fully Automated Person-Independent Detection of
616 Mind Wandering. In V. Dimitrova, T. Kuflik, D. Chin, F. Ricci, P. Dolog, & G. J. Houben
617 (Éd.), *User Modeling, Adaptation, and Personalization, Umap 2014* (Vol. 8538, p. 37-48).
618 Berlin: Springer-Verlag Berlin.
- 619 Braboszcz, C., & Delorme, A. (2011). Lost in thoughts: neural markers of low alertness
620 during mind wandering. *NeuroImage*, 54(4), 3040-3047.
621 <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2010.10.008>
- 622 Brown, I. D. (2005). *Review of the « looked but failed to see » accident causation factor*.
623 Consulté à l'adresse <https://trid.trb.org/view/1156399>
- 624 Burdett, B. R. D., Charlton, S. G., & Starkey, N. J. (2016). Not all minds wander equally: The
625 influence of traits, states and road environment factors on self-reported mind wandering
626 during everyday driving. *Accident; Analysis and Prevention*, 95(Pt A), 1-7.
627 <https://doi.org/10.1016/j.aap.2016.06.012>
- 628 Chaparro, R. A. H. (2015, novembre 9). *Behavioral and neural correlates of spontaneous*
629 *attentional decoupling : towards an understanding of mind wandering* (phdthesis). Université
630 Pierre et Marie Curie - Paris VI. Consulté à l'adresse [https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-](https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01314225/document)
631 [01314225/document](https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01314225/document)
- 632 Christoff, K., Gordon, A. M., Smallwood, J., Smith, R., & Schooler, J. W. (2009). Experience
633 sampling during fMRI reveals default network and executive system contributions to mind
634 wandering. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(21), 8719-8724.
635 <https://doi.org/10.1073/pnas.0900234106>
- 636 Corballis, M. C. (2013). Wandering tales: evolutionary origins of mental time travel and
637 language. *Frontiers in Psychology*, 4. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00485>

- 638 Dehais, F., Causse, M., & Tremblay, S. (2011). Mitigation of Conflicts with Automation: Use
639 of Cognitive Countermeasures. *Human Factors*, 53(5), 448-460.
640 <https://doi.org/10.1177/0018720811418635>
- 641 Endsley, M. R. (1995). Toward a theory of situation awareness in dynamic systems. *Human*
642 *factors*, 37(1), 32-64.
- 643 Galera, C., Orriols, L., M'Bailara, K., Laborey, M., Contrand, B., Ribereau-Gayon, R., ...
644 Lagarde, E. (2012). Mind wandering and driving: a responsibility case-control study. *BMJ*
645 *British medical journal*, 345, 7 p. <https://doi.org/10.1136/bmj.e8105>
- 646 Golchert, J., Smallwood, J., Jefferies, E., Seli, P., Huntenburg, J. M., Liem, F., ... Margulies,
647 D. S. (2017). Individual variation in intentionality in the mind-wandering state is reflected in
648 the integration of the default-mode, fronto-parietal, and limbic networks. *NeuroImage*, 146,
649 226-235. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2016.11.025>
- 650 Gonçalves, Ó. F., Rêgo, G., Oliveira-Silva, P., Leite, J., Carvalho, S., Fregni, F., ... Boggio,
651 P. S. (2017). Mind wandering and the attention network system. *Acta Psychologica*, 172,
652 49-54. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2016.11.008>
- 653 Greicius, M. D., Krasnow, B., Reiss, A. L., & Menon, V. (2003). Functional connectivity in
654 the resting brain: A network analysis of the default mode hypothesis. *Proceedings of the*
655 *National Academy of Sciences of the United States of America*, 100(1), 253-258.
656 <https://doi.org/10.1073/pnas.0135058100>
- 657 He, J., Becic, E., Lee, Y.-C., & McCarley, J. S. (2011). Mind wandering behind the wheel:
658 performance and oculomotor correlates. *Human Factors*, 53(1), 13-21.
659 <https://doi.org/10.1177/0018720810391530>
- 660 Kam, J. W. Y., Nagamatsu, L. S., & Handy, T. C. (2014). Visual asymmetry revisited: Mind
661 wandering preferentially disrupts processing in the left visual field. *Brain and Cognition*, 92C,
662 32-38. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2014.10.002>
- 663 Killingsworth, M. A., & Gilbert, D. T. (2010). A Wandering Mind Is an Unhappy Mind.
664 *Science*, 330(6006), 932-932. <https://doi.org/10.1126/science.1192439>
- 665 Konishi, M., Brown, K., Battaglini, L., & Smallwood, J. (2017). When attention wanders:
666 Pupillometric signatures of fluctuations in external attention. *Cognition*, 168, 16-26.
- 667 Kopp, K., D'Mello, S., & Mills, C. (2015). Influencing the occurrence of mind wandering
668 while reading. *Consciousness and Cognition*, 34, 52-62.
669 <https://doi.org/10.1016/j.concog.2015.03.003>
- 670 Lemercier, C., Pêcher, C., Berthié, G., Valéry, B., Vidal, V., Paubel, P.-V., ... Maury, B.
671 (2014). Inattention behind the wheel: How factual internal thoughts impact attentional control
672 while driving. *Safety Science*, 62, 279-285. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2013.08.011>

- 673 Levinson, D. B., Smallwood, J., & Davidson, R. J. (2012). The Persistence of Thought:
674 Evidence for a Role of Working Memory in the Maintenance of Task-Unrelated Thinking.
675 *Psychological Science*, 23(4), 375-380. <https://doi.org/10.1177/0956797611431465>
- 676 Liang, Y., & Lee, J. D. (2014). A hybrid Bayesian Network approach to detect driver
677 cognitive distraction. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 38, 146-155.
678 <https://doi.org/10.1016/j.trc.2013.10.004>
- 679 Liang, Y., Reyes, M. L., & Lee, J. D. (2007). Real-Time Detection of Driver Cognitive
680 Distraction Using Support Vector Machines. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation
681 Systems*, 8(2), 340-350. <https://doi.org/10.1109/TITS.2007.895298>
- 682 McVay, J. C., & Kane, M. J. (2009). Conducting the Train of Thought: Working Memory
683 Capacity, Goal Neglect, and Mind Wandering in an Executive-Control Task. *Journal of
684 experimental psychology: Learning, memory, and cognition*, 35(1), 196-204.
685 <https://doi.org/10.1037/a0014104>
- 686 Merat, N., Jamson, A. H., Lai, F. C. H., Daly, M., & Carsten, O. M. J. (2014). Transition to
687 manual: Driver behaviour when resuming control from a highly automated vehicle.
688 *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 27, 274-282.
689 <https://doi.org/10.1016/j.trf.2014.09.005>
- 690 Mooneyham, B. W., & Schooler, J. W. (2013). The Costs and Benefits of Mind-Wandering:
691 A Review. *Canadian Journal of Experimental Psychology-Revue Canadienne De Psychologie
692 Experimentale*, 67(1), 11-18. <https://doi.org/10.1037/a0031569>
- 693 Mosedale, J., Purdy, A., & Clarkson, E. (2004). Contributory factors to road accidents.
694 Consulté à l'adresse <https://trid.trb.org/view/864416>
- 695 Ottaviani, C., Shahabi, L., Tarvainen, M., Cook, I., Abrams, M., & Shapiro, D. (2014).
696 Cognitive, behavioral, and autonomic correlates of mind wandering and perseverative
697 cognition in major depression. *Frontiers in Neuroscience*, 8, 433.
698 <https://doi.org/10.3389/fnins.2014.00433>
- 699 Parasuraman, R. (2003). Neuroergonomics: Research and practice. *Theoretical issues in
700 ergonomics science*, 4(1-2), 5-20.
- 701 Pepin, G., JALLAIS, C., Fort, A., Moreau, F., Navarro, J., & GABAUDE, C. (2017).
702 Towards real-time detection of cognitive effort in driving: contribution of cardiac
703 measurement. *Le travail humain*, 80, 51-72. <https://doi.org/10.3917/th.801.0051>
- 704 Raichle, M. E., MacLeod, A. M., Snyder, A. Z., Powers, W. J., Gusnard, D. A., & Shulman,
705 G. L. (2001). A default mode of brain function. *Proceedings of the National Academy of
706 Sciences of the United States of America*, 98(2), 676-682.
- 707 Rayner, K. (1998). Eye movements in reading and information processing: 20 years of
708 research. *Psychological Bulletin*, 124(3), 372-422. [https://doi.org/10.1037/0033-
709 2909.124.3.372](https://doi.org/10.1037/0033-2909.124.3.372)

- 710 Regan, M. A., & Strayer, D. L. (2014). Towards an Understanding of Driver Inattention:
711 Taxonomy and Theory. *Annals of Advances in Automotive Medicine*, 58, 5-14.
- 712 Roy, R. N. (2015, juin 4). *Étude de corrélats électrophysiologiques pour la discrimination*
713 *d'états de fatigue et de charge mentale : apports pour les interfaces cerveau-machine passives*
714 (phdthesis). Université Grenoble Alpes. Consulté à l'adresse [https://tel.archives-](https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01217465/document)
715 [ouvertes.fr/tel-01217465/document](https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01217465/document)
- 716 Ruby, F. J. M., Smallwood, J., Engen, H., & Singer, T. (2013). How self-generated thought
717 shapes mood—the relation between mind-wandering and mood depends on the socio-temporal
718 content of thoughts. *PloS One*, 8(10), e77554. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0077554>
- 719 Schooler, J. W. (2002). Re-representing consciousness: dissociations between experience and
720 meta-consciousness. *Trends in Cognitive Sciences*, 6(8), 339-344.
721 [https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(02\)01949-6](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(02)01949-6)
- 722 Schooler, J. W., & Schreiber, C. A. (2004). Experience, meta-consciousness, and the paradox
723 of introspection. *Journal of Consciousness Studies*, 11(7-8), 17-39.
- 724 Seli, P., Ralph, B. C. W., Konishi, M., Smilek, D., & Schacter, D. L. (2017). What did you
725 have in mind? Examining the content of intentional and unintentional types of mind
726 wandering. *Consciousness and Cognition*, 51, 149-156.
727 <https://doi.org/10.1016/j.concog.2017.03.007>
- 728 Seth, A. K., Dienes, Z., Cleeremans, A., Overgaard, M., & Pessoa, L. (2008). Measuring
729 consciousness: relating behavioural and neurophysiological approaches. *Trends in Cognitive*
730 *Sciences*, 12(8), 314-321. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2008.04.008>
- 731 Smallwood, J. (2010). Why the global availability of mind wandering necessitates resource
732 competition: Reply to McVay and Kane (2010).
- 733 Smallwood, J. (2013). Distinguishing how from why the mind wanders: a process-occurrence
734 framework for self-generated mental activity. *Psychological Bulletin*, 139(3), 519-535.
735 <https://doi.org/10.1037/a0030010>
- 736 Smallwood, J., Beach, E., Schooler, J. W., & Handy, T. C. (2008). Going AWOL in the brain:
737 mind wandering reduces cortical analysis of external events. *Journal of Cognitive*
738 *Neuroscience*, 20(3), 458-469. <https://doi.org/10.1162/jocn.2008.20037>
- 739 Smallwood, J., Davies, J. B., Heim, D., Finnigan, F., Sudberry, M., O'Connor, R., &
740 Obonsawin, M. (2004). Subjective experience and the attentional lapse: task engagement and
741 disengagement during sustained attention. *Consciousness and Cognition*, 13(4), 657-690.
742 <https://doi.org/10.1016/j.concog.2004.06.003>
- 743 Smallwood, J., McSpadden, M., & Schooler, J. W. (2008). When attention matters: The
744 curious incident of the wandering mind. *Memory & Cognition*, 36(6), 1144-1150.

- 745 Smallwood, J., & Schooler, J. W. (2015). The science of mind wandering: empirically
746 navigating the stream of consciousness. *Annual Review of Psychology*, *66*, 487-518.
747 <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-010814-015331>
- 748 Smallwood, J., Schooler, J. W., Turk, D. J., Cunningham, S. J., Burns, P., & Macrae, C. N.
749 (2011). Self-reflection and the temporal focus of the wandering mind. *Consciousness and*
750 *Cognition*, *20*(4), 1120-1126. <https://doi.org/10.1016/j.concog.2010.12.017>
- 751 Smith, R., Keramatian, K., Smallwood, J., Schooler, J., Luus, B., & Christoff, K. (2006).
752 Mind-wandering with and without awareness: An fMRI study of spontaneous thought
753 processes. In *Proceedings of the Annual Meeting of the Cognitive Science Society* (Vol. 28).
- 754 Spronken, M., Holland, R. W., Figner, B., & Dijksterhuis, A. (2016). Temporal focus,
755 temporal distance, and mind-wandering valence: Results from an experience sampling and an
756 experimental study. *Consciousness and Cognition*, *41*, 104-118.
757 <https://doi.org/10.1016/j.concog.2016.02.004>
- 758 Stawarczyk, D., Cassol, H., & D'Argembeau, A. (2013). Phenomenology of future-oriented
759 mind-wandering episodes. *Frontiers in Psychology*, *4*, 425.
760 <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00425>
- 761 Stawarczyk, D., Majerus, S., Maj, M., Van der Linden, M., & D'Argembeau, A. (2011).
762 Mind-wandering: Phenomenology and function as assessed with a novel experience sampling
763 method. *Acta Psychologica*, *136*(3), 370-381. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2011.01.002>
- 764 Techer, F. (2016, novembre 3). *Impact de la colère sur l'attention, le traitement de*
765 *l'information et les performances en conduite simulée* (phdthesis). Université de Nantes.
766 Consulté à l'adresse <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01455218/document>
- 767 Vincent, J. L., Snyder, A. Z., Fox, M. D., Shannon, B. J., Andrews, J. R., Raichle, M. E., &
768 Buckner, R. L. (2006). Coherent spontaneous activity identifies a hippocampal-parietal
769 memory network. *Journal of Neurophysiology*, *96*(6), 3517-3531.
770 <https://doi.org/10.1152/jn.00048.2006>
- 771 Ward, A. F., & Wegner, D. M. (2013). Mind-blanking: when the mind goes away. *Frontiers*
772 *in Psychology*, *4*. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00650>
- 773 Yanko, M. R., & Spalek, T. M. (2014). Driving with the wandering mind: the effect that
774 mind-wandering has on driving performance. *Human Factors*, *56*(2), 260-269.
775 <https://doi.org/10.1177/0018720813495280>

Synthèse des résultats présentés dans l'article de *Consciousness & Cognition*

Au terme de cette étude, il apparaît que le VP est sensible à la fixité du regard, indicateur élaboré pendant la présente thèse. Dans les six secondes précédant la déclaration des pensées hors-tâche, le regard des conducteurs semble fixe et l'exploration visuelle réduite par rapport aux moments où le conducteur a relocalisé son attention sur l'activité de conduite. Ce résultat vient supporter l'hypothèse selon laquelle le DMN (réseau par défaut) est activé lors du VP et que les réseaux attentionnels VAN et DAN voient leurs activités réduites. En effet, on sait que le DAN contrôle tout ou partie des mouvements oculaires pour orienter l'attention vers les stimuli externes (Carretié et al., 2013) ; un regard fixe pourrait donc traduire une baisse d'activité de ce réseau. En revanche, l'activité oculaire des conducteurs dont l'attention est focalisée sur des réflexions portant sur des innovations n'a pas montré une augmentation de la fixité du regard. Penser à des choses différentes pourrait ainsi affecter différemment les conducteurs (Robison & Unsworth, 2015).

De plus, dans les deux à trois secondes après avoir déclaré leurs pensées vagabondes, le rythme cardiaque des conducteurs a légèrement augmenté. Cette augmentation n'a pas été retrouvée pour la condition de pensées réflexives sur les innovations. Plusieurs interprétations à cette augmentation du RC sont possibles. Premièrement, le pattern cardiaque mis en évidence lors de cette étude ressemble en de nombreux aspects à celui mis en évidence lors de la première expérimentation. Cette augmentation du RC pourrait donc traduire un effort cognitif. Cet effort cognitif pourrait être nécessaire, lorsque le conducteur s'aperçoit que son attention est dirigée vers des pensées personnelles, pour réorienter cette attention vers l'activité de conduite. Passer d'un mode par défaut à un mode attentif serait coûteux en ressources cognitives (Yanko & Spalek, 2014) et pourrait donc générer un effort cognitif. Il s'agirait d'un effort non intentionnel, mais nécessaire pour déplacer le focus attentionnel, désengager le réseau par défaut et réengager les réseaux liés aux traitements attentionnels à proprement dit (réseaux attentionnels ventral et dorsal). Une autre possibilité serait que le faible mouvement nécessaire pour déclarer les pensées vagabondes (appel de phare) ait nécessité l'activation de muscles qui auraient nécessité plus d'oxygène pour fonctionner. Le cœur aurait alors pu augmenter légèrement son débit pour répondre à cette demande. D'autres études seraient nécessaires pour conclure sur l'interprétation correcte à donner à ce résultat.

La fixité du regard et l'augmentation du RC n'ont été observées que pour le VP, pas pour les moments où l'attention des conducteurs était focalisée sur des pensées réflexives. Il est parfaitement possible que ces différences viennent de différents niveaux de conscience des pensées. Lorsque les conducteurs se sont trouvés dans un état de VP, il n'avait pas encore conscience que leur attention n'était plus focalisée sur l'activité de conduite contrairement aux moments de réflexion sur les innovations. Lorsque l'on a conscience que l'on est dans une situation de double tâche et qu'il nous faut diviser notre attention, des contre-mesures sont prises pour améliorer la sécurité du trajet (Yanko & Spalek, 2014). Ces mesures ne

pourraient pas être prises lorsque le conducteur est en VP par manque de conscience de cet état. Cela pourrait expliquer pourquoi le VP est marqué par un regard fixe et potentiellement par un effort cognitif nécessaire à la réorientation de l'attention du conducteur, alors que les pensées réflexives ne le sont pas. Bien que l'effet du VP sur la vitesse du véhicule n'ait laissé apparaître qu'un effet tendanciel, il est fort possible que cet état perturbe la gestion de la vitesse du véhicule. Cet effet tendanciel pourrait traduire un échec du contrôle cognitif et une focalisation de l'attention du conducteur accrue sur ses pensées pendant ce laps de temps. L'augmentation de la vitesse pourrait également être responsable de la prise de conscience du VP. Lorsque le véhicule roule à une vitesse plus élevée, le flux optique capté par le conducteur augmente proportionnellement. À ce moment-là, l'activité du DMN protégeant l'expérience vécue et inhibant l'activité des réseaux attentionnels à proprement dit, pourrait être supplantée par l'activité du VAN qui permet de prioriser et de traiter les informations qui nous parviennent. Ce début de glissement d'un mode automatique à un mode contrôlé pourrait permettre la prise de conscience que l'attention du conducteur s'était éloignée de l'activité de conduite dans les secondes précédentes.

Lorsque l'attention du conducteur est portée sur des pensées réflexives, celui-ci pourrait mettre diverses stratégies en place, afin de gérer la tâche de réflexion et l'activité de conduite en parallèle. La présente thèse ne peut quantifier le sur-risque généré par différents types de pensée, mais les données récoltées laissent supposer que les pensées réflexives, conscientes et intentionnelles, pourraient moins interférer avec l'activité de conduite.

Discussion

Au terme de cette étude, il apparaît que la fixité du regard est sensible à la présence du vagabondage de la pensée, ce qui confirme les résultats existants dans la littérature. Cet indicateur dérivé des données oculaires pourrait ainsi être utilisé pour améliorer la capacité d'un algorithme à révéler la présence de cet état. Chaque mesure susceptible d'attester la présence du VP pourrait être utilisée pour renseigner les moments où l'attention du conducteur n'est plus focalisée sur la conduite. La fixité du regard, en renseignant l'exploration visuelle du conducteur pendant l'activité de conduite et en temps quasi réel (une seconde de délai), serait donc susceptible d'aider à la détection du VP en conduite. Un tel indicateur pourrait être amélioré sur sa sensibilité, sa spécificité et sa robustesse à renseigner la présence de vagabondage. D'autres études seraient nécessaires pour faire varier les paramètres utilisés pour construire la fixité du regard afin d'optimiser sa capacité à être sensible aux moments où l'attention du conducteur s'est focalisée sur ses pensées ou sentiments internes. Il est possible que le regard du conducteur soit plus fixe et/ou qu'il le soit plus longtemps lorsque le VP est plus immersif et plus interférent avec l'activité de conduite.

Ensuite, l'augmentation de la fréquence cardiaque des conducteurs après qu'ils aient déclaré leurs pensées pourraient être interprétés de différentes façons. Cette élévation de la fréquence cardiaque pourrait traduire la nécessité de compenser la consommation d'oxygène due au mouvement physique pour déclarer ses pensées (méthode de l'auto-déclaration). Ce mouvement (faire un appel de phare) est très limité et, bien que des études supplémentaires soient nécessaires pour corroborer ou infirmer cela, cette élévation de la fréquence cardiaque pourrait, en réalité, traduire l'effort cognitif nécessaire pour que les conducteurs puissent réorienter leur attention vers la tâche de conduite. Passer du mode automatique de vagabondage de la pensée lors duquel les cortex cérébraux responsables des traitements sensoriels des conducteurs, sont moins activés (Smallwood et al., 2008) à un mode contrôlé nécessiterait de réorienter ses ressources (de Waard, 1996), de désengager le réseau par défaut et de réengager les cortex responsables des traitements sensoriels pour mettre à jour les informations de la mémoire de travail afin de recouvrer une conscience de la situation suffisante. Ainsi l'étude de la fréquence cardiaque et des influences auxquelles elle est soumise, pourrait être un bon moyen d'appréhender les changements d'état du conducteur notamment lorsqu'il passe d'un état de VP à un état attentif. Nous l'avons vu, les fluctuations de la fréquence cardiaques sont incessantes et multifactorielles. Mieux comprendre la fréquence cardiaque pourrait permettre de mieux appréhender les moments où l'attention du conducteur glisse de la tâche de conduite vers ses pensées personnelles, permettant d'avoir une mesure périphérique supplémentaire marquant le début et/ou la fin d'un épisode de vagabondage.

Enfin, il semblerait que différents types de pensée sans lien avec la tâche en cours n'auraient pas les mêmes répercussions sur les conducteurs. Voir son attention glisser vers des pensées personnelles ou vers des pensées réflexives n'affecterait pas les conducteurs de la même façon. En effet, les pensées intentionnelles ayant pour but de résoudre des problèmes généreraient un regard moins fixe que lors du VP à proprement dit. Prendre en compte le type et les caractéristiques des pensées des conducteurs pourrait être un premier pas pour estimer la dangerosité du VP en conduite. Penser intentionnellement à autre chose que la conduite, pourrait permettre au conducteur de mettre en place des stratégies pour effectuer les deux tâches en parallèle. Faire commuter notre attention d'une tâche à l'autre permettrait de conserver une quantité de ressources suffisantes à chaque instant pour ne pas perturber la tâche de conduite, évitant ainsi d'avoir un comportement inadéquat et dangereux. Mais quelles sont ces différentes stratégies de régulation sous-jacente. Quels sont les compromis cognitifs effectués ? Sont-ils conscients et opérationnalisés dans l'esprit du conducteur ou cela se fait-il en parallèle des tâches effectuées ? Des études supplémentaires seraient nécessaires afin de sonder les éventuels types de stratégie mis en place par les conducteurs lorsque leur attention est focalisée sur des pensées avec différents niveaux de conscience. Les conclusions à ces études pourraient permettre aux conducteurs de mieux gérer le vagabondage de leurs pensées en adoptant des stratégies de régulation et/ou des compromis cognitifs afin d'éviter les situations dangereuses ou accidentogènes.

Étude 3 : Effet du vagabondage de la pensée et de ses caractéristiques sur le traitement de l'information visuelle en conduite automobile

Objectif et Justification

La seconde étude de cette thèse a révélé que deux types de pensée différents pouvaient affecter différemment les variables physiologiques et comportementales : les pensées intentionnelles ayant pour but de résoudre des problèmes généreraient un regard moins fixe que le Vagabondage de la Pensée (VP) à proprement parler (pour un rappel, voir la partie sur les différents Types de pensée). Le VP, en limitant l'exploration visuelle du conducteur, serait susceptible d'être plus perturbant pour le conducteur et pourrait participer à la survenue de plus accidents, que des pensées générées intentionnellement. Au niveau du rythme cardiaque, l'augmentation de celui-ci après que les conducteurs aient déclaré leurs pensées, peut être interprétée comme un coût cognitif supplémentaire nécessaire à la réorientation de l'attention du conducteur vers l'activité de conduite. Le découplage perceptif décrit par de nombreux auteurs lors du VP pourrait ainsi se manifester par les patterns oculaires et cardiaques obtenus. Ce même découplage entraîne une perturbation du traitement de l'information dans diverses tâches dans lesquelles une attention soutenue est nécessaire. Lors du VP, dans diverses tâches de la vie quotidienne, l'amplitude de la composante N1 des potentiels évoqués cérébraux généralement associée au traitement sensoriel de l'information était réduite par rapport à des moments où l'attention de l'individu était focalisée sur la tâche (Broadway et al., 2015 ; Chaparro, 2015 ; Kam, 2010). Il se trouve que l'amplitude de la composante P3 généralement associée au traitement cognitif, plus profond, de l'information est également réduite dans diverses tâches (Barron et al., 2011 ; Kam, 2010 ; Macdonald et al., 2011 ; Smallwood et al., 2008).

La conduite étant une activité principalement visuelle, il convient donc de mieux comprendre si le traitement de l'information visuelle est altéré lors du VP, dans cette tâche particulière. De plus, comme il a été expliqué précédemment, tous les types de pensée sans lien avec la tâche de conduite pourraient ne pas avoir le même impact sur les conducteurs (Golchert et al., 2017). Plusieurs études ont émis l'hypothèse que les caractéristiques des pensées pourraient moduler l'intensité de l'interférence du VP avec la tâche principale. Rappelons également que l'étude de Galera et al. (2012) a montré que le VP dont le contenu est faiblement perturbant serait moins susceptible d'être à l'origine d'un accident que le VP dont le contenu est fortement perturbant. Ainsi, après avoir comparé les signatures comportementales et psychophysiologiques des pensées intentionnelles et du VP, il apparaît pertinent de questionner l'effet de certaines caractéristiques du VP sur le traitement de l'information visuelle en conduite. Les caractéristiques d'intérêt les plus susceptibles d'expliquer un niveau de dangerosité différent du VP sont l'orientation temporelle (Smallwood & Schooler, 2015) et la valence émotionnelle des pensées (Addis et al., 2009 ; Killingsworth & Gilbert, 2010 ; Ruby et

al., 2013 ; Techer, 2016). De par des liens forts entre ces deux dimensions (voir partie sur portant sur la Temporalité et Émotionnelle des pensées), ces deux facteurs ne pouvaient être étudiés séparément.

Ensuite, un des objectifs secondaires de cette étude était d'investiguer les liens entre le caractère labile ou stable d'une personne, sur la base de certaines caractéristiques de son signal électrodermal, et sa propension à avoir des pensées hors-tâches. La labilité électrodermale serait un trait psychophysiologique lié au degré d'attention portée à ses propres pensées et cognitions (Crider, 2008 ; Nikula, 1991). Il serait attendu qu'un individu qualifié de labile d'un point de vue électrodermal ait un esprit plus vagabond qu'un individu dit stable, car son attention serait plus fréquemment et plus intensément orientée vers leurs pensées et serait donc détournée de la tâche primaire. De la même façon, la capacité de la mémoire de travail pourrait venir moduler la fréquence d'apparition du VP. De nombreux travaux ont montré des résultats contraires quant aux liens entre émergence du VP et capacité de la mémoire de travail de l'individu. Une récente méta-analyse montre qu'il existerait une corrélation négative entre ces deux facteurs (Randall et al., 2014). Cette corrélation apparaît pourtant faible. La présente étude avait donc pour objectifs secondaires d'explorer, en conduite automobile, les liens entre labilité électrodermale et émergence du VP ainsi que de vérifier l'existence d'un possible lien entre la capacité de mémoire de travail des conducteurs et leurs propensions à être dans un état de VP.

La présente étude a donc eu pour objectif (1) de vérifier si le VP perturbe le traitement de l'information visuelle de la même façon en conduite automobile, que dans d'autres tâches de la vie quotidienne, (2) d'investiguer l'effet de l'orientation temporelle et de la valence émotionnelle sur la modulation de la perturbation du traitement de l'information et (3) d'explorer la possibilité d'un lien entre propension du VP, capacité de mémoire de travail des conducteurs et labilité électrodermale.

Méthode

Poste de conduite épuré et tâche proposée

Nous l'avons expliqué précédemment, la technique des potentiels évoqués possède une résolution telle que le décours temporel du traitement de l'information peut être facilement décomposé et analysé. En revanche, ces signaux sont très sensibles aux parasites. Ces parasites proviennent de tous mouvements physiques du conducteur que ce soit par des mouvements de têtes, d'yeux ou des mouvements liés aux passages de vitesses dans le véhicule. Tous ces mouvements vont fortement altérer le ratio signal/bruit et empêcher une bonne interprétation des données. Pour pallier cela, un simulateur de conduite réduit a été utilisé. Ce simulateur était composé d'un siège automobile, d'un écran 24 pouces, d'un pédalier et d'un volant (voir Figure 20).



Figure 20 : Installation des participants lors de l'expérimentation sur le simulateur épuré. Les éléments importants de gauche à droite : écran, pédalier, volant, siège, dispositif EEG (les flèches blanches indiquent les éléments ajustables du poste de conduite). Photo tirée de Techer (2016), utilisant le même matériel

La présence de tout élément non indispensable à l'expérimentation était proscrite, afin de ne pas ajouter d'interférences à des signaux déjà parasités par la moindre activité électromagnétique ou musculaire. Le simulateur de conduite épuré a été développé par le Laboratoire Exploitation, Perception, Simulations et Simulateurs de conduite (LEPSiS) de l'IFSTTAR.

La tâche proposée pour cette étude est ce que l'on appelle un suivi de moto. Une moto se trouvait en permanence devant le véhicule du conducteur et freinait à intervalle pseudo-irrégulier (entre 7.8 et 10.2 s, moyenne = 9 s). La consigne donnée aux conducteurs était de réagir le plus promptement possible aux freinages, annoncés par l'allumage du feu arrière de la moto, en levant le pied de la pédale d'accélérateur (les conducteurs ne devaient pas freiner). Tout le reste du temps, les conducteurs devaient maintenir enfoncée la pédale d'accélération. L'allumage du feu de la moto en tant que stimulation sensorielle servait de point de départ au calcul des potentiels évoqués cérébraux visuels.

Tous les participants ont effectué 12 sessions de conduite durant, chacune, environ 3 min et étant composée de 15 freinages de la moto. La base visuelle de la simulation de conduite utilisée pour cette étude est la même que celle d'études précédentes et a été développée, dans le passé, par le LEPSiS (Bueno et al., 2012 ; Techer et al., 2017). Le simulateur enregistre à une fréquence de 60 Hz, l'ensemble des variables de conduite : vitesse et position du véhicule sur la voie, temps de réaction correspondant au temps mis par le conducteur pour réagir après l'allumage du feu arrière de la moto et le nombre d'anticipations qui

correspond au nombre de fois où le conducteur a levé son pied de la pédale d'accélérateur, avant que le feu arrière de la moto ne se soit allumé.

EEG et traitement des potentiels évoqués cérébraux

Le système Biosemi Active Two® (www.biosemi.com) a permis le recueil de l'électroencéphalogramme (EEG) par l'utilisation de trente-deux électrodes actives, placées sur un bonnet extensible, selon le système international 10-20. Trois électrodes additionnelles étaient placées sur les deux mastoïdes et à côté de l'œil droit afin de filtrer respectivement, les interférences causées par les mouvements de tête et les clignements des yeux. L'électrode de référence placée sur le nez permettait de recueillir un signal faiblement parasité. Le taux d'échantillonnage du recueil de l'activité EEG s'est effectué à 1024 Hz. À chaque freinage de la moto, son feu arrière s'illuminait et une photodiode envoyait alors un signal électrique vers le dispositif d'enregistrement EEG. Cela permettait d'obtenir, avec une précision de l'ordre de la milliseconde le moment d'apparition du stimulus sensoriel. Le calcul des potentiels évoqués (PE) consistait ensuite à moyennner l'activité cérébrale entre - 100 ms et 800 ms pour chaque occurrence du stimulus cible en éliminant les évènements dont l'amplitude maximale sur cette fenêtre de temps dépassait 200 μ V (250 μ V pour les électrodes préfrontales, plus susceptibles de subir des variations amples). Après moyennage des Potentiels Évoqués (PEs), un second filtre a été appliqué afin de conserver le signal dont la fréquence se situait entre 1 et 30 Hz. Le traitement des PEs ainsi que le filtrage digital ont été effectués grâce au logiciel ELAN (Aguera, Jerbi, Caclin, & Bertrand, 2011).

Les méthodes de collecte et d'analyse utilisées pour la présente étude ont été empruntées à Bueno et al. (2012) et à Techer et al. (2017). L'objectif de cette recherche est évidemment différent de ceux des études précédentes et visait en premier lieu à évaluer l'impact du VP sur le traitement de l'information visuelle en conduite simulée. Pour cela, et en accord avec la méthode de couplage de données exposée dans la partie portant sur la Neuroergonomie, les conducteurs devaient subjectivement évaluer leur degré d'attention portée à la tâche de conduite à la fin de chacune des 12 sessions.

Recueil des pensées vagabondes

Il a été demandé aux participants de remplir un court questionnaire afin qu'ils évaluent, après chacune des sessions de conduite, le degré d'attention qu'ils estiment avoir porté à la tâche de conduite (item 1 de l'Annexe F). Afin d'évaluer l'impact du contenu des pensées sur les PEs, les participants avaient également à renseigner l'orientation temporelle ainsi que la coloration émotionnelle du contenu de leurs pensées (respectivement, item 3 et item 6 de l'Annexe F).

Étude 3 : Traitement de l'information visuelle et vagabondage

Dans l'objectif d'évaluer l'effet de l'orientation temporelle des pensées sur la qualité du traitement de l'information visuelle des conducteurs, le questionnaire proposé à la fin de chacune des sessions de conduite demandait aux conducteurs d'estimer la proportion de leurs pensées orientées vers le futur, le passé ou le présent durant la dernière session de conduite. De la même façon que cela a été fait pour comparer l'effet du vagabondage de la pensée en comparant les PEs obtenus à l'issue de différentes sessions de conduite, l'analyse des réponses subjectives des conducteurs a permis de classer les sessions de conduite selon l'orientation temporelle des pensées, pour tester l'impact de ce facteur sur les PEs. Pour cela, une légère transformation des données s'est avérée nécessaire. Le premier item du questionnaire renseignait du degré d'attention porté à la conduite et le troisième, qui nous intéresse ici, renseignait l'orientation temporelle des pensées du conducteur. L'objectif n'était pas simplement de comparer l'effet d'un pourcentage élevé de pensées prospectives (orientées vers le futur) par rapport à un pourcentage élevé de pensées rétrospectives (orientées vers le passé), mais bien de comparer l'effet du vagabondage de la pensée lorsque celui-ci était temporellement orienté. Il ne suffisait donc pas de classer les blocs selon les seules réponses au troisième item du questionnaire, mais bien de les classer selon un score composite des items 1 et 3, prenant ainsi en compte le degré d'attention à la conduite et l'orientation temporelle des pensées. Dans le cas contraire, nous aurions pu classer comme étant du vagabondage de la pensée orienté vers le futur, un bloc où le conducteur aurait estimé qu'il était concentré 90 % du temps sur la conduite et dont les 10 % restants auraient été passés à penser à un évènement futur.

Il semblait essentiel de prendre en compte les données subjectives renseignant du degré d'attention portée à la conduite et celles liées à l'orientation temporelle des pensées pour effectuer nos analyses. Ainsi l'indicateur composite, que nous avons intitulé « pourcentage de temps déclaré à penser à du contenu temporellement orienté » rendait compte du degré d'attention portée à l'activité de conduite et de la temporalité des pensées impliquées dans les phases de vagabondage. Il nous permettait ainsi de comparer les signatures physiologiques et comportementales de blocs équivalents en terme de temps passé à penser à des éléments temporellement orientés. Avec X étant le score de l'item 1 (compris entre 0 et 10), Y_A , Y_B et Y_C , respectivement les scores obtenus à l'item 3 pour la dimension passé, présent et futur (compris entre 0 et 4), le Score Composite Temporel (SCT) permettant d'appréhender le pourcentage de temps déclaré à penser à du contenu orienté vers le passé (SC_A), se calculait de la façon suivante :

$$SC_A = \frac{Y_A}{Y_A + Y_B + Y_C} \times \frac{10 - X}{10} \times 100$$

En ce qui concerne la valence émotionnelle, la même transformation a été mise en place : un score composite a été calculé à partir de l'item 1 et de l'item 6 du questionnaire afin de rendre compte de l'impact de la valence émotionnelle lors de pensées hors-tâche sur la qualité du traitement de l'information.

Avec X étant le score de l'item 1 (compris entre 0 et 10) et W le score obtenu à l'item 6 (compris entre - 1 et 1), le Score Composite Émotionnel (SCE) permettant d'appréhender le pourcentage de temps déclaré à penser à du contenu émotionnellement coloré, se calculait de la façon suivante :

$$SCE = W \times \frac{10 - X}{10} \times 100$$

Labilité électrodermale

La labilité électrodermale est un trait psychophysiologique qui se trouve être peu modifié au cours de la vie et serait lié au degré d'attention portée à ses propres pensées et cognitions (Crider, 2008 ; Nikula, 1991). Ce trait psychophysiologique serait donc susceptible de moduler l'intensité de l'attention portée envers ces pensées. Il est attendu que les individus qualifiés de labiles d'un point de vue électrodermal, aient un esprit plus vagabond que les stables car leur attention serait plus fréquemment et plus intensément orientée vers leurs pensées et serait donc détournée de la tâche primaire. Les personnes dites labiles pourraient ainsi avoir tendance à déclarer plus de pensées sans lien avec l'activité de conduite, que les personnes stables.

Pour savoir si un individu est plutôt labile ou stable, il existe deux possibilités méthodologiques : mesurer, au repos le nombre de fluctuations spontanées du signal électrodermal ou quantifier le nombre de présentations de stimuli auditifs nécessaires à ce que les fluctuations induites par les stimuli n'apparaissent plus ou soient considérées comme négligeables. Il se trouve qu'il existe de fortes corrélations entre le nombre (ou la fréquence) des réponses spontanées et le nombre de stimulus à envoyer avant habituation. On peut ainsi s'affranchir de l'une de ces mesures et se contenter de mesurer le nombre de réponses spontanées sur un intervalle de temps pour estimer la labilité ou stabilité électrodermale d'un individu (Crider, 2008).

Dans le présent travail, le nombre de réponses spontanées sur une fenêtre de temps particulière a été choisi comme mesure pour classer les individus. Ce choix repose principalement sur une plus grande simplicité de collecte et d'interprétation. Environ 35 % des individus sont dits labiles, le même nombre, stables et les 30% restants sont classés comme mixtes (Vossel & Zimmer, 1990). Les valeurs seuils permettant de quantifier le nombre de réponses spontanées dans les données électrodermales varient selon les études de 0.01 à 0.05 μ S (Grapperon, Pignol, & Vion-Dury, 2012). Dans le cas des données collectées lors de cette étude, une visualisation après filtrage des données était effectuée et les courbes furent lissées afin d'éviter les fortes variations de ligne de base. Ces variations différentes entre les participants pouvaient parasiter le

processus de détection des réponses spontanées. Après correction des valeurs de l'activité électrodermale, réduisant les amplitudes des fluctuations du signal électrodermal, furent considérées comme des réponses spontanées, les augmentations de la conductance cutanée de plus de 0.01 μ S. Le choix de la valeur seuil n'était pas particulièrement sensible puisqu'il ne s'agissait pas d'évaluer un nombre de réponses spontanées en soi, mais bien de regrouper les participants les uns par rapport aux autres pour évaluer l'effet d'un plus grand nombre de réponses spontanées sur la quantité de VP.

Le nombre de réponses spontanées était ainsi mis en relation avec le degré d'attention portée à la conduite. De plus, afin de tester l'hypothèse d'une capacité de contrôle exécutif plus important, le nombre de réponses spontanées a été mis en lien avec la capacité de l'individu à stopper ses pensées sans lien avec l'activité de conduite et à rester focalisé sur celle-ci. Pour cela, le nombre de réponses du signal électrodermal de l'individu était mis en relation avec un score composite calculé à partir de la question 1 du questionnaire (Annexe F). Ce score composite de la question 1 était obtenu en soustrayant la moyenne de déclaration du vagabondage lors des conditions durant lesquelles le conducteur devait se focaliser sur la conduite, à la moyenne de déclaration du vagabondage lors des autres conditions. Cet indice a l'avantage de donner une indication de la capacité du conducteur à réprimer les épisodes de vagabondage de la pensée.

Mémoire de Travail

De nombreuses études ont étudié les liens entre propension au vagabondage de la pensée et capacité de la mémoire de travail (MdT) de l'individu, montrant généralement un lien positif entre ces deux dimensions (Baird et al., 2011 ; Levinson et al., 2012 ; McVay & Kane, 2009). Une méta-analyse reprenant les résultats de nombreuses études indiqueraient une relation inverse : moins l'individu aurait un empan de MdT important plus il aurait tendance à vagabonder (Randall et al., 2014). Lors du vagabondage de la pensée, l'attention se détourne de la tâche principale et les pensées de l'individu deviennent la cible de son focus attentionnel. Le maintien du flux de pensées nécessite de puiser dans les ressources de la MdT (Kam & Handy, 2014 ; Levinson et al., 2012). Le contenu des pensées va ainsi remplir et charger la mémoire de travail de l'individu et entrer en concurrence avec l'intégration d'informations critiques, dont la collecte et le traitement sont indispensables à une conduite sûre.

