



HAL
open science

Étude de l'état attentionnel des conducteurs en conduite automatisée à partir des stratégies visuelles

Paul Marti

► **To cite this version:**

Paul Marti. Étude de l'état attentionnel des conducteurs en conduite automatisée à partir des stratégies visuelles. Psychologie. Université de Nantes, 2022. Français. NNT : . tel-03759769

HAL Id: tel-03759769

<https://hal.science/tel-03759769v1>

Submitted on 24 Aug 2022

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

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

THESE DE DOCTORAT DE

NANTES UNIVERSITE

ECOLE DOCTORALE N° 603

Education, Langages, Interaction, Cognition, Clinique

Spécialité : *Psychologie*

Par

Paul MARTI

Étude de l'état attentionnel des conducteurs en conduite automatisée à partir des stratégies visuelles

Thèse présentée et soutenue à Nantes, le 9 juin 2022

Unité de recherche : Laboratoire des sciences du Numérique de Nantes (LS2N)

Rapporteurs avant soutenance :

Jordan Navarro Professeur des Universités à l'Université Lyon 2

Jean-Michel Boucheix Professeur des Universités à l'Université de Bourgogne Franche-Comté

Composition du Jury :

Président : Prénom Nom Fonction et établissement d'exercice (8)(à préciser après la soutenance)

Examineurs : Christian Bastien Professeur des Universités à l'Université de Lorraine

Jordan Navarro Professeur des Universités à l'Université Lyon 2

Jean-Michel Boucheix Professeur des Universités à l'Université de Bourgogne Franche-Comté

Dir. de thèse : Franck Mars Directeur de recherche à l'Université de Nantes

Co-dir. de thèse : Anne Guillaume Professeure agrégée du Val de Grâce / Expert Leader Renault (DA)

Co-encadrant : Christophe Jallais Chargé de recherche à l'Université Gustave Eiffel

Remerciements

Tout d'abord, un grand merci à Arnaud Koustanai, Christophe Jallais, Anne Guillaume et Franck Mars pour la qualité de leur encadrement. Pour avoir été présent tout au long du doctorat, notamment dans les moments plus compliqués. D'avoir répondu à mes interrogations, donné de nombreux conseils, que j'ai essayé d'appliquer au mieux, et de m'avoir poussé à approfondir ma réflexion. Je vous remercie également pour le temps passé en réunion, à relire les protocoles, les articles, le manuscrit, etc.

Je remercie Jordan Navarro et Jean-Michel Boucheix d'avoir accepté de prendre le temps d'être les rapporteurs et les examinateurs de ma thèse, ainsi que Christian Bastien d'avoir accepté de faire partie des examinateurs.

Je tiens à adresser mes remerciements à ceux qui ont participé aux travaux du doctorat. Jeffery Petit et Damien Schnebelen pour l'entraide tout au long de la thèse et le temps passé sur le simulateur de conduite. Denis Creusot qui a toujours été présent pour dépanner le simulateur de conduite et développer de nouveaux programmes quand j'en ai eu besoin. Camilo Charron qui a fourni une aide précieuse pour les traitements statistiques et sa disponibilité pour « servir la science ». L'équipe du LESCOT de l'IFSTTAR pour m'avoir accueilli et aidé pour le traitement des données cardiaques. Les membres de l'équipe PACCE du LS2N, du CSI et de l'équipe comportement humain du LAB pour leurs retours constructifs sur mes travaux de thèse. Les participants pour avoir pris le temps de venir tester le véhicule du futur.

Je remercie mes parents et ma famille pour m'avoir soutenu tout au long de mes longues études et d'avoir toujours répondu présent. Aussi les ami(e)s pour leur soutien et leur encouragement. Enfin, je tiens à remercier ma femme d'avoir « partagé » cette aventure avec moi, de m'avoir suivi, supporté et d'avoir cru en moi jusqu'à la fin. Et de porter une motivation supplémentaire.