Considérant également que la capacité de la MdT est une caractéristique cruciale et déterminante dans la bonne réalisation des tâches cognitives et qui a un impact important sur la performance des individus (Conway, Cowan, & Bunting, 2001), la mesure de la capacité de la mémoire de travail lors de cette étude nous a permis d'explorer la relation entre capacité de la MdT et propension au VP lors d'une tâche de conduite monotone sur simulateur afin de lever les ambiguïtés quant aux liens existants entre propension au

vagabondage et capacité de la MdT. De plus, plusieurs études ont montré des liens différents entre l'empan de mémoire de travail et la propension à s'engager dans du vagabondage orienté vers le futur. Une étude a montré un lien positif entre ces deux dimensions (Baird et al., 2011) alors que d'autres études n'ont pas retrouvé ce lien (McVay, Unsworth, McMillan, & Kane, 2013 ; Robison & Unsworth, 2017). De plus, il semblerait qu'imaginer des événements futurs soit sous la dépendance du système de mémoire autobiographique (Buckner, 2010) et la difficulté à récupérer des informations liées à la mémoire autobiographique s'accompagnerait de moins de pensées orientées vers le futur (Klein, Loftus, & Kihlstrom, 2002). Il apparaît donc intéressant d'investiguer les liens entre différents sous-systèmes de mémoires et orientation temporelle des pensées.

La mesure de la capacité de MdT du participant s'est faite par le test d'empan de chiffre de la WISC V. Avant le début de l'expérimentation, trois exercices de 16 items maximum étaient proposés au participant qui devait, selon l'exercice, répéter dans l'ordre, à l'envers puis dans l'ordre croissant les chiffres énoncés par l'expérimentateur. La difficulté de chaque exercice augmentait progressivement : les 4 premiers items ne sont composés que de deux chiffres. Les deux suivants sont composés de 3 chiffres et la difficulté augmente de façon linéaire jusqu'à un maximum de 9 chiffres pour l'ordre direct et l'ordre croissant et 8 chiffres pour l'ordre inverse. L'exercice s'arrêtait lorsque le participant faisait deux erreurs consécutives dans le même niveau de difficulté ou lorsqu'il n'y avait plus suffisamment d'items pour continuer.

Chaque participant obtenait donc un score d'empan de chiffre endroit, un score d'empan de chiffre envers, un score d'empan de chiffre croissant et un score composite, moyenne des précédents. Ces scores pouvaient, par la suite être comparés à la quantité déclarée de vagabondage de la pensée afin d'évaluer le lien éventuel entre la capacité de la mémoire de travail des individus et la quantité de vagabondage de la pensée déclarée.

Procédure

La mesure de la capacité de la mémoire de travail des participants était la première étape de l'expérimentation. Ensuite, trois minutes d'enregistrement des signaux cardiaque, électrodermal et respiratoire au repos ont été collectées. Puis la pose du dispositif EEG (environ 30-40 minutes) était réalisée. Les participants avaient ensuite quelques minutes pour se familiariser avec le simulateur de conduite. Après cela, l'expérimentation pouvait commencer. Elle comprenait douze sessions de conduite identiques composées, chacune, de 15 événements. Un événement correspondait à un freinage de la moto qui était le déclencheur pour le calcul des temps de réaction et des potentiels évoqués cérébraux.

Compte tenu des liens existants entre temporalité et vagabondage et dans l'objectif de décrire l'impact de la temporalité des pensées sur la qualité du traitement de l'information, un nombre suffisant de pensées

orientées vers le passé étaient nécessaires. Ces pensées ne représentent normalement que 12 % des pensées totales (Baird et al., 2011). Or, un travail d'écriture pré-tâche portant sur la réflexion d'un projet personnellement important pour l'individu ainsi que sur les différentes étapes nécessaires à la bonne réalisation du projet, permet d'augmenter l'occurrence des pensées orientées vers le futur sans augmenter la quantité totale de vagabondage de la pensée (Kopp et al., 2015). Ainsi, dans l'objectif d'augmenter l'occurrence des pensées orientées vers le passé nous avons également proposé au participant d'effectuer un court travail d'écriture portant sur un souvenir important pour eux qui aurait déterminé certains choix de vie par la suite. Il fallait un évènement important pour l'individu, afin qu'il soit susceptible d'amorcer des phases de décrochages attentionnels pendant les phases de conduites. Compte tenu du biais rétrospectif du VP (les pensées orientées vers le passé ont tendance à être émotionnellement négatives) et pour éviter l'induction d'affect trop négatif, la consigne fut donnée au participant de ne pas sélectionner de souvenirs qui soient trop perturbants ou trop négatifs pour lui. Enfin, dans l'objectif d'obtenir des différences interindividuelles suffisamment importantes pour laisser apparaître un effet du VP, il était demandé au participant d'essayer de se focaliser du mieux qu'ils le pouvaient sur l'activité de conduite avant certaines sessions.

Ainsi, les participants avaient à effectuer le travail d'écriture dont le contenu devait être tourné vers le futur, puis conduisait pendant quatre sessions. Leur était ensuite demandé d'essayer de rester concentré sur la tâche de conduite pendant deux sessions (ce qui permettait, en plus d'élever le niveau d'attention moyen porté à la conduite, de couper court à l'induction) puis avaient à effectuer le travail d'écriture orienté vers le passé et conduisaient pendant quatre sessions. Durant les deux dernières sessions de conduite, les participants avaient pour consignes de rester, à nouveau, focalisé sur l'activité de conduite du mieux possible. C'est ainsi que quatre groupes de participants ont été créés afin de pallier un effet d'ordre ou un effet de fatigue (la tâche de conduite durait environ 45 minutes) pour tenter de mettre en évidence des différences dans la qualité du traitement de l'information selon l'orientation temporelle des pensées des individus.

Article soumis à la revue *Neuroscience Letters*, le 12/09/2018

Impact of mind wandering on visual information processing in driving: an electrophysiological study

Guillaume Pepin¹, Alexandra Fort¹, Christophe Jallais¹, Fabien Moreau¹, Daniel Ndiaye², Jordan Navarro^{3,4}, & Catherine Gabaude¹

1 Univ Lyon, IFSTTAR, TS2, LESCOT, F-69675, LYON, France

2 Université Paris-Est, COSYS, LEPSIS, IFSTTAR, F-77447 Marne-la-Vallée, France

3 Laboratoire d'Etude des Mécanismes Cognitifs, Université de Lyon, Bron, France

4 Institut Universitaire de France, Paris, France

1 **ABSTRACT**

2 Mind Wandering (MW) is damaging for tasks requiring sustained and divided attention, for example
3 driving. This state increases the risk of being responsible and involved in a car accident.

4 During MW, drivers suffer from perceptual decoupling: sensory cortices are less activated during MW.
5 Driving being mainly a visual activity, it appears appropriate to evaluate stages of visual information
6 processing impaired during MW, using Event-Related Potentials (ERPs) techniques. The aim of the present
7 study was to investigate how the level of attention devoted to driving impacted visual information
8 processing and reaction time.

9 Results showed reductions of N1 and P3 amplitudes of ERPs and longer reaction time during MW. It
10 suggests that drivers can be isolated from their environment by redirecting their attention to their personal
11 thoughts (reduction in N1 amplitude) and a part of their cognitive resources may be siphoned to feed internal
12 train of thoughts (reduction in P3 amplitude).

13 In the future, digging into off-task characteristics might be a good way to better understand the modulation
14 of the responsibility of car crashes due to MW.

15 **Keywords: Mind Wandering; Event-Related Potentials; Reaction Time; Simulated Driving;**
16 **Perceptual Decoupling**

17

18 **INTRODUCTION**

19 When the task demand is low, it is extremely difficult to prevent our minds to wander. Even during daily
20 living activities, our minds commonly escape from the here and now (Killingsworth & Gilbert, 2010).
21 Although Mind-Wandering (MW) can be beneficial, it can also be detrimental by impairing current task
22 performance (McVay & Kane, 2010). Recent findings indicated that mind wandering generates perceptual
23 decoupling and might compete with the driving task for attentional resource allocation (Baldwin et al.,
24 2017). As such, it is damaging for tasks requiring sustained and divided attention, like driving. The present
25 paper intends to understand how MW impairs visual attentional processes while driving.

26 Inattention and distraction have been described as different states with different impacts on drivers that
27 contributes to an equivalent part of accidents (Galéra et al., 2012). A huge number of studies worked towards
28 understanding their negative impacts on driving activity. Inattention and distraction have been
29 conceptualized as different states with different impact on drivers according to the location of drivers'
30 attention (Pepin et al., 2018). Inattention gathers several degraded attentional states including the mind-
31 blanking (Ward & Wegner, 2013) and Mind-Wandering (MW) which corresponds to a shift in the content
32 of thoughts away from an ongoing task to self-generated thoughts and feelings (Smallwood & Schooler,
33 2015). Even with a specific definition of MW, it remains difficult to unbendingly categorize driver's
34 thoughts and, more broadly, driver's states. Indeed, MW is by nature an unprompted, constantly fluctuating
35 state, which presence varies spontaneously over time (Chaparro, 2015). Assessing the presence of MW is
36 even more essential since it represents between 30 to 50 % of our daily life thoughts and this phenomenon
37 occurs frequently in all forms of activity (Berthié et al., 2015 ; Bixler & D'Mello, 2014 ; Killingsworth &
38 Gilbert, 2010). It is also a recurring phenomenon in driving and people reported MW from 35 to 70 % of
39 their driving time (Baldwin et al., 2017 ; Berthié et al., 2015). Assessing MW presence is essential to develop
40 counter-measures since this state can have serious consequences on driving activity.

41 Indeed, MW appeared to degrade the driver's control of the vehicle, with a decrease of speed micro-
42 regulations and larger lane departures (Lemercier et al., 2014). In addition, MW seems to increase reaction
43 times (RT) (Yanko & Spalek, 2013) and decreases safety distances (Yanko & Spalek, 2014). Vehicle speed
44 tends to be higher in MW (Yanko & Spalek, 2014) which could be linked to a failure in drivers' cognitive
45 control. Such impacts indicate that MW is detrimental since it interferes with the driving activity. These
46 effects come from the activation of a particular cerebral network. Indeed, the Default Mode Network (DMN)
47 activity increases during MW periods while it decreases when people focus on external events (Christoff et
48 al., 2009; Greicius, Krasnow, Reiss, & Menon, 2003; Mason et al., 2007; M. E. Raichle et al., 2001). The
49 DMN activity increases during passive condition of rest and during MW compared to moments during
50 which attention is focused on external task (Andrews-Hanna et al., 2013) and shows a strong negative

51 correlation with brain regions engaged by external sensory processes, such as regions of the occipital cortex
52 (Vincent et al., 2006).

53 Perceptual decoupling is a state in which the mind disengage attentional processes from sensory input and
54 engage it to internal train of thoughts (Smallwood et al., 2008). For visual or auditory stimulus, sensory
55 cortices are less activated during MW (Smallwood, Beach, Schooler, & Handy, 2008). In addition,
56 perceptual decoupling is often revealed by Event-Related Potentials (ERP) analysis from
57 electrophysiological data: once a visual stimulus appears, the first main negative electrical component is the
58 visual N1 that reflects the sensorial analysis of the stimulus. This component would reflect, among other
59 things, the attentional focus towards the stimulus presentation area (Luck, Woodman, & Vogel, 2000).
60 Higher level cognitive processes are observed by the P3 component which can be used as a measure of the
61 attentional resources allocation and working memory updating (Polich, 2007). MW seems to impair
62 information processing in daily living activities since the amplitude of N1 (Broadway, Franklin, & Schooler,
63 2015 ; Chaparro, 2015 ; Kam, 2010) and P3 (Barron et al., 2011 ; Kam, 2010 ; Macdonald et al., 2011 ;
64 Smallwood et al., 2008) components, were found to be reduced in a variety of tasks. To our knowledge, in
65 driving, only one study showed a reduction of P3 amplitude when MW (Baldwin et al., 2017).

66 In brief, during MW, attention disengages from perception (perceptual decoupling). In parallel, a cascading
67 effect starting with an activation of the DMN and a deactivation of sensorial cortex leading to poorer
68 information processing are noticed. MW, via the perceptual decoupling, leads to changes in driver's
69 behaviour, leading to higher frequency of errors and increased Reaction Times (RT). This cascading effect
70 may explain the important role of MW in accidents occurrence. The higher crash risk associated to MW
71 (Galera et al., 2012) could be explained by perceptual decoupling (Smallwood et al., 2008). Consequently,
72 it seems appropriate to investigate how MW disrupts visual attentional processes during driving.

73 The aim of the present study was to investigate how the level of attention devoted to visual information
74 processing relevant to driving was impacted by MW, along with its impact on driving performance and
75 reaction time. A reduction in visual N1 and in P3 amplitudes are expected during MW. RT are also expected
76 to be higher during MW.

77 **MATERIALS AND METHODS**

78 Participants

79 60 healthy volunteers (24 males; age 26.88 ± 4.08) were recruited from IFSTTAR and University Lyon 2.
80 All of them were right-hander, reported normal or corrected to normal visual acuity and had been holders
81 of a valid driving license for at least 3 years. None declared attentional, sensorial, motor or comprehension
82 trouble. This project have been approved by the CPP Ouest II - Angers (# 2017/25). All participants gave
83 written consent before data collection and received 60 euros for their participation. The experiment was
84 conducted at IFSTTAR Bron.

85 Material

86 Apparatus

87 The experimental room where participants carried out the experiment was equipped with a driving simulator
88 composed of a 24-inch screen, speakers, steering wheel and pedals.

89 The stimulus presentation and response gathering on the traffic simulation were controlled with the LEPSIS-
90 IFSTTAR (French Institute of Science and Technology for Transport, Development and Networks)
91 simulator software architecture : ArchiSim2. The electrophysiological data were recorded using Biosemi
92 ActiveTwo system (<http://www.biosemi.com/>). For EEG and EOG, signals were acquired using ActiveTwo
93 Ad box, 24 bit ADC per channel sampled at 1024 Hz.

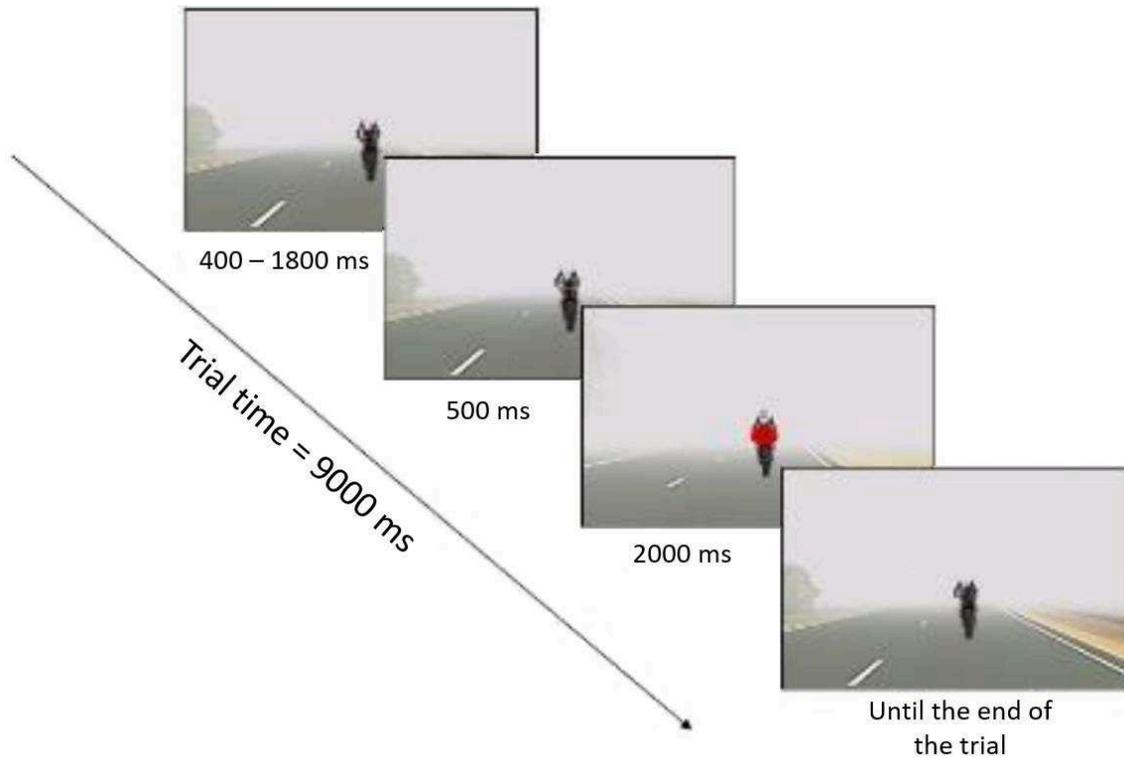
94 Questionnaire

95 Drivers' attentional state was assessed through a continuous scale from 0 to 100 to assess the percentage of
96 attention dedicated to driving during twelve driving sessions. To explore an effect of MW, the three sessions
97 with the higher level of attention to driving (Attention directed to Driving group = AD) were compared to
98 the three sessions with the lower level of attention to driving (Mind-wandering group = MW). The scale
99 was continuous from 0 to 100 with 0: "I was not focused on the driving at all" and 100: "I was perfectly
100 focused on driving". A session being composed of 15 epochs, 45 epochs for the AD group were compared
101 to 45 epochs for the MW group.

102 Task

103 Participants were asked to perform a motorcycle following paradigm in which the leading vehicle was
104 located 40 meters ahead. The scenario was based on the procedure of Bueno, Fabrigoule, Deleurence,
105 Ndiaye, & Fort (2012). No traffic and foggy conditions were specifically chosen to reduce motor movement
106 and to keep participants' attention focused on the center of the screen and to keep eye movements to a

107 minimum. These parameters were also chosen to promote the emergence of MW considering links between
108 MW frequency which increases under low mental workload conditions (He, Becic, Lee, & McCarley, 2011).



109
110 Figure 1 : Chronology of one trial of the driving task, adapted from Techer et al. (2017)
111 Participants were instructed to follow the motorcycle on a straight rural road. They had to maintain a
112 pressure on the accelerator pedal as long as the motorcycle did not brake. They had to reach the 70 km/h
113 speed limit to launch the first trials. A speed limiter ensured that participants drove at a constant speed. At
114 the moment they saw the target which was the brake light, participants were instructed to release the pedal.
115 Each session was made up of 15 trials (i.e. lead motorcycle brake signalled by its brake light firing) and for
116 each trial, the motorcycle braked for 2 s. During this braking time, the brake light of the motorcycle was lit.
117 At the end of each trial, the motorcycle accelerated to regain the initial inter-vehicular distance of 40 meters
118 and participants had to push the accelerator pedal at its maximum again. During the time before a new trial,
119 the motorcycle kept a 2 s distance at 70 km/h speed. This ensured to reproduce the exact same conditions
120 for each trial. The average time between two brakings was 9 s. To avoid a habituation effect due to the high
121 braking predictability, trials were randomly spaced from 7.8 s to 10.2 s (see Figure 1). After each session,
122 participants had to fill the questionnaire about their level of attention towards driving.

124 Procedure

125 Prior to the experiment, participants were informed about the content of the experiment and asked to give
126 their consent. In order to practice the driving simulator, a short training session was performed until the
127 participant felt comfortable with it. Each participant drove at least 3 minutes to familiarize her/himself with
128 the simulator and the driving environment.

129 After completing questionnaires related to personal information and informed consent, the EEG recording
130 apparatus was set on participants. Participants completed 12 identical sessions. Each session followed the
131 same structure and were made up of 15 trials. At the end of each session, participants were asked to fill the
132 questionnaire related to their attentional state towards driving (subjective percentage degree of attention
133 dedicated to driving).

134 Finally, at the very end of the experiment, a debriefing was performed to explain the purpose of the study
135 collect the participants' feedback and answer their questions.

136 Analyses

137 Driving performance

138 The driving simulator provided several driving measures such as reaction time corresponding to the duration
139 between the braking light onset and participants' releasing pressure on the accelerator pedal and reaction
140 time variability. The driving simulator also provided vehicle speed at a 60 Hz rate and the number of
141 anticipations corresponding to the number of time when participants lift their foot from the pedal before the
142 braking light. Speed was computed during the whole scenario and compared for the three sessions of the
143 AD group with the three sessions of the MW group (45 epochs, each).

144 Out of the sixty participants, six persons were removed from the analyses because of impossibility to explore
145 an effect of MW: either they declared too low or too high level of attention during the whole task generating
146 the impossibility to explore an effect of MW. Driving data analysis were conducted on the fifty-four persons
147 left.

148 Event-related potentials

149 An electrode cap containing 34 active electrodes with placement based on the International 10–20 System
150 (Fz, Cz, Pz, Oz; Fp1, F7, F3, FC1, FC5, T7, C3, CP1, CP5, P7, P3, PO3, O1, IMA; midway Oz-Ma1) and
151 their counterpart on the right hemi scalp; Ma1 and Ma2 (left and right mastoids respectively) was used.
152 Electrooculography activity (EOG) was recorded from the outer canthus of the right eye. The reference

153 electrode was located on the nose. Offline, ERPs were extracted from EEG signals according to the
154 attentional state of the participant.

155 Each visual ERP component was recorded using traditional locations and techniques (S. Luck, 2005). Visual
156 N1 window was set from 150 ms to 275 ms after the braking light and was computed on IMA, P7, PO3, O1,
157 O2, PO4, P8 and IMb. P3 was set from 250 ms to 400 ms on P3, Pz, PO3, O1, O2, PO4 and P4. Visual N1
158 and P3 were filtered offline at 1 Hz – 30 Hz, computed on a time window from -100 ms to 800 ms and
159 baselined from 100 ms to 0 ms pre-stimulus window. Epochs were rejected if participants made no response
160 to the target and if amplitude exceeded $\pm 200 \mu\text{V}$ at any scalp site ($250 \mu\text{V}$ for prefrontal electrodes) as
161 reflecting large artefacts linked to muscle activity or skin potentials (see Luck, 2005).

162 Amplitudes of N1 and P3 were computed by extracting the most negative or positive values on each
163 electrode on time-windows previously described. Latencies were computed on the same electrodes on the
164 same windows and corresponded to the time stamp of the amplitude of minimum or maximum value
165 according to the component polarity.

166 All ERP analysis were conducted with the ELAN software and the ERPA software (Aguera et al., 2011)
167 was used to visualize ERP waves. Amplitudes and latencies values of all electrodes were averaged to obtain
168 one amplitude and latency value per participant. All these measures were submitted to statistical one-way
169 analysis of variance (ANOVA) with the level of attention as a within-subject factor.

170 From the 54 persons left after the first removes, 2 persons were removed from the EEG analysis due to too
171 many blinks on the prefrontal's electrodes. 10 persons were removed because of too low EEG quality data
172 and 12 persons were removed because of a lack of data per participant to reveal Event-Related Potentials
173 (ERPs) components (visual N1 and P3).

174 **RESULTS**

175 Questionnaires

176 In the “attention to driving” group, participants declared having their attention directed to driving with an
177 average of 87.4 (SD = 10.4). In the “mind-wandering” group, participants declared having their attention
178 focused to driving with an average of 44.1 (SD = 20.1).

179 A repeated measure ANOVA was carried out with the Attention Level (Attention to driving/Mind-
180 wandering) as a within-subject factor, on the mean attention level ratings as dependent variables. As
181 expected, the mean attention level ratings analysis revealed a main effect of the Attention Level
182 ($F(1, 29) = 260.35, p < .001, \eta^2 = .899$) on subjective data suggesting that groups composed had, indeed, a
183 different level of attention paid to the driving activity.

184 Driving performance

185 A one-way ANOVA with repeated measures was carried out with the Attention Level (Attention to
186 driving/Mind-wandering) as a within-subject factor, on the driving performance indicators (Response times,
187 variability of response times, speed, and number of anticipations). The analyses revealed a significant effect
188 of the Attention Level on response times, response times' variability, speed but not on the number of
189 anticipations.

190 Reaction times were longer for the Mind-Wandering (MW) group ($m = 0.472, SD = 0.11$) than for the
191 Attention to Driving (AD) group ($m = 0.518, SD = 0.08$): $F(1, 53) = 14.96, p < .001, \eta^2 = .22$. Reaction
192 times' variability were higher for the Mind-Wandering (MW) group ($m = 0.18, SD = 0.15$) than for the
193 Attention to Driving (AD) group ($m = 0.12, SD = 0.11$): $F(1, 53) = 5.81, p < .05, \eta^2 = .10$. The speed of
194 the vehicle was higher in the MW group ($m = 69.56, SD = 0.49$) than in the AD group
195 ($m = 69.43, SD = 0.57$), ($F(1, 53) = 4, p < .05, \eta^2 = .07$).

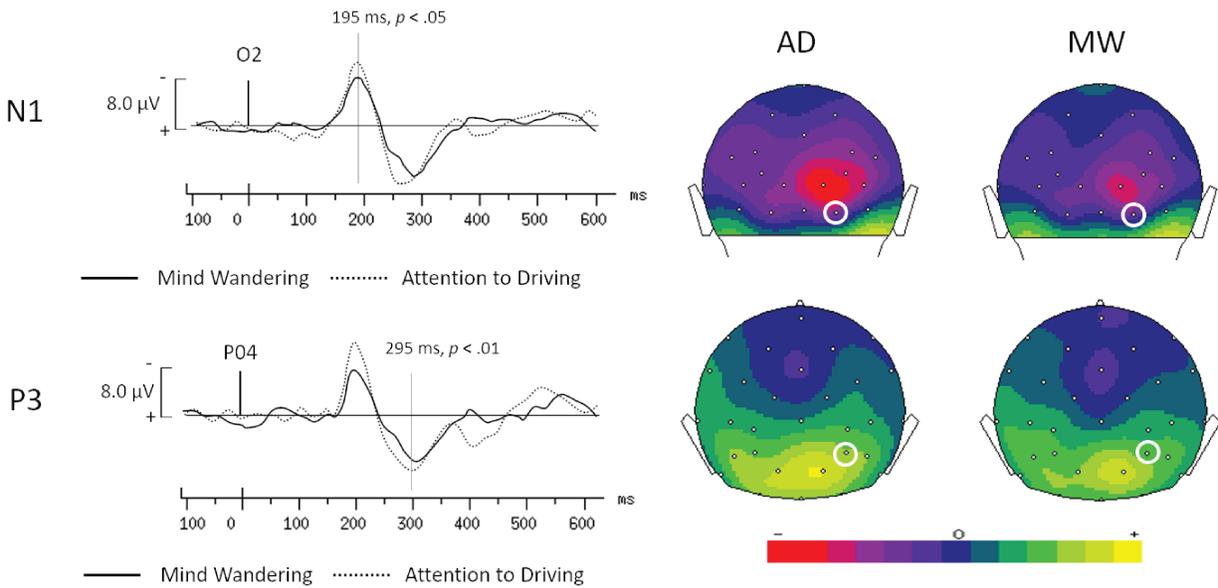
196 Event-related Potentials

197 The impact of MW on visual N1 amplitude and latency and on P3 amplitude and latency was tested by
198 repeated measures one-way ANOVAs with Attention Level as a within-subject factor. Statistics are
199 represented in Table 1.

200 Table 1 : ERPs means (SD) for amplitudes and latencies of N1 and P3 component according to the level of attention (AD = Attention
 201 to Driving, MW = Mind Wandering).

	Amplitude			Latency		
	Mean AD (μV)	Mean MW (μV)	F (1, 29) =	Mean AD (ms)	Mean MW (ms)	F (1, 29) =
N1	-4.97 (\pm 0.32)	-4.31 (\pm 0.30)	6.41, $p = .017^*$	214.80 (\pm 22.79)	214.62 (\pm 29.26)	0.002, $p = .97$
P3	4.07 (\pm 1.55)	3.21 (\pm 1.51)	10.74, $p = .0027^{**}$	334.36 (\pm 30.35)	336.29 (\pm 31.23)	0.15, $p = .70$

202
 203 No significant results have been highlighted for latencies of the N1 and P3 maximum amplitude. However,
 204 analysis revealed a significant effect of Attention Level on visual N1 amplitude which was higher in the AD
 205 group ($m = -4.97 \mu\text{V}$, $SD = 0.32$) than for the MW group ($m = -4.31 \mu\text{V}$, $SD = 0.30$) :
 206 ($F(1, 29) = 6.41$, $p < .05$, $\eta^2 = .18$), see Figure 2. Analysis also revealed a significant effect of Attention
 207 Level on P3 amplitude which was higher in the AD group ($m = -4.07 \mu\text{V}$, $SD = 1.55$) than for the MW
 208 group ($m = 3.21 \mu\text{V}$, $SD = 1.51$) : ($F(1, 29) = 10.74$, $p < .01$, $\eta^2 = .27$).



209
 210 Figure 2 : Example of the visual ERP on electrodes O2 and P04 according to the session, averaged over
 211 the data of the participant with the largest number of retained epochs (only 14 % rejected)

212 **DISCUSSION**

213 The present study intended to assess the influence of Mind-Wandering (MW) on visual information
214 processing while driving using the Event-Related Potentials (ERP) techniques. N1 and P3 amplitudes and
215 latencies were analysed according to the degree of attention dedicated to the driving task.

216 Event-related potentials

217 First, present results confirm assumption and previous effects of MW on ERP components: visual N1 and
218 P3 amplitudes were reduced. Previous studies showed a reduction in visual N1 amplitude (Broadway et al.,
219 2015 ; Chaparro, 2015; Kam, 2010) and in P3 amplitude (Barron et al., 2011 ; Kam, 2010 ; Macdonald et
220 al., 2011 ; Smallwood et al., 2008) when people's attention were directed towards their internal thoughts
221 rather than the ongoing activity. Only one study to our knowledge showed a reduction in auditory N1
222 amplitude during MW while driving (Baldwin et al., 2017). However, a recent work argued that MW could
223 impact the N1 amplitudes when anger was elicited with drivers, generating negative ruminations (Techer et
224 al., 2017). So far, this is the first study to show an effect of MW on both drivers' visual N1 and P3
225 amplitudes. Reduction on N1 and P3 amplitudes indicated that MW disrupt visual information processing.

226 Reduction in N1 amplitude might reflect the perceptual decoupling phenomenon. Perceptual decoupling is
227 a state in which the mind disengage attentional processes from sensory input (Smallwood et al., 2008). The
228 N1 component of ERP partly reflecting the quality of sensory attentional processes is likely to be affected
229 by the perceptual decoupling phenomenon. This could explain why MW tends to affect the amplitude of N1
230 component in a large number of everyday tasks (Broadway, Franklin, & Schooler, 2015 ; Chaparro, 2015 ;
231 Kam, 2010). The perceptual decoupling phenomenon could be responsible for the reduction in N1
232 amplitude, outcome of drivers' internal attentional reorientation. During MW, activation of DMN and
233 deactivation of sensory cortices could generate the perceptual decoupling phenomenon. The looked-but-
234 failed-to-see phenomenon (Brown, 2005) might therefore be explained by the perceptual decoupling
235 phenomenon of MW.

236 Reduction in P3 amplitude might reflect cognitive resources sharing between internal thoughts and driving.
237 P3 component reflect cognitive information processing and its amplitude appears to be affected by intensity
238 of information processing (Kok, 2001). Consuming cognitive resources to feed internal train of thoughts
239 would led to less available cognitive resources and generate a lower P3 amplitude. If less cognitive resources
240 are available to process relevant information in driving, it would explain the higher crash risk imputable to
241 MW (Galera et al., 2012).

242 The present study did not highlight any impact of MW on visual N1 and P3 latencies. Considering that,
243 External Distraction (ED) tends to delay P3 latency (Demeter et al., 2016), it might mean that MW and
244 distraction may be two exclusives states. Such results will have to be corroborated to assess such
245 interpretation. However, cognitive distraction, strongly similar to MW, appeared to reduce visual N1 and
246 P3 amplitudes of ERPs (Bueno et al., 2012). MW and ED being underpinned by distinct neural networks
247 (Stawarczyk, Majerus, Maquet, et al., 2011) and disrupting differently performance (Robison & Unsworth,
248 2015) suggesting that cognitive distraction and MW might be much more similar than MW and ED.

249 Driving performance

250 Results obtained showed that drivers responded quicker when their attention was dedicated to driving.
251 Having their attention focused on internal thoughts led to higher Reaction Times (RT). These results are in
252 line with those already collected in several studies, supporting a dual task effect of Mind-Wandering (MW)
253 by impairing the ability to promptly react to relevant stimuli (McVay & Kane, 2009 ; Smallwood &
254 Schooler, 2006 ; Yanko & Spalek, 2014). An increase in RT reveal a failure in sustained attention due to a
255 shift in location of attention from the driving activity to personal thoughts. Accordingly, higher RTs may
256 have serious negative consequences especially under massive time pressure (Merat, Jamson, Lai, Daly, &
257 Carsten, 2014). Reaction times variability also appeared to be longer when drivers are under MW (results
258 in line with McVay & Kane, 2009). Taking longer RT and the constantly fluctuating aspect of MW together
259 into account could explain an increase in RT variability. Indeed, MW is a widely fluctuant state which
260 increases drivers RT. In a three minutes driving session, MW might have move about several times,
261 generating this increase in RT variability that other studies already highlighted. It could therefore be
262 interesting to determine if the kind and the length of the task is a determining factor in the increased RT
263 variability and so, in the depth of MW.

264 Vehicle speed tends to gradually increase with MW (Pepin et al., 2018) generating a higher speed when
265 drivers are under MW (Yanko & Spalek, 2014). In the present study, speed appeared to be higher in MW
266 compared to an Attentive Driving (AD). Even if our result is consistent with earlier studies, it is possible
267 that the result concerning speed arises from a statistic bias. Indeed, our study was designed so that
268 participants had to press firmly the accelerator pedal most of the time and to release the pedal in case the
269 lead vehicle breaks. Vehicle speed was therefore limited to 70 km/h. Given this experimental design, it
270 seemed unlikely to obtain an effect of MW on speed. Yet, results showed that MW tends to increase vehicle
271 speed suggesting that drivers may not have enough cognitive resources to maintain their speed during MW.
272 Drivers' cognitive resources have to be split between their internal thoughts and the driving activity. This
273 may explain difficulties for drivers to maintain a constant speed.

274 Impacts of MW on drivers performance appears to be consistent across studies: increase in RT (Yanko &
275 Spalek, 2013, 2014), RT variability (McVay & Kane, 2009) and speed (Yanko & Spalek, 2014). These
276 results can explain why MW multiplies the risk of being responsible of a road accident by more than 2
277 (Galera et al., 2012). It could therefore be easier to develop counter measures to avoid a too high elevation
278 of reaction time and vehicle speed especially when the driving demand is high and/or under a strong
279 temporal pressure. But recent finding spotted that all MW may not be equal (Burdett et al., 2016 ; Galera et
280 al., 2012 ; Golchert et al., 2017) supporting the idea of different level of depths of MW.

281 An earlier study showed that intentional and unintentional MW behind the wheel may have different
282 negative impact and triggered different physiological and behavioral patterns (Pepin et al., 2018). Yet, recent
283 studies advised to take temporality and emotion into account to explain the difference in MW disruptiveness
284 (Galera et al., 2012). Factors such as temporality and emotion of off-task thoughts has to be shown to
285 potentially modulate the impact of MW on people and could therefore explain a different disruptive effect
286 of MW on drivers (Banks, Welhaf, Hood, Boals, & Tartar, 2016 ; Killingsworth & Gilbert, 2010 ; Ruby,
287 Smallwood, Engen, & Singer, 2013 ; Smallwood & Schooler, 2015 ; Spronken, Holland, Figner, &
288 Dijksterhuis, 2016). The present study did not have a sufficient statistical power to dig into those factors
289 and make trustable comparisons between past and future-oriented MW or between negative and positive
290 thoughts. Indeed, even with a careful consideration to the experience sampling, the experimental design of
291 the present study was not robust enough to provide enough quality data for each subset. Thoughts and
292 experiences lived by people in MW are not homogeneous. For example, only around 12 % of thoughts are
293 past-oriented. With the constraints due to ERP techniques and rejection artefacts, not enough quality data
294 were obtained for each factor making impossibility to certainty determine the impact of temporality and
295 emotion of MW on visual information processing while driving. Further studies are required to investigate
296 the impact of emotion and temporality of MW on visual information processing in driving.

297 Conclusion

298 The present study intended to assess MW effects on visual information processing components and driving
299 performance. The combination of electrophysiological and behavioral data through event-related potentials
300 and reaction-times collection appeared to be a good way to better understand drivers' mind wandering
301 episodes. It appears that effects of MW on driving and on various everyday tasks are quite similar. Reduction
302 of N1 and P3 amplitudes of ERPs suggests that drivers can be isolated from their environment by redirecting
303 their attention to their personal thoughts (reduction in N1 amplitude) and a part of their cognitive resources
304 may be siphoned to feed the train of thoughts (reduction in P3 amplitude). Impacts of MW on drivers
305 performance showed an increase in RT, RT variability and speed. But MW with high disrupting content
306 was the strongest predictor by multiplying by 2.12 the risk to be responsible for a road accident (Galera et

307 al., 2012). Digging into off-task characteristics might be a good way to better understand the modulation of
308 the responsibility of car crashes due to MW and to grasp what this disruptive content is. It might help to
309 develop counter-measures to the disruptive MW state to improve road safety.

310 Conflict of interest

311 All authors declare they have no conflict of interest

312 **References**

- 313 Aguera, P.-E., Jerbi, K., Caclin, A., & Bertrand, O. (2011). ELAN: a software package for analysis
314 and visualization of MEG, EEG, and LFP signals. *Computational intelligence and neuroscience*,
315 2011, 5.
- 316 Andrews-Hanna, J. R., Kaiser, R. H., Turner, A. E. J., Reineberg, A. E., Godinez, D., Dimidjian,
317 S., & Banich, M. T. (2013). A penny for your thoughts: dimensions of self-generated thought
318 content and relationships with individual differences in emotional wellbeing. *Frontiers in*
319 *Psychology*, 4. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00900>
- 320 Baldwin, C. L., Roberts, D. M., Barragan, D., Lee, J. D., Lerner, N., & Higgins, J. S. (2017).
321 Detecting and Quantifying Mind Wandering during Simulated Driving. *Frontiers in Human*
322 *Neuroscience*, 11, 406. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2017.00406>
- 323 Banks, J. B., Welhaf, M. S., Hood, A. V. B., Boals, A., & Tartar, J. L. (2016). Examining the role
324 of emotional valence of mind wandering: All mind wandering is not equal. *Consciousness and*
325 *Cognition*, 43, 167-176. <https://doi.org/10.1016/j.concog.2016.06.003>
- 326 Barron, E., Riby, L. M., Greer, J., & Smallwood, J. (2011). Absorbed in Thought: The Effect of
327 Mind Wandering on the Processing of Relevant and Irrelevant Events. *Psychological Science*,
328 22(5), 596-601. <https://doi.org/10.1177/0956797611404083>
- 329 Berthié, G., Lemercier, C., Paubel, P.-V., Cour, M., Fort, A., Galéra, C., ... Maury, B. (2015). The
330 restless mind while driving: drivers' thoughts behind the wheel. *Accident; Analysis and Prevention*,
331 76, 159-165. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2015.01.005>
- 332 Bixler, R., & D'Mello, S. (2014). Toward Fully Automated Person-Independent Detection of Mind
333 Wandering. In V. Dimitrova, T. Kuflik, D. Chin, F. Ricci, P. Dolog, & G.-J. Houben (Éd.), *User*
334 *Modeling, Adaptation, and Personalization* (p. 37-48). Springer International Publishing.
335 https://doi.org/10.1007/978-3-319-08786-3_4
- 336 Broadway, J. M., Franklin, M. S., & Schooler, J. W. (2015). Early event-related brain potentials
337 and hemispheric asymmetries reveal mind-wandering while reading and predict comprehension.
338 *Biological Psychology*, 107, 31-43. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2015.02.009>
- 339 Brown, I. D. (2005). Review of the « looked but failed to see » accident causation factor. Consulté
340 à l'adresse <https://trid.trb.org/view/1156399>
- 341 Bueno, M., Fabrigoule, C., Deleurence, P., Ndiaye, D., & Fort, A. (2012). An electrophysiological
342 study of the impact of a Forward Collision Warning System in a simulator driving task. *Brain*
343 *Research*, 1470, 69-79. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2012.06.027>
- 344 Burdett, B. R. D., Charlton, S. G., & Starkey, N. J. (2016). Not all minds wander equally: The
345 influence of traits, states and road environment factors on self-reported mind wandering during
346 everyday driving. *Accident; Analysis and Prevention*, 95(Pt A), 1-7.
347 <https://doi.org/10.1016/j.aap.2016.06.012>

- 348 Chaparro, R. A. H. (2015). Behavioral and neural correlates of spontaneous attentional
349 decoupling : towards an understanding of mind wandering (phdthesis). Université Pierre et Marie
350 Curie - Paris VI. Consulté à l'adresse <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01314225/document>
- 351 Christoff, K., Gordon, A. M., Smallwood, J., Smith, R., & Schooler, J. W. (2009). Experience
352 sampling during fMRI reveals default network and executive system contributions to mind
353 wandering. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*,
354 106(21), 8719-8724. <https://doi.org/10.1073/pnas.0900234106>
- 355 Demeter, E., De Albuquerque, D., & Woldorff, M. G. (2016). The effects of ongoing distraction
356 on the neural processes underlying signal detection. *Neuropsychologia*, 89, 335-343.
357 <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2016.06.038>
- 358 Galera, C., Orriols, L., M'Bailara, K., Laborey, M., Conrand, B., Ribereau-Gayon, R., ... Lagarde,
359 E. (2012). Mind wandering and driving: a responsibility case-control study. *BMJ British medical*
360 *journal*, 345, 7 p. <https://doi.org/10.1136/bmj.e8105>
- 361 Golchert, J., Smallwood, J., Jefferies, E., Seli, P., Huntenburg, J. M., Liem, F., ... Margulies, D. S.
362 (2017). Individual variation in intentionality in the mind-wandering state is reflected in the
363 integration of the default-mode, fronto-parietal, and limbic networks. *NeuroImage*, 146, 226-235.
364 <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2016.11.025>
- 365 Greicius, M. D., Krasnow, B., Reiss, A. L., & Menon, V. (2003). Functional connectivity in the
366 resting brain: a network analysis of the default mode hypothesis. *Proceedings of the National*
367 *Academy of Sciences of the United States of America*, 100(1), 253-258.
368 <https://doi.org/10.1073/pnas.0135058100>
- 369 He, J., Becic, E., Lee, Y.-C., & McCarley, J. S. (2011). Mind Wandering Behind the Wheel
370 Performance and Oculomotor Correlates. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and*
371 *Ergonomics Society*, 53(1), 13-21. <https://doi.org/10.1177/0018720810391530>
- 372 Kam, J. (2010). Slow fluctuations in attentional control of sensory cortex. University of British
373 Columbia. <https://doi.org/10.14288/1.0071153>
- 374 Killingsworth, M. A., & Gilbert, D. T. (2010). A Wandering Mind Is an Unhappy Mind. *Science*,
375 330(6006), 932-932. <https://doi.org/10.1126/science.1192439>
- 376 Kok, A. (2001). On the utility of P3 amplitude as a measure of processing capacity.
377 *Psychophysiology*, 38(3), 557-577.
- 378 Lemercier, C., Pêcher, C., Berthié, G., Valéry, B., Vidal, V., Paubel, P.-V., ... Maury, B. (2014).
379 Inattention behind the wheel: How factual internal thoughts impact attentional control while
380 driving. *Safety Science*, 62, 279-285. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2013.08.011>
- 381 Luck, S. (2005). An introduction to the event-related potential technique MIT press. Cambridge,
382 Ma, 45-64.
- 383 Luck, S., Woodman, G. F., & Vogel, E. K. (2000). Event-related potential studies of attention.
384 *Trends in cognitive sciences*, 4(11), 432-440.

- 385 Macdonald, J., Mathan, S., & Yeung, N. (2011). Trial-by-Trial Variations in Subjective Attentional
386 State are Reflected in Ongoing Prestimulus EEG Alpha Oscillations. *Frontiers in Psychology*, 2,
387 82. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2011.00082>
- 388 Mason, M. F., Norton, M. I., Van Horn, J. D., Wegner, D. M., Grafton, S. T., & Macrae, C. N.
389 (2007). Wandering Minds: The Default Network and Stimulus-Independent Thought. *Science*
390 (New York, N.Y.), 315(5810), 393-395. <https://doi.org/10.1126/science.1131295>
- 391 McVay, J. C., & Kane, M. J. (2010). Adrift in the Stream of Thought: The Effects of Mind
392 Wandering on Executive Control and Working Memory Capacity. In A. Gruszka, G. Matthews, &
393 B. Szymura (Éd.), *Handbook of Individual Differences in Cognition* (p. 321-334). Springer New
394 York. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1210-7_19
- 395 McVay, J., & Kane, M. J. (2009). Conducting the Train of Thought: Working Memory Capacity,
396 Goal Neglect, and Mind Wandering in an Executive-Control Task. *Journal of experimental*
397 *psychology. Learning, memory, and cognition*, 35(1), 196-204. <https://doi.org/10.1037/a0014104>
- 398 Merat, N., Jamson, A. H., Lai, F. C. H., Daly, M., & Carsten, O. M. J. (2014). Transition to manual:
399 Driver behaviour when resuming control from a highly automated vehicle. *Transportation*
400 *Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 27, 274-282.
401 <https://doi.org/10.1016/j.trf.2014.09.005>
- 402 Pepin, G., Malin, S., Jallais, C., Moreau, F., Fort, A., Navarro, J., ... Gabaude, C. (2018). Do
403 distinct mind wandering differently disrupt drivers? Interpretation of physiological and behavioral
404 pattern with a data triangulation method. *Consciousness and Cognition*, 62, 69-81.
405 <https://doi.org/10.1016/j.concog.2018.04.006>
- 406 Polich, J. (2007). Updating P300: an integrative theory of P3a and P3b. *Clinical neurophysiology*,
407 118(10), 2128–2148.
- 408 Raichle, M. E., MacLeod, A. M., Snyder, A. Z., Powers, W. J., Gusnard, D. A., & Shulman, G. L.
409 (2001). A default mode of brain function. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the*
410 *United States of America*, 98(2), 676-682. <https://doi.org/10.1073/pnas.98.2.676>
- 411 Robison, M., & Unsworth, N. (2015). Working memory capacity offers resistance to mind-
412 wandering and external distraction in a context-specific manner. *Applied Cognitive Psychology*,
413 29(5), 680–690.
- 414 Ruby, F., Smallwood, J., Engen, H., & Singer, T. (2013). How self-generated thought shapes mood-
415 -the relation between mind-wandering and mood depends on the socio-temporal content of
416 thoughts. *PloS One*, 8(10), e77554. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0077554>
- 417 Smallwood, J., Beach, E., Schooler, J. W., & Handy, T. C. (2008). Going AWOL in the brain: mind
418 wandering reduces cortical analysis of external events. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 20(3),
419 458-469. <https://doi.org/10.1162/jocn.2008.20037>
- 420 Smallwood, J., & Schooler, J. W. (2006). The restless mind. *Psychological Bulletin*, 132(6),
421 946-958. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.132.6.946>

- 422 Smallwood, J., & Schooler, J. W. (2015). The science of mind wandering: empirically navigating
423 the stream of consciousness. *Annual review of psychology*, 66, 487–518.
- 424 Spronken, M., Holland, R. W., Figner, B., & Dijksterhuis, A. (2016). Temporal focus, temporal
425 distance, and mind-wandering valence : Results from an experience sampling and an experimental
426 study. *Consciousness and Cognition*, 41, 104-118. <https://doi.org/10.1016/j.concog.2016.02.004>
- 427 Stawarczyk, D., Majerus, S., Maquet, P., & D'Argembeau, A. (2011). Neural Correlates of
428 Ongoing Conscious Experience: Both Task-Unrelatedness and Stimulus-Independence Are
429 Related to Default Network Activity. *PLOS ONE*, 6(2), e16997.
430 <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0016997>
- 431 Techer, F., Jallais, C., Corson, Y., Moreau, F., Ndiaye, D., Piechnick, B., & Fort, A. (2017).
432 Attention and driving performance modulations due to anger state: Contribution of
433 electroencephalographic data. *Neuroscience Letters*, 636, 134-139.
434 <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2016.11.011>
- 435 Vincent, J. L., Snyder, A. Z., Fox, M. D., Shannon, B. J., Andrews, J. R., Raichle, M. E., &
436 Buckner, R. L. (2006). Coherent spontaneous activity identifies a hippocampal-parietal memory
437 network. *Journal of Neurophysiology*, 96(6), 3517-3531. <https://doi.org/10.1152/jn.00048.2006>
- 438 Ward, A., & Wegner, D. M. (2013). Mind-blanking: when the mind goes away. *Frontiers in*
439 *Psychology*, 4. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00650>
- 440 Yanko, M., & Spalek, T. M. (2013). Route familiarity breeds inattention: A driving simulator study.
441 *Accident Analysis & Prevention*, 57, 80–86.
- 442 Yanko, M., & Spalek, T. M. (2014). Driving with the wandering mind: the effect that mind-
443 wandering has on driving performance. *Human Factors*, 56(2), 260-269.
444 <https://doi.org/10.1177/0018720813495280>

Synthèse des résultats présentés dans l'article soumis à *Neuroscience Letters*

Dans cette partie ne seront présentés que les résultats ayant été intégrés à un article scientifique soumis pour publication. Les résultats liés à l'activité électrodermale, à la mémoire de travail ainsi qu'à l'impact de l'orientation temporelle et de la valence émotionnelle des pensées seront présentés dans la partie suivante, portant sur les Résultats supplémentaires de cette étude. La partie actuelle se concentrera sur l'impact du vagabondage de la pensée sur le traitement de l'information visuelle ainsi que sur les variables de conduite.

L'objectif de cette étude, rappelons-le, était de déterminer l'impact du VP sur le traitement de l'information visuelle en conduite simulée ainsi que sur les différentes variables de conduite. Au terme de cette étude, il apparaît que l'amplitude des composantes N1 et P3, traduisant respectivement le traitement sensoriel précoce et le traitement cognitif plus tardif de l'information, apparaissent toutes deux réduites lorsque le conducteur est dans un état de VP. En revanche, aucune différence n'a pu être mise en évidence quant aux latences des composantes N1 et P3 ni sur le nombre d'anticipations des conducteurs.

En isolant le conducteur de son environnement, le découplage perceptuel pourrait entraîner une réduction de l'amplitude de la composante N1 lors du VP. Le pourcentage de variation (ou taux d'évolution¹³) de l'amplitude de la composante N1 entre la condition d'attention dirigée vers la conduite ($m = -4.97$, $ET = 0.32$) et la condition de VP ($m = -4.31$, $ET = 0.30$) s'élève à 13.3 %. Cela signifie que l'amplitude de la composante N1 était réduite d'environ 13 % lorsque le conducteur avait son attention focalisée sur ses pensées. Il se trouve que l'activité des différents cortex sensoriels (visuel dans ce cas) est réduite lors du VP (Smallwood et al., 2008) au bénéfice de l'activité du réseau par défaut (Raichle et al., 2001) afin de protéger l'expérience vécue de l'effet potentiellement distracteur des stimuli externes (Barron et al., 2011 ; Schooler et al., 2011). Cette diminution de l'amplitude de la composante N1 pourrait donc s'expliquer par le fait que le conducteur, lorsqu'il pense à autre chose qu'à son activité de conduite, subit le phénomène de découplage perceptif, l'isolant de son environnement direct.

La réduction de l'amplitude de la composante P3 signifie que le traitement cognitif de l'information a été plus superficiel lorsque l'attention du conducteur était focalisée sur ses pensées personnelles ($m = 3.21$, $ET = 1.51$) plutôt que sur l'activité de conduite ($m = 4.07$, $ET = 1.55$). Le taux d'évolution de l'amplitude de la composante P3 entre la condition d'attention dirigée vers la conduite et la condition de VP s'élève à 21.1 %. La diminution d'environ 20 % de l'amplitude de la composante P3 peut s'expliquer par le partage des ressources cognitives du conducteur entre la tâche de conduite (suivre le véhicule le précédant

¹³ Le taux d'évolution est une grandeur sans unité, souvent exprimé en pourcentage et qui permet de quantifier l'évolution d'une variable entre deux moments distincts. Un taux d'évolution de - 10 % sera interprété comme une réduction de la grandeur d'intérêt d'un dixième de sa valeur initiale.

et réagir le plus rapidement possible en cas de freinage) et ses pensées personnelles. Le vagabondage de la pensée générerait une situation de double tâche dans laquelle le conducteur doit partager ses ressources entre la tâche de conduite et ses pensées, laissant une quantité de ressources amoindries. Cela générerait une amplitude réduite de la composante P3 des potentiels évoqués.

Cette interprétation est corroborée par une augmentation des temps de réaction du conducteur. Les temps de réaction du conducteur lorsque son attention était dirigée vers la conduite ($m = 0.472$, $ET = 0.08$) étaient significativement moins élevés que lorsque celui-ci était en VP ($m = 0.518$, $ET = 0.11$). Le taux d'évolution est de 9.7 %. Le VP impacterait donc le conducteur sur sa capacité à réagir promptement à des événements non soudains. Dans le cadre de cette étude, deux freinages de la moto étaient au maximum espacés de 10.2 s. Lors de l'expérimentation, les conducteurs savaient qu'un freinage de la moto allait suivre et pouvait donc s'y préparer. Mais qu'en est-il des événements soudains ? La présente étude ne peut répondre à cette question. Mais de par notre capacité à rapidement changer notre focus attentionnel entre deux tâches lors du VP (voir interprétations proposées dans la partie portant sur la Synthèse des résultats présentés dans l'article de Consciousness & Cognition de l'étude précédente), il est fortement probable que le temps de réaction à des événements exceptionnels serait bien plus impacté par le VP que dans la présente étude lors de laquelle le conducteur s'attendait au freinage de la moto et pouvait mettre en place des stratégies pour l'anticiper.

Résultats supplémentaires

D'autres analyses ont été effectuées afin de mieux comprendre d'autres aspects et impacts du vagabondage de la pensée. L'objectif était notamment de sonder l'effet de l'orientation temporelle et de la valence émotionnelle des pensées des conducteurs pour mieux comprendre comment ces facteurs sont susceptibles de perturber le traitement de l'information visuelle en conduite. L'effet du vagabondage de la pensée sur l'accélération cardiaque après que le conducteur ait eu à lever le pied suite au freinage de la moto a également été sondé. L'analyse d'autres facteurs plus indirects tels la labilité électrodermale des conducteurs ou la capacité de leur mémoire de travail avaient pour objectif de mieux comprendre différents degrés d'émergence du vagabondage de la pensée.

Inductions

Nous l'avons vu, les pensées dont le contenu est orienté dans le passé ne représenteraient que 12 % des pensées des individus, en moyenne (Baird et al., 2011). Ainsi, dans le but de favoriser l'émergence du vagabondage de la pensée orienté dans le passé afin de concilier l'objectif de comparer l'effet des pensées temporellement orientées avec les contraintes liées aux techniques des potentiels évoqués nécessitant la répétition d'événements identiques, nous nous sommes inspirés du protocole de Kopp, D'Mello, & Mills

(2015), en demandant, aux conducteurs avant une phase de conduite, de décrire un évènement personnel marquant de leur passé qui aurait influencé ce qu'ils sont devenus de nos jours sur le plan personnel ou professionnel. L'objectif était de réactiver certains souvenirs pendant les phases de conduite qui ont suivi afin que leur attention s'oriente préférentiellement sur des pensées centrées sur cet évènement ou sur des évènements proches, donc orientés vers le passé. Cela avait pour objectif d'augmenter la quantité de pensées orientées vers le passé, tel que cela avait été fait pour augmenter la part des pensées orientées vers le futur (Kopp et al., 2015) afin de permettre de comparer l'impact de la temporalité des pensées sur les variables comportementales et physiologiques des conducteurs.

Afin d'évaluer la qualité de l'induction permettant d'augmenter la part des pensées orientées vers le passé, nous avons calculé le pourcentage de temps que les conducteurs ont déclaré avoir passé à penser à des éléments orientés vers le passé dans les quatre sessions de conduite qui ont suivi l'induction. Ce temps a été comparé avec le pourcentage de temps moyen dans l'ensemble des autres sessions que les conducteurs ont déclaré avoir passé à penser à un contenu orienté vers le passé. Il faut être vigilant et ne pas confondre le pourcentage du temps de conduite en vagabondage orienté vers le passé et la part des pensées orientées vers le passé. Le premier terme prend en compte les moments d'attention dirigée vers la conduite, pas le second (voir Recueil des pensées vagabondes et calcul des scores composites). Il se trouve que la quantité de temps que les conducteurs ont passé à penser à des éléments, sans rapport avec la conduite, tournés vers le passé dans les quatre sessions de conduite suivant l'induction ($m = 11.25$; $ET = 7.61$) se trouvent être significativement plus élevés que la quantité de temps moyen que les conducteurs ont passé à penser à des éléments orientés vers le passé lors des autres sessions de conduite ($m = 4.88$, $ET = 10.53$), $t(30) = 4.58$, $p < .001$. Ainsi, proposer une tâche d'écriture portant sur un souvenir personnel de l'individu augmenterait significativement la quantité de pensées orientées vers le passé d'un individu.

Potentiels évoqués cérébraux et données de conduite

L'analyse des potentiels évoqués cérébraux visuels a révélé une réduction de l'amplitude de la N1 visuelle et de la P3. Ces effets ont été interprétés comme un effet du découplage perceptif lors duquel le conducteur se retrouve isolé de son environnement (réduction de l'amplitude de la composante N1 visuelle) et comme une conséquence de l'effet de double tâche du VP (réduction de l'amplitude de la composante P3). Ces résultats ont été présentés dans l'Article soumis à la revue *Neuroscience Letters*, le 12/09/2018.

Des analyses supplémentaires ont été conduites afin d'investiguer l'effet de l'orientation temporelle et de la valence émotionnelle des pensées. L'objectif était d'évaluer la modulation d'amplitude des composantes

des potentiels évoqués associées à ces deux facteurs pour inférer différents degrés d'interférences des pensées hors-tâche avec la conduite.

Temporalité

Nous avons, en premier lieu, regroupé a posteriori, les sessions de conduite en trois groupes (groupes passé, présent et futur) selon les déclarations des participants et les résultats obtenus au questionnaire de fin de session (Annexe F).

L'analyse des données des potentiels évoqués selon la temporalité des pensées des conducteurs a montré plusieurs résultats intéressants. Premièrement, la comparaison de **l'amplitude de la composante N1** visuelle pour les pensées orientées vers le passé ($m = -4.72$; $ET = 1.55$), le futur ($m = -4.35$; $ET = 1.49$) et vers le présent ($m = -3.8$; $ET = 1.51$) est tendancielle : $F(2, 77) = 2.48$, $p = .09$. Lorsque l'on fait des comparaisons deux à deux, il s'avère que l'amplitude de la composante N1 lorsque le conducteur a son attention focalisée sur des pensées dont le contenu est orienté vers le présent se distingue de l'amplitude de la composante N1 lorsque celui-ci a son attention focalisée sur des pensées orientées vers le futur ou vers le passé :

- Différence d'amplitude entre les groupes de VP passé et présent : $F(1, 22) = 6.07$, $p < .05$, $\eta^2 = .22$
- Différence d'amplitude entre les groupes de VP passé et futur : $F(1, 22) = 1.29$, $p > .05$
- Différence d'amplitude entre les groupes de VP présent et futur : $F(1, 27) = 4.66$, $p < .05$, $\eta^2 = .15$

En revanche, l'analyse de **l'amplitude de la composante P3** n'a révélé aucune différence selon l'orientation temporelle des pensées envers lesquelles était focalisée l'attention des conducteurs. L'effet des pensées orientées vers le passé ($m = 205.23$; $ET = 25.53$), le futur ($m = 212.08$; $ET = 30.03$) ou le présent ($m = 217.37$; $ET = 26.39$) sur la **latence de la composante N1** visuelle est tendanciel : $F(2, 77) = 2.48$, $p = .09$. Lorsque l'on s'intéresse aux comparaisons groupe par groupe, il apparaît que la latence de la N1 est significativement différente lorsque l'attention des conducteurs est focalisée sur des pensées orientées vers le passé que lorsqu'elles sont orientées vers le futur : ($F(1, 22) = 6.18$, $p < .05$, $\eta^2 = .22$). De même que pour l'amplitude, aucun effet de la temporalité des pensées n'a pu être mis en évidence sur la **latence de la composante P3**. Enfin, l'analyse des temps de réaction n'a pas permis de mettre en évidence des différences lorsque le conducteur avait son attention focalisée sur des pensées passées ($m = 0.497$; $ET = 0.106$), présentes ($m = 0.485$; $ET = 0.112$) et futures ($m = 0.500$; $ET = 0.110$) : ($F(2, 168) = 0.322$, $p > .05$).

En résumé, ces résultats montrent que l'amplitude de la composante N1 pourrait être affectée par l'orientation temporelle des pensées lorsque l'attention du conducteur est portée sur celles-ci. Si l'amplitude

de la composante N1 pouvait montrer la force du phénomène de découplage perceptif, alors ce sont les pensées dont le contenu est orienté vers le présent qui pourraient être le plus affectées par ce phénomène. Nos résultats suggèrent que les pensées orientées vers le présent se distinguent des pensées temporellement orientées (vers le passé et le futur) quant à la qualité du traitement sensoriel de l'information. De plus, la latence de la composante N1 est plus tardive pour les pensées orientées vers le futur que pour les pensées orientées vers le passé. Les pensées orientées vers le futur et vers le passé pourraient provenir de sous-systèmes cérébraux distincts (Addis et al., 2009). Les pensées futures, en puisant dans les ressources de la mémoire de travail pourraient occuper l'esprit et agir comme une distraction expliquant le retard du pic de la N1 pour ce type de pensée. Cela pourrait provenir du fait que penser à quelque chose que l'on est en train de faire perturbe plus cette action que la faire de façon automatisée (Flegal & Anderson, 2008). Parmi les pensées présentes se trouvaient des pensées dont le contenu touchait à la tâche en elle-même, au participant et à tout ce qui touche à son corps (« j'ai faim », « j'ai envie d'aller aux toilettes », etc.). Une critique du protocole de cette étude est à introduire ici. L'objectif était de tester le potentiel impact des pensées orientées temporellement. Un dernier encart dans le questionnaire aurait dû être ajouté afin de renseigner les pensées sans orientation temporelle qui, bien qu'étant peu nombreuses, ont pu être amalgamées avec les pensées présentes. Cela aurait pu également permettre d'investiguer l'impact des pensées sans orientation temporelle sur la qualité du traitement de l'information.

Les analyses des données de conduite n'ont pas permis de mettre en évidence des différences au niveau des temps de réaction selon l'orientation temporelle des pensées. Prendre en compte les temps de réaction après l'allumage du feu permet d'obtenir un nouvel éclairage et de nouvelles interprétations des résultats en PE. Interpréter ensemble différents types de résultat permet, ici, d'observer et de décrire les données non pas de façon séquentielle, mais de façon plus globale en appréhendant l'expérience vécue par le participant. Ainsi, il est possible qu'un traitement plus superficiel (se caractérisant par une amplitude réduite de la N1) pour les pensées présentes ait été suffisant pour réagir à temps au freinage de la moto. Ces résultats pourraient être interprétés comme un compromis cognitif où une performance satisfaisante peut être obtenue à moindre coût (Hoc & Amalberti, 2007). Ici, lorsque le conducteur pensait à un événement présent (lié à la tâche, simulateur, électrodes, etc.) réagir suffisamment tôt ne nécessitait pas le même niveau de vigilance que lorsque son attention était dirigée vers des événements passés ou futurs.

Le questionnaire de fin de bloc (Annexe F) dans lequel les participants devaient caractériser leur état et leurs pensées pendant la dernière session de conduite demandait également, en cas de pensées sans lien avec l'activité de conduite, orientées temporellement, de renseigner la distance temporelle de celles-ci. Les pensées orientées temporellement pouvaient être proches (aujourd'hui) à très éloignées (plusieurs années).

L'effet de ce facteur n'a pas pu être testé compte tenu du trop faible nombre de données disponibles pour l'analyse.

En résumé, les résultats liés à la temporalité des pensées pourraient laisser entendre que le degré de découplage perceptif pourrait être différent selon que les pensées sur lesquelles l'attention du conducteur est focalisée, soient orientées vers le passé, le présent ou le futur. Cette interprétation se base sur des résultats différents obtenus sur l'amplitude de la N1. En puisant dans les ressources de la mémoire de travail, les pensées orientées vers le futur pourraient avoir un effet proche de la distraction cognitive, retardant le pic de la composante N1 visuelle. Les pensées orientées vers le passé pourraient nécessiter un traitement sensoriel de l'information plus profond pour générer des temps de réaction équivalents. En revanche, aucune différence n'a été mise en évidence concernant l'amplitude ou la latence de la composante P3 suggérant que les modalités de ce facteur n'aient pas d'effet additionnel sur le siphonnage du réservoir de ressources du conducteur. Le VP par la génération d'un effet de double tâche, abaisse l'amplitude de la composante N1 visuelle et de la composante P3. Le facteur « temporalité » des pensées ne semble pas avoir d'impact quant au partage des ressources cognitives, générant une composante P3 dont l'amplitude est équivalente pour l'ensemble des modalités. La temporalité des pensées pourrait donc avoir un effet sur le degré « d'isolement » des conducteurs par le biais du découplage perceptif, mais cela ne semble pas augmenter encore plus le coût cognitif (pas de modification d'amplitude de la composante P3, ni d'augmentation des temps de réaction).

Ces résultats n'ont pas été intégrés à l'article soumis à *Neurosciences Letters*, car ceux-ci ne semblaient ni suffisamment robustes ni congruents entre eux, générant plusieurs interprétations possibles. Avec un manque de données suffisantes (ici, moins de 12 % du temps de conduite était dédié à des pensées dont le contenu était orienté vers le passé), les interprétations de ces comparaisons ne permettaient pas de tirer des conclusions claires. Il a donc semblé préférable de ne pas incorporer ces résultats dans l'article.

Émotion

L'analyse des données des potentiels évoqués selon la valence émotionnelle du contenu des pensées des conducteurs a montré que l'**amplitude de la composante N1** visuelle pour les pensées dont le contenu est négatif ($m = -5.04$; $ET = 1.88$) est significativement supérieure à l'amplitude des pensées neutres ($m = -4.21$; $ET = 1.22$), $F(1, 18) = 7.17$, $p < .05$. L'analyse de l'amplitude de la composante N1 n'a pas permis de mettre en évidence des différences des pensées positives ($m = -4.73$; $ET = 1.54$) par rapport aux deux autres groupes. L'analyse de la **latence de la composante N1** a montré deux effets tendanciels. La latence de la N1 des pensées positives ($m = 220.09$; $ET = 25.17$) pourrait se distinguer de celle des pensées négatives ($m = 213.29$; $ET = 27.61$) : $F(1, 18) = 3.602$, $p = .07$. De la même façon, la latence de la

composante N1 des pensées positives pourrait se distinguer de celle des pensées dont le contenu est émotionnellement neutre ($m = 214.40$; $ET = 28.38$) : $F(1, 18) = 3.600$, $p = .07$.

L'analyse des **amplitudes de la P3** suite au freinage de la moto lorsque l'attention du conducteur était focalisée sur des pensées dont le contenu est négatif ($m = 4.11$; $ET = 1.54$), positif ($m = 3.97$; $ET = 1.35$) ou neutre ($m = 3.82$; $ET = 1.38$) n'a pas montré d'effet. Aucune différence entre les groupes n'a pu être mise en évidence. En ce qui concerne l'analyse de la **latence de la P3** selon la coloration émotionnelle des pensées, il se trouve que la latence de la P3 pour les pensées négatives ($m = 340.14$; $ET = 28.35$) se distingue significativement de la latence pour les pensées neutres ($m = 324.98$; $ET = 30.36$) : $F(1, 18) = 7.63$, $p < .05$. La latence du pic de la P3 lorsque l'attention du conducteur est focalisée sur des pensées positives ($m = 331.14$; $ET = 30.39$) ne se distingue pas des deux autres modalités. Enfin, l'analyse des temps de réaction n'a pas permis de mettre en évidence des différences lorsque le conducteur avait son attention focalisée sur des pensées négatives ($m = 0.479$; $ET = 0.081$), neutres ($m = 0.486$; $ET = 0.069$) et positives ($m = 0.496$; $ET = 0.079$) : ($F(2, 117) = 0.502$, $p > .05$). La comparaison entre le groupe dans lequel les pensées étaient négatives et le groupe dans lequel les pensées du conducteur étaient positives laissent apparaître un effet tendanciel : $F(1, 39) = 3.11$, $p = .08$.

Il se trouve que l'amplitude de la N1 était plus importante pour les pensées négatives que neutre. Cela pourrait traduire une anticipation et/ou la mise en place de stratégies de régulation. Cela ne se voit pourtant pas au niveau des temps de réaction ni au niveau de la proportion d'anticipation des participants. Il est possible que l'anxiété liée à la tâche de conduite sur simulateur augmente la capacité du réservoir attentionnel des conducteurs et donc la quantité de ressources disponibles (Techer, 2016). Il serait également possible que, de la même façon que pour les pensées temporellement orientées, les pensées émotionnellement colorées accentuent le phénomène de découplage perceptif et aient un effet de distraction cognitive en retardant le moment du traitement de l'information (visible par l'analyse des latences des pics des composantes N1 et P3). En revanche, de nombreuses analyses présentées ici n'ont montré que des résultats statistiquement tendanciels. Il est ainsi difficile d'interpréter clairement les résultats de ces analyses qui mériteraient d'être éclaircies en collectant des données supplémentaires afin de trancher : ces résultats tendanciels sont-ils dus à des biais statistiques en raison de multiples comparaisons entre les groupes ou ressortiraient-ils significatifs si plus de données de qualité étaient disponibles pour chacun des groupes ?

De la même façon que pour la temporalité, ces résultats n'ont pas été intégrés à l'article soumis à *Neurosciences Letters*, car les analyses auraient nécessité plus de données pour améliorer la robustesse des résultats et permettre des interprétations limpides. Les données collectées lors de cette expérimentation n'étaient peut-être pas de suffisamment bonne qualité ni en quantité suffisante pour espérer obtenir des informations quant à l'impact de certains facteurs précis telle la coloration émotionnelle du contenu des

pensées. Les données de cette étude renforcent pourtant l'idée d'investiguer l'effet du type de pensées et de leurs contenus sur le degré d'interférence avec l'activité de conduite.

Activité frontale

L'analyse des potentiels évoqués cérébraux nécessite la présentation d'un stimulus sensoriel particulier et évalue la qualité du traitement de l'information associé. Il s'agit donc de tester une hypothèse précise en prenant en compte la modalité sensorielle de présentation et en allant étudier spécifiquement l'activité de la zone cérébrale impliquée dans le traitement sensoriel de ce type d'information. Dans la présente étude, les stimuli présentés étaient visuels ; il s'agissait de l'allumage, en rouge, du feu arrière de la moto. Les analyses des potentiels évoqués se sont logiquement portées sur les zones occipitales du cerveau, responsables du traitement des informations visuelles. Nous l'avons vu, le VP aurait un impact sur le traitement sensoriel et sur le traitement cognitif de l'information en réduisant l'amplitude des composantes N1 visuelle et P3. Les analyses présentées précédemment ne se sont intéressées qu'aux zones cérébrales responsables du traitement de l'information visuelle, dans les zones occipitale et pariétale uniquement. Des analyses plus globales ont été menées en analysant les modifications dans l'activité de toutes les régions cérébrales. Elles ont permis de montrer des différences dans différentes zones frontales dans les quelques centaines de millisecondes suivant l'allumage du feu de la moto. Ces différences ont été obtenues en comparant les potentiels évoqués par l'apparition du stimulus cible lorsque les conducteurs se disaient attentifs à l'environnement de conduite ou focalisés sur leurs pensées sur la base de l'item 1 de l'Annexe F. L'activité frontale est différente entre la condition de VP et la condition d'attention dirigée vers la conduite avant 200 ms après l'allumage du feu et ces différences perdurent jusqu'à environ 300 ms (voir Figure 21).

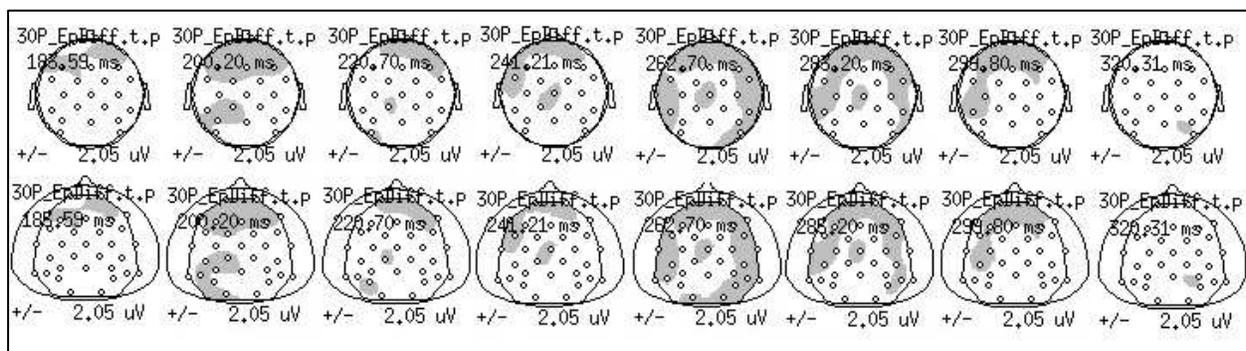


Figure 21 : Représentation schématique du scalp et de la position des électrodes du bonnet EEG sous forme de cercles blancs. Les zones grisées représentent les différences statistiques obtenues en comparant la condition d'attention à la conduite à la condition de vagabondage de la pensée avec un seuil alpha de .05 pour la première ligne et .01 pour la seconde ligne entre 183.59 ms et 320.31 ms après l'allumage du feu-stop de la moto

Ces analyses montrent donc des différences d'activité dans certaines zones, parfois étendues, de la région frontale des conducteurs. Ces différences sont statistiquement significatives avant 200 ms après l'allumage du feu et apparaissent de façon centrale. Elles semblent se diffuser vers 250 ms vers des zones temporales, moins centrales. Les différences persistent dans les zones frontales jusqu'à un peu plus de 300 ms après l'allumage du feu.

Comment pourrions-nous interpréter de telles différences ? Certaines tâches réflexives se rapprochant de l'état de VP entraîneraient une augmentation du flux sanguin dans le cortex préfrontal dorso-médian et le gyrus temporal médian antérieur gauche ainsi qu'une diminution du flux sanguin dans les régions préfrontales à droite (D'argembeau et al., 2005). Or, le cortex préfrontal-dorso médian appartient au réseau par défaut. L'activité du réseau par défaut et donc de ses composants étant plus importante lors du VP, il est possible que les différences obtenues dans ces zones proviennent d'une différence d'activité des projections des sous-structures frontales du réseau par défaut.

Une autre piste d'interprétation intéressante résiderait dans le fonctionnement du réseau autonome central. Celui-ci est constitué de nombreuses structures cérébrales dont le cortex préfrontal ventro-médian (Thayer & Lane, 2000). Le premier relais de ce réseau se fait dans les neurones pré-ganglionnaires sympathiques et parasympathiques dont les fibres afférentes viennent innover le cœur. Ce réseau a été décrit comme un élément des systèmes de régulation interne par lesquels le cerveau contrôle les réponses viscérales, neuroendocrines et comportementales qui sont indispensables pour l'adaptation et les comportements dirigés par les buts (Benarroch, 1993). Une activité différente lors du VP de certaines sous-structures de ce réseau cérébral modulant les réponses viscérales et comportementales selon les attentes des conducteurs pourrait expliquer l'activité différente obtenue dans les zones frontales. La régulation comportementale lors du VP pourrait également avoir une répercussion sur l'activité du cortex pré-moteur, responsable de la planification du mouvement, et sur celle du cortex moteur responsable de la prise de décision et de la commande motrice ; deux structures cérébrales se situant dans le lobe frontal.

Il serait donc possible que ces différences statistiques dans l'activité frontale, après la présentation du stimulus cible proviennent d'une différence d'activité de certaines sous-structures du réseau par défaut, plus actif lors du vagabondage de la pensée que lorsque le conducteur est attentif à sa tâche de conduite. Il serait également possible que lors du VP, certaines structures cérébrales appartenant à au réseau autonome central qui n'a pas été présenté ici et qui serait notamment responsable de la régulation comportementale soient plus ou moins activé, expliquant ces différences d'activité. Enfin, la régulation comportementale et l'anticipation des conducteurs pourraient différer lorsque ceux-ci sont attentifs à la conduite ou focalisés sur leurs pensées et ainsi modifier l'activité des cortex moteurs et pré-moteurs après la présentation du stimulus sensoriel. Dans l'état actuel des données et des mesures récoltées, il n'est pas possible d'interpréter avec

certitudes les résultats présentés. Une activité différente dans différentes zones frontales pourrait avoir de nombreuses explications. D'autres études seraient nécessaires afin d'investiguer spécifiquement l'impact du VP sur l'activité frontale (voir temporale et pariétale) des conducteurs et ainsi estimer si l'activité de certaines zones cérébrales serait susceptible de révéler la présence de VP. En effet, ces différences dans l'activité frontale pourraient être un marqueur supplémentaire permettant la mise en lumière de cet état lors de phases de conduite.

Résultats Cardiaques

La collecte du signal cardiaque des conducteurs dans la présente étude n'avait pas pour objectif de trouver un marqueur cardiaque du vagabondage de la pensée. Les précédentes études ont montré que le rythme cardiaque fluctue autour d'une valeur relativement stable et que l'état interne du conducteur peut modifier ces paramètres. Ainsi, des différences pourraient être mises en évidence sur des fenêtres de temps élevées, de l'ordre de plusieurs minutes sur des indicateurs de variabilité cardiaque à plus ou moins long terme. Dans le cadre de la présente étude, le temps de chaque session était trop réduit pour espérer montrer un effet du VP sur les indices de variabilité de la fréquence cardiaque. C'est pour cela que la collecte des données cardiaques n'avait pas pour objectif de trouver des marqueurs du VP, mais bien d'étudier l'impact de cet état sur l'évolution du rythme cardiaque dans les secondes qui ont suivi la levée du pied du participant en réponse au freinage de la moto.

L'étude précédente a montré une augmentation de la fréquence cardiaque après que les conducteurs aient déclaré leurs pensées vagabondes. Il est possible que cette élévation provienne du besoin de compenser la perte d'oxygène dans l'organisme après avoir réalisé un mouvement, mais il est également possible que ce pattern cardiaque soit lié au coût cognitif nécessaire pour que les conducteurs réorientent leur attention vers la tâche de conduite. Il est probable que le pattern cardiaque retrouvé dans l'étude précédente soit le résultat de la présence de ces deux facteurs. Dans la présente étude, la collecte du signal cardiaque avait un double objectif. Le premier était de corroborer une augmentation de la fréquence cardiaque après que le conducteur ait eu à lever le pied de la pédale d'accélérateur suite à l'apparition du feu arrière de la moto. Le second était d'investiguer la possibilité d'une accélération cardiaque plus importante lorsque le conducteur avait son attention tournée vers ses pensées plutôt que vers la conduite, suggérant alors une consommation plus importante des ressources attentionnelles du conducteur, corroborant l'interprétation d'un coût cognitif plus important lorsque le conducteur avait à réorienter son attention lorsque les conducteurs.

L'analyse de l'évolution du rythme cardiaque dans les secondes entourant l'évènement (décélération de la moto) montre que le RC suit plus ou moins le même pattern lorsque le conducteur a son attention focalisée sur ses pensées ou sur l'activité de conduite (voir Figure 22).

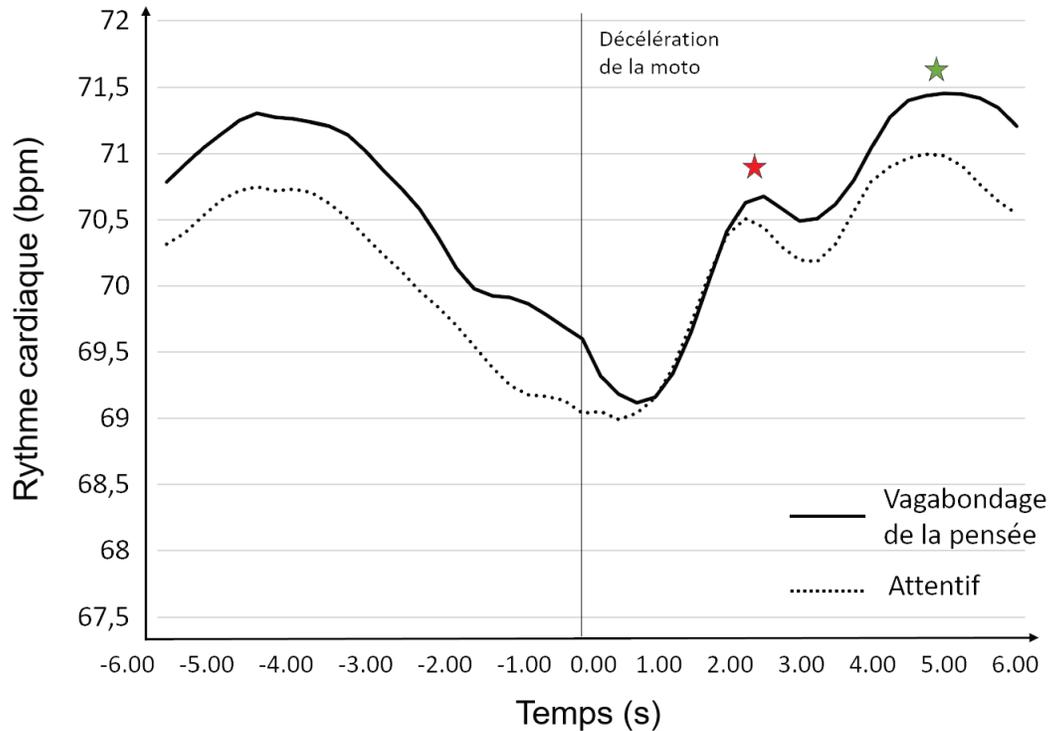


Figure 22 : Évolution du rythme cardiaque dans les 12 secondes entourant le freinage de la moto précédant le véhicule du conducteur

L'analyse du rythme cardiaque n'a pas montré de différence sur l'ensemble des sessions ($p > .05$), signifiant qu'en moyenne, les conducteurs avaient une fréquence cardiaque équivalente qu'ils soient focalisés sur la tâche de conduite ou sur leurs pensées. L'analyse de l'évolution du RC après la décélération de la moto montre un pattern équivalent : une première élévation franche de la fréquence cardiaque dont le pic est atteint entre deux et trois secondes après le freinage (Figure 22, étoile rouge). Ce pattern de par son amplitude et la latence de son pic, pourrait correspondre à l'effet d'un effort cognitif. Cet effort proviendrait de la nécessité de réagir au freinage de la moto. Pour les conducteurs, il aurait donc fallu avoir une attention soutenue envers la conduite accrue lors du freinage. Il était ainsi attendu une accélération du RC plus franche lorsque le conducteur avait son attention focalisée sur ses pensées ($m = 1.51$) par rapport à la valeur du RC avant la décélération, par rapport aux moments où l'attention du conducteur était focalisée sur la route ($m = 1.35$), mais ce résultat n'était pas significatif ($p > .05$). La seule différence significative obtenue apparaît lorsque l'on compare la valeur du RC lorsque le conducteur avait son attention orientée sur ses pensées dans la seconde précédant le freinage de la moto ($m = 68.97$; $ET = 9.74$) à la valeur du RC dans la seconde suivant le freinage de la moto ($m = 68.42$; $ET = 9.36$), $F(1, 26) = 6.51$, $p < .05$, $\eta^2 = .20$. Cette

différence qui n'a pas été retrouvée pour la condition dans laquelle l'attention du conducteur était focalisée sur la conduite, signifierait que la composante ECR1 est impactée par le VP. Nous l'avons vu dans la partie sur les potentiels évoqués cérébraux, le VP a impacté la composante N1 visuelle en réduisant son amplitude et ECR1 et N1 seraient une paire de composantes cardiaque et cérébrale appariées (Lawrence & Barry, 2009). Cela prendrait tout son sens si l'amplitude de la composante ECR2 apparaissant après le déclencheur de l'allumage du feu de la moto avait également été modifiée lors du VP, ce qui n'est pas le cas ici. En effet, la composante ECR2 et la composante P3 des potentiels évoqués cérébraux seraient également une paire de composantes appariée (Lawrence & Barry, 2009). Ensemble, ces résultats pourraient suggérer que l'aspect fluctuant du vagabondage de la pensée, le design expérimental de l'étude, ou que l'élévation plus tardive de la VaRC après un mouvement du conducteur (second pic) ait empêché la mise en évidence de résultats significatifs concernant la composante ECR2. Visuellement, le RC accélère plus lorsque le conducteur a son attention focalisée sur ses pensées que lorsqu'il a son attention focalisée sur sa tâche de conduite, mais il est aussi possible que ce résultat soit dû au hasard compte tenu du fait que les résultats des analyses statistiques se soient révélés non significatifs. D'autres études seraient nécessaires pour apporter des réponses à ces questions.