Table des matières

Introduction générale.....	8
A. État de l'art	12
A.1. Activité de conduite manuelle.....	17
A.2. Activité de conduite automatisée.....	13
A.3. Phénomène de sortie de boucle.....	24
A.4. Vision, activité cardiaque et conduite.....	41
B. Objectifs et organisation de la thèse	55
B.1. Charge mentale induite par l'activité non liée à la conduite et qualité de reprise en main.....	55
B.2. Conscience de la situation et qualité de reprise en main.....	56
B.3. Influence du niveau d'automatisation sur le vagabondage de la pensée.....	57
C. Matériel	58
C.1. Simulateur de conduite.....	58
C.2. IHM du système automatisé.....	59
C.3. Oculomètre Smart Eye Pro.....	59
D. Expérimentation 1 : Effet de la distraction du conducteur sur la charge mentale et la qualité de reprise en main	60
D.1. Objectifs et hypothèses.....	60
D.2. Méthodes.....	60
D.3. Analyse des données.....	63
D.4. Résultats.....	67
D.5. Discussion et conclusion.....	72
E. Expérimentation 2 : Impact de l'engagement visuelle du conducteur sur la conscience de la situation et la qualité de reprise en main	75
E.1. Objectifs et hypothèses.....	75
E.2. Méthodes.....	75
E.3. Analyse des données.....	78

E.4. Résultats.....	81
E.5. Discussion et conclusion.....	87
F. Expérimentation 3 : Effet du niveau d'automatisation sur l'évolution du vagabondage de la pensée	91
F.1. Objectifs et hypothèses.....	91
F.2. Méthodes.....	92
F.3. Analyse des données.....	93
F.4. Résultats.....	101
F.5. Discussion et conclusion.....	106
G. Discussion générale	110
G.1. Activité non liée à la conduite et qualité de reprise en main.....	110
G.2. Vagabondage de la pensée et niveau d'automatisation.....	117
G.3. Perspectives et recommandations.....	121
Conclusion.....	123
Liste des figures	124
Liste des tables.....	128
Références.....	129

Introduction générale

Le premier véhicule autonome a été développé dès 1979 (Tsugawa et al., 1979). Il détectait des marquages blancs sur la route, à l'aide de deux caméras, et se déplaçait à 30 km/h. De 1987 à 1995, le projet Prometheus (European Eureka Project, 1987) a permis de développer le concept de la conduite autonome basée sur la vision. Dickmanns et al. (1994) ont mis au point une Sedan MERCEDES 500 SEL avec des caméras à l'avant et à l'arrière pour détecter les objets sur la route afin de maintenir une représentation de la situation autour du véhicule. En 1995, Mercedes-Benz, dans le cadre du projet Prometheus, a réalisé un véhicule autonome qui a parcouru 1678 km de Munich à Copenhague avec des vitesses de pointe de 175 km/h sur l'autoroute allemande. Le dépassement était réalisé par le véhicule sur l'approbation du conducteur. En 2009, Waymo a lancé le projet de voiture autonome de Google (Waymo) sur des routes ouvertes en Californie et a proposé 5 ans plus tard un prototype électrique totalement autonome (Egloff, 2014).

Depuis 2016 (Gouvernement Français, 2016), en France, il est possible de faire des essais de voitures autonomes sur les routes. Un cadre législatif et juridique pour l'expérimentation de véhicules autonomes a été adopté dans le cadre de la loi Pacte de 2019 (Gouvernement Français, 2019a). Cette loi encadre les essais des véhicules autonomes en donnant des conditions pour les essais sur route autorisant la distraction ou l'absence de conducteurs. La loi sur l'orientation des mobilités (LoM) de 2019 (Gouvernement Français, 2019b) permet d'adapter la législation pour la mise en circulation des véhicules autonomes. La stratégie nationale de développement de la mobilité routière et automatisée 2020-2022 (Gouvernement Français, 2020) prévoit de finaliser le cadre législatif pour les véhicules autonomes pour le 1^{er} trimestre 2022.