Visuellement, les données cardiaques laissent apparaître un second pic aux alentours de 5 secondes après le freinage de la moto. C'est la première fois, à notre connaissance, que l'analyse de la VaRC montre deux pics. Ce résultat inhabituel pourrait être interprété comme une accélération du RC nécessaire pour compenser le mouvement du conducteur lors de sa levée de pied de la pédale d'accélération après le freinage de la moto. Faire n'importe quel mouvement implique une stimulation du système sympathique et en découle, entre autres réactions corporelles, une élévation de la fréquence cardiaque (Kahle, Platzer, Leonhardt, & Cabrol, 1981). Le mouvement nécessaire pour lever le pied semble plus important et nécessiterait ainsi le travail de plus de muscles que lorsque le conducteur avait à déclarer ses pensées en faisant un appel de phare lors de l'étude 2. La consommation d'oxygène pourrait ainsi être plus élevée et le cœur, pour compenser ce manque, éviter l'hypoxie et maintenir l'homéostasie du corps, accélérerait pour apporter l'oxygène nécessaire. Ce second pic (Figure 22, étoile verte) plus tardif pourrait ainsi refléter le coût physique de la levée de pied et la latence de ce pic, le délai du cœur pour pallier la consommation en oxygène de la contraction musculaire nécessaire pour lever le pied.

Labilité électrodermale

Tester les liens entre labilité électrodermale, capacité de la mémoire de travail et propension au vagabondage n'a pas d'intérêt propre en sécurité routière (hormis le fait de révéler des profils d'individus susceptibles

d'être confronté plus souvent au vagabondage de la pensée), mais permettrait de mieux comprendre les liens entre ces dimensions et de raccrocher ces liens en terme de sous-structures cérébrales impliquées.

Pour rappel, l'analyse du signal électrodermal pour déterminer la labilité/stabilité d'un individu dans le présent travail, s'est fait par la quantification le nombre de réponses spontanées et par le classement des participants selon ce résultat. Le tiers d'individus ayant le plus de réponses spontanées (définies comme les augmentations de la conductance cutanée de plus de 0.01 μ S) sont d'habitude considérés comme labile et le tiers d'individus ayant le moins de réponses, considérés comme stables. Effectuer un tel classement permet de pallier les biais méthodologiques de ce que l'on appelle le « médian split ¹⁴».

Ici, nous avons préféré utiliser une matrice de corrélations afin de tester nos hypothèses. La matrice de corrélation permet d'éviter de ne pas joindre à l'analyse un tiers des données collectées (le tiers d'individus dits mixtes) et permettrait de mieux entrevoir les liens entre labilité électrodermale et propension au vagabondage de la pensée. Pour rappel, les individus qualifiés de labiles d'un point de vue électrodermal étaient attendus comme ayant un esprit plus vagabond que les stables car leur attention serait plus fréquemment et plus intensément détournée de la tâche primaire. Les personnes dites labiles auraient donc tendance à déclarer plus de pensées sans lien avec l'activité de conduite que les stables.

Les résultats d'analyse montrent que le nombre de réponses spontanées du signal électrodermal des individus ne corrèlent pas significativement avec le degré d'attention portée à la conduite, mais laissent apparaître un résultat tendanciel ($r = -0.25$, $p = .06$). L'analyse du nombre de réponses spontanées du signal électrodermal et la capacité des individus à limiter le nombre de pensées vagabondes n'ont pas montrer de corrélation significative : $r = -0.08$, $p > .05$. En revanche, la mise en relation du nombre de réponses spontanées avec le degré d'attention portée à la conduite lorsque les individus devaient se concentrer sur celle-ci a montré un lien inverse significatif : $r = -0.31$, $p < .05$.

Ainsi, la labilité électrodermale comme trait psychophysologique pourrait révéler une tendance au vagabondage de la pensée. Bien que ce résultat ne soit que tendanciel, le fait d'être labile prédisposerait à déclarer plus de pensées vagabondes et une attention envers la tâche principale moins importante. Cet effet tendanciel se renforcerait lorsque la consigne donnée aux individus serait de se concentrer sur l'activité de conduite. Dans ces cas-là, les personnes stables seraient plus à même de respecter la consigne et de maintenir une attention soutenue envers l'activité de conduite que les personnes labiles. La labilité électrodermale serait donc susceptible d'expliquer des différences interindividuelles dans la propension au

¹⁴ Le « median split » est une méthode permettant de créer deux groupes séparant les données en deux sur la base d'un score. Le score médian devient la référence et tous les individus ayant un score supérieur à cette valeur seront dans le même groupe qui sera comparé à l'ensemble des individus ayant obtenu un score inférieur à celui de la médiane.

VP. Mais d'autres facteurs, telle la capacité de la mémoire de travail, pourrait également moduler cette propension.

Mémoire de Travail

Pour rappel, une fois mesurée la capacité de la mémoire de travail (MdT) des participants, chacun d'eux obtenait un score d'empan de chiffre endroit, un score d'empan de chiffre envers, un score d'empan de chiffre croissant et un score composite, moyenne des précédents. Comme précédemment, ces scores ont été mis en relation avec le degré d'attention portée à la tâche de conduite afin d'investiguer les liens entre capacité de la mémoire de travail des individus et la quantité de vagabondage de la pensée déclaré.

Tout d'abord, les dimensions mesurées (empans endroit, envers, croissant et le score composite) corrélaient fortement entre elles et dans le même sens. Cela signifie qu'aucune dimension ne variait dans un sens opposé aux autres. Les résultats obtenus sont congruents entre eux et le score composite obtenu par la moyenne des scores bruts est celui qui obtient la moyenne de corrélation avec les autres dimensions la plus élevée : $r = 0.83$. Les liens entre ce score composite reflétant donc la capacité de la mémoire de travail des individus se trouve être significativement et positivement corrélé avec le degré d'attention subjectivement déclaré par les conducteurs, $r = .50$, $p < .01$. En revanche, aucun lien significatif n'a pu être mis en évidence entre la capacité de la mémoire de travail et la capacité des individus à supprimer leurs pensées ($p > .05$).

De plus, l'étude des liens entre temporalité des pensées et capacité de la mémoire de travail permet d'apporter un éclairage différent, des liens entre la quantité de vagabondage de la pensée orientée vers le futur et la capacité de la MdT, dans le cadre d'une tâche de conduite simulée et monotone. Nos résultats ont montré un lien tendanciel entre ces deux dimensions : $r = -0.36$, $p = .050$. Ce résultat à la limite de la significativité, tendrait à montrer que les individus ayant une capacité de leur mémoire de travail élevée, auraient moins tendance à penser à des événements futurs. À notre connaissance, il s'agit de la première étude montrant ce type de lien entre orientation de l'attention vers le futur des pensées vagabondes et capacité de la mémoire de travail. Un second résultat intéressant a émergé des analyses : plus l'individu aurait une capacité de sa MdT élevée, moins il aurait tendance à penser à des éléments sans lien avec l'activité de conduite et orienté vers le présent. Ces pensées sont multiples et se rassembleraient sous l'étiquette de pensées interférentes (en anglais, TRI = Task-Related Interferences). Il se trouve que lors de cette étude, la capacité de la mémoire de travail s'est faite par la mesure de l'empan de chiffres des individus alors que Baird, Smallwood, & Schooler (2011) ont obtenu un indice de mémoire de travail en utilisant l'OSPAN (Operation Span task) utilisant des lettres. Considérant le biais prospectif du vagabondage de la pensée (Smallwood et al., 2009) et le fait que MdT et quantité de pensées vagabondes puissent être

également liées, montrer des corrélations significatives entre capacité de la MdT et quantité de VP orienté vers le futur, pourrait n'être qu'un biais statistique. Afin de sonder sérieusement cette question, l'échantillonnage des données subjectives et leur analyse doivent être pris en compte. En effet, calculer des corrélations entre un score de MdT et un score reflétant la quantité de VP orienté vers le futur, serait différent de calculer des corrélations entre le score de MdT et un score composite reflétant la part de vagabondage de la pensée orienté vers le futur.

Ensemble, ces résultats montreraient que la capacité de la mémoire de travail de l'individu pourrait prédisposer à une sensibilité au vagabondage de la pensée. Plus un individu aurait une mémoire de travail dont la capacité est élevée, moins il aurait tendance à avoir des pensées sans lien avec l'activité de conduite. Ces résultats corroborent ceux d'une méta-analyse récente, allant dans ce sens (Randall et al., 2014). Il se trouve que les types de pensée qui seraient les plus affectés par une diminution de la capacité de la MdT seraient les pensées orientées vers le présent correspondant aux pensées interférentes et éventuellement les pensées orientées vers le futur. La quantité de pensées orientées vers le passé ne semble pas être affecté par des changements dans la capacité de la MdT de l'individu. Il est également important de préciser que ces résultats ont été obtenus lors d'une tâche de conduite simulée à faible coût. Le coût de la tâche pouvant fortement modifier le niveau des ressources disponibles des conducteurs et leur engagement, ce paradigme gagnerait à être répliqué dans une tâche de conduite cognitivement plus coûteuse, afin de sonder les variations du degré d'attention portée à la conduite ainsi que les changements dans la temporalité des pensées des conducteurs.

Discussion

Lors de cette expérimentation, de nombreux indices et mesures ont été collectés : données comportementales de conduite, données physiologiques (activité électrodermale et signal cardiaque) et électrophysiologiques (potentiels évoqués cérébraux) et des données neuropsychologiques afin de mesurer la capacité de la mémoire de travail des conducteurs (empan de chiffre endroit, envers et croissant).

L'analyse du nombre de réponses spontanées dans le signal électrodermal des conducteurs de cette étude a permis de montrer que le fait d'être labile prédisposerait à déclarer plus de pensées vagabondes. Cet effet, bien que tendanciel, se renforcerait lorsque la consigne donnée aux individus serait de se concentrer sur l'activité de conduite. Dans ces cas-là, les personnes stables (celles ayant eu le moins de réponses spontanées) seraient plus à même de respecter la consigne et de maintenir une attention soutenue envers l'activité de conduite. De la même façon, la capacité de la mémoire de travail jouerait un rôle sur la propension au vagabondage de la pensée déclarée. En effet, plus un individu pourrait stocker de nombreux éléments dans sa mémoire de travail, moins il aurait tendance à avoir des pensées sans lien avec l'activité

de conduite. De plus, certains types de pensée comme les pensées orientées vers le présent et éventuellement les pensées orientées vers le futur seraient les plus affectés par une diminution de la capacité de la MdT. Nous ne serions donc pas tous égaux devant la propension au vagabondage de la pensée. Certains individus de par les caractéristiques de leur signal électrodermal ou par la capacité de leur mémoire de travail, seraient susceptibles d'être plus parasités par du VP lors de tâche de la vie quotidienne et ainsi d'en essuyer les mauvais aspects. D'autres facteurs seraient très probablement impliqués dans la modulation d'émergence des pensées hors-tâches et pourraient permettre de mieux comprendre la manifestation des pensées sans lien avec l'activité principale.

Les signatures du VP mises en évidence lors de cette étude montrent de nombreux effets complémentaires et néfastes du VP sur le conducteur. Au niveau des données électrophysiologiques, il s'avère que lorsque le conducteur porte son attention sur ses pensées plutôt que sur l'activité de conduite, l'amplitude des deux composantes principales (N1 visuelle et P3) était réduite, suggérant que les conducteurs subissent le phénomène de découplage perceptif et qu'une partie de leurs ressources attentionnelles sont siphonnées pour créer et alimenter leurs pensées. L'augmentation des temps de réaction vient confirmer l'hypothèse d'une certaine quantité de ressources allouées aux pensées du conducteur plutôt qu'à la tâche de conduite. De plus, l'amplitude de la composante N1 pourrait être modulée par l'orientation temporelle des pensées lorsque l'attention du conducteur est portée sur celles-ci, générant des niveaux de découplage perceptif différents pour les conducteurs. Ces résultats pourraient expliquer les différents niveaux de dangerosité du vagabondage pointés par la littérature (Galera et al., 2012), bien qu'il aurait été plus évident de conclure si la temporalité des pensées avait affecté l'amplitude de la composante P3. De plus, les liens entre activité frontale et vagabondage de la pensée laissent à penser que le VP ne se contenterait pas de perturber le traitement des informations sensorielles, mais générerait un état bien particulier lors duquel certains réseaux seraient préférentiellement activés (Christoff et al., 2009 ; Raichle et al., 2001) et dont les projections et les liens avec d'autres sous-structures pourraient modifier l'activité cérébrale, particulièrement dans les zones frontales, lorsqu'une réponse à un événement est attendue.

Les liens entre coût cognitif et vagabondage de la pensée sont importants à étudier, nos ressources et nos capacités étant limitées et malléables (Kahneman, 1973 ; Wickens, 2002 ; Young & Stanton, 2002). La collecte du signal cardiaque et les transformations effectuées pour obtenir la Variation du Rythme Cardiaque (VaRC) avaient pour but d'investiguer ces liens. Il était attendu que les données cardiaques, par le calcul de la VaRC, soient susceptibles de nous éclairer et de montrer que le coût cognitif et donc l'effort cognitif à fournir par le conducteur, serait plus important lorsque celui-ci a son attention focalisée sur ses pensées, plutôt que sur l'activité de conduite. Le pattern d'effort cognitif peut être visualisé avec la Figure 22. Ce pattern apparaît semblable à ceux précédemment obtenus, bien qu'il se trouve être légèrement différent. Ces

différences pourraient provenir de la dynamique de la tâche, le rythme cardiaque nécessitant un certain temps avant de pouvoir revenir à sa ligne de base, la tâche proposée ne le lui permettait pas, expliquant le léger décalage dans les moyennes du RC avant le freinage de la moto. De plus, le pattern mis en évidence lors de cette étude laisse apparaître une double augmentation de la VaRC. La première, de par ses caractéristiques pourrait correspondre à l'effet d'un effort cognitif. Cet effort serait nécessaire pour réagir au freinage de la moto qui précède le conducteur. La seconde augmentation de la VaRC pourrait être interprétée comme un besoin nécessaire pour compenser la consommation d'oxygène par les muscles suite au mouvement du conducteur lors de sa levée de pied de la pédale d'accélération, après la décélération de la moto. Ces explications quant aux fluctuations de la VaRC ne sont que des interprétations et mériteraient d'être corroborées ou infirmées par des études étudiant spécifiquement l'impact de mouvements et postures sur la fréquence cardiaque. Cela permettrait déjà, de mieux comprendre les liens entre postures, mouvements physiques et RC et cela pourrait permettre de proposer une correction du RC selon les mouvements du conducteur, renforçant ainsi les différents indicateurs dérivés du RC dans leurs capacités à être sensibles à différents états d'intérêts ; ici, la VaRC après une telle correction, pourrait être encore plus sensible à l'effort cognitif.

La présence de vagabondage de la pensée générerait donc chez le conducteur un état bien particulier au niveau de l'activité de certains réseaux et de certaines zones cérébrales, ce qui aurait une incidence importante sur la capacité des conducteurs à réagir à des événements, même non soudains et répétitifs. Les temps de réaction sont augmentés, les informations sont traitées de façon superficielle et des modifications d'activité notamment en zone frontale laisseraient supposer que le VP n'a pas d'incidence que dans les zones responsables du traitement sensoriel (Smallwood et al., 2008) ou dans le réseau dédié (Raichle et al., 2001). Cette étude a permis notamment de montrer des signatures particulières du vagabondage de la pensée, et a renforcé l'idée de creuser dans le contenu des pensées pour inférer différents niveaux d'interférences du VP. L'analyse de la temporalité et de la valence émotionnelle des pensées ont montré des effets légers, mais encourageants pour mieux comprendre comment et selon quels critères le VP pourrait plus ou moins impacter le conducteur. Il faut garder à l'esprit que la tâche proposée lors de cette étude était répétitive et que les conducteurs pouvaient parfois réagir de façon automatique. Les résultats obtenus auraient probablement été plus marqués si l'évènement (freinage de la moto) apparaissait beaucoup moins souvent. Il serait intéressant d'évaluer le degré d'interférence, ainsi que la puissance statistique des différences obtenues entre une condition de vagabondage de la pensée et une condition lors de laquelle l'attention du conducteur est focalisée sur la conduite pour investiguer l'effet d'évènements soudains, plus susceptible d'être représentatif de situations de conduite écologiques, sur le traitement de l'information, les données de conduite et l'évolution de la VaRC.

Étude 3 : Traitement de l'information visuelle et vagabondage

Enfin, le travail d'écriture avant la tâche de conduite a permis de significativement augmenter le temps passé en vagabondage de la pensée dont le contenu serait orienté vers le passé. L'augmentation de la quantité de vagabondage de la pensée orienté vers le passé a permis d'investiguer, même sommairement, l'effet de la temporalité des émotions sur les variables physiologiques et comportementales du conducteur. Sans une telle induction, la quantité de VP orienté vers le passé aurait été presque trois fois inférieure et de telles analyses n'auraient pu être menées. Il s'agit là, à notre connaissance de la première méthode permettant d'orienter préférentiellement les pensées de l'individu vers des événements passés. Dans le futur, une telle induction pourrait être utilisée pour pallier le biais prospectif du VP et permettre d'autres comparaisons sur la base de la temporalité du contenu des pensées afin d'étudier l'impact des pensées temporellement orientées en conduite ou lors de tâche de la vie quotidienne.

Discussion Générale

Rappelons tout d'abord que l'humain et ses erreurs seraient responsables environ 95 % du temps de la survenue d'accidents (Sabey & Taylor, 1980). Cette part très importante des accidents de la route pourrait fortement diminuer avec des mesures efficaces pour lutter contre l'inattention au volant ou avec l'automatisation des véhicules. Avec l'arrivée progressive des véhicules automatisés de niveau 1 à 4, surveiller le conducteur pour pallier ses éventuelles erreurs de surveillance lorsque la machine détient le contrôle ou pour harmoniser les phases de transition de contrôle du véhicule, pourrait être une solution pérenne pour limiter les conséquences du paradoxe de l'automatisation. Ce phénomène serait d'autant plus dommageable que l'activité de conduite déléguée à une machine serait moins intense, laissant le superviseur libre de vagabonder.

L'objectif principal de cette thèse était d'étudier les corrélats physiologiques et comportementaux du vagabondage de la pensée (VP) en conduite automobile, afin de dégager des indicateurs sensibles à cet état. De précédentes études ont montré les effets néfastes et délétères du VP sur l'activité de conduite. Le manque clair de consensus quant à la catégorisation des différents états dégradés de l'attention ainsi que l'absence d'une liste de ces états et de leurs caractéristiques propres, a été problématique pour la conceptualisation des différents types de pensée et de la comparaison de leurs effets. Les définitions de l'inattention et de la distraction étant multiples et parfois contradictoires, la présente thèse a donc tenu, en premier lieu, à définir les sujets d'intérêt, en prenant en compte la localisation de l'attention des conducteurs : le conducteur est considéré en VP lorsque son attention s'est réorientée de la tâche de conduite vers des pensées et sentiments personnels auto-générés. Réorienter son attention de cette façon signifie que la tâche en cours, ici la conduite, n'est plus la cible attentionnelle du conducteur. Pourtant, compte tenu de la difficulté à traquer la focalisation attentionnelle du conducteur, un épisode de VP peut avoir été amorcé par un court épisode de distraction, tel qu'un élément de l'environnement proche aura détourné l'attention de la tâche principale de conduite. L'esprit du conducteur pourra ensuite avoir été focalisé sur cet élément pertinent pour lui, générant des pensées sur ce sujet et donc un épisode de VP. Cela explique la difficulté qu'ont les chercheurs et les instituts à harmoniser leurs définitions de ces concepts. Il est important de souligner que lorsque l'on parle et que l'on étudie le vagabondage de la pensée, l'attention de l'individu se doit d'être focalisée sur ses pensées personnelles. Aucun processus ni aucune action n'étant gratuits dans le cerveau, la création et le maintien des pensées de l'individu posséderaient un coût cognitif. Le VP générerait donc un phénomène de

double tâche, telle que peut l'être la distraction. Or, il se trouve que la distraction et l'inattention auraient des effets quantitativement comparables, mais qualitativement différents sur les conducteurs.

Clarifions les concepts d'inattention et distraction

Les résultats de la littérature, nous l'avons vu montrent que l'inattention et la distraction ont des points communs. Tout d'abord, au niveau attentionnel, ces deux états sont le résultat d'une réorientation de l'attention vers des éléments externes (distraction) ou internes (inattention) au conducteur. Ces deux états vont donc générer un risque augmenté d'être impliqué ou responsable d'un accident (Bakiri et al., 2013 ; Galera et al., 2012 ; Lagarde et al., 2004 ; Mosedale et al., 2004 ; Observatoire National Interministériel de la Sécurité Routière [ONISR], 2017). Pourtant, distraction et inattention à la conduite génère des comportements différents à l'origine de ces sur-risques. Pour rappel, la distraction génère des mouvements de tête et une attention visuelle en dehors de la scène routière (Liang, Reyes, et al., 2007). Les mécanismes cognitifs sous-jacents à ces états pourraient ainsi être différentes, ce qui générerait des conséquences délétères quantitativement équivalentes de ces états (Galera et al., 2012), mais pouvant différemment affecter les conducteurs (Robison & Unsworth, 2015).

Une des études de ce travail de thèse a montré que l'attention visuelle du conducteur, lorsque celui-ci est inattentif envers la conduite automobile et est donc focalisé sur ses pensées, est dirigée sur la route, mais que son exploration visuelle est réduite. Lorsque l'on étudie la qualité du traitement de l'information associée à ces deux états, il se trouve que l'on obtient également des points communs et des différences entre l'inattention et la distraction. Les analyses en potentiels évoqués ont montré que le vagabondage de la pensée a tendance à réduire l'amplitude des composantes N1 et P3 sans modifier la latence des pics associés (voir Article soumis à la revue *Neuroscience Letters*, le 12/09/2018). La distraction quant à elle génère les mêmes effets, c'est-à-dire qu'elle a tendance à réduire l'amplitude des composantes N1 et P3 (Bueno et al., 2012), mais tendrait à retarder la latence de la P3 (Demeter et al., 2016). En changeant de focus attentionnel lors d'épisodes de distraction ou d'inattention à la conduite, la mémoire de travail du conducteur serait donc chargée d'informations non pertinentes pour la bonne réalisation de la tâche principale. Cela pourrait expliquer à la fois la réduction d'amplitude de la composante P3 et l'augmentation des temps de réaction que l'on retrouve lorsque le conducteur se trouve dans l'un de ces deux états (Bueno et al., 2012 ; Yanko & Spalek, 2014). En outre, la diminution d'amplitude de la composante N1 visuelle lors d'épisodes de distractions pourrait venir du fait que le regard de l'individu ne se porte pas au bon endroit alors qu'une même diminution dans le cas d'un épisode de VP pourrait s'expliquer par une activité cérébrale différente. Il y aurait donc des points communs et des différences à la fois au niveau des mécanismes sous-jacents à ces deux états (réorientation de l'attention du conducteur de façon endogène ou exogène) et au niveau de

leurs conséquences sur les conducteurs (traitement de l'information superficiel et mouvement de la tête ou fixité dans le regard).

Ensuite, de précédentes études ont permis de différencier différents types d'états, afin de mieux rendre compte des possibles expériences vécues par les individus (Stawarczyk, Majerus, Maquet, et al., 2011). Dans la conceptualisation des états altérés de l'attention, quatre types d'états ont donc été distingués : être concentré sur la tâche principale, être distrait par des éléments externes, avoir des pensées parasites qui interfèrent avec la tâche et être dans un état de vagabondage de la pensée (voir Figure 7). Il se trouve que des correspondances entre le degré d'activité de certaines régions du réseau par défaut (DMN = Default Mode Network) et différents types d'états ont été mises en évidence. Ces résultats signifieraient que le DMN pourrait être divisé selon le degré d'activité de ses sous-composants, ce qui pourrait expliquer l'émergence de différents types de pensée et d'états. Plus spécifiquement, les régions centrales de ce réseau sous-tendraient la focalisation de l'attention des individus vers des sources internes et externes (Stawarczyk, Majerus, Maquet, et al., 2011). Au niveau de cette différence de focalisation attentionnelle vers des sources externes ou internes, la réorientation de l'attention vers des sources externes serait possible par les voies attentionnelles ascendantes ; contrairement à la réorientation de l'attention vers des sources internes au conducteur qui se ferait par les voies attentionnelles descendantes (Chun, Golomb, & Turk-Browne, 2011). Or il se trouve que les réseaux attentionnels responsables du traitement ascendant et descendant des informations sont différents. Le réseau attentionnel ventral est responsable des traitements attentionnels ascendants (guidés par les stimuli externes) alors que le réseau attentionnel dorsal est responsable des traitements attentionnels descendants (guidés par les buts de l'individu) (Corbetta & Shulman, 2002). Les réseaux cérébraux sous-tendant notre attention pourraient ainsi nous éclairer sur l'état dans lequel se trouve l'individu. Les résultats de la dernière étude en potentiels évoqués de cette thèse montrent d'ailleurs une activité différente dans les régions occipitales (traitement visuel de l'information) mais également dans de larges régions frontales, suggérant que le VP ne se contentent pas de perturber le traitement des informations sensorielles. L'activité des projections des sous-structures composant le DMN serait susceptible de révéler l'état dans lequel se trouve l'individu.

Pour rappel, l'activation du DMN d'un individu est souvent interprétée comme un épisode de vagabondage de la pensée ou, en tout cas, une déconnexion entre son attention et son environnement immédiat. Des études récentes viennent tempérer ces interprétations en montrant que le DMN, bien que souvent associé aux pensées hors-tâche, pourrait également soutenir la cognition couplée à l'environnement externe et donc certains types de tâche (Zhang, Savill, Margulies, Smallwood, & Jefferies, 2018). Les réseaux ventraux et dorsaux seraient quant à eux activés lorsque le conducteur a son attention focalisée sur l'environnement externe. Il pourrait être intéressant d'étudier la connectivité de ces réseaux pour mieux appréhender l'état

du conducteur. De plus, il serait possible que les réseaux cérébraux activés pendant un épisode de distraction soient les mêmes que lorsque le conducteur est focalisé sur la conduite. En effet, la distraction entraînerait un défaut de hiérarchisation des buts ; le conducteur étant concentré sur l'environnement proche, mais ne priorisant plus les tâches comme il le faudrait puisqu'il porterait son regard sur un élément sans lien avec la conduite. Cela le conduirait à observer et traiter des informations non pertinentes pour la conduite (un élément sur le bord de la chaussée qui attire son attention, par exemple) générant un risque augmenté d'accidents puisque son attention visuelle n'est pas exclusivement dédiée à l'activité de conduite, l'empêchant de mettre à jour sa représentation de la situation. Cela expliquerait également les résultats en potentiels évoqués obtenus lorsque le conducteur est distrait (Bueno et al., 2012; Demeter et al., 2016). La distraction ne serait donc pas dangereuse parce que des réseaux cérébraux particuliers seraient impliqués et gêneraient le traitement des informations importantes, mais bien parce que l'attention du conducteur ne serait pas focalisée sur le bon locus. C'est en chargeant la mémoire de travail de ces informations non pertinentes, que s'expliqueraient les diminutions d'amplitude des composantes N1 et P3 des potentiels évoqués traduisant la qualité des traitements sensoriel et cognitif de l'information lors d'épisodes de distraction.

La difficulté à tracer une frontière claire entre les concepts de distraction purement cognitive et de distraction liée à de la multi-activité au volant, rend encore plus difficile la comparaison de des effets négatifs de l'inattention et de la distraction. Il serait ainsi possible de, très grossièrement, faire des liens entre l'activation de certains réseaux et l'état possible dans lequel pourrait se trouver le conducteur (voir Tableau 1). Il aurait été intéressant de distinguer l'activité des réseaux attentionnels ventral et dorsal ainsi que celles des deux réseaux de contrôle, mais le manque de connaissance sur le sujet n'aurait mené qu'à des imprécisions supplémentaires. Nous avons préféré ici, nous en tenir à des hypothèses même grossières, afin de proposer une réflexion sur ces liens possibles entre activités de différents réseaux et existence d'états internes ayant des implications et des effets hétéroclites sur les conducteurs. Ainsi et par souci de clarté, les lignes bleutées du Tableau 1 sont celles pour lesquelles l'état actuel des connaissances sur le sujet nous permet d'avancer ces propos, qui se trouvent être en accord avec des études ayant montré les liens entre l'état désigné et l'activité des réseaux. Les lignes orangées sont en revanche des hypothèses, que de futures études pourront infirmer ou confirmer.

Tableau 1 : Liens entre activation de certains réseaux cérébraux et l'état interne potentiellement engendré. « X » signifie que le réseau est activé ; l'absence de « X » signifie que le réseau n'est pas activé.

État de l'individu / du conducteur	Réseaux attentionnels : VAN et DAN	Réseau par défaut : DMN	Réseaux de contrôle : FP et CO
Vagabondage de la pensée (Christoff et al., 2009)		X	
Vagabondage intentionnel (Golchert et al., 2017)		X	X
Attentif / Distract	X		X
Attentif, mais faiblesse au vagabondage	X		
Vagabondage de la pensée avec représentations mentales sensorielles	X	X	
Vagabondage de la pensée intentionnel avec représentations mentales sensorielles	X	X	X
Méditation (Mindfulness)			X

Nous l'avons dit, il est possible que les mêmes réseaux attentionnels soient activés pour des épisodes de distraction et lorsque le conducteur a son attention focalisée sur l'activité de conduite. Lorsque le conducteur est attentif, nous l'avons vu, il orienterait son attention délibérément sur l'activité de conduite, engageant les réseaux correspondants (Fronto-Parietal Control Network = FPCN et le Réseau de Contrôle Cingulo-Operculaire, RCCO). Si ces réseaux venaient à ne plus être engagés, le conducteur pourrait avoir une faiblesse au vagabondage de la pensée, c'est-à-dire qu'il pourrait être plus susceptibles de s'engager dans ses pensées. De plus, lorsque le conducteur se trouve dans un état de vagabondage de la pensée avec des représentations mentales visuelles ou auditives, il est possible qu'une activation conjointe du réseau par défaut et des réseaux responsables des traitements attentionnels proprement dits soient observés. Enfin, l'état méditatif de pleine conscience, état qui semble s'opposer au vagabondage de la pensée, pourrait n'impliquer que l'activation des réseaux de contrôle, voir l'activation du réseau attentionnel ventral lorsque l'individu se focalise sur ses sensations corporelles. Il ne s'agit pas ici d'affirmer, mais bien de proposer un début prudent de réflexion pour amorcer des pistes de recherches spécifiques concernant les correspondances entre les activations de certains réseaux cérébraux et les différents états du conducteur.

Vagabondage de la pensée et modèles de l'attention

Au vu des différentes conceptions de l'attention (l'attention permettrait de filtrer les distracteurs et serait un réservoir contenant des ressources limitées), effectuer une tâche additionnelle en plus de la conduite devrait laisser moins de ressources attentionnelles au conducteur. Le coût cognitif associé à la tâche de conduite et donc l'effort cognitif pour y répondre serait augmenté. De nombreuses études ont montré des patterns particuliers dans les données physiologiques et comportementales du VP dans toutes sortes de tâches. Les particularités de l'activité de conduite ne permettent pas de généraliser ces mesures et de les utiliser directement pour essayer d'attester la présence de VP. Par exemple, l'activité oculaire en conduite, dans diverses tâches cognitives ou en lecture n'est pas la même et essayer de détecter la présence de VP en conduite en utilisant les conclusions de l'activité oculaire du lecteur, n'aurait que trop peu de sens. La présente thèse avait ainsi pour visée, de mieux comprendre les signatures objectives spécifiques du VP en conduite.

Lors du vagabondage de la pensée en conduite automobile, le focus de notre attention se déplace de l'environnement de conduite vers nos pensées. Lorsque l'on place le vagabondage de la pensée dans les modèles présentant l'attention comme ayant un rôle de filtre précoce, il se trouve que le conducteur ayant focalisé son attention sur ses pensées, traitera moins profondément les informations provenant de la scène routière ; l'activité de conduite devenant la tâche secondaire. Cet effet de l'attention, nous l'avons vu dans l'état de l'art de cette thèse pourrait totalement ou en partie créer le phénomène de découplage perceptif. Les études récentes portant sur certains réseaux cérébraux lors du vagabondage de la pensée montrent que l'activité du réseau par défaut augmente (Christoff et al., 2009 ; Raichle et al., 2001). En parallèle, l'activité des cortex ayant la responsabilité de traiter les informations sensorielles diminue (Smallwood et al., 2008), augmentant le degré d'isolement des conducteurs lorsque ceux-ci portent leur attention sur leurs pensées plutôt que sur leur environnement proche. Les conducteurs seraient donc moins prompts à réagir, l'activité des zones concernées du cerveau n'étant pas optimale. Il n'est donc pas étonnant que les conducteurs réagissent moins rapidement à un événement lié à la scène de conduite lorsqu'ils pensent à leurs problèmes personnels ou à l'organisation de leurs fins de journées. En agissant comme n'importe quelle tâche additionnelle, le VP semble puiser dans le réservoir de ressources du conducteur (ou les réservoirs, selon le modèle).

Selon le modèle de Kahneman (1973), le VP et par extension toutes les pensées sans lien avec la tâche de conduite auraient le même impact : elles viendraient toutes siphonner de la même façon les ressources attentionnelles du conducteur. À l'inverse, la conception de l'attention comme étant un réservoir de ressources à multiples sections selon Wickens (2002), pourrait expliquer différents niveaux de dangerosité

associés au vagabondage. En effet, selon cette conception, le réservoir attentionnel serait compartimenté, il serait donc possible qu'en focalisant son attention sur ses pensées personnelles lors d'un trajet, l'on siphonne différemment un ou plusieurs compartiments attentionnels selon le contenu des pensées. Des pensées dont le contenu implique, par exemple, des représentations mentales visuelles pourraient venir absorber une partie des ressources visuelles du conducteur. La conduite étant principalement une activité visuelle, le niveau d'interférence de ce type de pensée avec le trajet en cours pourrait ainsi être plus élevé. La réorientation de l'attention dans ces cas-là pourrait être plus lente et plus difficile, ce qui pourrait expliquer que certains types de vagabondage et de pensée soient plus interférents et plus dangereux pour le conducteur. Le modèle de Wickens (2002) pourrait donc être particulièrement adapté pour étudier le VP en conduite et estimer l'impact que peuvent avoir des pensées impliquant des représentations mentales visuelles, sur le degré d'interférence avec l'activité de conduite.

Le modèle du réservoir attentionnel malléable de Young & Stanton (2002) proposant de voir la taille de la réserve attentionnel comme s'adaptant grossièrement à la demande de la tâche en cours, pourrait prendre un autre sens lorsque l'on étudie le vagabondage de la pensée. Ce modèle a été imaginé pour expliquer certains résultats expérimentaux contredisant les prévisions des modèles de Kahneman (1973) et de Wickens (2002). Ces modèles n'arrivant pas à rendre compte des performances diminuées des opérateurs lors de situations de sous-charge cognitive, l'adaptation du réservoir attentionnel était donc un bon compromis pour expliquer à la fois la baisse des performances lors d'une augmentation ou d'une diminution trop importante de la demande de la tâche. Mais dans le cas où un opérateur se trouve impliqué dans une tâche très peu coûteuse qui ne lui demandera qu'un investissement minime, comment savoir si les baisses de performance s'expliquent par la diminution de ses ressources disponibles dues à la diminution de son réservoir attentionnel ou par la présence de vagabondage de la pensée siphonnant une partie de ses ressources cognitives ? Nous l'avons vu, le VP tend à être plus présent lors des tâches monotones du quotidien, que l'individu peut effectuer de façon plus ou moins automatique (Killingsworth & Gilbert, 2010) expliquant également la prédominance des accidents sur les trajets connus. La mise en perspective de la présence du vagabondage de la pensée dans la quasi-totalité de nos actions quotidiennes pourrait apporter des éléments de réponses aux résultats obtenus lors des situations de sous-charge cognitives : les individus ne seraient pas forcément en sous-charge, mais plutôt perdu dans leurs pensées, occupés à résoudre leurs problèmes, à organiser leurs vies ou à rêvasser. La baisse des performances obtenues lors de ces situations de sous-charge pourrait ne pas correspondre à la nécessité de recruter des ressources cognitives, mais bien de les réorienter : l'individu en VP aurait son attention focalisée sur ses pensées. Il lui faudrait ainsi réorienter son attention et ses ressources ce qui, nous l'avons vu, aurait un coût et ne pourrait être immédiat. Cette possibilité aurait également le mérite de ne pas faire « disparaître » artificiellement des ressources lors de la contraction du réservoir, mais d'imaginer que ces ressources sont consommées par les pensées des individus. Pour trancher

sur cette question, il semblerait scientifiquement pertinent et intéressant de s'intéresser à la nature même de ce réservoir et des ressources, cognitives ou attentionnelles, selon le nom qu'on leur donne. Une réflexion sur ce sujet est abordée dans la partie portant sur les Perspectives de cette thèse.

Enfin, selon certaines conceptions du fonctionnement attentionnel, la mobilisation et l'orientation intentionnelles des ressources attentionnelles ne seraient ni instantanées ni gratuites (de Waard, 1996). Cela signifie que déplacer, à dessein, son focus attentionnel nécessiterait un temps plus ou moins court et aurait un coût en terme de ressources. Le conducteur ayant son attention orientée sur la planification de sa fin de soirée et sur ce qu'il pense préparer pour le dîner, n'aura d'autre choix en cas d'imprévu (un enfant traverse subitement la route, par exemple), de revenir à sa tâche de conduite en changeant délibérément la cible de son attention afin de réagir le plus vite possible et tenter d'éviter la collision. Le réseau attentionnel ventral sera plus activé et notre attention devrait se réorienter de nos pensées vers l'environnement proche afin d'intégrer, par la voie ascendante, les informations de la scène de conduite. Cette bascule attentionnelle aurait un coût qu'il serait possible d'appréhender grâce à la collecte des données cardiaques. Ce coût cognitif, potentiellement détectable à travers la Variation du Rythme Cardiaque (VaRC) pourrait être plus élevé lorsque le conducteur est perdu dans ses pensées.

Il se trouve que la VaRC apparaît sensible à l'effort cognitif en conduite. Dans la seconde étude de cette thèse, le pattern cardiaque de VaRC a été retrouvé après que le participant déclare ses pensées suggérant un coût cognitif nécessaire pour que le conducteur réoriente son attention vers la conduite. Dans la troisième étude de cette thèse, le pattern de VaRC a été retrouvé après que le conducteur ait eu à lever le pied de la pédale d'accélération suite au freinage de la moto, suggérant de la même façon, un effort cognitif pour faire cette bascule attentionnelle entre les pensées du conducteur et son environnement proche. L'orientation de l'attention du conducteur serait donc coûteuse en terme de ressources attentionnelles, ce qui est problématique pour des événements non soudains (voir les Résultats Cardiaques de l'étude 3). A fortiori, le risque d'accident pourrait être encore plus élevé pour des événements non soudains et si la demande cognitive de la tâche de conduite est faible ; la capacité du réservoir attentionnel du conducteur s'étant adaptée et générant une quantité de ressources plus faible (Young & Stanton, 2002). Le vagabondage de la pensée, en filtrant les informations provenant de l'environnement proche (Broadbent, 1958 ; Treisman, 1969), en générant une activité de certains réseaux non nécessaires à la bonne gestion de l'activité de conduite (Mason et al., 2007) et en puisant dans les ressources attentionnelles du conducteur (Kahneman, 1973 ; Wickens, 2002), vient fortement parasiter le conducteur dans sa capacité à collecter et traiter les informations pertinentes pour avoir une conscience de la situation suffisante à chaque instant. Etudier, plus en avant les liens entre coût cognitif et inattention pourrait permettre une meilleure compréhension des mécanismes de défaillance sous-jacents au vagabondage de la pensée.

Indicateurs objectifs de l'inattention en conduite

Mesure cardiaque

Les liens entre coût cognitif et vagabondage de la pensée n'étant que trop peu discutés dans la littérature, la première partie de cette thèse s'est employée à explorer la sensibilité d'un indicateur dérivé du rythme cardiaque pour mesurer l'effort cognitif du conducteur. Cette étude menée en 2015 a permis de montrer que non seulement la variation du rythme cardiaque (VaRC) est bien sensible à l'effort cognitif en conduite, mais que cette VaRC pourrait également être un indicateur quantitatif et représentatif de l'intensité de l'effort investi par les participants lors de diverses tâches cognitives. La VaRC est capable de discriminer une condition d'effort d'une condition de repos lorsque les données cardiaques sont moyennées sur un nombre suffisant d'évènements. Il aurait été possible d'aller encore plus loin dans les interprétations et les conclusions de cette étude en prenant en compte les capacités des individus en calcul mental. Mettre en correspondance les élévations du RC des participants avec leurs capacités en calcul mental, leurs niveaux de motivation, de fatigue ou d'engagement le jour de l'expérimentation, permettrait de mieux comprendre comment l'effort cognitif module l'activité cardiaque. La VaRC reflétant l'effort investi dans une tâche cognitive, un fort niveau en calcul mental, d'engagement et un faible niveau de fatigue serait susceptible de réduire l'effort à investir pour répondre à la tâche cognitive et pourrait entraîner une élévation moins importante de la VaRC.

La VaRC a donc fait ses preuves sur sa capacité à révéler, par le moyennage sur un certain nombre d'évènements, l'effort cognitif de l'individu, qu'il soit au volant ou non. Rappelons-le, la VaRC se calcule en étudiant l'évolution du rythme cardiaque dans les secondes suivant un évènement. Ainsi, de par sa méthode de calcul, la VaRC ne peut montrer un effort cognitif que par rapport à un évènement particulier qui aurait donc un début facilement identifiable : calcul mental, début de réflexion, etc. Or, il se trouve que la présence de VP fluctue fortement au cours du temps ou d'un trajet en voiture. Il est donc difficile, avec la méthodologie employée ici, de penser pouvoir détecter le VP grâce à l'effort cognitif généré et visible dans les données cardiaques. Pourtant, il a été possible d'observer une augmentation du RC et donc de la VaRC lors de la bascule de l'attention du conducteur de ses pensées vers l'activité de conduite. Après avoir pris conscience que son attention n'était plus focalisée sur la conduite, le conducteur déclarait ses pensées vagabondes et réorientait son attention vers son environnement proche. La déclaration des pensées vagabondes servant de marqueur, il a été possible d'examiner l'évolution du rythme cardiaque dans les secondes suivantes. Il est apparu une augmentation du rythme cardiaque proche de celle obtenue lorsqu'un effort cognitif était réalisé, corroborant l'idée selon laquelle changer son focus attentionnel ne serait ni

instantané ni gratuit en terme de ressources attentionnelles (de Waard, 1996). Une autre interprétation à ce résultat est possible (léger mouvement du conducteur pouvant augmenter le RC) et d'autres études seraient nécessaires pour corroborer ou infirmer cette interprétation. Pourtant les résultats de la troisième étude montrent que lorsque le conducteur avait à effectuer un mouvement, même léger (lever le pied de l'accélérateur), l'augmentation du RC en réponse à un mouvement physique d'un individu (Kahle et al., 1981) était plus tardive que pour un effort cognitif. Des études plus poussées comparant l'impact de tâches physiques et cognitives de différentes intensités sur le RC pourraient permettre de tirer des conclusions plus solides sur ces questions.

Les résultats issus des données cardiaques de la présente thèse montrent que lorsque le conducteur porte son attention sur ses pensées, ses capacités à réagir promptement sont réduites. Il serait ainsi possible, qu'en cas de danger soudain nécessitant une action rapide du conducteur, l'effort cognitif à fournir pour que celui-ci bascule à temps son attention vers la conduite et effectue une opération d'urgence, soit trop important. Lors du VP particulièrement lorsque celui-ci est profond et potentiellement gênant, le coût cognitif pour revenir rapidement à la tâche de conduite pourrait ne pas pouvoir être fourni par le conducteur. La profondeur des épisodes de VP pourrait moduler le temps nécessaire à l'allocation des ressources attentionnelles qui pourraient elles-mêmes être, dans ce cas, présentes en quantité inférieure. Le conducteur aurait donc moins de temps pour réagir et moins de ressources à disposition ce qui pourrait générer des erreurs et des défaillances, qui pourrait participer à la survenue d'un accident.

Les données cardiaques ne se trouvent pas être les seules susceptibles de dévoiler un épisode de vagabondage de la pensée du conducteur. Une étude de 2011 avait déjà montré que l'exploration visuelle des conducteurs était réduite lors du vagabondage. L'étude des mouvements oculaires et de leurs dispersions apparaissait pertinente et a permis de mettre au point pour la seconde étude de ce travail de thèse, un indicateur d'exploration visuelle en temps réel.

Mesures oculométriques

La fixité du regard a été créée pour la présente thèse afin d'obtenir une indication du degré d'exploration visuelle du conducteur¹⁵. La méthodologie expérimentale de l'auto-déclaration a permis de segmenter dans les données oculométriques les moments où l'attention du conducteur était focalisée sur ses pensées et les moments où celle-ci était focalisée sur l'activité de conduite. Il s'avère que la fixité du regard moyenne

¹⁵ Pour rappel, le regard du conducteur était considéré comme étant fixe si au moins 90 % des positions absolues du regard du conducteur sur une seconde étaient contenues dans une surface de 2 ° d'angle visuel. L'oculomètre fournissant un échantillonnage des données à 30 Hz, la fixité du regard était présente si au moins 27 des 29 prochaines valeurs absolues de la position du regard (correspondant à une seconde de données) fournies par l'oculomètre étaient contenues dans une surface inférieure ou égale à 2 ° d'angle visuel par rapport à la première fixation

augmente lors du VP et revient à un niveau de base lorsque l'attention du conducteur se réoriente vers l'activité de conduite.

La fixité du regard étant sensible au VP proprement dit, c'est-à-dire aux pensées inconscientes, non intentionnelles sans rapport avec l'activité de conduite, il semblait intéressant de voir si la fixité du regard se révélait sensible à un autre type de pensées intentionnelles et servant à la résolution de problème. Les résultats de cette seconde expérimentation ont montré que l'activité oculaire des conducteurs dont l'attention est focalisée sur des réflexions n'a pas montré une augmentation de la fixité du regard. La fixité du regard ne serait donc pas sensible à toutes les pensées sans lien avec l'activité de conduite. L'état de vagabondage de la pensée, tel qu'il est défini ici, semble être particulièrement interférent avec l'exploration visuelle des conducteurs.

À terme, une étude plus approfondie de la fixité du regard du conducteur pourrait permettre de discriminer différents niveaux d'interférence du VP avec l'activité de conduite. Cela pourrait permettre de mieux comprendre les moments de décrochage attentionnel particulièrement dangereux pour le conducteur, notamment lorsque ce dernier n'explore plus (ou presque plus) l'environnement. Ce mécanisme de fixité du regard pourrait expliquer la défaillance d'exploration visuelle pouvant participer à la survenue d'accidents de la route. De plus, en tant qu'indicateur sensible à la présence du VP, la fixité du regard pourrait être utilisée comme un indicateur d'état du conducteur. De plus, en affinant l'indicateur de fixité créé pour la seconde étude, il pourrait être possible, en étudiant plus précisément les micro-saccades par exemple, d'obtenir un indicateur continu et non plus binaire de la présence de VP. Des patterns particuliers dans les micro-saccades lors de la fixité pourraient indiquer un niveau différent d'attention envers la conduite.

La concordance entre la présence de fixité du regard et du pattern d'effort cognitif retrouvé lors de l'étude deux, suggère que le découplage perceptif pourrait se manifester par un regard fixe et engendré un effort cognitif lors de la bascule de l'attention des pensées de l'individu vers la scène de conduite. Ces deux éléments étant absents pour des pensées intentionnelles, ces résultats laissent à penser que le VP serait plus interférents avec l'activité de conduite et pourraient ainsi être à l'origine d'une part plus élevée des accidents que les pensées intentionnelles.

Mesures cérébrales

La dernière expérimentation de la présente thèse avait pour objectif principal d'étudier la qualité du traitement de l'information visuelle en conduite automobile lors du vagabondage de la pensée. En adéquation avec les résultats de la littérature dans diverses autres tâches de la vie quotidienne, le vagabondage de la pensée perturbe le traitement de l'information visuelle en conduite automobile. En effet,

des réductions d'amplitude des composantes N1 et P3 des potentiels évoqués cérébraux signifieraient que les traitements sensoriel et cognitif de l'information visuelle ont été plus superficiels lors du VP. Le conducteur subirait à la fois le phénomène de découplage perceptif lors duquel il se trouve isolé de son environnement proche et le partage obligatoire de ses ressources attentionnelles entre la tâche de conduite et ses pensées. La consommation de ressources attentionnelles pourrait être nécessaire pour alimenter les pensées du conducteur. Ne pouvant traiter plus d'une source d'information à la fois, notre attention donne, lors du VP, la priorité à nos pensées qui deviennent le focus de notre attention. Le traitement des informations provenant de l'environnement externe serait alors plus superficiel, ce qui se traduirait par une activité réduite des cortex sensoriels responsables des traitements des sources externes, soutenue par les réseaux cérébraux dorsaux et ventraux (Smallwood et al., 2008).

Ce phénomène de découplage perceptif pourrait s'expliquer par une quantité insuffisante de ressources attentionnelles chez le conducteur pour traiter correctement les informations de l'environnement de conduite et rester focalisé sur ses pensées. Ce phénomène de découplage perceptif pourrait également prendre sens si sa visée est de préserver le focus attentionnel des distracteurs en inhibant le traitement des informations non pertinentes (Smallwood & Schooler, 2015). Pour le conducteur perdu dans ses pensées, la préservation du focus attentionnel correspond à ses pensées et les distracteurs ainsi que les informations non pertinentes correspondraient à l'ensemble des informations de conduite. Cela pourrait, tout comme pour l'état de distraction, s'apparenter à un défaut de hiérarchie des buts, c'est-à-dire à une erreur du conducteur dans la priorisation du traitement des informations : les informations les plus importantes devant théoriquement être celles provenant de l'environnement de conduite. Pourtant, sans informations nouvelles à traiter (lors d'un trajet connu avec peu de trafic par exemple) et bien que les risques liés à l'inattention sur les trajets connus soient établis, nous pourrions considérer qu'il ne s'agit pas d'un défaut de hiérarchie des buts mais d'une utilisation efficace des ressources disponibles en l'absence de demande cognitive.

En puisant dans les ressources attentionnelles du conducteur, le VP générerait une situation de double tâche lors de laquelle les ressources cognitives de ce dernier seront partagées entre ses pensées et la tâche de conduite. Ceci expliquerait la réduction d'amplitude de la composante P3 des potentiels évoqués cérébraux traduisant une quantité de ressources disponibles amoindries et un traitement plus superficiel de l'information. Ces interprétations sont corroborées par l'augmentation des temps de réaction lors du VP qui ont augmenté, en moyenne, de près de 10% lorsque les conducteurs étaient concentrés sur leurs pensées (voir la Synthèse des résultats de l'étude 3). Le VP réduirait ainsi la capacité des conducteurs à réagir promptement à des événements non soudains. Il serait intéressant d'investiguer les effets du VP lors d'évènements inattendus sur le traitement de l'information. La troisième étude de cette thèse devait consentir aux contraintes liées à la technique des potentiels évoqués, nécessitant notamment de répéter la

même stimulation afin de moyenner les résultats pour augmenter le ratio signal/bruit. Ces répétitions génèrent une tâche lors de laquelle le freinage de la moto était prévu et prédictible. Lors d'un trajet connu et donc peu coûteux en terme de ressources attentionnelles, peu de ressources seraient disponibles, que ce soit parce que le réservoir attentionnel des conducteurs serait « contracté » (Young & Stanton, 2002) ou que les conducteurs utilisent leurs ressources pour alimenter leurs pensées. La survenue d'un événement soudain et unique, pourrait être particulièrement problématique et venir fortement perturber le conducteur, générant une situation intense et accidentogène. Ainsi, une expérimentation étudiant l'impact d'évènements non prévisibles et soudains sur les temps de réaction et la qualité du traitement de l'information du conducteur, pourrait mieux rendre compte de la problématique du VP en situation écologique.

En résumé, les résultats issus du présent travail de thèse ont montré différents effets du vagabondage de la pensée sur le conducteur, son comportement et ses variables physiologiques. Le conducteur ayant son attention orientée sur ses pensées personnelles, aurait une activité cérébrale différente de lorsqu'il est focalisé sur la conduite. Cela perturberait le bon traitement des informations provenant de la scène routière et puiserait dans ses ressources, ce qui empêcherait ce dernier d'être efficace au volant et d'avoir une bonne représentation du monde qui l'entoure. De plus, le VP apparaît particulièrement interférent avec l'activité oculaire des conducteurs. La réduction de l'exploration visuelle lors du VP est particulièrement problématique puisque la conduite est avant tout une activité visuelle, lors de laquelle la bonne collecte et le bon traitement des informations sont un des meilleurs prédicteurs d'un trajet en sécurité (Recarte & Nunes, 2003). Ainsi, en cas de danger soudain nécessitant une action rapide, l'effort cognitif à fournir par le conducteur qui pense à ses soucis personnels ou qui planifie sa journée pourrait être trop important ; il n'aurait pas le temps de chercher, collecter et traiter les informations ce qui l'empêcherait de réagir à temps ou conduirait à des erreurs de jugement, pouvant expliquer une partie du sur-risque associé au VP en conduite. De plus, différents types de pensée pourraient ne pas être aussi interférents les uns que les autres avec l'activité de conduite. Par exemple, les pensées intentionnelles n'ayant pas le même niveau de conscience ni les mêmes caractéristiques que les pensées non intentionnelles n'auraient pas le même impact sur les conducteurs notamment sur la gestion de la vitesse de leur véhicule ou sur la fixité de leurs regards. La Figure 23 met en évidence le degré de dangerosité potentiel de certains types de pensée selon les résultats obtenus lors des différentes études menées pendant cette thèse. Les résultats des analyses en potentiels évoqués montrant que les pensées négatives et orientées vers le passé pourraient être les plus à même de perturber le conducteur. Lorsque le conducteur est focalisé sur ces types de pensée, il pourrait avoir besoin de mobiliser plus de ressources (augmentation de l'amplitude de la P3) pour un temps de réaction équivalent. Les pensées dont le contenu est orienté vers le futur, en ne perturbant que la latence de la composante N1, pourraient avoir un léger effet distracteur sur les conducteurs et augmenter l'occurrence d'accidents. À l'inverse, les pensées intentionnelles ou dont le contenu est positif, neutre ou orienté vers le présent

apparaissent, selon les résultats obtenus lors du présent travail de thèse, être les moins interférentes avec l'activité de conduite. Pour confirmer ces inférences et évaluer l'impact de différents niveaux de conscience des pensées ou de l'impact des pensées interférentes, d'autres études seraient nécessaires.

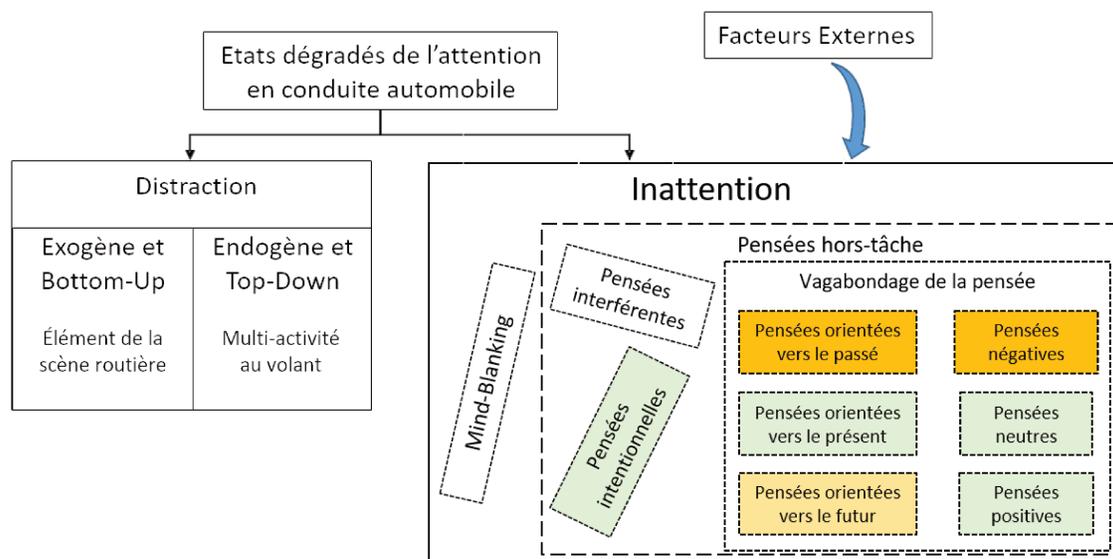


Figure 23 : Mise à jour de la Figure 9 entre différents états dégradés de l'attention en incluant un code couleur selon la dangerosité des pensées estimées lors des expérimentations de cette thèse : orange foncé = pensées les plus susceptibles d'interférer avec l'activité de conduite ; vert = pensées les plus susceptibles de ne pas perturber l'activité de conduite

Pour mieux comprendre ces résultats et les résultats des études à venir sur ce sujet, il pourrait être prometteur d'évaluer comment chaque type de pensée vient perturber le conducteur en puisant différemment dans son stock de ressources afin d'évaluer leur degré d'interférence avec l'activité de conduite. En continuant à affiner la liste d'indicateurs sensibles à cet état, ce travail s'inscrit dans une entreprise plus vaste de meilleure compréhension des liens entre activité cérébrale, consommation de ressources, signatures psychophysiologiques et impact sur le comportement du conducteur. Mieux comprendre ces liens pourrait nous éclairer quant aux facteurs susceptibles de mieux expliquer la dangerosité de certains types d'inattention. La mise en lumière d'autres indicateurs sensibles au VP nous permettrait de révéler la présence de cet état lorsqu'il est dangereux pour le conducteur et donc générateur d'accidents, ce qui permettrait de limiter les coûts humains, sociétaux et économiques engendrés.

Perspectives

Les interprétations et conclusions émises dans la partie discussion de cette thèse permettent d'envisager différentes applications à ce travail de thèse. Dans cette partie, seront présentées différentes possibilités d'études afin de prolonger la recherche d'indices objectifs d'états internes pour mieux comprendre ces états en conduite et en réduire les effets négatifs. Tout d'abord, nous commencerons par recenser les études et travaux interdisciplinaires qui n'ont pas pu être réalisés lors de cette thèse et proposerons ensuite des applications possibles au présent travail de thèse.

Travail non effectué

Le présent travail de thèse ne pouvait balayer l'ensemble de la thématique et des problématiques associées au Vagabondage de la Pensée (VP) en conduite. La stratégie mise en place a conduit à des choix quant aux facteurs pouvant potentiellement expliquer des niveaux d'interférences différents du VP avec l'activité de conduite et ainsi inférer différents niveaux de risques. Les expérimentations menées lors de cette thèse ont cherché à mettre en évidence des signatures comportementales et physiologiques du VP et à mieux comprendre l'impact de certains types de pensée et du contenu de ces pensées sur la dégradation des performances de conduite et la modulation de ces signatures. Ainsi, nous nous sommes intéressés à l'effet de l'intentionnalité des pensées (étude 2) ainsi qu'au contenu de celles-ci notamment en évaluant l'impact de l'orientation temporelle et de la valence émotionnelle des pensées (étude 3). Mais d'autres facteurs n'ont pas pu être explorés. Le degré de conscience du conducteur lorsqu'il focalise son attention sur ses pensées pourrait être un facteur judicieux à prendre en compte dans l'étude portant sur les effets néfastes du VP en conduite automobile.

Étude des états de conscience

Tout d'abord, il est important de ne pas confondre intentionnalité et conscience qui sont des concepts proches, mais dont la disjonction est importante. Il semblerait que des pensées intentionnelles soient conscientes, mais que des pensées conscientes pourraient ne pas être intentionnelles. Les futures recherches portant sur le sujet devront donc avant tout faire un travail important de caractérisation et de définition des facteurs et des liens qui peuvent exister entre eux afin de mieux démêler leurs effets propres. Afin d'étudier l'impact du facteur conscience sur la dangerosité du vagabondage de la pensée, la combinaison de la

méthode de l'auto-déclaration et du probe-caught (voir la partie portant sur les Mesures subjectives) apparaît comme une solution séduisante. La méthode de l'auto-déclaration ne permet de renseigner que les épisodes de VP qui deviennent conscients dans l'esprit du conducteur. Certains épisodes peuvent être inconscients pendant un temps plus ou moins important et atteindre un niveau de conscience suffisant pour pouvoir ensuite être verbalisé par le conducteur. La méthode du probe-caught repose sur le fait de demander de façon intermittente, la focalisation attentionnelle du conducteur. De cette façon, il est possible de capter le VP encore inconscient du conducteur, sans pouvoir savoir si celui-ci aurait pu, par la suite, se rendre compte que son attention s'est éloignée de l'activité de conduite. Cette méthode permet donc de capter tous les types de vagabondage.

En étudiant les différences dans les signatures associées aux épisodes de VP par ces deux méthodologies et en estimant les parts de variance commune et différente, il semble possible de mieux comprendre l'impact de différents niveaux de conscience des pensées sans rapport avec l'activité de conduite sur le conducteur. Une telle étude pourrait également donner des informations précieuses quant à la capacité des participants à décrire et renseigner leurs expériences conscientes (Schooler et al., 2011). Il semblerait que plus l'épisode de VP reste à un niveau de conscience insuffisamment élevé pour être rapporté par les conducteurs, plus ces derniers estiment que cet épisode a eu un impact négatif sur leurs performances de conduite (Berthié et al., 2015). L'exploration du facteur conscience pourrait également permettre de mieux décrire les régulations et les stratégies mises en place par les conducteurs lorsqu'ils ont conscience qu'ils ne sont pas pleinement focalisés sur l'activité de conduite.

Analyser différemment les données électroencéphalographiques

D'autres types d'analyses sur les données électroencéphalographiques pourraient être menées afin d'avoir une vue plus globale de l'activité cérébrale lors du VP. Les analyses menées lors du présent travail de thèse ne se sont focalisées que sur l'évolution de l'activité cérébrale suite à la présentation d'un stimulus cible (le feu arrière de la moto). Il serait intéressant d'étudier l'activité du cerveau non plus par rapport à un événement particulier, mais de façon plus globale, par des analyses fréquentielles. Plusieurs gammes de fréquence ont été décrites, notamment les ondes alpha dont les fréquences sont comprises entre 8.5 et 12 Hz, les ondes bêta (généralement entre 12 et 45 Hz), les ondes delta (jusqu'à 4 Hz) et les ondes thêta (généralement entre 4.5 et 8 Hz). Chacune de ces gammes de fréquences possède des caractéristiques et des moments d'apparition qui lui sont propres et que nous ne détaillerons pas ici. Les ondes alpha pourraient avoir un intérêt particulier pour l'étude du vagabondage. En effet, ce type d'onde apparaîtrait lorsque l'individu a les yeux fermés, qu'il manque de sommeil ou qu'il vit un épisode de micro-endormissement (Eoh, Chung, & Kim, 2005). De plus, une étude en aviation a constaté une diminution de la réinitialisation

de phase des neurones dans les bandes alpha et bêta (10-17 Hz) environ 400 ms après l'arrivée d'un stimulus. Cette diminution s'accompagnait d'une réduction de l'amplitude de la P300 pendant les épisodes de surdité attentionnelle (Giraudet, St-Louis, Scannella, & Causse, 2015). L'analyse des données en potentiels évoqués pourrait ainsi bénéficier de l'analyse complémentaire de décomposition des fréquences de l'activité brute du cerveau. Une étude récente sur simulateur de conduite a montré qu'une analyse EEG en termes de gammes de fréquences révèle une différence dans les bandes alpha (ici, 8-9 Hz) lors du vagabondage de la pensée (Baldwin et al., 2017). Il y aurait donc un intérêt à étudier plus précisément ces gammes de fréquences, notamment les bandes alpha qui pourraient refléter le désengagement de l'attention visuelle loin de la perception. De plus, il semblerait que les caractéristiques électrophysiologiques des oscillations dans cette gamme de fréquences pourraient varier selon l'état de l'individu en reflétant différents phénomènes cérébraux (Cantero, Atienza, & Salas, 2002). Ainsi, étudier ensemble, le VP, la somnolence et les micro-endormissements, permettrait d'identifier des signatures particulières de ces états dans la bande alpha de l'activité EEG et investiguer la possibilité qu'une augmentation de la puissance spectrale dans la bande alpha puisse refléter le désengagement de l'attention loin de la perception et potentiellement un début d'épisode de VP.

Quantification de la sensibilité et spécificité de la VaRC et de la fixité du regard

Lors de ce travail de thèse, nous avons de nombreuses fois évoqué l'importance d'obtenir des mesures sensibles et spécifiques de l'état du conducteur. L'objectif du travail proposé lors du concours international de Valeo était d'améliorer, qualitativement, la sensibilité de la VaRC en supprimant l'influence de la respiration des données cardiaques. Pourtant nous n'avons pas évalué la sensibilité et la spécificité de la fixité du regard et de la variation du rythme cardiaque reflétant respectivement le VP et l'effort cognitif.

Dans l'article soumis, accepté et publié dans « Le travail humain », une première démarche en ce sens avait été proposée : les courbes de VaRC pour les conditions d'écoute simple et de comptage avaient été examinées afin d'évaluer la proportion de courbes, moyennées pour chacun des participants, qui correspondait aux attentes (augmentation franche de la VaRC lors d'un effort cognitif et diminution simple lors de la condition d'écoute). Il s'avère que la moitié des participants (9 sur 18) voyaient leurs courbes de VaRC pour les conditions d'écoute simple et de comptage être en adéquation avec les hypothèses émises. Pour sept participants, une des courbes de VaRC était en adéquation avec nos hypothèses pour la condition d'écoute ou pour celle de comptage, l'autre ne l'étant pas. Les courbes de VaRC des deux participants restants étaient en inadéquation avec nos hypothèses pour les deux conditions. Cette première estimation de la sensibilité de la VaRC par individu a montré qu'en moyennant les données cardiaques sur moins de 40 évènements, environ 70 % des courbes de VaRC se sont révélées sensibles à l'effort cognitif du conducteur.

Mais pour évaluer la réelle sensibilité de la VaRC à l'effort cognitif, il faudrait aller plus loin en calculant la sensibilité de cet indice pour chacun des événements, c'est-à-dire à chaque fois qu'un stimulus était proposé pour les conditions de comptage et d'écoute simple. La prise en compte des données déclarées par les participants quant à leur degré d'engagement ou leur niveau de fatigue (couplage des données objectives et subjectives) permettrait encore d'affiner la VaRC en rejetant les événements lors desquels un effort cognitif était demandé sans qu'il n'ait été consenti par l'individu.

Tableau 2 : Calcul de la sensibilité et de la spécificité d'un algorithme selon la présence/absence de l'état d'intérêt et le diagnostic de l'algorithme (positif / négatif) ; VP = Vrai Positif ; FP = Faux Positif ; FN = Faux Négatif ; VN = Vrai Négatif

	Présence de l'état	Absence de l'état
Positif	A (VP)	B (FP)
Négatif	C (FN)	D (VN)
	Sensibilité : $A / (A+C)$	Spécificité : $D / (D+B)$

Un point très important est à souligner lorsque des paramètres objectifs sont recherchés à partir des signaux physiologiques pour caractériser la présence d'un état interne. La prise en compte de la seule sensibilité de ces paramètres pour cet état n'est pas suffisante. La dilatation pupillaire, qui ne sera pas utilisée dans la présente thèse, mais qui illustre parfaitement le fait que la seule sensibilité d'un indicateur ne soit pas suffisante pour caractériser la présence d'un état interne, se trouve être sensible à la lumière, à la charge mentale et même au stress (Sirois & Brisson, 2014). Ainsi, une augmentation du diamètre pupillaire ne veut pas forcément dire augmentation de la charge mentale, mais pourrait provenir d'une diminution de la luminance dans la scène routière ou d'une augmentation du niveau de stress du conducteur. La sensibilité d'un indicateur pour un certain état est importante, mais il faut se rappeler que la spécificité de l'indicateur en question pour cet état est tout aussi importante.

Le calcul complémentaire de la spécificité de la VaRC en estimant le nombre de fois où la composante ECR2 (composante spécifique à l'effort cognitif) apparaît dans les données cardiaques en l'absence d'effort cognitif mènerait à estimer le nombre de faux positifs d'un algorithme qui chercherait à détecter l'accélération cardiaque susceptible de révéler un effort cognitif. La quantification de la sensibilité et la spécificité de la VaRC permettraient ainsi d'appréhender l'efficacité de cet indice à renseigner l'effort cognitif en temps réel. Ensuite, les données subjectives renseignant le degré d'implication, de fatigue et de

motivation des individus ainsi que leurs niveaux en calcul mental manquent cruellement dans l'étude 1 de ce travail. La collecte de ce type de données aurait permis, peut-être, de mieux comprendre pourquoi certaines courbes de VaRC n'étaient pas en adéquation avec nos hypothèses. Un désengagement de l'individu à cause de capacités insuffisantes en calcul mental pour réaliser la tâche, expliquerait que la VaRC de cet individu n'ait pas augmenté dans la condition d'effort (puisque'il n'y aurait pas eu d'effort cognitif). De futures études pourraient ainsi s'essayer à collecter ces différents types de mesure pour vérifier la mise en correspondance des augmentations de la VaRC avec différents états et capacités des individus. Cette mise en correspondance des variations intra-individuelles avec les fluctuations d'élévations de la VaRC pour une même tâche cognitive, permettrait d'aller plus loin quant à la surveillance de la courbe de charge mentale du conducteur en montrant que la VaRC permettrait de distinguer différents niveaux de charge, chez un même individu selon son état et ses ressources. En conduite automobile, dans l'objectif de révéler les états internes du conducteur, un tel indicateur pourrait s'avérer particulièrement précieux.

En ce qui concerne la fixité du regard, la quantification de la sensibilité et la spécificité n'a pas non plus été effectuée lors du présent travail de thèse. De la même façon que ce qui pourrait être fait avec la VaRC, estimer la proportion de fois où la fixité du regard, par une analyse en fenêtre glissante, est détectée par l'algorithme lorsque le conducteur porte son attention sur ses pensées, permettrait de quantifier la sensibilité de cet indicateur. En outre, le calcul de la spécificité de la fixité permettrait de quantifier la capacité de la fixité du regard à ne révéler que le VP et pas d'autres états. Il est important de rappeler que les seuils ayant servi à transformer la position du regard du conducteur en indicateur de fixité ont été choisis par rapport à la distribution des données visuelles des conducteurs et pourraient ainsi être adaptés selon la nature de l'activité de conduite. Dans le cadre d'une conduite hors agglomération avec très peu de trafic, le regard était considéré comme fixe si au moins 90 % des positions absolues du regard du conducteur sur une seconde étaient contenues dans une surface de 2° d'angle visuel. L'exploration visuelle en centre-ville ou sur l'autoroute n'étant pas la même que lors d'un trajet hors agglomération, l'actualisation des valeurs seuils permettrait de mieux discriminer l'état de VP selon le type de route, le nombre d'automobilistes présents ou même selon le fait qu'il s'agisse d'un trajet connu ou non. La mise en correspondance des données GPS et des données du véhicule avec les données oculométriques pourraient ainsi apporter des informations quant aux besoins d'exploration visuelle du conducteur selon sa vitesse, le type et la portion de route empruntée et ainsi mieux déceler à travers les données oculométriques, les phases de décrochage attentionnel.

Ainsi, coupler des données de différentes sources pourrait également revêtir une importance première pour la quantification de la sensibilité et de la spécificité des indicateurs. En mettant en correspondance les données subjectives avec les données objectives (comportementale et physiologique), il serait possible d'exclure les événements lors desquels le conducteur s'est désengagé de la tâche ou lorsque la bonne

réalisation de la tâche à échouer. La discrimination des patterns d'erreurs pourrait également être réalisée. Ainsi, le calcul de la sensibilité et de la spécificité des indicateurs serait plus précis et permettrait de mieux rendre compte de la précision et de l'utilisabilité, dans un algorithme de détection, des mesures présentées dans ce travail de thèse. La VaRC en rendant compte de l'effort cognitif des conducteurs et la fixité du regard, de la présence de VP en conduite, donneraient des indications sur la gestion des ressources cognitives des conducteurs. Mais ne serait-il pas bénéfique d'essayer de mieux comprendre ce que sont les ressources, comment elles sont orientées, renouvelées et consommées ? Rechercher des indices plus directs de la disponibilité des ressources pourrait venir compléter les connaissances déjà acquises quant aux indices plus indirects de leur présence, absence et consommation ?

Applications possibles

Les parties suivantes porteront sur les applications possibles au présent travail de thèse. Sera, tout d'abord, abordée la dynamique des réactions en cascade suivant une tâche cognitive ainsi que les indices permettant de mieux appréhender les différentes phases de cette cascade. Nous aborderons ensuite la fusion de données, technique particulière ayant fait ses preuves dans la détection de certains états internes du conducteur pour discuter de la faisabilité et de la pertinence d'une telle méthode pour détecter le VP du conducteur.

Remonter à la source de la consommation des ressources ?

Les mesures physiologiques semblent intrinsèquement liées

Les données de la présente thèse ont montré, entre autres, que la Variation du Rythme Cardiaque (VaRC) apparaît sensible à l'effort cognitif en conduite. Il serait pertinent de s'intéresser aux origines de la modification de la fréquence cardiaque lors d'un effort cognitif et des liens que l'on peut faire avec les changements possibles dans l'activité cérébrale. Bien qu'il ait été montré que ce n'est pas le cœur qui, en augmentant sa fréquence, régule directement le débit sanguin cérébral (Bouma & Muizelaar, 1990 ; Deegan et al., 2010), il serait intéressant de s'intéresser aux causes de l'augmentation de la VaRC lors d'un effort cognitif pour peut-être obtenir des indices plus précoces de la consommation des ressources cognitives en conduite. La consommation des nutriments nécessaire à l'activité des neurones lors de la réalisation d'une tâche cognitive, pourrait-elle expliquer cette augmentation du débit cardiaque ? Il a été montré que des pairs de composantes N1-ECR1 et P3-ECR2 apparaîtraient lors du traitement de stimuli auditifs (Lawrence & Barry, 2009). Bien que la présente thèse n'ait pu mettre en évidence ces pairs de composantes cardiaques et cérébrales, il apparaîtrait pertinent d'investiguer les liens entre les différentes signatures existantes.

Le signal électrique localisé, capté par le dispositif EEG suite à la présentation d'un stimulus sensoriel entraînant une tâche cognitive (allumage du feu du véhicule précédent nécessitant un freinage, par exemple), traduit la dépolarisation des neurones des cortex concernés (ici, visuel). Ces dépolarisations en chaînes consomment des nutriments qui doivent être renouvelés. En parallèle se joue une augmentation de la VaRC traduisant une élévation de la fréquence cardiaque, qui pourrait être vue comme une réaction périphérique aidant à compenser la perte en oxygène et en glucose en amenant plus de sang au cerveau. Pourtant, le débit sanguin cérébral n'est pas impacté par l'élévation de la fréquence cardiaque. La relation entre ces deux dimensions pourrait ainsi être encore plus indirecte par l'activité de certains systèmes corticaux et sous-corticaux tels le complexe amygdale-hippocampe ou le cervelet qui participerait à réguler la fréquence cardiaque (Gianaros, Veen, & Jennings, 2004). Ainsi, les liens entre augmentation de la VaRC et débit sanguin restent flous et des études se concentrant sur la mise en lumière de ces liens pourraient être nécessaires pour affiner notre connaissance de la VaRC et mettre en évidence d'autres indicateurs sensibles à l'effort cognitif.

Mais dans l'objectif d'obtenir des indices de l'état du conducteur et plus particulièrement de ses ressources disponibles pour savoir, dans le cas d'un véhicule automatisé par exemple, si l'opérateur serait prêt à reprendre la main ou si une assistance serait nécessaire, nous pourrions ainsi commencer par nous demander comment quantifier l'effort cognitif consenti par le conducteur ? La mesure de la VaRC est-elle la meilleure ? De nombreuses études, dont celles réalisées pendant le présent travail de thèse, ont montré l'impact de diverses tâches cognitives sur le rythme cardiaque, l'activité du cerveau, le comportement oculaire, etc., mais ces indices périphériques ne sont que des raccourcis que l'on utilise pour inférer l'état du conducteur.

Le cerveau nécessite des nutriments pour que fonctionnent ses neurones, unités cérébrales fonctionnelles. De futures recherches pourraient ainsi se pencher sur la problématique de la régulation de concentration en nutriments dans le cerveau traduisant l'activité cérébrale et donc potentiellement le coût cognitif. D'autres pourraient se focaliser sur les liens entre augmentation de la fréquence cardiaque et flux cérébral en lien avec les cellules gliales. En effet, certaines cellules gliales comme les astrocytes ont un rôle clé dans le maintien du flux sanguin et à la bonne activité des neurones (Mandrick, 2013). Ces cellules jouent donc un rôle majeur dans les échanges de nutriments entre les capillaires sanguins et les neurones (Attwell et al., 2010). Ainsi, étudier l'activité de ces cellules gliales pourrait apporter d'autres informations intéressantes quant à la régulation du flux sanguin et des nutriments afin d'étudier la consommation de ceux-ci traduisant une activité cérébrale localisée. La neuroergonomie s'avère être un cadre conceptuel idéal pour cela, puisqu'elle s'appuie sur l'utilisation de techniques d'imagerie cérébrale et de capteurs psychophysologiques afin d'étudier les mécanismes neuronaux qui sous-tendent les phénomènes qui se produisent lors d'activités

complexes et écologiques (Dehais, Causse, & Cegarra, 2017). Avec l'arrivée de nouvelles techniques d'imagerie, de nouveaux paradigmes et de nouveaux questionnements sont autorisés. La spectroscopie en proche infrarouge fonctionnelle (en anglais, fNIRS = functional near infra-red spectroscopy), par sa capacité à mettre en évidence les changements de concentration en hémoglobines oxygénée et désoxygénée ainsi que les jeux d'équilibre de débit sanguin pour maintenir les besoins en oxygène à un niveau minime, pourrait-elle apporter un nouvel éclairage sur les liens entre modifications de la fréquence cardiaque, coût cognitif d'une tâche et consommation des nutriments nécessaires au bon fonctionnement des neurones ? Des études futures permettront probablement des mises à jour des modèles théoriques et conceptuels en apportant des réponses à ces questions.

Existe-t-il des indicateurs des ressources cognitives ?

Si nous souhaitons remonter à la source de la consommation des ressources cognitives, il faudrait s'interroger sur ce qu'est une ressource cognitive. La baisse des performances des individus s'expliquerait-elle par un manque de ressources cognitives ou parce que ces ressources ne pourraient être simultanément mobilisées à plusieurs endroits ? Existe-t-il une définition nous permettant de comprendre ce que sont, de façon pratique, les ressources, ou une mesure nous permettant de les quantifier ? Il serait intéressant d'être pragmatique sur ces questions et d'essayer de trouver des rationnels physiques quant à ces notions. Lorsque l'on parle de consommation ou de mobilisation des ressources (attentionnelles ou cognitives), abordons-nous de façon implicite, les substrats nécessaires à l'activité des neurones tels que l'oxygène, le glucose ou l'ATP, ou abordons-nous, sans y réfléchir, d'autres notions ?

Nous n'avons pas la prétention d'apporter une réponse à ces questions ici. En revanche, les données de cette thèse montrent que la fréquence cardiaque est impactée par une tâche cognitive. En prenant en compte les données récentes montrant les modifications du débit sanguin dans certaines zones cérébrales, il serait possible de mieux comprendre la dynamique du coût cognitif. En mettant en regard, l'impact d'une tâche cognitive sur l'activité des neurones, sur les changements dans la fréquence cardiaque ainsi que sur les modifications du flux sanguin cérébral, de nouvelles connaissances quant à la dynamique de réactions corporelles pourraient être mises en lumière afin d'apporter un nouvel éclairage pour mieux interpréter les états internes du conducteur. Ainsi, grâce aux données existantes et à celles récoltées lors des expérimentations de cette thèse, il est possible de mettre en correspondance, l'activité électrique des neurones, l'augmentation de la fréquence cardiaque et l'évolution de la concentration en hémoglobine oxygénée et désoxygénée dans les zones cérébrales impliquées dans le traitement d'une tâche (voir Figure 24). Regrouper ces signaux ne permet toutefois pas de comprendre ce que sont les ressources cognitives ni de décrire ce qu'il se passe à chaque instant pour l'individu, mais donnerait une vue d'ensemble de la

cascade de réactions (ou du moins, d'une partie de la cascade) par la visualisation de la dynamique des réponses physiologiques lors d'une tâche cognitive consommant une partie des ressources.

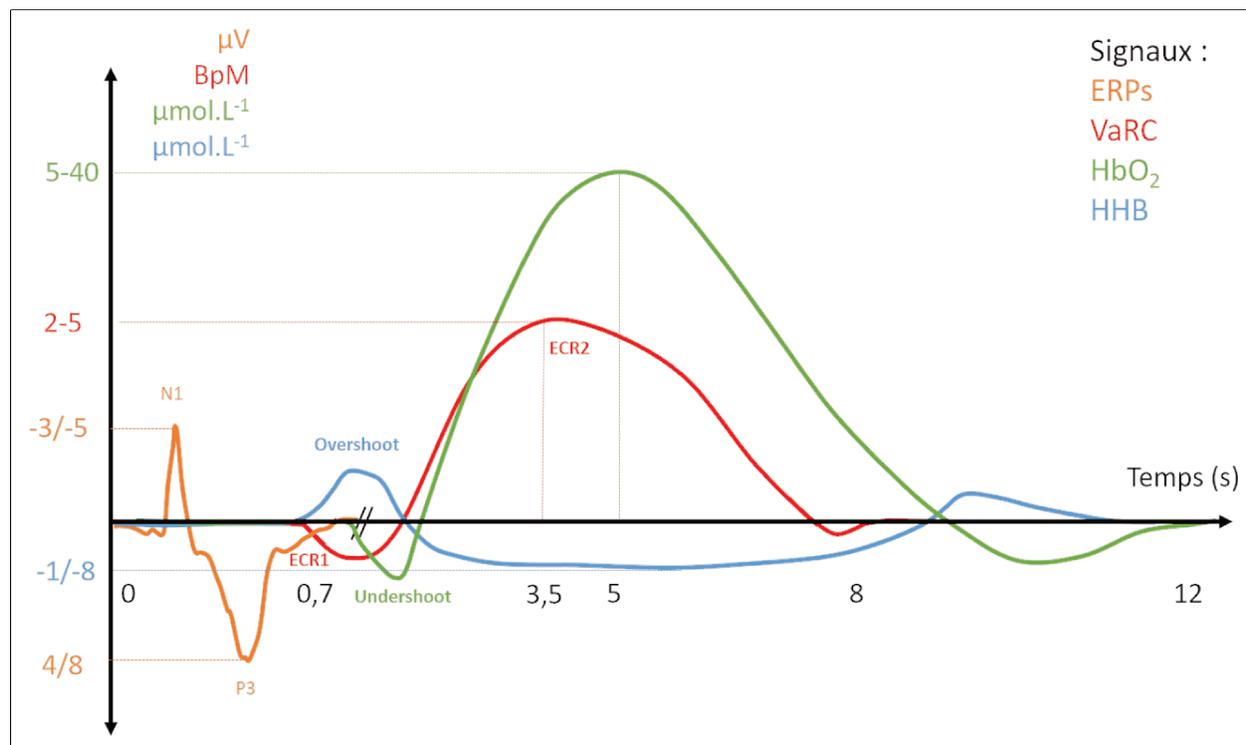


Figure 24 : Graphique représentant schématiquement l'évolution de plusieurs signaux (électro)physiologiques dont le signal électrique des potentiels évoqués cérébraux (ERPs), la Variation du Rythme Cardiaque (VaRC), la concentration en hémoglobine oxygénée (HbO₂) et en hémoglobine désoxygénée (HbB). Le temps t_0 correspond à la présentation d'une stimulation sensorielle entraînant une tâche cognitive. Le temps 0 correspond à la présentation d'un stimulus déclenchant une tâche cognitive

Le début de la cascade de réaction semble s'opérer par la consommation d'oxygène et de glucose par les neurones (Mandrick, 2013). Cette consommation doit être compensée pour maintenir l'homéostasie et l'efficacité du traitement des informations par les neurones, expliquant les modifications, dans les signaux fNIRS, (augmentation de la concentration en hémoglobine oxygénée et diminution de la concentration en hémoglobine désoxygénée). Comme nous l'avons vu dans la partie précédente, l'activité neurologique à l'origine des modifications du rythme cardiaque pourrait expliquer l'élévation de la VaRC lors d'un effort cognitif. Les futurs travaux qui chercheront des indices objectifs du vagabondage de la pensée, de différentes émotions ou qui, plus largement, chercheront à mieux comprendre la dynamique de l'effort cognitif des individus et la façon dont certaines tâches viennent consommer leurs ressources, gagneraient à expliciter ces termes de « ressources cognitives et attentionnelles », voire même de proposer des méthodes afin de quantifier leurs présences ou leurs consommations. De telles recherches permettraient de mieux comprendre

les réactions physiologiques lorsque le cerveau humain est en action et pourraient éclairer la gestion des ressources des individus. Comment l'individu gère-t-il la consommation subite de ces ressources ? Quelles erreurs est-il le plus probable de voir survenir et quelles sont les contre-mesures à envisager pour pallier ces erreurs ? Une meilleure compréhension de la dynamique du coût d'une tâche cognitive ainsi que de ces effets sur les individus pourrait également servir à la création d'algorithmes de détection du vagabondage de la pensée en conduite.