En conduite manuelle, l'erreur humaine intervient dans la plupart des accidents (88% selon Dingus et al., 2016; 94% selon NHTSA, 2008 ; 97% selon Otte et al., 2009). Il est donc attendu des effets bénéfiques de la délégation de la conduite sur la sécurité routière (European Transport Safety Council, 2016; Goodall, 2014). Hayes & Lives (2011) suggéraient que le taux de mortalité aux Etats Unis pourrait diminuer jusqu'à atteindre 1% de leur niveau actuel si les véhicules étaient tous autonome, soit de 40000 décès par an à 400, ce qui ferait de la voiture autonome le moyen de transport le plus sûr en termes de décès par passager-mile. De plus, l'utilisation de véhicules autonomes permettrait de réguler le trafic (Anderson et al., 2016) et par conséquent de réduire le temps de trajet (Cyganski et al., 2015). Friedrich (2016) met en

avant une augmentation de la capacité de la circulation de 80% sur l'autoroute et de 40% pour les routes urbaines grâce à l'automatisation des véhicules. Si les véhicules autonomes communiquent entre eux, alors l'augmentation de la capacité de la circulation sur autoroute serait estimée à 270% (Tientrakool et al., 2011). Ces véhicules aideraient certaines populations (séniors, personnes handicapées, enfants, personnes sans permis...) à retrouver de la mobilité (Harper et al., 2016; Kovacs et al., 2020; Lutin et al., 2013).

Dans l'objectif de la commercialisation des véhicules autonomes, en 2016, la SAE International (Society of Automotive Engineers) a classifié les véhicules en 6 niveaux en fonction de leur niveau d'automatisation. Au niveau 0 et 1, la conduite est manuelle. Le conducteur peut bénéficier d'aide à la conduite sous forme d'alertes ou d'assistances momentanées comme l'alerte d'angle mort (au niveau 0). Au niveau 1, les systèmes d'aide permettent d'avoir une assistance en continu dans une seule direction comme le centrage dans la voie, le régulateur de vitesse adaptatif, ... Au niveau 2, le conducteur peut déléguer le contrôle latéral et le contrôle longitudinal du véhicule à des systèmes d'aide à la conduite. Cependant, la supervision de la route reste sous sa responsabilité. Au niveau 3, la conduite peut être autonome dans son domaine de validité (ODD : « Operational Design Domain »). Le domaine opérationnel de conception va définir dans quelles conditions le système automatisé peut être activé (quel type de route, quelle vitesse, ...). Quand la conduite autonome est activée, le système automatisé devient responsable du contrôle du véhicule et de la supervision du contexte routier. Cependant si les conditions nécessaires ne sont plus réunies alors le système automatisé soit oblige le conducteur à reprendre le contrôle du véhicule dans un temps imparti, soit réalise une manœuvre de risque minimal. Au niveau 4, en cas de problème avec les conditions du domaine de validité, le système automatisé garde le contrôle et la supervision du véhicule et le met en sécurité sauf si le conducteur reprend le contrôle du véhicule. Au niveau 5, le véhicule est autonome quelles que soient les conditions et peut donc se passer de conducteur.

Cependant, de nombreuses questions restent encore ouvertes concernant la commercialisation et le déploiement massif des véhicules autonomes sur les voies publiques. Les recherches continuent au travers de projets tels que le projet « coopération conducteur-véhicule intelligent autonome » (CoCoVeIA, 2013-2017), le projet « En route vers la conduite autonome : comment sommes-nous influencés par l'automatisation de nos véhicules ? Investigations comportementales, cognitives et neurales » (Autodrive) ou le projet « Adaptation de la stratégie d'automatisation des véhicules autonomes aux besoins et à l'état des conducteurs en condition réelles » (Autoconduct). Le but du projet AutoConduct (2016-2021), en