Vers une détection du vagabondage de la pensée en temps réel ?

Une solution pérenne pour la création de systèmes de surveillance du conducteur en temps réel passerait par la constitution de bibliothèques d'indicateurs sensibles de différents états internes, première étape vers la conception d'algorithmes utilisant comme données d'entrée les variables physiologiques et comportementales. L'algorithme en allant chercher dans ces données, la présence ou l'absence de patterns d'intérêts pourrait ainsi révéler l'état du conducteur et permettre au véhicule automatisé d'adapter ses propres décisions en conséquence.

Nous l'avons vu, pour maximiser l'identification du vagabondage de la pensée du conducteur, le couplage des données reste certainement la meilleure méthodologie puisque l'ajout de nouvelles mesures à un modèle de détection et/ou de prédiction permet de pallier les faiblesses des précédentes. L'efficacité du modèle est donc améliorée à chaque fois qu'une variable pertinente est ajoutée.

Couplage des données et neuroergonomie

Le cœur et par extension le Rythme Cardiaque (RC) a un rôle très important de régulation des besoins de l'organisme. Le RC est soumis à de nombreuses influences (postures, mouvement, stress, etc.), sa variabilité est donc importante. Mais en comprenant mieux l'impact de chacun de ces facteurs sur le RC, il serait possible de limiter le nombre de faux positifs d'un algorithme dans ses tentatives de détection de l'effort cognitif, par exemple. En effet, une augmentation du RC ne pourrait plus être imputable à un mouvement ou à tout autre facteur puisque cet effet aura été quantifié et supprimé. Le travail effectué lors du Valeo Innovation Challenge (VIC) s'inscrivait dans cette philosophie. Mieux comprendre les liens existants entre RC et respiration était un premier pas vers une meilleure compréhension et de meilleures capacités d'interprétation de l'évolution du RC. En supprimant l'effet de l'arythmie sinusale respiratoire (ASR), certains changements dans le rythme cardiaque dus à l'influence respiratoire seraient ainsi absents, améliorant la sensibilité de la VaRC à l'effort cognitif. Bien que les résultats des travaux proposés n'aient

évidemment pas permis de corriger totalement le RC de l'influence de la respiration, il s'agissait là de pousser la compréhension et la faisabilité méthodologique d'une telle correction.

À terme, il est probable que la réussite de la correction du rythme cardiaque de l'influence de certains facteurs tels la respiration ou les postures, permettent de pouvoir détecter l'effort cognitif du conducteur en moyennant la VaRC sur un nombre d'évènements moins élevé. Le ratio signal/bruit ayant été augmenté, le nombre de répétitions nécessaires pour laisser apparaître les composantes d'intérêts (ECR1 et ECR2) serait réduit. À plus grande échelle et en supprimant des données cardiaques, l'impact des changements de posture du conducteur, de ses mouvements, de son niveau de stress, etc., il pourrait être possible de maximiser la capacité d'un algorithme à détecter l'effort cognitif. Il ne sera peut-être pas nécessaire que l'algorithme ait à détecter l'effort cognitif du conducteur sur un unique évènement puisque la VaRC pourrait être couplée à d'autres mesures susceptibles d'améliorer encore la sensibilité, la spécificité et la robustesse de l'indicateur de sortie. Comme cela a été dit, l'ajout de nouvelles variables sensibles complète et améliore le modèle en venant pallier les faiblesses des mesures précédentes.

Pour le VP, de nombreux indices pourraient renseigner la présence de cet état en conduite automobile. Parmi les indicateurs sensibles et susceptibles d'en permettre la détection, se trouvent, nous l'avons vu, la fixité du regard. Le présent travail de thèse a montré que le conducteur explore moins l'environnement lorsque son attention se porte sur ses pensées plutôt que l'activité de conduite. La possibilité d'améliorer cet indicateur pour le rendre plus efficient dans sa capacité à identifier des épisodes de VP pourrait être proposée dans des travaux ultérieurs. Le couplage des données de conduite, des données du GPS et des données respiratoires avec les indicateurs mis en évidence pendant le présent travail de thèse et d'autres, déjà existants (conductance cutanée : Smallwood et al. (2004) ; dilatation pupille : Franklin, Broadway, Mrazek, Smallwood, & Schooler (2013) ; clignements des yeux : Smilek, Carriere, & Cheyne (2010) ; certains marqueurs cardiaques : Ottaviani et al. (2014) ; Smallwood et al. (2004), pourraient permettre d'approcher une détection du VP en temps réel. Certaines études ont d'ores et déjà montré la possibilité de détecter avec un taux de réussite significativement différent du hasard, la présence de VP en utilisant les données cérébrales (Durantin et al., 2015). Il existe donc de nombreux marqueurs de la présence du VP qui, ensemble, pourrait permettre un taux de bonne détection très élevé et un nombre de fausses alarmes acceptable.

Mais comment faire pour limiter l'impact néfaste du VP en conduite ? Quels sont les outils méthodologiques et techniques susceptibles de permettre une détection de cet état ?

Techniques de fusion de données pour la détection du vagabondage

Il est techniquement possible d'augmenter ou de réduire artificiellement l'émergence du vagabondage de la pensée des individus en utilisant la stimulation transcrânienne à courant direct sur des zones particulières du cerveau (Axelrod et al., 2015 ; Kajimura & Nomura, 2015) ou en réduisant l'épaisseur du cortex de certaines régions comme le cortex préfrontal médian ou celui du cortex cingulaire antérieur (Bernhardt et al., 2014). Des dégâts sur une autre zone du cortex peuvent également réduire l'émergence du VP (Bertossi & Ciaramelli, 2016), ce qui permettrait d'en limiter l'aspect néfaste en conduite.

Évidemment, cela n'apparaît pas comme une solution viable ni éthique pour limiter l'impact négatif du VP sur les conducteurs. L'objectif principal à long terme est de pouvoir détecter le vagabondage de la pensée hautement perturbant des conducteurs, afin de les avertir par les progrès de l'intelligence artificielle et de l'automatisation, tout en laissant leur esprit vagabonder tant que le degré d'interférence avec la tâche de conduite reste faible ou que l'on estime, dans les cas de conduite automatisée, qu'ils pourraient reprendre en main le véhicule. Pour cela, plusieurs travaux en amont ont été et devront encore être menés. Existe-t-il des réseaux ou des zones cérébrales particulières à l'œuvre lorsque le VP est particulièrement interférent et dangereux pour le conducteur ? Y aurait-il d'autres signes périphériques ou psychophysiologiques annonciateurs de ce type de VP ? Quels sont les indices comportementaux suffisamment fiables et pouvant être utilisés en temps réel afin de faciliter la détection d'un tel état ?

Le présent travail de thèse, en collectant l'activité cérébrale, le rythme cardiaque et certains paramètres comportementaux tels les mouvements oculaires ou les temps de réaction, a recherché des premiers indicateurs sensibles au vagabondage de la pensée, en conduite automobile. L'objectif étant la création d'une bibliothèque d'indicateurs objectifs du VP pour pouvoir, dans un futur proche, créer et tester des algorithmes de fusion de données afin d'effectuer une surveillance en temps réel du conducteur et de pouvoir empêcher l'impact délétère du VP. Lorsque d'autres études auront poursuivi ce travail et qu'il sera possible de bien mieux comprendre l'impact du VP et particulièrement du VP dont le contenu est hautement perturbant pour le conducteur (Galera et al., 2012), la mise en commun de toutes ces signatures pourrait permettre une détection en temps réel de cet état.

Pour évaluer l'apport de la méthode de fusion de données, il serait nécessaire d'évaluer la sensibilité et la spécificité au vagabondage de la pensée de chacun des indicateurs et de vérifier, tels que cela a été fait avec la distraction quelques années auparavant, l'apport de chacun de ces indicateurs au modèle global (Liang, Reyes, et al., 2007). La méthode classique consiste à extraire les caractéristiques des signaux ou des données d'intérêts pour distinguer l'état de vagabondage de l'état d'attention dirigée vers la conduite. Plusieurs méthodes ont été proposées afin d'étudier différents états internes susceptibles d'augmenter le risque

d'accident de la route telle la fatigue du conducteur notamment par des supports vecteurs machine (Liang, Reyes, et al., 2007 ; Shen, Li, Ong, Shao, & Wilder-Smith, 2008), des réseaux bayésiens, dynamiques ou traditionnels (Liang & Lee, 2014 ; Yang, Lin, & Bhattacharya, 2010), des analyses en ondelettes (Li & Chung, 2013) et par l'utilisation de réseaux neuronaux sur différents indicateurs sensibles de l'état d'intérêt (Patel, Lal, Kavanagh, & Rossiter, 2011). Quel que soit le type d'analyse utilisée pour dégager des indicateurs d'états attentionnels dégradés, la fusion de données permet de rendre les algorithmes de détection plus robustes et performants (Pfurtscheller et al., 2010).

La mise en place d'Interface Cerveau-Machine (ICM) permettrait l'échange d'information entre le cerveau d'un individu et une machine extérieure sans nécessiter d'activité motrice (Wolpaw, Birbaumer, McFarland, Pfurtscheller, & Vaughan, 2002). Lors de leurs premières conceptions, les ICM avaient pour objectif d'ouvrir aux personnes ne pouvant plus échanger ni communiquer avec l'extérieur, un canal de communication (Roy, 2015). D'autres types d'ICM sont dits passives lorsqu'il n'est pas question d'échanger avec l'extérieur ou de contrôler un effecteur (pour les personnes tétraplégiques, par exemple), mais dont l'objectif est la surveillance des états mentaux de l'individu. Ces ICM permettent de recueillir, d'analyser et de classer l'activité cérébrale afin de créer un retour visuel de l'état du conducteur ou du pilote. Ces ICM permettraient d'adapter le niveau d'automatisation du véhicule ou de donner au conducteur un retour sur son propre état, c'est ce qu'on appelle le neurofeedback (Roy, 2015). Que la machine, en connaissant l'état de l'individu le lui restitue ou qu'elle décide de l'action à effectuer, l'objectif à plus long terme étant la supervision du conducteur en temps réel. Que ce soit lors d'une conduite traditionnelle ou automatisée, l'objectif est de limiter au maximum les risques liés à l'inattention et améliorer la sécurité routière pour l'ensemble des usagers de la route.

Dans une approche de neuroergonomie, centrée sur le conducteur, une interface cerveau-machine passive pourrait permettre de donner un retour au conducteur sur son propre état. Afficher des messages ou des alarmes contextualisées aux états de l'opérateur, pourrait permettre de mieux gérer les phases de décrochage attentionnel et, avec l'automatisation progressive, de mieux réguler les interactions humain-machine. D'autres applications technologiques sont possibles : certains constructeurs étudient la possibilité d'afficher en réalité augmentée des informations sur le pare-brise du véhicule. En cas de danger et lorsqu'il est perdu dans ses pensées, faire ressortir le piéton ou le panneau important dans la situation en cours, pourrait permettre au conducteur d'améliorer sa conscience de la situation à moindre coût cognitif.

Il serait également possible d'évaluer les situations les plus accidentogènes imputables au VP. En d'autres mots, il s'agirait de mieux comprendre comment certaines situations pourraient être plus impactées par cet état à cause, par exemple, d'un besoin d'explorer l'environnement plus important (capacité perturbée par le VP). Il faudrait, pour cela, observer comment les indicateurs sensibles au VP et les performances de conduite

varient dans ces situations. Les situations les plus accidentogènes pourraient être celles où une exploration visuelle de l'environnement efficace est nécessaire telles que le tourne-à-gauche bien qu'il semble probable que le conducteur sorte de sa rêverie avant la manœuvre. Une meilleure compréhension du degré de dangerosité de certaines situations de conduite pourrait nous amener à proposer des contre-mesures efficaces et différentes selon le contexte.

L'arrivée de l'intelligence artificielle pourrait également pallier aux différences interindividuelles des conducteurs, problématiques compte tenu des disparités dans les signaux physiologiques et les comportements. Chacun n'explore pas l'environnement de la même façon, ne gère pas son véhicule ou sa vitesse comme les autres, etc., ce qui pourrait gêner la bonne détection du VP par un algorithme. Il serait ainsi possible d'extraire des caractéristiques propres aux individus lors de différents trajets et d'observer les modifications associées au vagabondage de la pensée. Ce travail devra très probablement être mené conjointement par une équipe pluridisciplinaire composée, au moins d'ingénieurs, de chercheurs et d'ergonomes qui auront pour mission de cerner cette problématique particulière afin d'y apporter conjointement des solutions. Les connaissances complémentaires de chacun des membres d'une telle équipe permettraient la création d'un système efficace. Utiliser les données physiologiques et comportementales du conducteur comme entrée d'un programme capable d'extraire les patterns révélateurs des états du conducteur, pourrait permettre de renseigner en temps réel son état interne. Ces informations pourraient être transmises à une interface afin de donner un retour au conducteur sur son propre état ou l'aider à réorienter son attention sur les informations critiques afin de lui permettre d'économiser du temps et des ressources cognitives. Que ce soit par une prise de contrôle de l'intelligence artificielle, l'affichage d'informations en réalité augmentée sur le pare-brise ou en donnant au conducteur un retour sur son propre état, l'objectif est de maintenir l'adéquation entre la demande de la tâche et les capacités du conducteur afin que ce dernier puisse avoir une conscience de la situation suffisante à tout instant pour limiter les risques d'accident.

Mais si nous, conducteurs, ne pouvons pleinement contrôler ces moments de décrochages attentionnels, que pouvons-nous bien faire au quotidien pour lutter contre l'inattention au volant ? Peut-être, pouvons-nous rester à l'écoute de notre esprit qui, par l'intermédiaire du vagabondage de la pensée, nous aiguillerait sur des pistes de réflexion nous permettant de connaître nos enjeux, nos envies et qui nous permettrait peut-être de simplement mieux nous connaître. Evidemment, cela ne réduira pas les effets négatifs de l'inattention au volant mais pourrait nous aider à mieux nous comprendre, à mettre en lumière nos envies de vie cachée et à potentiellement être plus satisfait, en limitant cette prise de contrôle sans permission de nos pensées.

Bibliographie

- Abadie, M., Waroquier, L., & Terrier, P. (2013). Gist memory in the unconscious-thought effect. *Psychological Science*, 24(7), 1253–1259.
- Addis, D. R., Pan, L., Vu, M.-A., Laiser, N., & Schacter, D. (2009). Constructive episodic simulation of the future and the past: Distinct subsystems of a core brain network mediate imagining and remembering. *Neuropsychologia*, 47(11), 2222–2238.
- Aguera, P.-E., Jerbi, K., Caclin, A., & Bertrand, O. (2011). ELAN: a software package for analysis and visualization of MEG, EEG, and LFP signals. *Computational intelligence and neuroscience*, 2011, 5.
- Ahn, S., Nguyen, T., Jang, H., Kim, J., & Jun, S. (2016). Exploring Neuro-Physiological Correlates of Drivers' Mental Fatigue Caused by Sleep Deprivation Using Simultaneous EEG, ECG, and fNIRS Data. *Frontiers in Human Neuroscience*, 10. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2016.00219>
- Andrews-Hanna, Jessica, Kaiser, R. H., Turner, A., Reineberg, A., Godinez, D., Dimidjian, S., & Banich, M. (2013). A penny for your thoughts: dimensions of self-generated thought content and relationships with individual differences in emotional wellbeing. *Frontiers in psychology*, 4, 900.
- Andrews-Hanna, Jessica, Irving, Z., Fox, K., Spreng, N., & Christoff, K. (2017). The Neuroscience of Spontaneous Thought: An Evolving, Interdisciplinary Field. arXiv:1704.02533 [q-bio]. Consulté à l'adresse <http://arxiv.org/abs/1704.02533>
- Antrobus, J., Singer, J., & Greenberg, S. (1966). Studies in the stream of consciousness: experimental enhancement and suppression of spontaneous cognitive processes. *Perceptual and Motor Skills*, 23(2), 399–417.
- Attwell, D., Buchan, A., Charkpak, S., Lauritzen, M., MacVicar, B., & Newman, E. (2010). Glial and neuronal control of brain blood flow. *Nature*, 468(7321), 232-243. <https://doi.org/10.1038/nature09613>
- Axelrod, V., Rees, G., Lavidor, M., & Bar, M. (2015). Increasing propensity to mind-wander with transcranial direct current stimulation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(11), 3314-3319. <https://doi.org/10.1073/pnas.1421435112>

- Baird, B., Smallwood, J., Mrazek, M., Kam, J., Franklin, M., & Schooler, J. (2012). Inspired by distraction: mind wandering facilitates creative incubation. *Psychological Science*, 23(10), 1117-1122. <https://doi.org/10.1177/0956797612446024>
- Baird, B., Smallwood, J., & Schooler, J. (2011). Back to the future: autobiographical planning and the functionality of mind-wandering. *Consciousness and Cognition*, 20(4), 1604-1611. <https://doi.org/10.1016/j.concog.2011.08.007>
- Bakiri, S., Galéra, C., Lagarde, E., Laborey, M., Contrand, B., Ribéreau-Gayon, R., ... Orriols, L. (2013). Distraction and driving: results from a case-control responsibility study of traffic crash injured drivers interviewed at the emergency room. *Accident; Analysis and Prevention*, 59, 588-592. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2013.06.004>
- Baldwin, C. L., Roberts, D. M., Barragan, D., Lee, J. D., Lerner, N., & Higgins, J. S. (2017). Detecting and Quantifying Mind Wandering during Simulated Driving. *Frontiers in Human Neuroscience*, 11, 406. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2017.00406>
- Barron, E., Riby, L. M., Greer, J., & Smallwood, J. (2011). Absorbed in Thought: The Effect of Mind Wandering on the Processing of Relevant and Irrelevant Events. *Psychological Science*, 22(5), 596-601. <https://doi.org/10.1177/0956797611404083>
- Benarroch, E. E. (1993). The Central Autonomic Network: Functional Organization, Dysfunction, and Perspective. *Mayo Clinic Proceedings*, 68(10), 988-1001. [https://doi.org/10.1016/S0025-6196\(12\)62272-1](https://doi.org/10.1016/S0025-6196(12)62272-1)
- Berger, A. J., Mitchell, R. A., & Severinghaus, J. W. (1977). Regulation of Respiration. *New England Journal of Medicine*, 297(3), 138-143. <https://doi.org/10.1056/NEJM197707212970305>
- Bernhardt, B., Smallwood, J., Tusche, A., Ruby, F. J. M., Engen, H. G., Steinbeis, N., & Singer, T. (2014). Medial prefrontal and anterior cingulate cortical thickness predicts shared individual differences in self-generated thought and temporal discounting. *NeuroImage*, 90, 290-297. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2013.12.040>
- Berntson, G. G., Cacioppo, J. T., & Quigley, K. S. (1993). Respiratory sinus arrhythmia: Autonomic origins, physiological mechanisms, and psychophysiological implications. *Psychophysiology*, 30(2), 183-196. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.1993.tb01731.x>
- Berthié, G., Lemerrier, C., Paubel, P.-V., Cour, M., Fort, A., Galéra, C., ... Maury, B. (2015). The restless mind while driving: drivers' thoughts behind the wheel. *Accident; Analysis and Prevention*, 76, 159-165. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2015.01.005>

- Bertossi, E., & Ciaramelli, E. (2016). Ventromedial prefrontal damage reduces mind-wandering and biases its temporal focus. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 11(11), 1783-1791. <https://doi.org/10.1093/scan/nsw099>
- Bouma, G. J., & Muizelaar, J. P. (1990). Relationship between cardiac output and cerebral blood flow in patients with intact and with impaired autoregulation. *Journal of Neurosurgery*, 73(3), 368-374. <https://doi.org/10.3171/jns.1990.73.3.0368>
- Brehmer, B., & Dörner, D. (1993). Experiments with computer-simulated microworlds: Escaping both the narrow straits of the laboratory and the deep blue sea of the field study. *Computers in Human Behavior*, 9, 171-184. [https://doi.org/10.1016/0747-5632\(93\)90005-d](https://doi.org/10.1016/0747-5632(93)90005-d)
- Broadbent, D. E. (1958). *Perception and communication*. Pergamon Press.
- Broadway, J. M., Franklin, M. S., & Schooler, J. W. (2015). Early event-related brain potentials and hemispheric asymmetries reveal mind-wandering while reading and predict comprehension. *Biological Psychology*, 107, 31-43. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2015.02.009>
- Brookhuis, K. A., & de Waard, D. (2010). Monitoring drivers' mental workload in driving simulators using physiological measures. *Accident Analysis & Prevention*, 42(3). Consulté à l'adresse <https://trid.trb.org/view.aspx?id=917848>
- Buckner, R. (2010). The role of the hippocampus in prediction and imagination. *Annual review of psychology*, 61, 27-48.
- Buckner, R., & Vincent, J. (2007). Unrest at rest: Default activity and spontaneous network correlations. *NeuroImage*, 37(4), 1091-1096. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2007.01.010>
- Bueno, M., Fabrigoule, C., Deleurence, P., Ndiaye, D., & Fort, A. (2012). An electrophysiological study of the impact of a Forward Collision Warning System in a simulator driving task. *Brain Research*, 1470, 69-79. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2012.06.027>
- Burdett, B. R. D., Charlton, S. G., & Starkey, N. J. (2016). Not all minds wander equally: The influence of traits, states and road environment factors on self-reported mind wandering during everyday driving. *Accident; Analysis and Prevention*, 95(Pt A), 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2016.06.012>
- Burdett, B. R. D., Charlton, S. G., & Starkey, N. J. (2017). Inside the commuting driver's wandering mind. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2017.11.002>

- Butler, J. E. (2007). Drive to the human respiratory muscles. *Respiratory Physiology & Neurobiology*, 159(2), 115-126. <https://doi.org/10.1016/j.resp.2007.06.006>
- Cabeza, R., Dolcos, F., Prince, S. E., Rice, H. J., Weissman, D. H., & Nyberg, L. (2003). Attention-related activity during episodic memory retrieval: a cross-function fMRI study. *Neuropsychologia*, 41(3), 390-399. [https://doi.org/10.1016/S0028-3932\(02\)00170-7](https://doi.org/10.1016/S0028-3932(02)00170-7)
- Callard, F., Smallwood, J., Golchert, J., & Margulies, D. S. (2013). The era of the wandering mind? Twenty-first century research on self-generated mental activity. *Frontiers in Psychology*. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00891>
- Cantero, J. L., Atienza, M., & Salas, R. M. (2002). Human alpha oscillations in wakefulness, drowsiness period, and REM sleep: different electroencephalographic phenomena within the alpha band. *Neurophysiologie Clinique/Clinical Neurophysiology*, 32(1), 54-71. [https://doi.org/10.1016/S0987-7053\(01\)00289-1](https://doi.org/10.1016/S0987-7053(01)00289-1)
- Carretié, L., Albert, J., López-Martín, S., Hoyos, S., Kessel, D., Tapia, M., & Capilla, A. (2013). Differential neural mechanisms underlying exogenous attention to peripheral and central distracters. *Neuropsychologia*, 51(10), 1838–1847.
- Casner, S. M., & Schooler, J. W. (2014). Thoughts in flight: Automation use and pilots' task-related and task-unrelated thought. *Human factors*, 56(3), 433–442.
- Chaparro, R. A. H. (2015). Behavioral and neural correlates of spontaneous attentional decoupling: towards an understanding of mind wandering (phdthesis). Université Pierre et Marie Curie - Paris VI. Consulté à l'adresse <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01314225/document>
- Chica, A. B., Bartolomeo, P., & Valero-Cabré, A. (2011). Dorsal and ventral parietal contributions to spatial orienting in the human brain. *Journal of Neuroscience*, 31(22), 8143–8149.
- Choi, J., & Gutierrez-Osuna, R. (2011). Removal of Respiratory Influences From Heart Rate Variability in Stress Monitoring. *IEEE Sensors Journal*, 11(11), 2649-2656. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2011.2150746>
- Christoff, K. (2012). Undirected thought: Neural determinants and correlates. *Brain Research*, 1428, 51-59. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2011.09.060>
- Christoff, K., Gordon, A. M., Smallwood, J., Smith, R., & Schooler, J. W. (2009). Experience sampling during fMRI reveals default network and executive system contributions to mind wandering. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(21), 8719-8724. <https://doi.org/10.1073/pnas.0900234106>

- Chun, M. M., Golomb, J. D., & Turk-Browne, N. B. (2011). A taxonomy of external and internal attention. *Annual review of psychology*, 62, 73–101.
- Cnossen, F. (1994). Mental effort from energetical and computational perspectives. Unpublished paper for the BCN course Cognitive Neuroscience. Haren, The Netherlands: Traffic Research Centre, University of Groningen.
- Conway, A. R., Cowan, N., & Bunting, M. F. (2001). The cocktail party phenomenon revisited: the importance of working memory capacity. *Psychonomic Bulletin & Review*, 8(2), 331-335.
- Corballis, M. C. (2015). *The Wandering Mind: What the Brain Does When You're Not Looking*. University of Chicago Press.
- Corbetta, M. (1998). Frontoparietal cortical networks for directing attention and the eye to visual locations: Identical, independent, or overlapping neural systems? *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 95(3), 831-838.
- Corbetta, M., Patel, G., & Shulman, G. L. (2008). The reorienting system of the human brain: from environment to theory of mind. *Neuron*, 58(3), 306–324.
- Corbetta, M., & Shulman, G. L. (2002). Control of goal-directed and stimulus-driven attention in the brain. *Nature reviews neuroscience*, 3(3), 201.
- Crider, A. (2008). Personality and Electrodermal Response Lability: An Interpretation. *Applied Psychophysiology and Biofeedback*, 33(3), 141. <https://doi.org/10.1007/s10484-008-9057-y>
- Critchley, H. D. (2002). Electrodermal responses: what happens in the brain. *The Neuroscientist*, 8(2), 132–142.
- Cunningham, S., Scerbo, M. W., & Freeman, F. G. (2000). The electrocortical correlates of daydreaming during vigilance tasks. *Journal of Mental Imagery*, 24(1-2), 61-72.
- Dambock, D., Weißgerber, T., Kienle, M., & Bengler, K. (2013). Requirements for cooperative vehicle guidance. In *Intelligent Transportation Systems-(ITSC), 2013 16th International IEEE Conference on* (p. 1656–1661). IEEE.
- D'argembeau, A., Collette, F., Van der Linden, M., Laureys, S., Del Fiore, G., Degueldre, C., ... Salmon, E. (2005). Self-referential reflective activity and its relationship with rest: a PET study. *Neuroimage*, 25(2), 616–624.
- de Waard, D. (1996). *The measurement of drivers' mental workload*. Groningen University, Traffic Research Center Netherlands.

- Deegan, B. M., Devine, E. R., Geraghty, M. C., Jones, E., ÓLaighin, G., & Serrador, J. M. (2010). The relationship between cardiac output and dynamic cerebral autoregulation in humans. *Journal of Applied Physiology*, 109(5), 1424-1431. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.01262.2009>
- Dehais, F., Causse, M., & Cegarra, J. (2017). Neuroergonomics: measuring the human operator's brain in ecological settings. *Le travail humain*, 80(1), 1–6.
- Demeter, E., De Albuquerque, D., & Woldorff, M. G. (2016). The effects of ongoing distraction on the neural processes underlying signal detection. *Neuropsychologia*, 89, 335-343. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2016.06.038>
- Desimone, R., & Duncan, J. (1995). Neural mechanisms of selective visual attention. *Annual review of neuroscience*, 18(1), 193–222.
- Dosenbach, N., Fair, D., Cohen, A., Schlaggar, B., & Petersen, S. (2008). A dual-networks architecture of top-down control. *Trends in Cognitive Sciences*, 12(3), 99-105. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2008.01.001>
- Dosenbach, N., Fair, D., Miezin, F., Cohen, A., Wenger, K., Dosenbach, R., ... Petersen, S. (2007). Distinct brain networks for adaptive and stable task control in humans. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104(26), 11073-11078. <https://doi.org/10.1073/pnas.0704320104>
- Drews, F. A., Yazdani, H., Godfrey, C. N., Cooper, J. M., & Strayer, D. L. (2009). Text messaging during simulated driving. *Human factors*, 51(5), 762–770.
- Durantín, G. (2015). *Contrôle de l'état attentionnel en conditions aéronautiques écologiques par imagerie cérébrale* (PhD Thesis). Toulouse, ISAE.
- Durantín, G., Dehais, F., & Delorme, A. (2015). Characterization of mind wandering using fNIRS. *Frontiers in Systems Neuroscience*, 9. <https://doi.org/10.3389/fnsys.2015.00045>
- Endsley, M. R., & Kiris, E. O. (1995). The Out-of-the-Loop Performance Problem and Level of Control in Automation. *Human Factors*, 37(2), 381-394. <https://doi.org/10.1518/001872095779064555>
- Engen, H. G. (2017). *On the endogenous generation of emotion* (PhD Thesis). Max Planck Institute for Human Cognitive and Brain Sciences Leipzig.
- Engström, J., Johansson, E., & Östlund, J. (2005). Effects of visual and cognitive load in real and simulated motorway driving. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, 8(2), 97–120.

- Eoh, H., Chung, M., & Kim, S.-H. (2005). Electroencephalographic study of drowsiness in simulated driving with sleep deprivation. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 35(4), 307-320. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2004.09.006>
- Flegal, K. E., & Anderson, M. C. (2008). Overthinking skilled motor performance: Or why those who teach can't do. *Psychonomic Bulletin & Review*, 15(5), 927-932. <https://doi.org/10.3758/PBR.15.5.927>
- Fort, A., Martin, R., Jacquet-Andrieu, A., Combe-Pangaud, C., Foliot, G., Daligault, S., & Delpuech, C. (2010). Attentional demand and processing of relevant visual information during simulated driving: A MEG study. *Brain Research*, 1363, 117-127. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2010.09.094>
- Fox, M., Snyder, A., Vincent, J., Corbetta, M., Van Essen, D., & Raichle, M. (2005). The human brain is intrinsically organized into dynamic, anticorrelated functional networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 102(27), 9673–9678.
- Franklin, M. S., Broadway, J. M., Mrazek, M. D., Smallwood, J., & Schooler, J. W. (2013). Window to the wandering mind: Pupillometry of spontaneous thought while reading. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 66(12), 2289-2294. <https://doi.org/10.1080/17470218.2013.858170>
- Frith, C., & Frith, U. (2005). Theory of mind. *Current Biology*, 15(17), R644–R645.
- Gabaude, C., Baracat, B., Jallais, C., Bonniaud, M., & Fort, A. (2012). Cognitive load measurement while driving. In : *Human Factors: a view from an integrative perspective*. In *Cognitive load measurement while driving*. In : *Human Factors: a view from an integrative perspective* (p. 67-80). HUMAN FACTORS AND ERGONOMICS SOCIETY. Consulté à l'adresse <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01027475>
- Galera, C., Orriols, L., M'Bailara, K., Laborey, M., Contrand, B., Ribereau-Gayon, R., ... Lagarde, E. (2012). Mind wandering and driving: a responsibility case-control study. *BMJ British medical journal*, 345, 7 p. <https://doi.org/10.1136/bmj.e8105>
- Giambra, L. M. (1989). Task-unrelated thought frequency as a function of age: a laboratory study. *Psychology and aging*, 4(2), 136.
- Giambra, L. M. (1993). The influence of aging on spontaneous shifts of attention from external stimuli to the contents of consciousness. *Experimental Gerontology*, 28(4), 485-492. [https://doi.org/10.1016/0531-5565\(93\)90073-M](https://doi.org/10.1016/0531-5565(93)90073-M)
- Gianaros, P., Veen, F. M. V. der, & Jennings, J. R. (2004). Regional cerebral blood flow correlates with heart period and high-frequency heart period variability during working-memory tasks:

- Implications for the cortical and subcortical regulation of cardiac autonomic activity. *Psychophysiology*, 41(4), 521-530. <https://doi.org/10.1111/1469-8986.2004.00179.x>
- Giraudet, L., St-Louis, M.-E., Scannella, S., & Causse, M. (2015). P300 event-related potential as an indicator of inattentive deafness? *PloS One*, 10(2), e0118556. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0118556>
- Golchert, J., Smallwood, J., Jefferies, E., Seli, P., Huntenburg, J. M., Liem, F., ... Margulies, D. S. (2017). Individual variation in intentionality in the mind-wandering state is reflected in the integration of the default-mode, fronto-parietal, and limbic networks. *NeuroImage*, 146, 226-235. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2016.11.025>
- Gorgolewski, K. J., Lurie, D., Urchs, S., Kipping, J. A., Craddock, R. C., Milham, M. P., ... Smallwood, J. (2014). A correspondence between individual differences in the brain's intrinsic functional architecture and the content and form of self-generated thoughts. *PloS one*, 9(5), e97176.
- Grapperon, J., Pignol, A.-C., & Vion-Dury, J. (2012). La mesure de la réaction électrodermale. *L'Encéphale*, 38(2), 149-155. <https://doi.org/10.1016/j.encep.2011.05.004>
- Greicius, M., Krasnow, B., Reiss, A. L., & Menon, V. (2003). Functional connectivity in the resting brain: A network analysis of the default mode hypothesis. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 100(1), 253-258. <https://doi.org/10.1073/pnas.0135058100>
- Gusnard, D., Akbudak, E., Shulman, G., & Raichle, M. (2001). Medial prefrontal cortex and self-referential mental activity: relation to a default mode of brain function. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 98(7), 4259-4264.
- Guyot, R. (2002). Gisements de sécurité routière (p. 320). Ministère de l'Équipement, des transports, du Logement, du Tourisme et de la Mer.
- Hamzeie, R., Savolainen, P. T., & Gates, T. J. (2017). Driver speed selection and crash risk: Insights from the naturalistic driving study. *Journal of Safety Research*, 63, 187-194. <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2017.10.007>
- Hancock, P., & Parasuraman, R. (1992). Human factors and safety in the design of intelligent vehicle-highway systems (IVHS). *Journal of Safety Research*, 23(4), 181-198. [https://doi.org/10.1016/0022-4375\(92\)90001-P](https://doi.org/10.1016/0022-4375(92)90001-P)
- He, J., Becic, E., Lee, Y.-C., & McCarley, J. S. (2011). Mind wandering behind the wheel: performance and oculomotor correlates. *Human Factors*, 53(1), 13-21. <https://doi.org/10.1177/0018720810391530>

- Henderson, J. M. (1993). Visual attention and saccadic eye movements. In Annual Meeting of the Psychonomic Society, 31st, 1990, New Orleans, LA, US. North-Holland/Elsevier Science Publishers.
- Hendricks, D. L., Fell, J. C., & Freedman, M. (2001). The relative frequency of unsafe driving acts in serious traffic crashes. The Office.
- 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(1), 22–55.
- Horrey, W. J., Lesch, M. F., Mitsopoulos-Rubens, E., & Lee, J. D. (2015). Calibration of skill and judgment in driving: Development of a conceptual framework and the implications for road safety. *Accident Analysis & Prevention*, 76, 25–33.
- Jacob, R. J., & Karn, K. S. (2003). Eye tracking in human-computer interaction and usability research: Ready to deliver the promises. In *The mind's eye* (p. 573–605). Elsevier.
- Jamson, A. H., & Merat, N. (2005). Surrogate in-vehicle information systems and driver behaviour: Effects of visual and cognitive load in simulated rural driving. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 8(2), 79–96.
- Jasper, H. H. (1958). The ten-twenty electrode system of the International Federation. *Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol.*, 10, 370–375.
- Jha, A. P., Krompinger, J., & Baime, M. J. (2007). Mindfulness training modifies subsystems of attention. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 7(2), 109-119. <https://doi.org/10.3758/CABN.7.2.109>
- Kabat-Zinn, J. (2005). *Wherever You Go, There You Are: Mindfulness Meditation in Everyday Life* (10^e éd.). New York: Hachette Books.
- Kaber, D. B., Liang, Y., Zhang, Y., Rogers, M. L., & Gangakhedkar, S. (2012). Driver performance effects of simultaneous visual and cognitive distraction and adaptation behavior. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, 15(5), 491–501.
- Kahle, W., Platzer, W., Leonhardt, H., & Cabrol, C. (1981). *Anatomie, Tome 3, système nerveux et organes des sens*. Consulté à l'adresse <https://www.decitre.fr/livres/anatomie-9782257122537.html>
- Kahneman, D. (1973). *Attention and effort* (Vol. 1063). Prentice-Hall Englewood Cliffs, NJ.

- Kaiser, J., Beauvale, A., & Bener, J. (1996). The evoked cardiac response as a function of cognitive load in subjects differing on the individual difference variable of reaction time. *Acta Neurobiologiae Experimentalis*, 56(1), 209-213.
- Kajimura, S., & Nomura, M. (2015). Decreasing propensity to mind-wander with transcranial direct current stimulation. *Neuropsychologia*, 75, 533-537. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2015.07.013>
- Kam, J. (2010). Slow fluctuations in attentional control of sensory cortex. University of British Columbia. <https://doi.org/10.14288/1.0071153>
- Kam, J., & Handy, T. C. (2014). Differential recruitment of executive resources during mind wandering. *Consciousness and Cognition*, 26, 51-63. <https://doi.org/10.1016/j.concog.2014.03.002>
- Kam, J., Nagamatsu, L. S., & Handy, T. C. (2014). Visual asymmetry revisited: Mind wandering preferentially disrupts processing in the left visual field. *Brain and Cognition*, 92C, 32-38. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2014.10.002>
- Kane, M. J., Brown, L. H., McVay, J. C., Silvia, P. J., Myin-Germeys, I., & Kwapil, T. R. (2007). For Whom the Mind Wanders, and When: An Experience-Sampling Study of Working Memory and Executive Control in Daily Life. *Psychological Science*, 18(7), 614-621. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.2007.01948.x>
- Kelley, W. M., Macrae, C. N., Wyland, C. L., Caglar, S., Inati, S., & Heatherton, T. F. (2002). Finding the Self? An Event-Related fMRI Study. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 14(5), 785-794. <https://doi.org/10.1162/08989290260138672>
- Killingsworth, M. A., & Gilbert, D. T. (2010). A Wandering Mind Is an Unhappy Mind. *Science*, 330(6006), 932-932. <https://doi.org/10.1126/science.1192439>
- Klauer, S. G., Dingus, T. A., Neale, V. L., Sudweeks, J. D., & Ramsey, D. J. (2006). The impact of driver inattention on near-crash/crash risk: An analysis using the 100-car naturalistic driving study data.
- Klein, S., Loftus, J., & Kihlstrom, J. (2002). Memory and temporal experience: The effects of episodic memory loss on an amnesic patient's ability to remember the past and imagine the future. *Social Cognition*, 20(5), 353-379.
- Kopp, K., D'Mello, S., & Mills, C. (2015). Influencing the occurrence of mind wandering while reading. *Consciousness and Cognition*, 34, 52-62. <https://doi.org/10.1016/j.concog.2015.03.003>
- Kreibig, S. (2010). Autonomic nervous system activity in emotion: A review. *Biological Psychology*, 84(3), 394-421. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2010.03.010>

- Lachaux, J.-P. (2018, août). Pour un cerveau responsable au volant. *Cerveau & Psycho*, (101), 63-74.
- Lagarde, E., Chastang, J.-F., Gueguen, A., Coeuret-Pellicer, M., Chiron, M., & Lafont, S. (2004). Emotional stress and traffic accidents: the impact of separation and divorce. *Epidemiology*, 15(6), 762–766.
- Lavie, N. (2010). Attention, Distraction, and Cognitive Control Under Load. *Current Directions in Psychological Science*, 19(3), 143-148. <https://doi.org/10.1177/0963721410370295>
- Lawrence, C., & Barry, R. J. (2009). ERPs and the evoked cardiac response to auditory stimuli: Intensity and cognitive load effects. *Acta Neurobiologiae Experimentalis*, 69(4), 552-559.
- Lechevalier, B. (2008). Chapitre 3. Localisationnisme et associationnisme. In *Traité de neuropsychologie clinique* (p. 21-28). De Boeck Supérieur. Consulté à l'adresse <https://www.cairn.info/traite-de-neuropsychologie-clinique--9782804156787-p-21.htm>
- Lee, J., & Strayer, D. L. (2004). Preface to the special section on driver distraction. *Human Factors*, 46(4), 583-586. <https://doi.org/10.1518/hfes.46.4.583.56811>
- Leech, R., & Sharp, D. J. (2013). The role of the posterior cingulate cortex in cognition and disease. *Brain*, 137(1), 12–32.
- Lemercier, C., Pêcher, C., Berthié, G., Valéry, B., Vidal, V., Paubel, P.-V., ... Maury, B. (2014). Inattention behind the wheel: How factual internal thoughts impact attentional control while driving. *Safety Science*, 62, 279-285. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2013.08.011>
- Levinson, D., Smallwood, J., & Davidson, R. J. (2012). The Persistence of Thought: Evidence for a Role of Working Memory in the Maintenance of Task-Unrelated Thinking. *Psychological Science*, 23(4), 375-380. <https://doi.org/10.1177/0956797611431465>
- Li, G., & Chung, W.-Y. (2013). Detection of driver drowsiness using wavelet analysis of heart rate variability and a support vector machine classifier. *Sensors*, 13(12), 16494–16511.
- Liang, Y., & Lee, J. (2014). A hybrid Bayesian Network approach to detect driver cognitive distraction. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 38, 146-155. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2013.10.004>
- Liang, Y., Lee, J., & Reyes, M. (2007). Nonintrusive detection of driver cognitive distraction in real time using Bayesian networks. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2018), 1–8.