particulier, était de fournir une nouvelle stratégie de coopération humain-machine adaptée en temps réel à l'état du conducteur par le biais du monitoring avancé de cet état pour les véhicules de niveau 3-4. Cette thèse CIFRE, adossée projet AutoConduct, est à l'initiative du Laboratoire d'Accidentologie et Biomécanique (LAB) qui est un groupement d'intérêt économique des groupes automobiles Renault et PSA. L'engagement des constructeurs automobiles dans la recherche témoigne de leur préoccupation pour la sécurité du véhicule autonome. Pour répondre à leurs questions, des études expérimentales sont encore nécessaires pour comprendre tous les processus sous-jacents aux difficultés pouvant être lié au véhicule autonome et assurer la sécurité des conducteurs et des passagers.

En conduite manuelle, la boucle perception-action est continuellement maintenue. Dès que le conducteur délègue une partie de l'activité de conduite, son rôle est modifié. On parle alors du phénomène de la « sortie de boucle » (Merat et al., 2019). Ce phénomène est notamment étudié dans la littérature pour ses conséquences durant la conduite autonome, mais également pendant la reprise en main et juste après lorsque le conducteur a repris le contrôle.

En conduite autonome de niveau 3, que les conducteurs réalisent ou non une activité non liée à la conduite, ils présentent des temps de réaction plus lents (Merat et al., 2012; Merat & Jamson, 2009; Zeeb et al., 2015), des réactions plus abruptes (Bueno et al., 2016) et un nombre de collisions plus élevé (Louw, Merat, et al., 2015) lors de l'apparition d'un événement critique comparé à une conduite manuelle. Ils peuvent également présenter des performances de conduite dégradées après la demande de reprise en main (Calvi et al., 2020; Kaduk et al., 2021; Louw et al., 2021).

Avec l'automatisation, le temps passé à regarder le centre de la route diminue (Carsten et al., 2012; Jamson et al., 2013) et ce temps diminue encore plus lorsque le conducteur s'engage dans une activité non liée à la conduite (Carsten et al., 2012). L'augmentation du temps de fixations sur l'activité de non conduite et la diminution de la surveillance de la route, pourraient mener à une augmentation du nombre d'accidents lors d'une reprise en main avec un obstacle (Zeeb et al., 2015). Que le conducteur soit partiellement ou totalement hors de la boucle (Merat et al., 2019), c'est-à-dire qu'il supervise ou non l'environnement routier, son comportement visuel est modifié. Il est donc possible à l'aide des stratégies visuelles d'évaluer l'état du conducteur dans la boucle de conduite pendant la conduite et de savoir s'il est en train de surveiller la route ou non. L'objectif de ce doctorat est d'étudier l'influence de la distraction et de l'inattention sur l'état du conducteur avant et pendant la reprise en main en s'appuyant sur l'analyse des stratégies visuelles.

Une première étude a été menée pour étudier l'impact de la charge mentale d'une activité non liée à la conduite sur les données visuelles, les données cardiaques et la qualité de la reprise en main lors de l'évitement d'un obstacle. Les conducteurs ont dû réaliser une activité non liée à la conduite de deux niveaux de difficultés différents lors d'une conduite automatisée de niveau 3.

Dans une deuxième étude, la durée de l'engagement du conducteur dans une activité non liée à la conduite a été manipulée pour mettre en évidence un lien entre la conscience de la situation et la qualité de la reprise en main lors de l'évitement d'un obstacle. A l'aide d'une activité non liée à la conduite, certains conducteurs ont été empêchés de construire une conscience de la situation. Un oculomètre permettait d'étudier les stratégies visuelles avant et après l'alerte de la reprise en main.

La dernière étude s'est intéressé l'impact du niveau 2 et du niveau 3 sur le vagabondage de la pensée. Le niveau 2 a été modulé en deux sous-conditions. Dans la première sous-condition, le conducteur devait continuellement garder les mains sur le volant même quand la conduite a été déléguée et dans la deuxième sous-condition, le conducteur n'était plus obligé de tenir le volant. Le vagabondage se définit par des pensées qui ne sont pas liées à l'activité en cours. L'objectif était d'étudier, à l'aide des données visuelles, la survenue et l'évolution au cours du temps du vagabondage et s'il est possible de différencier les différents niveaux d'automatisation.

Pour rendre compte de ce travail, ce mémoire est organisé en 7 parties. La première partie est constituée de l'état de l'art (partie A). Elle traite 3 points : la conséquence de l'automatisation sur l'activité de conduite ; le phénomène de la sortie de boucle et ses effets sur le conducteur et la performance de conduite ; et l'évaluation de l'état du conducteur à l'aide des données psychophysiologiques. La partie suivante développe les objectifs du doctorat (partie B). Ensuite, la partie Matériel (partie C) présente le matériel commun à toutes les expérimentations. Les trois parties suivantes présentent chacune une étude (partie D, E, F). La dernière partie développe la discussion générale et les perspectives futures (partie G) avant la conclusion (partie H).

A. État de l'art

La première section de l'état de l'art (cf. section A.1) est consacrée au cadre théorique relatif à l'activité de conduite manuelle. La section suivante (cf. section A.2) met en avant les modifications de la conduite manuelle suite à l'introduction de l'automatisation dans les véhicules. Dans la section A.3, le phénomène de la sortie de boucle est présenté. Enfin (cf. section A.4), la question du diagnostic de l'état du conducteur lors de la sortie de boucle est abordée à l'aide de mesures psychophysologiques.

A.1. Activité de conduite manuelle

L'activité de conduite est une tâche complexe pendant laquelle le conducteur doit être capable de s'adapter rapidement à son environnement en y percevant les indices essentiels pour parvenir à sa destination en toute sécurité grâce à des actions adéquates sur le véhicule. Le modèle de Rasmussen (1983) (cf. section A.1.1) décrit la réalisation d'une tâche cognitive selon les processus impliqués dans le contrôle des activités dynamiques. De nombreux auteurs ont proposé des modèles hiérarchiques de l'activité de conduite (Allen et al., 1971; Mars, 2016; Michon, 1985; Ranney, 1994; Salvucci, 2006). Dans le cadre de ce doctorat, l'activité de conduite est abordée selon le modèle de Michon (1985) (cf. section A.1.2) qui est le modèle le plus souvent mis en avant dans la littérature pour décrire la tâche de conduite dans son ensemble. Il est superposable en grande partie au modèle de Rasmussen (1985) tout en étant plus directement appliqué à l'activité de conduite.

A.1.1. Le modèle de Rasmussen (1983)

Rasmussen (1983) a présenté le modèle SKR (Skill-Knowledge-Rule), « habiletés-règles-connaissances », qui hiérarchise trois niveaux de contrôle de l'activité humaine. Ce modèle général décrit l'adaptation dynamique d'un opérateur à son environnement en hiérarchisant les comportements basés sur les habiletés, les règles et les connaissances (cf. Figure A.1).