- Liang, Y., Reyes, M. L., & Lee, J. (2007). Real-Time Detection of Driver Cognitive Distraction Using Support Vector Machines. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 8(2), 340-350. <https://doi.org/10.1109/TITS.2007.895298>
- Luck, S. (2005). *An introduction to the event-related potential technique* MIT press. Cambridge, Ma, 45–64.
- Luck, S. J. (2014). *An introduction to the event-related potential technique*. MIT press.
- Macaluso, E., & Driver, J. (2005). Multisensory spatial interactions: a window onto functional integration in the human brain. *Trends in neurosciences*, 28(5), 264–271.
- Macdonald, J., Mathan, S., & Yeung, N. (2011). Trial-by-Trial Variations in Subjective Attentional State are Reflected in Ongoing Prestimulus EEG Alpha Oscillations. *Frontiers in Psychology*, 2, 82. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2011.00082>
- Madelrieux, S. (2012). *Expérencier. Critique*, (787), 1012-1013.
- Mandrick, K. (2013). *Application de la spectroscopie proche infrarouge dans la discrimination de la charge de travail*. Montpellier 1. Consulté à l'adresse <http://www.theses.fr/2013MON14002>
- Marieb, E., & Hoehn, K. (2014). *Anatomie et physiologie humaines*. Pearson Education France.
- Marquart, G., Cabrall, C., & de Winter, J. (2015). Review of Eye-related Measures of Drivers' Mental Workload. *Procedia Manufacturing*, 3, 2854-2861. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.07.783>
- McCraty, R., & Shaffer, F. (2015). Heart Rate Variability: New Perspectives on Physiological Mechanisms, Assessment of Self-regulatory Capacity, and Health risk. *Global Advances in Health and Medicine*, 4(1), 46-61. <https://doi.org/10.7453/gahmj.2014.073>
- McVay, J., & Kane, M. J. (2009). Conducting the Train of Thought: Working Memory Capacity, Goal Neglect, and Mind Wandering in an Executive-Control Task. *Journal of experimental psychology. Learning, memory, and cognition*, 35(1), 196-204. <https://doi.org/10.1037/a0014104>
- McVay, J., & Kane, M. J. (2012). Why does working memory capacity predict variation in reading comprehension? On the influence of mind wandering and executive attention. *Journal of experimental psychology: general*, 141(2), 302.
- McVay, J., Unsworth, N., McMillan, B. D., & Kane, M. J. (2013). Working memory capacity does not always support future-oriented mind-wandering. *Canadian Journal of Experimental Psychology = Revue Canadienne De Psychologie Experimentale*, 67(1), 41-50. <https://doi.org/10.1037/a0031252>

- Merat, N., & Jamson, A. H. (2009). Is Drivers' Situation Awareness Influenced by a Fully Automated Driving Scenario? In *Human factors, security and safety*. Shaker Publishing.
- Mobility Nation. (2017). Réinventer *la mobilité urbaine et périurbaine à l'horizon 2030, 24 propositions pour l'Île-de-France* dans le cadre de Paris 2024.
- Mooneyham, B., & Schooler, J. W. (2013). The Costs and Benefits of Mind-Wandering: A Review. *Canadian Journal of Experimental Psychology-Revue Canadienne De Psychologie Experimentale*, 67(1), 11-18. <https://doi.org/10.1037/a0031569>
- Mosedale, J., Purdy, A., & Clarkson, E. (2004). Contributory factors to road accidents. Consulté à l'adresse <https://trid.trb.org/view/864416>
- Mulder, G. (1986). The concept and measurement of mental effort. In *Energetics and human information processing* (p. 175–198). Springer.
- National Highway Traffic Safety Administration, (NHTSA). (2013). Preliminary Statement of Policy Concerning Automated Vehicles. National Highway Traffic Safety Administration.
- Navarro, J. (2017). Apports de la neuroergonomie à la compréhension de l'activité de conduite automobile.
- Nieoullon, A., Paradiso, M. A., Connors, B. W., & Bear, M. F. (2016). *Neurosciences: A la découverte du cerveau*. (4^e éd.). Montrouge: Pradel.
- Nikula, R. (1991). Psychological Correlates of Nonspecific Skin Conductance Responses. *Psychophysiology*, 28, 86-90. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.1991.tb03392.x>
- Nyberg, L., Kim, A. S. N., Habib, R., Levine, B., & Tulving, E. (2010). Consciousness of subjective time in the brain. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(51), 22356-22359. <https://doi.org/10.1073/pnas.1016823108>
- Observatoire National Interministériel de la Sécurité Routière [ONISR]. (2017). *La sécurité routière en France - Bilan de l'accidentatilité de l'année 2016*.
- Ottaviani, C., Shahabi, L., Tarvainen, M., Cook, I., Abrams, M., & Shapiro, D. (2014). Cognitive, behavioral, and autonomic correlates of mind wandering and perseverative cognition in major depression. *Frontiers in Neuroscience*, 8, 433. <https://doi.org/10.3389/fnins.2014.00433>
- Ottaviani, C., Shapiro, D., & Couyoumdjian, A. (2013). Flexibility as the key for somatic health: From mind wandering to perseverative cognition. *Biological Psychology*, 94(1), 38-43. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2013.05.003>

- Paas, F. (1992). Training strategies for attaining transfer of problem-solving skill in statistics: A cognitive-load approach. *Journal of Educational Psychology*. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.84.4.429>
- Parasuraman, R. (2003). *Neuroergonomics: Research and practice* (Vol. 4). <https://doi.org/10.1080/14639220210199753>
- Parasuraman, R., & Riley, V. (1997). Humans and automation: Use, misuse, disuse, abuse. *Human factors*, 39(2), 230–253.
- Parot, F., & Richelle, M. (1992). *Introduction à la psychologie. Histoire et méthodes*.
- Patel, M., Lal, S. K., Kavanagh, D., & Rossiter, P. (2011). Applying neural network analysis on heart rate variability data to assess driver fatigue. *Expert systems with Applications*, 38(6), 7235–7242.
- Pellissier, S. (2013). Chapitre 7. Variabilité du rythme cardiaque. In *Electrophysiologie de la cognition* (p. 157-177). Dunod. Consulté à l'adresse <https://www.cairn.info/electrophysiologie-de-la-cognition--9782100593064-page-157.htm>
- Perruchet, P. (1988). *Les automatismes cognitifs* (Vol. 174). Editions Mardaga.
- Petersen, S. E., & Posner, M. I. (2012). The Attention System of the Human Brain: 20 Years After. *Annual review of neuroscience*, 35, 73-89. <https://doi.org/10.1146/annurev-neuro-062111-150525>
- Pettitt, M., Burnett, G. E., & Stevens, A. (2005). Defining driver distraction. In *12th World Congress on Intelligent Transport SystemsITS AmericaITS JapanERTICO*.
- Pfurtscheller, G., Allison, B. Z., Bauernfeind, G., Brunner, C., Solis Escalante, T., Scherer, R., ... Birbaumer, N. (2010). The hybrid BCI. *Frontiers in neuroscience*, 4, 3.
- Polich, J. (2007). Updating P300: an integrative theory of P3a and P3b. *Clinical neurophysiology*, 118(10), 2128–2148.
- Posner, M., & Petersen, S. E. (1990). The attention system of the human brain. *Annual Review of Neuroscience*, 13, 25-42. <https://doi.org/10.1146/annurev.ne.13.030190.000325>
- Raichle, M., MacLeod, A. M., Snyder, A., Powers, W., Gusnard, D., & Shulman, G. (2001). A default mode of brain function. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 98(2), 676-682.
- Randall, J., Oswald, F. L., & Beier, M. E. (2014). Mind-wandering, cognition, and performance: a theory-driven meta-analysis of attention regulation. *Psychological Bulletin*, 140(6), 1411-1431. <https://doi.org/10.1037/a0037428>

- Recarte, M., & Nunes, L. M. (2000). Effects of verbal and spatial-imagery tasks on eye fixations while driving. *Journal of experimental psychology: Applied*, 6(1), 31.
- Recarte, M., & Nunes, L. M. (2003). Mental workload while driving: effects on visual search, discrimination, and decision making. *Journal of Experimental Psychology. Applied*, 9(2), 119-137.
- Regan, M., Hallett, C., & Gordon, C. P. (2011). Driver distraction and driver inattention: definition, relationship and taxonomy. *Accident; Analysis and Prevention*, 43(5), 1771-1781. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2011.04.008>
- Regan, M., Lee, J. D., & Young, K. (2008). *Driver distraction: Theory, effects, and mitigation*. CRC Press.
- Regan, M., & Strayer, D. L. (2014). Towards an Understanding of Driver Inattention: Taxonomy and Theory. *Annals of Advances in Automotive Medicine*, 58, 5-14.
- Robinson, D., & Campbell, R. (2006). Contributory factors to road accidents. Consulté à l'adresse <https://trid.trb.org/view/835950>
- Robison, M., & Unsworth, N. (2015). Working memory capacity offers resistance to mind-wandering and external distraction in a context-specific manner. *Applied Cognitive Psychology*, 29(5), 680–690.
- Robison, M., & Unsworth, N. (2017). Working memory capacity and mind-wandering during low-demand cognitive tasks. *Consciousness and Cognition*, 52, 47-54. <https://doi.org/10.1016/j.concog.2017.04.012>
- Rowling, J. K. (2007). *Harry Potter and the deathly hallows (Vol. 7)*. Bloomsbury publishing.
- Roy, R. (2015). *Étude de corrélats électrophysiologiques pour la discrimination d'états de fatigue et de charge mentale : apports pour les interfaces cerveau-machine passives* (phdthesis). Université Grenoble Alpes. Consulté à l'adresse <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01217465/document>
- Roy, R., Gateau, T., Bovo, A., Dehais, F., & Ponzoni Carvalho Chanel, C. (2016). Physiological Markers for UAV Operator Monitoring.
- Ruby, F., Smallwood, J., Engen, H., & Singer, T. (2013). How self-generated thought shapes mood--the relation between mind-wandering and mood depends on the socio-temporal content of thoughts. *PLoS One*, 8(10), e77554. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0077554>
- Rugg, M., & Vilberg, K. L. (2013). Brain networks underlying episodic memory retrieval. *Current opinion in neurobiology*, 23(2), 255–260.

- Rummel, J., & Boywitt, C. D. (2014). Controlling the stream of thought: Working memory capacity predicts adjustment of mind-wandering to situational demands. *Psychonomic Bulletin & Review*, 21(5), 1309–1315.
- Sabey, B., & Taylor, H. (1980). The Known Risks We Run: The Highway. In *Societal Risk Assessment* (p. 43-70). Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/978-1-4899-0445-4_3
- Sayette, M., Reichle, E. D., & Schooler, J. W. (2009). Lost in the sauce: The effects of alcohol on mind wandering. *Psychological Science*, 20(6), 747–752.
- Schacter, D., Addis, D. R., & Buckner, R. L. (2007). Remembering the past to imagine the future: the prospective brain. *Nature Reviews Neuroscience*, 8(9), 657.
- Schooler, J. (2002). Re-representing consciousness: dissociations between experience and meta-consciousness. *Trends in Cognitive Sciences*, 6(8), 339-344. [https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(02\)01949-6](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(02)01949-6)
- Schooler, J. (2004). Zoning Out while Reading: Evidence for Dissociations between Experience and Metaconsciousness Jonathan W. Schooler, Erik D. Reichle, and David V. Halpern. *Thinking and seeing: Visual metacognition in adults and children*, 203.
- Schooler, J., Mrazek, M. D., Franklin, M. S., Baird, B., Mooneyham, B. W., Zedelius, C., & Broadway, J. M. (2014). The middle way: Finding the balance between mindfulness and mind-wandering. In *Psychology of learning and motivation* (Vol. 60, p. 1–33). Elsevier.
- Schooler, J., & Schreiber, C. A. (2004). Experience, meta-consciousness, and the paradox of introspection. *Journal of Consciousness Studies*, 11(7-8), 17-39.
- Schooler, J., Smallwood, J., Christoff, K., Handy, T. C., Reichle, E. D., & Sayette, M. A. (2011). Meta-awareness, perceptual decoupling and the wandering mind. *Trends in Cognitive Sciences*, 15(7), 319-326. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2011.05.006>
- Shen, K.-Q., Li, X.-P., Ong, C.-J., Shao, S.-Y., & Wilder-Smith, E. P. (2008). EEG-based mental fatigue measurement using multi-class support vector machines with confidence estimate. *Clinical Neurophysiology*, 119(7), 1524–1533.
- Sio, U. N., & Ormerod, T. C. (2009). Does incubation enhance problem solving? A meta-analytic review. *Psychological bulletin*, 135(1), 94.
- Smallwood, J., & Andrews-Hanna, J. (2013). Not all minds that wander are lost: the importance of a balanced perspective on the mind-wandering state. *Frontiers in psychology*, 4, 441.

- Smallwood, J., Beach, E., Schooler, J. W., & Handy, T. C. (2008). Going AWOL in the brain: mind wandering reduces cortical analysis of external events. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 20(3), 458-469. <https://doi.org/10.1162/jocn.2008.20037>
- Smallwood, J., Davies, J. B., Heim, D., Finnigan, F., Sudberry, M., O'Connor, R., & Obonsawin, M. (2004). Subjective experience and the attentional lapse: task engagement and disengagement during sustained attention. *Consciousness and Cognition*, 13(4), 657-690. <https://doi.org/10.1016/j.concog.2004.06.003>
- Smallwood, J., Nind, L., & O'Connor, R. C. (2009). When is your head at? An exploration of the factors associated with the temporal focus of the wandering mind. *Consciousness and Cognition*, 18(1), 118-125. <https://doi.org/10.1016/j.concog.2008.11.004>
- Smallwood, J., & O'Connor, R. C. (2011). Imprisoned by the past: unhappy moods lead to a retrospective bias to mind wandering. *Cognition & emotion*, 25(8), 1481-1490.
- Smallwood, J., & Schooler, J. W. (2006). The restless mind. *Psychological Bulletin*, 132(6), 946-958. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.132.6.946>
- Smallwood, J., & Schooler, J. W. (2015). The science of mind wandering: empirically navigating the stream of consciousness. *Annual Review of Psychology*, 66, 487-518. <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-010814-015331>
- Smilek, D., Carriere, J. S. A., & Cheyne, J. A. (2010). Out of mind, out of sight: eye blinking as indicator and embodiment of mind wandering. *Psychological Science*, 21(6), 786-789. <https://doi.org/10.1177/0956797610368063>
- Smith, J. (2016). *Psychothérapie de la dissociation et du trauma*. Dunod.
- Smith, R., Keramatian, K., Smallwood, J., Schooler, J., Luus, B., & Christoff, K. (2006). Mind-wandering with and without awareness: An fMRI study of spontaneous thought processes. In *Proceedings of the Annual Meeting of the Cognitive Science Society* (Vol. 28).
- Solís-Marcos, I., Galvao-Carmona, A., & Kircher, K. (2017). Reduced Attention Allocation during Short Periods of Partially Automated Driving: An Event-Related Potentials Study. *Frontiers in Human Neuroscience*, 11. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2017.00537>
- Spreng, N. (2012). The Fallacy of a "Task-Negative" Network. *Frontiers in Psychology*, 3. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2012.00145>

- Spreng, N., Stevens, W. D., Chamberlain, J. P., Gilmore, A. W., & Schacter, D. L. (2010). Default network activity, coupled with the frontoparietal control network, supports goal-directed cognition. *Neuroimage*, 53(1), 303–317.
- Spronken, M., Holland, R. W., Figner, B., & Dijksterhuis, A. (2016). Temporal focus, temporal distance, and mind-wandering valence: Results from an experience sampling and an experimental study. *Consciousness and Cognition*, 41, 104-118. <https://doi.org/10.1016/j.concog.2016.02.004>
- Stanton, N., Young, M. S., Walker, G. H., Turner, H., & Randle, S. (2001). Automating the driver's control tasks. *International Journal of Cognitive Ergonomics*, 5(3), 221–236.
- Stawarczyk, D., Cassol, H., & D'Argembeau, A. (2013). Phenomenology of future-oriented mind-wandering episodes. *Frontiers in Psychology*, 4, 425. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00425>
- Stawarczyk, D., Majerus, S., Maj, M., Van der Linden, M., & D'Argembeau, A. (2011). Mind-wandering: Phenomenology and function as assessed with a novel experience sampling method. *Acta Psychologica*, 136(3), 370-381. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2011.01.002>
- Stawarczyk, D., Majerus, S., Maquet, P., & D'Argembeau, A. (2011). Neural Correlates of Ongoing Conscious Experience: Both Task-Unrelatedness and Stimulus-Independence Are Related to Default Network Activity. *PLOS ONE*, 6(2), e16997. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0016997>
- Strayer, D., & Drews, F. A. (2007). Cell-Phone–Induced Driver Distraction. *Current Directions in Psychological Science*, 16(3), 128-131. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8721.2007.00489.x>
- Strayer, D., Drews, F. A., Albert, R. W., & Johnston, W. A. (2001). Cell Phone-induced perceptual impairments during simulated driving.
- Techer, F. (2016). *Impact de la colère sur l'attention, le traitement de l'information et les performances en conduite simulée* (phdthesis). Université de Nantes. Consulté à l'adresse <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01455218/document>
- Techer, F., Jallais, C., Corson, Y., Moreau, F., Ndiaye, D., Piechnick, B., & Fort, A. (2017). Attention and driving performance modulations due to anger state: Contribution of electroencephalographic data. *Neuroscience Letters*, 636, 134-139. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2016.11.011>
- Thayer, J., & Lane, R. (2000). A model of neurovisceral integration in emotion regulation and dysregulation. *Journal of affective disorders*, 61(3), 201–216.
- Thayer, J., & Lane, R. (2009). Claude Bernard and the heart–brain connection: Further elaboration of a model of neurovisceral integration. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 33(2), 81–88.

- Treisman, A. (1969). Strategies and models of selective attention. *Psychological review*, 76(3), 282.
- Treisman, A., & Gelade, G. (1980). A feature-integration theory of attention. *Cognitive psychology*, 12(1), 97–136.
- Unsworth, N., & McMillan, B. D. (2013). Mind wandering and reading comprehension: Examining the roles of working memory capacity, interest, motivation, and topic experience. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 39(3), 832.
- Van Elslande, P. (2003). Erreurs de conduite et besoins d'aide : une approche accidentologique en ergonomie. *Le travail humain*, 66(3), 197-224. <https://doi.org/10.3917/th.663.0197>
- Visser, M., Jefferies, E., & Lambon Ralph, M. A. (2010). Semantic processing in the anterior temporal lobes: a meta-analysis of the functional neuroimaging literature. *Journal of cognitive neuroscience*, 22(6), 1083–1094.
- Vollrath, M., & Fischer, J. (2017). When does alcohol hurt? A driving simulator study. *Accident Analysis & Prevention*, 109, 89-98. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2017.09.021>
- Vossel, G., & Zimmer, H. (1990). Psychometric properties of non-specific electrodermal response frequency for a sample of male students. *International Journal of Psychophysiology: Official Journal of the International Organization of Psychophysiology*, 10(1), 69-73.
- Vossel, S., Geng, J. J., & Fink, G. R. (2014). Dorsal and ventral attention systems: distinct neural circuits but collaborative roles. *The Neuroscientist*, 20(2), 150–159.
- Wang, H.-T., Poerio, G., Murphy, C., Bzdok, D., Jefferies, E., & Smallwood, J. (2018). Dimensions of Experience: Exploring the Heterogeneity of the Wandering Mind. *Psychological Science*, 29(1), 56-71. <https://doi.org/10.1177/0956797617728727>
- Wang, J.-S., Knipling, R. R., & Goodman, M. J. (1996). The role of driver inattention in crashes: New statistics from the 1995 Crashworthiness Data System. In 40th annual proceedings of the Association for the Advancement of Automotive Medicine (Vol. 377, p. 392).
- Ward, A., & Wegner, D. M. (2013). Mind-blanking: when the mind goes away. *Frontiers in Psychology*, 4. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00650>
- Wickens, C. (1981). *Processing Resources in Attention, Dual Task Performance, and Workload Assessment*.
- Wickens, C. (2002). Multiple resources and performance prediction. *Theoretical issues in ergonomics science*, 3(2), 159–177.

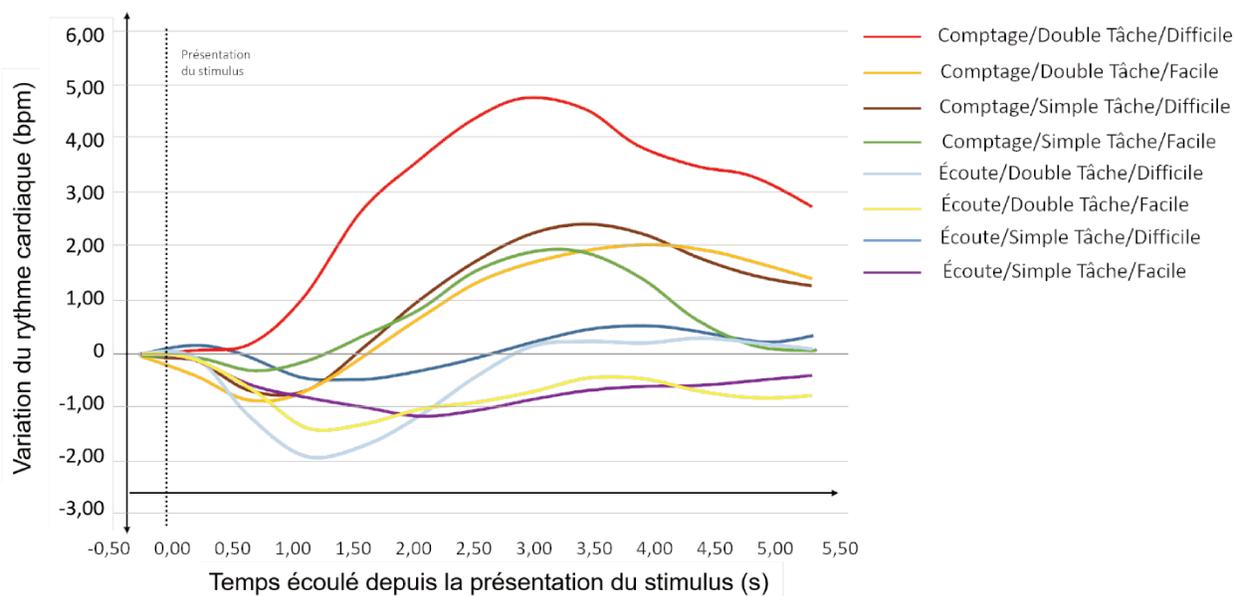
- Wolpaw, J., Birbaumer, N., McFarland, D. J., Pfurtscheller, G., & Vaughan, T. M. (2002). Brain–computer interfaces for communication and control. *Clinical neurophysiology*, 113(6), 767–791.
- Woodman, G. (2010). A brief introduction to the use of event-related potentials in studies of perception and attention. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 72(8), 2031–2046.
- Yang, G., Lin, Y., & Bhattacharya, P. (2010). A driver fatigue recognition model based on information fusion and dynamic Bayesian network. *Information Sciences*, 180(10), 1942–1954.
- Yanko, M., & Spalek, T. M. (2013). Route familiarity breeds inattention: A driving simulator study. *Accident Analysis & Prevention*, 57, 80–86.
- Yanko, M., & Spalek, T. M. (2014). Driving with the wandering mind: the effect that mind-wandering has on driving performance. *Human Factors*, 56(2), 260-269. <https://doi.org/10.1177/0018720813495280>
- Young, M., & Stanton, N. A. (2002). Malleable attentional resources theory: a new explanation for the effects of mental underload on performance. *Human Factors*, 44(3), 365-375. <https://doi.org/10.1518/0018720024497709>
- Zhang, M., Savill, N., Margulies, D. S., Smallwood, J., & Jefferies, E. (2018). Individual differences in reading comprehension and off-task thought relate to perceptually-coupled and decoupled cognition. *BioRxiv*, 387035. <https://doi.org/10.1101/387035>

ANNEXES

Annexe A : Grille apprise par les participants lors de l'étude 1 et permettant de réaliser la tâche difficile. Le contour rouge correspondant à la limite du déplacement effectué par le participant s'il n'effectuait aucune erreur. Les cases externes n'étaient présentes que pour pallier une éventuelle erreur de participants.

1	2	3	4	5
11	12	13	14	15
21	22	23	24	25
31	32	33	34	35
41	42	43	44	45

Annexe B : Courbes de VaRC selon les 8 conditions expérimentales de l'étude 1.



Annexe C : Document soumis pour le Valeo Innovation Challenge lors de la phase 1 (3 pages).

VALEO INNOVATION CHALLENGE

Team Name: MW-Monitoring

Project Name: Mind-Wandering real-time detection

Objective: *Get drivers back in-the-loop to retake control in the safest way*

Abstract (990/999 caractères)

With the gradual automation of vehicles, drivers will have to regain car control in the safer way. Degraded states of attention are exacerbated during takeover because of the primary task type change and the strong time pressure. Previous research has highlighted various methods to detect these states but no study has focused on the detection of cognitive effort generated by the perceptual decoupling from mind-wandering (MW). With an algorithm able to detect cognitive effort induced by MW, the vehicle could offer a safer assistance. Our solution will contribute to reduce the adverse impact of cognitive cost generated by MW on driving bringing a new technological brick in the detection of degraded attentional states. The driver could then go back into the loop in the safest way. Such an innovation would allow all drivers equipped with this automated devices to be alerted in the better way and to easily adapt their operational mode when these attentional states become critical.

I Quel est le problème ? (1462/1499 caractères)

In 2014 in France, there are still over 3,300 killed on our roads. Many studies have highlighted inattention as a contributing factor for nearly ¼ of injury accidents. The term inattention gathers different states as distraction, cognitive overload or mind-wandering (MW). Mind-Wandering can be defined as a shift in the contents of thought away from an ongoing task to self-generated thoughts and feelings. During mind-wandering, focus is disengaged from external inputs; drivers suffer from a perceptual decoupling. MW is a recurring phenomenon in driving, four drivers out of five declare being aware of MW on their last journey and feel being in this state for more than a third of the time. It's therefore necessary to study this phenomenon to limit its impact on driving.

The progressive automation of vehicles seems to be a lasting solution to reduce the number of road accident victims. It is important to anticipate potential problems when drivers will regain car control. Advanced driver assistance systems are already available in some vehicles. The level of automation is gradually increasing and the role of the driver is about to change. Drivers will be responsible for monitoring the automation and hand back the vehicle if necessary. The MW could be disruptive. The effort that the operator will provide to bring its attention to driving could scupper its takeover. It is therefore appropriate to seek an innovative solution to solve this problem.

II Les solutions actuelles (1188/1500 caractères)

These last ten years, some researchers have shown that, through behavioral and physiological measures, the detection of drivers' attentional degraded states is feasible. Current systems detect distraction but no system still detects inattention related to mind-wandering. Specific physiological markers were identified: at an electroencephalographic level (EEG), the amplitude of theta and delta brain waves increase during MW so that the amplitude of alpha and beta waves decrease (Braboszcz & Delorme, 2011); eye control has shown a greater number of blinks and a lesser number of attachment during MW (Smilek et al., 2010); at a behavioral level, there is a lack of micro-regulation of the vehicle's lateral position (Berthié et al., 2015). Each of these studies showed indicators able to detect MW.

Some authors defined an algorithm based on behavioural and gaze data to detect drivers distraction (Liang et al., 2007), its detection rate is excellent (> 96%). However, this model does not include the detection of attentional states degraded by mind-wandering. The technological brick we propose in this challenge could later be integrated into this model to make it even more robust.

III Notre solution (4031/5000 caractères)

During MW, attention disengages from the external environment to turn to internal thoughts (perceptual decoupling; Smallwood et al., 2015). The driver is no longer able to have a good representation of the situation, the cognitive effort it provides are at the service of its self-generated thoughts. The additional cognitive cost generated to bring his attention to the driving task could become too large especially during. In fact, the takeover involves a transition from the driver's non-core activity to the vehicle control. Therefore, the operator could not have sufficient cognitive resources to bring its attention to driving in order to properly return in the control loop. MW, through its perceptual decoupling is likely to cause excessive effort that could hinder the takeover. In consequence, it is necessary to measure in real time the cognitive effort to adapt the assistance level accordingly and allow a good recovery procedure.

As we saw in the previous section, there are several methods to detect mind-wandering and, for the reasons mentioned above, it is necessary to improve their sensitivity by measuring the cognitive effort. By controlling heart rate and breathing, drivers' cognitive effort can be measured (Kaiser et al., 1996; 1999; Lawrence et al., 2009; Choi et al., 2011). Indeed, the extent of the cognitive effort by the heart rate variation (HRV) has been repeatedly demonstrated. As evidence of its validity, a parallel was made with simultaneous brain changes and strong correlations were found between HRV and events-related potentials (Lawrence et al., 2009). My Master 2 work have confirmed the high sensitivity of the HRV while driving (Pepin et al., Submitted). However, there are strong links between heart rate and breathing. This is called Respiratory Sinus Arrhythmia (RSA). To improve the sensitivity of this indicator of cognitive effort, it is appropriate to remove from the cardiac signal the influence of breathing. A modeling technique of the breathing has been validated (Choi et al., 2011). It is time to discover if HRV corrected from the influence of breathing is a sensitive enough indicator to detect in real time the driver's cognitive effort. The contribution of the

eye tracking data should also improve the final indicator detection rate (Faure et al., 2013). In this challenge, we propose to set up three experiments that will develop a technological brick to ensure the real-time detection of cognitive efforts made by the driver.

The model obtained for the detection of cognitive effort linked to the MW allows assisting the driver in various maneuvers and especially during takeover. Experimentally studying the effects of internal mental states is not easy, the strategy of triangulation has been described as optimal for studying this states (Smallwood et al., 2015). This procedure enable to infer internal mental processes based on combination of self-reports and physiological and behavioral measures. Thus, by collecting the heart rate, breathing and eye tracking, as well as driving variables such as the deviation of the lateral position of the vehicle, it seems highly possible to create a model capable of detecting cognitive efforts related to MW.

Eventually, if, at the time of a takeover, a cognitive effort is detected, an adaptive assistance may then be proposed. This assistance will be able to adapt itself to operator's needs and shortcomings. If the algorithm detects a cognitive effort, the onboard computer can display the surrounding obstacles on the screen or on the windshield. This would allow the driver to save time and cognitive resources to improve its situational awareness and reduce the risk of error while returning into the control loop. Conversely, if the algorithm doesn't show any cognitive effort, the information proposed should not overburden its working memory. It would be also possible with our method to know the cognitive effort required by the driver at this time to offer the best possible interface.

IV Notre maquette et notre manière de faire (1496/1499 caractères)

To find the real-time most sensitive indicator of cognitive effort, three steps are proposed. In the first one, to control the realization of a cognitive effort, the participant will be asked to perform calculations while driving the simulator. Triggers will be marked each time a new calculation will be made by the driver. The objective is to maximize the detection of cognitive effort in analyzing cardiac and respiratory signals together.

The second step will reuse the collected data without using triggers. A sliding window analysis will determine if indicators are enough resistant to noise by evaluating their sensitivity and specificity. The objective of this step is to answer the following question: "Without trigger, are we able to detect the cognitive effort with a correct detection rate?".

After this step, the third one will be run on-road. Drivers will be asked to self-report MW episodes while driving. When they will be aware of being in MW state, they will push a button. This will allow us to, a posteriori, be able to study the physiological variables during the events: the time window from -13 s to -4 s prior to each button press will be designated as a MW interval and the window from 20 s to 29 s as an attentive interval (He et al., 2011). Sensitivity and specificity of our indicators will be tested in an ecological context. This final step will be validated when the system will satisfactorily detect the cognitive effort linked to MW during on-road driving episodes.

Annexe D : Document soumis pour le Valeo Innovation Challenge lors de la seconde phase (20 pages).



Valeo Innovation Challenge 2016

Phase 2 Project file

Deadline: July, 15th 2016; noon 12:00 CET

Please remember the Valeo Innovation Challenge Rules and the FAQ before starting the description of your proposal. Bear in mind that the proposal will be evaluated according to the selection criteria set out in the rules Article 7.

The technical file must respect this template using the headings on page 2. The structure of this document and the font must not be changed. The minimum font size allowed is 11 points and the font type is Arial. The maximum number of 20 pages should be respected. You can insert texts, images or drawings.

Team name: MONITOR

Project title: Mind-Wandering real-time detection

Abstract (15 lines max):

With the gradual automation of vehicles, drivers will have to take over their car in the safest way. No study has focused on the detection of cognitive effort generated by mind-wandering (MW) yet. Indeed, the cognitive cost generated by the MW or by any other task could exceed the driver's real capacities. Several studies have already highlighted indicators able to detect cognitive effort averaged over a huge number of events. For the proof of concept of this challenge, we tried to decorrelate heart rate and respiratory signals to remove the Respiratory Sinus Arrhythmia phenomenon. This would improve the sensitivity of HRC to spot the cognitive effort in driving. Moreover, using the data fusion methodology, others indicators could be added to further improve our capacity to detect the cognitive effort. With an algorithm able to detect cognitive effort induced by MW, a device implemented into cars could offer an assistance. The driver could then go back into the loop in the safest way. Such an innovation would allow all drivers equipped with this automated devices to be alerted in the better way and to easily adapt their operational mode when these attentional states become critical.

valeoinnovationchallenge@valeo.com Phase 2





Valeo Innovation Challenge 2016

Phase 2 Project file

Deadline: July, 15th 2016; noon 12:00 CET

Please remember the Valeo Innovation Challenge Rules and the FAQ before starting the description of your proposal. Bear in mind that the proposal will be evaluated according to the selection criteria set out in the rules Article 7.

The technical file must respect this template using the headings on page 2. The structure of this document and the font must not be changed. The minimum font size allowed is 11 points and the font type is Arial. The maximum number of 20 pages should be respected. You can insert texts, images or drawings.

Team name: MONITOR

Project title: Mind-Wandering real-time detection

Abstract (15 lines max):

With the gradual automation of vehicles, drivers will have to take over their car in the safest way. No study has focused on the detection of cognitive effort generated by mind-wandering (MW) yet. Indeed, the cognitive cost generated by the MW or by any other task could exceed the driver's real capacities. Several studies have already highlighted indicators able to detect cognitive effort averaged over a huge number of events. For the proof of concept of this challenge, we tried to decorrelate heart rate and respiratory signals to remove the Respiratory Sinus Arrhythmia phenomenon. This would improve the sensitivity of HRC to spot the cognitive effort in driving. Moreover, using the data fusion methodology, others indicators could be added to further improve our capacity to detect the cognitive effort. With an algorithm able to detect cognitive effort induced by MW, a device implemented into cars could offer an assistance. The driver could then go back into the loop in the safest way. Such an innovation would allow all drivers equipped with this automated devices to be alerted in the better way and to easily adapt their operational mode when these attentional states become critical.



Summary for “Technological Innovation” Category	Indicative nb of pages
1: What is the problem? Or situation to improve? <ul style="list-style-type: none"> • What are the expected impacts-benefits if improved / corrected? • Speak with data as far as possible. 	1-2
2: What is/are the current solution(s) / state of the art? <ul style="list-style-type: none"> • What are the remaining challenges to solve (technical, economic, societal, etc...)? 	2-4
3: What is your solution? <ul style="list-style-type: none"> • Describe selected concepts, principles, and associated technologies. • How does it work? Give detailed information (functional description, architecture, hardware, software- apps , car integration and Human Machine Interface, etc.). • Illustrate with figures / data / schematics / drawings as far as possible. 	4-7
4: Present your mock' up. <ul style="list-style-type: none"> • Be it simulation, physical mock-up with evaluation/tests, animation, video, etc. • Describe/show how it works, how it is built. • What are the associated characteristics / performances / limits (can do/cannot do)? • Identify the difficult points / issues to be solved (technical challenges to implement it in the coming years) • Describe the improvements to be brought during further developments. 	4-7
5: If you belong to the Top 4 finalists. <ul style="list-style-type: none"> • How do you plan to present your Innovation to the requirements? Grand Jury in Paris (20' presentation on stage (No demo car): materials requested? / transport of the mock up?) 	0,5



What is the problem? Or situation to improve? (1-2 pages)

In 2014 in France, there are still over 3,300 killed on our roads. It seems that road safety measures involving speed decreases or alcohol regulation maintain this number under 3,500 but are no longer efficient to reduce it. The solution for counter measures allowing to reduce this number seems to be elsewhere. Indeed, many studies have highlighted inattention and distraction as contributing factors for nearly 25% of injury accidents each (Mosedale et al, 2005; Galéra et al, 2012). Distraction can be defined as a diversion of attention away from critical activities to competitive ones while inattention can be defined as a state inducing endogenous shift of attention (Lemerancier and Cellier, 2008). The term inattention gathers different states such as cognitive overload or mind-wandering (MW). The MW state is defined as a shift in the contents of thought away from an ongoing task to self-generated thoughts and feelings (Smallwood and Schooler, 2015). It's a recurring phenomenon in driving so that four drivers out of five declare having wandering thoughts during their last journey and feel being in this state for more than a third of the time (Berthié et al, 2015). Moreover, this state represents between 30 to 50% of our everyday thoughts (Bixler & D'Mello, 2014; Killingsworth & Gilbert, 2010). But being in MW would improve the risk to be responsible for a road accident (Galéra et al, 2012). This may be explained by a phenomenon called perceptual decoupling (Smallwood et al, 2008). The perceptual decoupling corresponds to the capacity for the mind to flexibly disengage attentional processes from perception (Smallwood and Schooler, 2015).

Last years have seen the emergence of advanced driver assistance systems (ADAS). These devices are already available in some vehicles. So, the level of automation is gradually increasing and the role of the driver is about to change (Damböck et al, 2012). According to the national highway traffic safety administration (NHTSA, 2013), 5 levels of automation may be distinguished ranging from "No automation" (level 0) to "Full self-driving automation" (level 4). So, drivers driving time will decrease proportionally to the increase of the level of automation. Thus, until the autonomous vehicle is fully operational, drivers will have to monitor the automation when it has control of the vehicle and takeover when it stops. Considering the levels of automation 1 to 3 on which the driver stay "in the loop", to maintain safety smooth interactions between human operator and automation will be critical. Nevertheless, insofar as there are situations that automation will not be able to handle, the driver must be able to quickly return to the driving task to takeover. Thus, harmonious and adapted interactions between automation and human operator seem to be the strongest predictor of a



successful takeover. So it is important to anticipate potential issues when drivers will regain car control. We know that MW propensity is directly linked to the driver's working load. Indeed, MW propensity decreases when the working and particularly the cognitive demand are high. For example, more episodes of MW were reported on well-known than unknown roads and in no-wind condition than in heavy-wind condition (He et al, 2001). With the increase of the level of automation, it is expected that drivers' cognitive load will be lower during driving with ADAS than without. Then, it's therefore likely that drivers', although they know they have to monitor the automated device, would be more often in a MW state. So, how can we ask people using ADAS to be ready to take over vehicles at any time, knowing that MW will be more frequent? It's the automation paradox.

And what about unexpected driving situations? Facing an unforeseeable danger or a system failure, automation will probably delegate the driving activity to the human operator. The latter should abandon its second activity (listen to music, read a book, daydreaming etc ...) to be able, in a strict temporality, to take over the vehicle. But how a person who does not lead and whose attention is not on the line can properly take over the vehicle? Indeed, as we saw, MW could be disruptive. The cognitive cost generated by the perceptual decoupling can hinder the update of drivers' representation of situation. Furthermore, the additional cognitive cost generated by the need of reorienting attention on driving could be too important in particular during high temporal constraints. The effort that the operator will provide to bring its attention to driving could scupper its takeover and lead to an accident. It's therefore necessary to study this phenomenon to limit its impact on driving and seek an innovative solution to solve this problem.

Solving the automation paradox would improve drivers' safety when using ADAS. Indeed, in cases where automation has to delegate the lead, knowing the driver state in real-time would allow the device to decide if the driver is able to take over or not. In a complex emergency situation that automation can not handle, not delegating the lead to the driver because of its inattentive state can not be a solution. The best hope to safely handle the situation appears to train upstream and warn the driver in the best way so it would provide optimal conditions for him to take over. That's why it seems so important to be able to detect the driver state in real-time.



What is/are the current solution(s) / state of the art? (2-4 pages)

First of all, most of the researches conducted on attentional failure while driving do not expose clear differences between distraction and inattention. Indeed, conceptual work conducted by Lee, Young & Regan (2009) contributed to raise confusion between those two concepts. So, although there is no consensus on the subject, differences between distraction and inattention have to be clarified. In our MONITOR Team, inattention to driving is defined as a state inducing endogenous shift of attention (Lemerrier & Cellier, 2008). The emergence of inattention can be promoted by various factors including fatigue, medication or mind wandering (MW). Distraction is defined as a diversion of attention away from critical activities to competitive activities not linked with the ongoing activity; an example is cell phone use while driving (Strayer, Drews, Albert, & Johnston, 2001). Distraction and inattention, better known under Degraded States of Attention (DSA) are considered as contributing factors for 25 to 50% of injury accidents. These states seem to have different negative impacts on drivers but would be responsible for an equivalent part of accidents (Mosedale et al, 2005; Galéra et al, 2012). So, to maximize their potential, counter measures have to be adapted to the state in which the driver is. The detection and the capacity to distinguish these states would improve our capacity to counter them and then improve road safety by limiting their negative impact. DSA detection, due to the strong time pressure must be done in real time. So, we have to focus on specific indicators able to detect distraction or inattention in real-time.

These last ten years, some researchers have shown that, through behavioral and physiological measures, the detection of DSA is feasible. Indeed, some authors designed an algorithm merging behavioral and gaze data to detect drivers' distraction (Liang et al., 2007). Several models have been proposed and the better one is able to detect driver distraction with more than 96% accuracy. It's therefore possible to carry out a driver monitoring by knowing if the driver is fully focused on his driving task (eyes on the road) or distracted (eyes off the road). So, a current system is able to detect distraction but no system detects inattention yet. Indeed, inattention did not necessarily involving identifiable behavioral activity. Physiological measures seem to be the best tool to provide information about this cognitive state. Each study cited below was interested in the detection of one kind of inattention state (such as the overload or MW) by one physiological dimension.

MW physiological markers have been highlighted by conducting an electroencephalography



(EEG) study. Indeed, the amplitude of the theta (4-7 Hz) and delta (2-3.5 Hz) waves increases during MW while amplitude of alpha (9-11 Hz) and beta (15-30 Hz) waves decreases (Braboszcz & Delorme, 2011). Brain waves appearance is likely to inform us about a possible presence of a MW state. A second study tried to pull in MW gaze markers. Researchers showed a greater number of eye blinks during MW. In addition, the number of binding was significantly lower in MW compared to a control condition (Smilek et al., 2010). Finally, MW state can be studied using driving data. Indeed, there is an absence of micro-regulations of the lateral position of the vehicle when drivers see their mind wander (Lemercier et al., 2014). Links between MW and heart rate were surveyed by Smallwood and collaborators in 2004. Their study shows heart rate significantly higher during MW self-reported episodes. Each of these studies showed an objective indicator able to detect MW. So, it's therefore likely that the combination of several indicators (such as EEG, gaze, driving and heart rate measurements) seems to be the best solution to improve MW detection and to a large extent inattention. Indeed, data fusion increases the sensitivity and specificity of the final indicator (Liang et al., 2007; Gaetan et al, 2015). Data fusion refers to a specific methodology which aims to refine the indicators by collecting data from different sources. It would be therefore interesting to merge such measurements into an algorithm and use the triangulation method to objectively assess its sensitivity and specificity (Smallwood et al, 2015). But we are looking at an indicator able to detect the cognitive effort (cost) generated by the MW state. Such an indicator could be added into the algorithm to improve its detection of inattention.

As previously said, during MW, drivers suffer from a perceptual decoupling corresponding to a difficulty for the mind to flexibly disengage attentional processes from perception (Smallwood and Schooler, 2015). The cognitive cost generated by this decoupling can hinder the update of drivers' representation of situation. Furthermore, the additional cognitive cost generated by the need to reorient its attention resources on driving could be too important in particular during high temporal constraints. So, we are focusing on the cognitive effort generated by MW. Let's bring information about an objective indicator which has proved its worth.

Indeed, several studies have highlighted a cognitive effort indicator through a physiological measurement. Indeed, the cognitive effort detection has been demonstrated by several studies using heart rate change (HRC) (Kaiser et al, 1996; Kaiser et al, 1999; Lawrence &



Barry, 2009). Under relaxation (or passive) conditions, a simple deceleration in HR have been recorded in a 6 seconds time-window after the stimulus onset (ECR1 component). Under cognitive effort (or active) conditions, a slight deceleration in HR (ECR1) have been highlighted replaced by a sharp acceleration (ECR2 component) in the same time-window (Kaiser et al, 1996). Kaiser and collaborators reproduced the same experimental conditions as previously but included patients with amyotrophic lateral sclerosis (ALS), a motor neuron disease that does not interfere with executive behavior, but impairs cognitive function. There was no difference between groups in the passive task, whereas a significant less pronounced HR acceleration was found in the active task for ALS patients compared to healthy people (Kaiser et al., 1999). It's therefore likely that the ECR2 component reflects the cognitive effort made by participants.

A parallel have been made with simultaneous brain variations and strong correlations were found between changes in heart rate and changes in event-related potentials (ERP = changes of electric potential at the surface of the scalp). Authors highlighted two pairs of matched components: N1 and P300 component for ERP and ECR1 and ECR2 components for HRC (Lawrence & Barry, 2009). So, regarding cognitive processes, ECR1 and N1 express information recording while ECR2 and P300 express information processing. The evidence that it's possible to infer what happen in the brain from the cardiac activity have been demonstrated. An experiment has validated the sensitivity of HRC while driving (Pepin, Jallais, Fort, Moreau, Navarro, Gabaude, in press). Basically, results obtained are the same than previously obtained by different authors (see Figure 1).

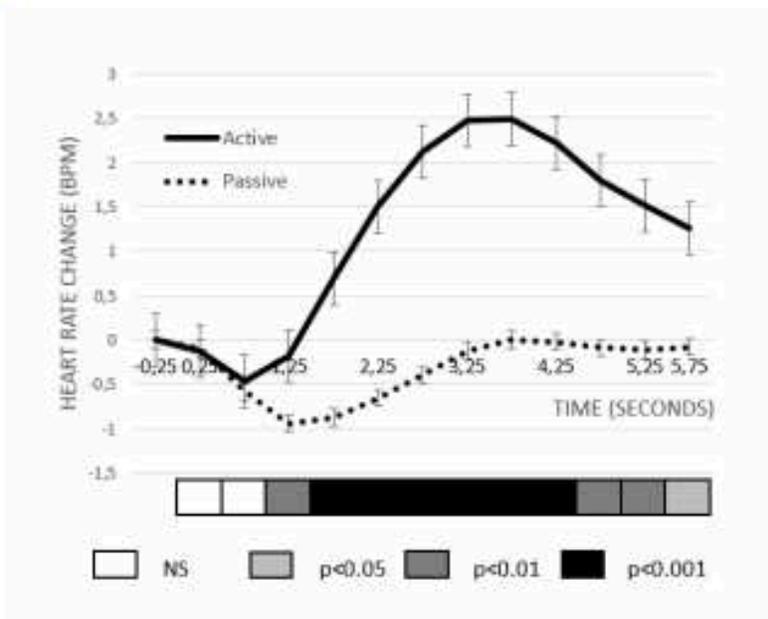


Figure 1 : Grand mean evoked cardiac responses at 0.5 s intervals from stimulus onset (obtained from raw data), ECR averaged across active vs passive conditions and statistical significance for Student's t-tests comparing mean HRC values between active and passive conditions.

Thus, using the HRC measurement over short time windows, it is possible to observe HR accelerations reflecting drivers' cognitive effort. Finally, it appears that a measurement of cognitive effort was possible by analyzing HRC over short time windows averaged for a large number of events. Indeed, each HRC curve has been calculated averaging over 150 events by condition. So, how can we detect the cognitive effort in real time if we need to average our data on hundreds of events before being able to conclude? The sensitivity of this indicator has to be improved for the detection of the cognitive effort in real-time generated by the MW perceptual decoupling.

What is your solution? (4-7)

To summarize the problem: during MW, attention disengages from the external environment to turn to internal thoughts (perceptual decoupling; Smallwood et al., 2015). The driver is no longer able to have a good representation of the situation, the cognitive effort it provides is at the service of its self-generated thoughts. The additional cognitive cost generated to bring his attention to the driving task could become too large especially during heavy time constraints. In fact, the takeover involves a transition from the driver's non-core activity to the vehicle control. Therefore, the operator could not have sufficient cognitive resources to bring

valeoinnovationchallenge@valeo.com

Phase 2





its attention to driving in order to properly return into the control loop. MW, through its perceptual decoupling is likely to cause excessive effort that could hinder the takeover. In consequence, it is necessary to measure in real time the cognitive effort to accordingly adapt the assistance level and then allow a good recovery procedure. As we saw in the previous section, there are several methods to detect the cognitive effort and, for the reasons mentioned above, it is necessary to improve their sensitivity.

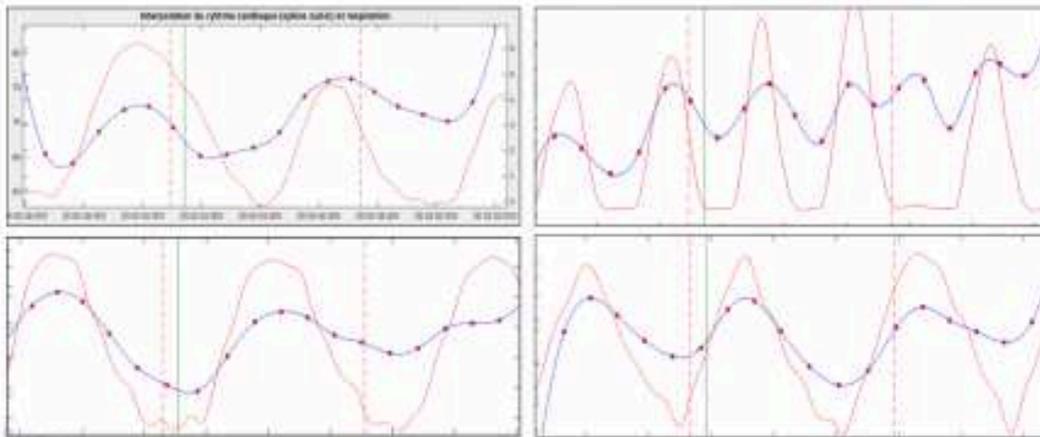


Figure 2 : 4 diagrams representing heart rate signal (in blue) and respiratory signal (in red).

In the literature, it is admitted that there are strong links between heart rate and breathing. Indeed, each breath have an impact on HR. This is called Respiratory Sinus Arrhythmia (RSA) (see Figure 2). Respiratory sinus arrhythmia (RSA) has emerged as an indicator of how well the body maintains homeostasis and flexibly responds to environmental demands. When we inhale, HR accelerates a little and decelerates when we exhale. We saw that a cognitive effort lead to an increase of 2 or 3 BpM on average compared to HR baseline. So, the correction of this phenomenon would improve the sensitivity of heart rate change (HRC) and would allow us to detect the cognitive effort firstly averaging over a significantly fewer number of data and then, with a sensitivity greatly improved, in real-time. So, the inclusion of breathing is necessary to understand and quantify links between breathing and HR. But how is it possible to remove the breathing influence from the heart rate signal?

An online procedure was used to recruit 18 healthy volunteers from the University of Lyon (10 males, age 22.7 ± 1.4). All of them reported normal or corrected to normal visual acuity and had been holders of a valid driving license for at least 3 years. All of them gave written consent and received no financial support for their participation. Each participant took part



in each condition of the independent variables. It has to be noted that drivers had to maintain the car speed at 70 Km/h and stay in the center of the lane. In checking the accuracy of the answers, we assessed that the cognitive task was performed correctly. Throughout the experiment, participants were seated in a car wearing an ambulatory measurement system of cardiac activity. The objective of this experiment was to highlight HRC as a cognitive effort indicator suitable for driving (Pepin et al, in press).

An off-line cardiometer method was used to identify interbeat intervals (IBI). An automatic detection of the R-R intervals to define IBI corresponding to the time between two peaks of R waves have been realized. At this step, it was possible to inspect the ECG and correct mistakes in the detection process, and also identify ectopic beats. All data sets were manually checked for outliers (1386 events) to eliminate trials (107 events) from which the cardiac signal was noisy. On average, 71 (± 8) events were analyzed for each participant. Then, off-line transformation of the IBI into HR in beats/min was done to obtain a continuous signal. HR and IBI are defined as follows:

$$IBI_n = r_n - r_{n-1}$$

$$HR_n = \frac{60,000}{IBI_n}$$

where IBI_n is the interval between two peaks at a given time in milliseconds (ms), r_n is the time of the n^{th} R peaks and HR_n is the heart rate in beat per minute (bpm) at the same time (Roy, 2015).

As a last step to obtain the heart rate change every 0.5 s, the transformation formula have been calculated as follows:

$$HRC = HR(t) - HR(t_0)$$

where HRC is the change in heart rate in beat per minute (bpm), $HR(t)$ is the heart rate at any time in the time window and $HR(t_0)$ is the heart rate at the beginning of the time window. Indeed, each time window lasted 6 s corresponding to 13 successive HRC values including the first and the last data point.

Previous results recorded in laboratory conditions have been replicated during driving:

valeoinnovationchallenge@valeo.com

Phase 2





during the first seconds after a cognitive effort, there is a slight deceleration in heart rate followed by a sharp acceleration. Conversely, in the absence of cognitive effort, a simple cardiac deceleration has been observed. Our study confirms that it is possible to distinguish HRC in response to a cognitive effort over short time windows by observing the grand mean of evoked cardiac responses at 0.5 s intervals from stimulus onset when averaged over a significant number of episodes.

So, this experiment allowed us to use cardiac and breathing data collected to conduct several analysis in order to decorrelate those 2 signals. Data collected here will allow us to quantify HRC sensitivity before and after the correction. To summarize HRC sensitivity will be evaluated before the correction. Sensitivity is defined as the probability of finding an event knowing that this event is actually present. When we apply this definition to our problematic, it means that we will calculate the number of time where our indicator detect a cognitive effort when we know there was a cognitive effort. This sensitivity score will be compared to a new sensitivity score after correction. So the data mining methodology will be evaluated on its capacity to decorrelate those 2 signals and improve HRC sensitivity.

If data is characterized as recorded facts reflecting the state of the world, then information is the set of patterns that underlie the data. In each database, there is a huge amount of potentially important information locked up. To bring it forth a data mining methodology has been built up. *Data mining is the extraction of implicit, previously unknown, and potentially useful information from data.* The idea is to build computer programs that sift through databases automatically, seeking regularities or patterns (Witten & Frank, 2005).

So, data collected during several driving sessions have been analyzed to find invariants. As we said, the main objective was to quantify changes in heart rate due to the RSA phenomenon. Several steps have been followed to fill this purpose. Firstly, around 20 variables such as the amplitude and the duration of the respiration signal or its derivative have been derived from the respiratory signal. So, all of these explanatory variables likely to explain changes in HR have been put into a matrix able to design decision trees. Decision tree builds classification or regression models in the form of a tree structure. It's a structure with root nodes, branches and leaf nodes. It breaks down a dataset into smaller and smaller subsets while each internal node denotes an inferential statistical test on an attribute, each branch denotes the outcome of a test, and each leaf node holds a class label. The final result is a tree with



decision nodes and leaf nodes. A decision node has two or more branches. Leaf node represents a classification or decision. Two different kinds of decision tree have been designed here: Classification and Regression Trees (CRT) and Chi-squared Automatic Interaction Detection CHAID.

CRT

CRT allow researchers to split the data into various segments. These segments are as homogeneous as possible according to the dependent variable and its limitations. A terminal node in which all cases have the same value for the dependent variable is a homogeneous, "pure" node. Indeed, the CRT growing method attempts to maximize within-node homogeneity. The extent to which a node does not represent a homogenous subset of cases is an indication of impurity. For example, a terminal node in which all cases have the same value for the dependent variable is a homogenous node that requires no further splitting because it is "pure." In CRT, all splits are binary and scale and ordinal independent variables are handled the same way; so, it's not possible to specify a number of intervals for scale independent variables.

CHAID

CHAID is a type of decision tree based upon adjusted significance testing. The CHAID decision tree can be used for prediction, classification and for detection of interaction between different explanatory variables. CHAID's advantages are that its output is highly visual and easy to interpret. Because it uses multiway splits by default, it needs rather large sample sizes to work effectively, since with small sample sizes the respondent groups can quickly become too small for reliable analysis. One important advantage of CHAID over alternatives such as multiple regressions is that it is non-parametric.

Present your mock' up (4-7)

As we previously said, a data mining methodology has been set up for the removal of the RSA phenomenon. This methodology highlighted different results which have been compared on their capacity to improve the HRC sensitivity. Results obtained have been explored using decision trees. The sensitivity of the HRC indicator have been compared before and after the removal of RSA using classification tree.



Firstly, we established 18 potential explanatory variables and all of these variables have been put in a correlation matrix. Results can be seen in Appendix 1. Among those variables, the duration of the respiration or its amplitude have been taken into account as well as the duration and the amplitude of the derivative of the respiratory signal. We decided to keep variables with the highest correlation coefficient with the variable entitled "*DeltaRC*" which represent changes in HR. When we took a closer look, we noticed that 2 pairs of variables had high correlation coefficient between each other. We thought it was then useless to keep them all and the decision to remove the 2 variables of each pair with the lowest correlation coefficient (*DureeRespi* which represent the duration of the respiration at each moment and *AmpliDiffRespiFCPrécédente* which represent the amplitude of the derivative signal which has been taken during the previous heart rate) have been taken.

Decision trees are able to classified variables on their capacity to explain another variable, here, changes in HR. So, we decided to keep all of these potentially explanatory variables and test it. So, each one have been added and removed from the model to quantify its added value. Around 50 decision trees have been built up using different methodologies such as the CHAID or the CRT using heart rate data collected among 18 participants. We voluntarily excluded extremes values of change in heart rate. Indeed, changes in heart rate values upper than 7BpM or lower than -7BpM have been removed to avoid errors in the classification. Then, we picked up the decision tree with the higher accuracy for the test phase. The decision tree which explains changes in HR with the greatest accuracy has a percentage of explanation of 25.4% for the learning phase while it has 18.6 % for the test phase. This decision tree is a CRT with 627 nodes all in all and 314 terminal nodes. The standard error for the learning phase is 0.002 and 0.002 for the test phase.



Classification	Sample	Observations Forecast														Correct Percentage	
		-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6		7
Learning Phase	-7	8	10	1	24	137	169	28	34	14	10	2	1	1	0	0	1.40%
	-6	1	23	7	25	222	243	83	52	17	9	6	3	0	1	1	1.30%
	-5	1	7	18	34	287	414	121	112	40	18	10	3	0	1	0	1.80%
	-4	1	2	13	106	431	592	225	183	64	38	14	7	4	0	0	6.20%
	-3	2	1	13	42	666	804	382	314	129	87	17	12	4	3	1	26.90%
	-2	0	0	8	47	505	1220	888	599	232	132	32	25	4	3	2	34.70%
	-1	0	1	10	37	432	858	1296	854	404	232	68	39	8	1	0	30.60%
	0	0	2	11	38	296	675	775	1460	648	433	88	66	24	4	3	12.50%
	1	0	1	2	5	176	475	436	756	1147	525	368	118	28	11	5	30.60%
	2	0	0	1	7	77	178	202	427	571	827	258	250	66	21	14	29.20%
	3	0	0	1	7	41	115	89	234	330	527	475	256	84	37	12	21.70%
	4	0	0	0	1	23	90	63	141	191	322	390	472	94	42	21	27.90%
	5	0	0	0	0	21	28	41	88	101	238	174	251	198	11	42	16.40%
	6	0	0	0	1	5	23	12	72	78	152	120	213	85	77	19	9.00%
	7	0	0	0	1	8	13	12	52	44	93	69	100	80	27	90	9.70%
Percentage	0.00%	0.10%	0.30%	1.30%	10.50%	18.00%	14.00%	16.90%	12.60%	11.40%	5.60%	5.80%	2.20%	0.80%	0.60%	25.40%	0.548
Test Phase	-7	8	15	2	16	127	164	46	40	11	11	2	1	1	0	1	5.40%
	-6	2	4	6	32	200	242	77	77	28	20	5	1	1	0	0	6.60%
	-5	2	4	8	25	324	380	145	123	56	19	3	4	2	0	0	6.70%
	-4	2	10	18	49	427	598	258	213	81	53	11	5	3	1	0	2.80%
	-3	2	5	18	52	520	794	439	340	162	104	17	12	6	0	2	21.90%
	-2	1	1	9	54	565	879	708	656	268	139	39	31	2	1	0	28.40%
	-1	1	3	12	46	451	876	968	969	485	244	62	44	13	7	3	22.60%
	0	0	1	4	16	328	716	809	1007	683	484	128	85	23	4	5	24.50%
	1	0	1	9	15	167	409	471	802	838	630	221	156	51	17	8	22.20%
	2	0	0	1	4	86	223	243	486	610	677	337	220	65	27	17	22.60%
	3	0	0	0	2	40	118	122	244	355	521	287	273	105	43	33	13.40%
	4	0	0	0	1	21	71	57	142	244	332	242	320	114	36	23	18.40%
	5	0	0	0	2	14	31	30	101	129	242	199	112	133	40	18	10.40%
	6	0	0	0	1	9	17	27	54	69	125	143	220	47	39	39	4.70%
	7	0	0	0	0	6	20	16	38	42	113	75	161	80	32	23	1.80%
Percentage	0.10%	0.10%	0.20%	1.00%	10.30%	18.00%	14.20%	16.90%	12.70%	11.60%	5.60%	5.80%	2.10%	0.80%	0.60%	18.60%	

Development method: CART
 Dependent Variable : catDeltaFC

Table 2: HRC values expected by the model compared to the real HRC values calculated from the heart rate signal. Red square means that 635 events were classified as 0 HRC values while they should have been classified as -2BpM HRC values.

A one point margin of error was allowed. It means that if the decision tree expected a -4 correction while the good correction was -5 BpM, it was considered as a negligible error. Indeed, we saw that a cognitive effort lead to an increase of 2 or 3 BpM so this higher tolerance would not avoid the detection of the cognitive effort. When we take this correction into account, the accuracy of the decision tree increases considerably. Indeed, with such a correction, the accuracy of prediction for the learning phase raises to 54.8% while it raises 46.7% for the test phase.

From this decision tree, the decision rules have been extracted and implemented into an algorithm so we can offset this influence. The selected decision tree was complex and decision rules extracted from it filled 9420 code lines in the algorithm. So we have been able to understand the decision rules provided by the tree and applied it to the cardiac data to remove the RSA influence. For example, if the decision tree has expected a 2BpM increase for the next heart rate considering the 18 variables, then we removed 2BpM for the next HR.



The algorithm has been used for the 67094 heart rate values. After this pass, we had corrected the heart rate from the breathing influence using the data mining methodology (Figure 3).

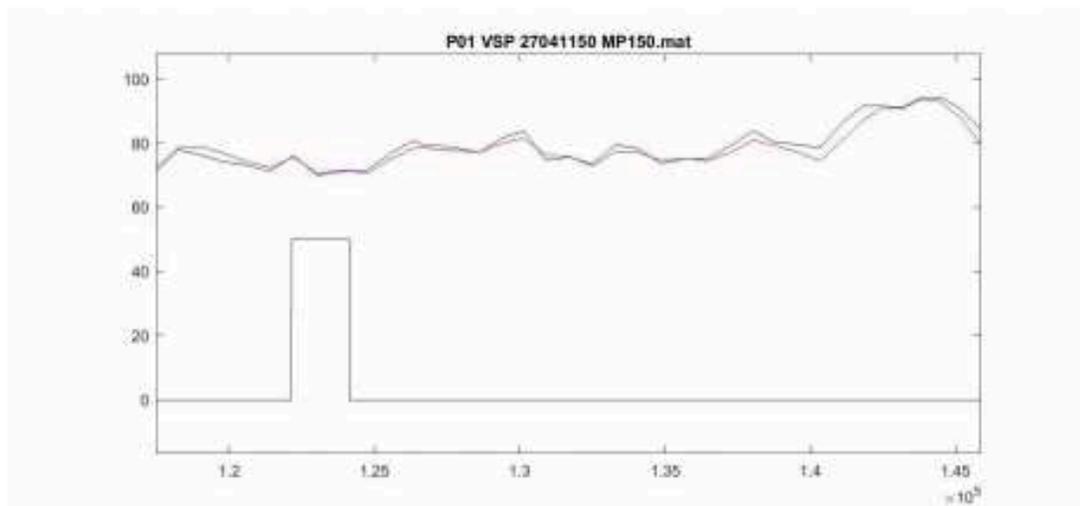


Figure 3 : Uncorrected heart rate signals (blue) and corrected heart rate signal in a 25 seconds time-window.

Let's have a closer look on the consequences led by the correction we made. Indeed, the heart rate after correction (NHR = New Heart Rate) here in blue, is slightly different from the uncorrected heart rate here in red. We can see that there are tiny differences between those 2 signals and the corrected signal does not degenerate. Indeed, multiple corrections in the algorithm have overcome this issue. Positive and negative corrections made to compensate the RSA phenomenon offset one another and lead to a consistent signal.

Then, a second step allowed us to know if this correction has been efficiency enough to improve the sensitivity of HRC. So, in the same vein than before, we used decision tree to classify different event from our study on the condition factor (0 = No cognitive effort and 1= Cognitive effort). First of all, we used descriptive statistical analysis to visually observe the effects and to try to find invariants. For example, when we compare a condition with a cognitive effort with a condition with no cognitive effort, the largest differences can be seen between 3 and 4 seconds after the beginning of the cognitive effort. To classify the condition, we used several indicator, chosen on the basis of the visual shape of the data, such as HRC values (=DFC) 3 and 4 seconds after the cognitive effort or HRC value 5 seconds after the Cognitive effort compared to HRC value 1 second after the cognitive effort (DFCt1) (see Appendix 2).



These information and others have been used to better classify the condition using our variables. We could have used all the potentially explanatory variables to correct the cardiac signal from the respiratory data but decision trees have some rules it has to be underlined. Indeed, those classification trees have a learning phase and a test phase. Harness all of the explanatory variables would improve the accuracy for the learning phase but that would result in a sharp decrease of the accuracy for the test phase: the model is unable to generalize. We had to make a trade-off between quantity and quality. The objective was to have goods both learning and test phase. So we programmed the model to learn on 80% of our data and then test itself on the 20% left. Results obtained are shown in Table 1.

Sample	Observations	Forecast		
		0	1	Correct Percentage
Learning Phase	0	338	164	67,3%
	1	90	421	82,4%
	Percentage	42,3%	57,7%	74,9%
Test Phase	0	67	58	53,6%
	1	43	90	67,7%
	Percentage	42,6%	57,4%	60,9%

Table 1: CRT development method to classify the condition (0 = No Cognitive Effort and 1 = Cognitive Effort)

It appears that our model during the test phase have been able to classify the condition with more than 67% accuracy. It means that the model explains 35.4% ($100 \cdot (67.7 - 50) / 50$) more than the random sampling. But it is known that wrong detections can prevent the smooth running of a model due to way too much false alarms. This would make unusable such model. An interesting point has to be specified. We can not be sure that there was absolutely no cognitive effort performed by the participants all along the 5 minutes task. Indeed, in the condition where participants were asked to ignore the stimuli, they could very well have thought to their supermarket shopping or to the next week-end incoming. As we previously said the no cognitive effort condition was repetitive with nothing to occupy their time. It's likely, in view of the wealth information provided by the literature that the mind of our participant may have wandered (He et al, 2011; Smallwood & Schooler, 2006; Smallwood & Schooler, 2015). This could explain this higher number of false alarms. Maybe it's not real false alarms and the cognitive effort generated was at the service of theirs self-generated



thoughts and feelings. This represents the first limit of this study. Our experiment can not provide information about the driver state and about what they really did, thought and processed while they were performing simulated driving tasks. One of tomorrow's major challenges is to detect drivers' internal mental states to prevent, as in the case of MW, their potential negative impact. Because even if we can decorrelate physiological signals, such a correction would be useless if the driver state can't be assessed.

Secondly, even if a model will one day be able to perfectly decorrelate heart rate and respiratory signals, it seems likely that the detection of the cognitive effort in real-time will be even more effective collecting more than those 2 measures. Indeed, the combination of different kind of measures (better known as data fusion) seems to be the better way to improve our capacity to detect the cognitive effort and, by extension degraded states of attention. Thus, by collecting heart rate, breathing, gaze behavior and pupil dilation for example, as well as driving variables such as the deviation of the lateral position of the vehicle, it seems likely that the sensitivity and the specificity of the detection model can be improved. With the triangulation methodology detailed above, indicators reflecting the driver state could be highlighted using physiological and behavioral measures. These indicators would be defined with intensity and temporal thresholds. Then, all this information could be put together into an algorithm implemented into a device able to analyze the collected information. Then the driver state would be established in real time using a sliding window analysis. The objective is to merge data from different sources to obtain sensitive indicators reflecting the driver state. The big picture being to monitor the driver in real-time, understanding his internal state at each moment of his trip and help him when a critical situation occurs.

Such model could be able to detect the cognitive effort generated by the MW and then would improve our capacity to assist the driver in the better way. This help could be decisive, especially during takeover. Let's take an example of a potential benefit of the cognitive effort detection in real-time. Eventually, if, at the time of a takeover, a huge cognitive effort is detected, an adaptive assistance may then be proposed. This assistance will be able to adapt itself to operator's needs and shortcomings. If the algorithm detects a cognitive effort, the onboard computer could display the surrounding obstacles on the screen or on the windshield. This would allow the driver to save time and cognitive resources to improve its situational awareness and reduce the risk of error while returning into the control loop. For this, we think that researchers will have to better understand the physiological and behavioral



signatures of several internal states such as emotions, cognitive effort, motivation or situational awareness. Human factors and individual differences should also be surveyed. Using the triangulation strategy through a neuroergonomics scope seems to be the shortest and safest route to further improve road safety.

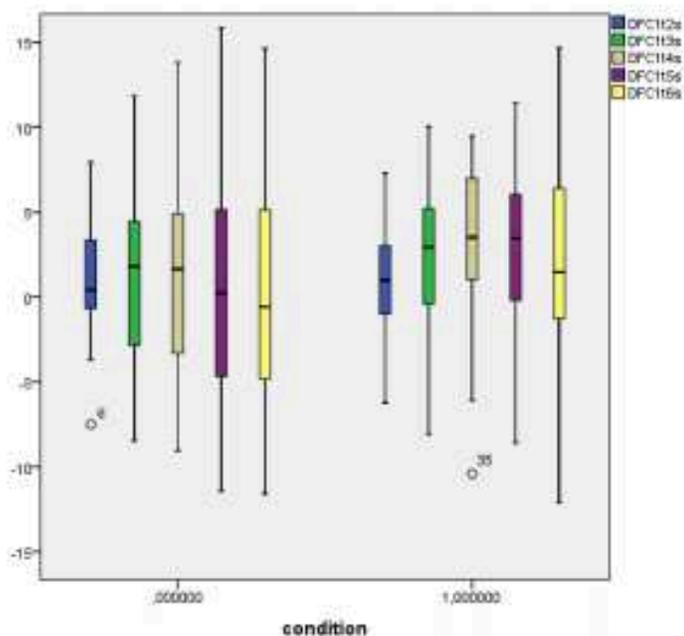
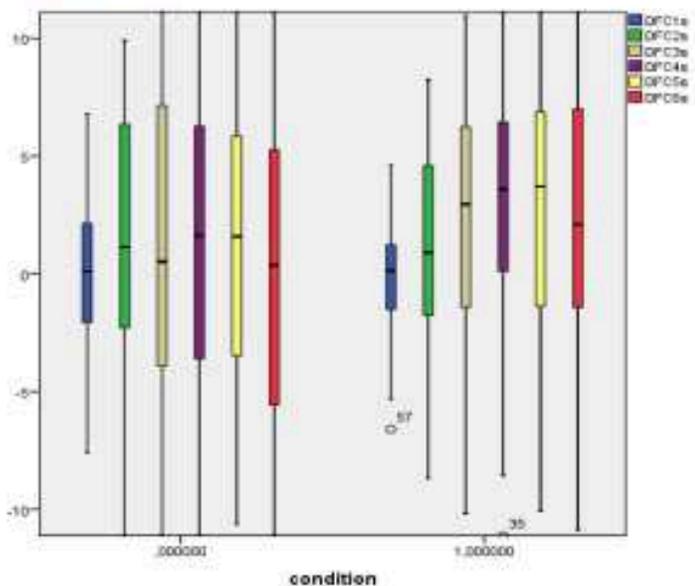
If you belong to the Top 4 finalists (0.5)

If we belong to the top 4 finalists we will present a video of the correction of the heart rate from the respiratory sinus arrhythmia phenomenon. This video will be included into a PowerPoint presentation exposing our theoretical background, our methodology, our main results and perspectives associated. But we will also present our issues and failures during this proof of concept phase. We will argue for the neuroergonomics approach, defending why it is interesting to go further in this direction and explaining various opportunities offered by the cardiac measurement and the physiological data in general. The importance of taking internal states into account will be underlined.

Regarding materials, a computer and a video projector would be enough. All information requested will be brought on USB stick.



Appendix 2



Annexe E : Poster affiché lors de la troisième et dernière phase du Valeo Innovation Challenge à Paris, le 13 octobre 2016.

Towards a Mind-Wandering (MW) real-time detection?

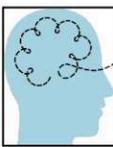
Valeo Innovation Challenge 2016
Final Stage, 13/10/16

MONITOR TEAM

Guillaume PEPIN / Séverine MALIN
Laboratory of Ergonomics and Cognitive Sciences applied to Transport, LESCOT-TS2-IFSTTAR, Bron, 69675, France

The objective was to try to suppress the influence of the Respiratory Sinus Arrhythmia (RSA) phenomenon on the cardiac data to improve our capacity to detect in real-time the cognitive effort generated by MW

What is the problem or situation to improve?



“Why is it I always get my best ideas while shaving?”
Albert Einstein

- **Inattention and distraction** have different negative impacts on drivers and seems responsible for an **equivalent part of accidents**¹
- **Inattention** (state inducing endogenous shift of attention from a critical activity to a competitive one²) gathers different states including **MW**
MW = shift in the contents of thought away from an ongoing task to **self-generated thoughts** and feelings³
- **Half of our daily living thoughts** are task-unrelated⁴ and it has been shown that it appears around **35% of the driving time**⁵
- So, we need to **detect the cognitive effort** generated by the need to **redirect attention** to the driving activity after the perceptual decoupling induced by a MW episode?

What is the current solution?

Previous study demonstrated the **feasibility** of the detection of **drivers' cognitive effort** by studying **heart rate change (HRC)**⁶. After a cognitive effort: **slight deceleration** followed by a **sharp acceleration** in Heart Rate (HR) (Figure 1)

- Possibility to detect the cognitive effort when **averaged over a significant number of episodes !**
- Impossibility to detect the cognitive effort for each event → need to improve the sensitivity of HRC by removing the effect of **respiratory sinus arrhythmia**

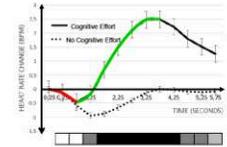


Figure 1: Grand mean evoked cardiac responses at 0.5 s intervals from stimulus onset. ECR averaged across active vs passive conditions and statistical significance for Student's t-tests comparing mean HRC values between active and passive conditions.

Our solution

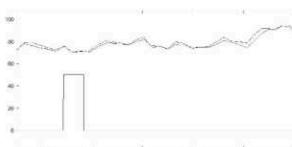


Figure 2: Uncorrected heart rate signals (blue) and corrected heart rate signal in a 25 seconds time-window.

RSA: indicator of how well the body maintains homeostasis. So **each breath impacts HR**. When we inhale, HR accelerates a little and decelerates when we exhale

This phenomenon increases heart rate variability by **adding changes** in the cardiac data preventing researchers to detect the cognitive effort generated by MW

We proposed a **data mining** method to suppress the RSA influence and then improve **HRC sensitivity**:

- Several potentially **explanatory variables** have been highlighted and **decision trees** has been built up
- We extracted **decision rules** provided by the best predictor decision tree to **offset the RSA influence**. The **corrected heart rate** is represented in figure 2
- Our model classified the “cognitive effort” condition with more than **67% accuracy** and the “no cognitive effort” condition with **53,6% accuracy**

Sample	Observations	Forecast		Correct Percentage
		0	1	
Learning Phase	0	338	164	67.2%
	1	90	421	82.4%
	Percentage	42.3%	57.7%	74.9%
Test Phase	0	67	58	53.9%
	1	43	90	67.7%
	Percentage	42.6%	57.4%	60.9%

Table 1: CRT development method to classify the condition (0 = No Cognitive Effort and 1 = Cognitive Effort).

Conclusion & Perspectives

67 % accuracy and 46% of false alarms is still not enough to detect the cognitive effort generated by MW **on each event**

We still need to **improve the sensitivity** of our model or use another methodology (ARMAX model) to detect the cognitive effort **in real-time**

Such detection would allow to **assist the driver** in the better way when his mind is wandering

In the future, with the gradual automation, such assistance could be helpful to **monitor** the driver when he will have to **takeover automated** cars by allowing him to save time and cognitive resources

Key References

1. Galera, C. et al. (2012). Mind wandering and driving: responsibility case-control study. *BMJ* 2012; (Clinical Research Ed): 345: e8105.
2. Lemerrier, C. et al. (2008). Les défauts de l'attention en conduite automobile : inattention, distraction et interférence. *Trav Hum*, 71(3), 271-296.
3. Smallwood, J., & Schooler, J. W. (2015). The science of mind wandering: empirically navigating the stream of consciousness. *Annu Rev Psychol*, 66, 487-518.
4. Killingsworth, M. A. & Gilbert, D. T. (2010). A Wandering Mind is an Unhappy Mind. *Science*, 330(6056), 932-932.
5. Berthak, G. et al. (2015). The restless mind while driving: drivers' thoughts behind the wheel. *AAP*, 76, 159-165.
6. Pepin, G. et al. (in press). Towards real-time detection of cognitive effort in driving: contribution of cardiac measurement. *Trav Hum*.

Contact Us

 +33 (0)4.72.14.24.15
 guillaume.pepin@ifsttar.fr

 +33 (0)6.48.10.20.52
 severine.malin@univ-lyon2.fr




Annexe F : Questionnaire utilisé pour obtenir le focus attentionnel et le contenu des pensées des conducteurs lors de l'expérimentation 3 de la présente thèse.



Cadre réservé ci-dessous à l'expérimentateur

Questionnaire

Numéro d'identifiant: _____ Ordre des scénarios: _____
--

Condition N, Bloc1

1) Degré d'attention porté à la tâche



Je n'étais pas du tout concentré sur la conduite

J'étais parfaitement concentré sur la conduite

2) Estimer le nombre de fois où vous vous êtes rendu compte que votre attention s'était éloignée de la conduite :

..... fois

3) Ces dernières minutes, lorsque vos pensées se sont éloignées de la conduite, elles étaient plutôt dirigées sur (entourer la dimension dominante) des événements et estimer la fraction de temps



4) Temporalité la plus présente (question précédente) était :



Proche (aujourd'hui)

Semaines

Mois

Très lointain (années)

5) Estimer le nombre de fois où vous avez pensé :

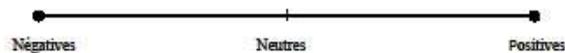
Au casque EEG ou aux électrodes

..... fois

Au simulateur ou à l'environnement virtuel

..... fois

6) Ces dernières minutes, lorsque vos pensées se sont éloignées de la conduite, étaient-elles :



Négatives

Neutres

Positives

7) Lorsque vous étiez en train de penser à autre chose, vous êtes-vous concentrés sur vos pensées ou sur la conduite



J'ai été absorbé par mes pensées

Je suis resté concentré sur la conduite

8) Êtes-vous confiant dans la précision de vos réponses ?



Je doute très fortement de mes réponses

Je n'ai pas le moindre doute

*« P'têtre que j' suis comme
Mario, la tête dans les nuages
à la recherche d'une vie cachée »*

Casseurs Flowters, **Inachevés**

Recherche d'indicateurs d'inattention en conduite automobile : apports des mesures physiologiques et comportementales

Searching for inattention indicators during driving: contribution of physiological and behavioral measurement

Résumé :

Le Vagabondage de la Pensée (VP) est un état d'inattention particulier que chacun expérimente au quotidien et qui consiste, pour un individu en un changement de l'orientation de son attention vers des pensées personnelles. Dans le cas de la conduite automobile, le VP a de nombreux effets négatifs générant un risque accru d'être impliqué et responsable d'un accident.

L'objectif de cette thèse était d'abord de mieux décrire l'impact du VP sur les variables physiologiques et comportementales du conducteur afin de dresser une liste des indicateurs sensibles à cet état. Le VP en agissant comme une tâche additionnelle à la conduite, consommerait une partie des ressources cognitives du conducteur. Il convenait donc de rechercher, par une approche expérimentale, un indicateur de l'effort cognitif en conduite automobile. Comme la multiplicité des pensées et de leurs caractéristiques pourraient créer différents niveaux de risque pour le conducteur, il apparaissait pertinent d'étudier l'impact de ces différentes formes d'inattention sur la conduite.

Les résultats des différents travaux menés montrent que la variation du rythme cardiaque est sensible à l'effort cognitif en conduite simulée. Une solution possible pour améliorer cet indicateur en vue d'atteindre une détection temps réel de l'effort cognitif, a été proposée à un concours international : le Valeo Innovation Challenge de 2016. Un second indicateur a été identifié : le regard du conducteur lorsque celui-ci est en VP est plus fixe que lors d'épisodes d'attention vers la conduite. Enfin, l'analyse des mesures électroencéphalographiques a révélé que le VP diminue l'attention allouée aux différentes étapes (sensorielle et cognitive) du traitement de l'information visuelle en conduite simulée. Ainsi, l'effet de différents types de pensée sur le comportement oculaire, le traitement de l'information visuelle et sur l'indicateur d'effort mis en évidence a renseigné le degré d'interférence de différents types de pensée sur l'activité de conduite.

Les résultats de cette thèse montrent qu'il semble prometteur d'aller encore plus loin dans la recherche d'indicateurs sensibles au vagabondage et possiblement aux autres états internes du conducteur pour pallier leurs effets négatifs sur l'activité de conduite. La mise en commun par une technique de fusion de données, des indicateurs sensibles au VP pourrait permettre, dans le futur, de créer des algorithmes à même de superviser le conducteur. L'automatisation progressive des véhicules couplée à une surveillance intelligente des conducteurs pourrait permettre de limiter le risque d'accident et les coûts humains, sociétaux et économiques qui leur sont imputables.

Mots clés : Vagabondage de la pensée, Inattention, Conduite simulée, Rythme cardiaque, Comportement oculaire, Traitement de l'information

Abstract:

Mind-Wandering (MW) is a particular state of inattention that everyone experiences in daily tasks. It involves a change of an individual attentional focus, from the main activity to personal thoughts. During driving, MW has many negative effects enhancing the risk of being involved and responsible for a car accident.

The objective of this thesis was to better describe the impact of MW on drivers' physiological and behavioral variables to draw up a list of sensitive indicators to this state. MW, acting as an additional task to driving, would consume some of driver's cognitive resources. It was therefore necessary to search, by an experimental approach, an indicator of cognitive effort in driving. As the multiplicity of thoughts and their characteristics could create different levels of risk for the driver, it seemed relevant to study the impact of these different forms of inattention on driving.

Results of various work conducted, show that heart rate change is sensitive to cognitive effort during simulated driving. A possible solution to improve this indicator and try to achieve a real-time detection of cognitive effort has been proposed to an international competition: the 2016 Valeo Innovation Challenge. Another indicator has been identified: driver's eyes appeared to be more staring during MW than during episodes of attention dedicated to driving. Lastly, analysis of electroencephalographic measurements revealed that MW decreases attention allocated to the different stages (sensory and cognitive) of visual information processing during simulated driving. Thus, the effect of different types of thoughts on ocular behavior, visual information processing, and on the cognitive effort indicator previously highlighted, informed about the degree of interference of different types of thoughts on the driving activity.

The results of this thesis show that it seems promising to go even further in the search for indicators sensitive to MW and possibly other internal states to mitigate their negative effects on the driving activity. Gathering MW sensitive indicators, using a technique of data fusion, could allow, in the future, the possibility to create algorithms able to supervise the driver. The gradual automation of vehicles coupled with intelligent monitoring of drivers could limit the risk of accidents and human, societal and economic costs that are attributable to them.

Keywords: Mind wandering, Inattention, Simulated driving, Heart rate, Ocular behavior, Information processing