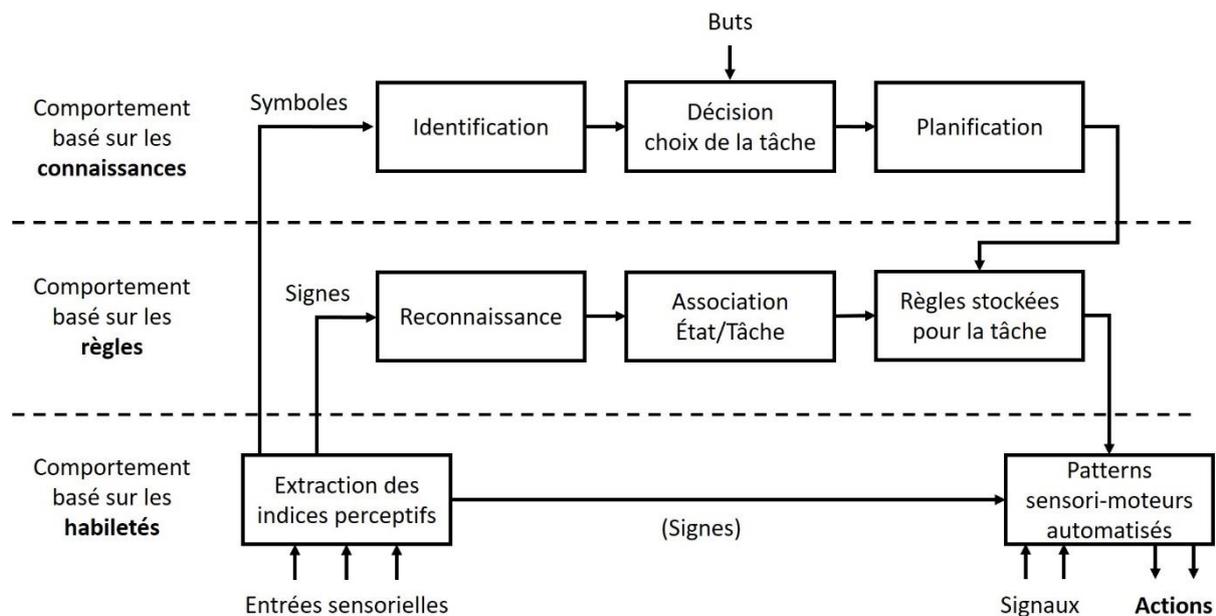


Figure A.1. Modèle comportemental Habiletés-Règles-Connaissances, Rasmussen (1983)

Au niveau le plus bas, le comportement basé sur les habiletés s'appuie sur des routines automatisées. Le risque est de ne pas avoir les informations nécessaires pour la boucle perceptivo-motrice. Par exemple, le suivi de voie dans l'activité de conduite est réalisé de façon automatique par le conducteur. S'il est distrait, inattentif ou si la météo ne permet pas de percevoir les marquages au sol, il ne peut plus accomplir le suivi de voie convenablement. Au niveau intermédiaire, basé sur les règles, l'opérateur définit une série d'actions à réaliser pour répondre à une situation. L'opérateur est capable d'explicitement ses décisions contrairement au niveau des habiletés. Ces règles répondent aux besoins d'une situation familière à l'aide d'une procédure connue. L'erreur associée à ce niveau est l'activation d'une règle inadaptée comme, par exemple, les règles de priorités dans les carrefours. Le dernier niveau est celui des connaissances. Il est conscient, non automatique et demande des ressources cognitives. Il concerne des situations nouvelles sans règles ou procédures connues. L'opérateur doit définir une stratégie pour trouver une solution à la situation à partir de ses connaissances et de ses buts. Le danger est de ne pas trouver de solution. Par exemple, les infrastructures routières peuvent être différentes en fonction des villes ou des pays et l'objectif du conducteur est de s'y adapter sur la base de ses connaissances ou de l'observation des autres opérateurs.

Lors de l'activité, les comportements peuvent être appris avec la pratique. Cela permet de faire passer un comportement d'un niveau supérieur à un niveau inférieur, d'une connaissance vers une règle et une règle vers une habileté. Par exemple, lors de l'apprentissage

pour passer les vitesses, le comportement est basé sur des règles mais une fois acquis alors passer les vitesses devient un comportement basé sur les habiletés.

A.1.2. Le modèle de Michon (1985)

Contrairement à Rasmussen qui s'appuie sur les processus cognitifs internes à l'individu, Michon (1985) s'appuie sur les caractéristiques de la tâche. A partir des travaux de Rasmussen (1983), Michon (1985) a proposé un modèle tripartite et hiérarchique de l'activité humaine appliquée à la conduite automobile manuelle. Les trois niveaux de son modèle sont : le niveau stratégique, le niveau tactique et le niveau opérationnel (cf. Figure A.2).

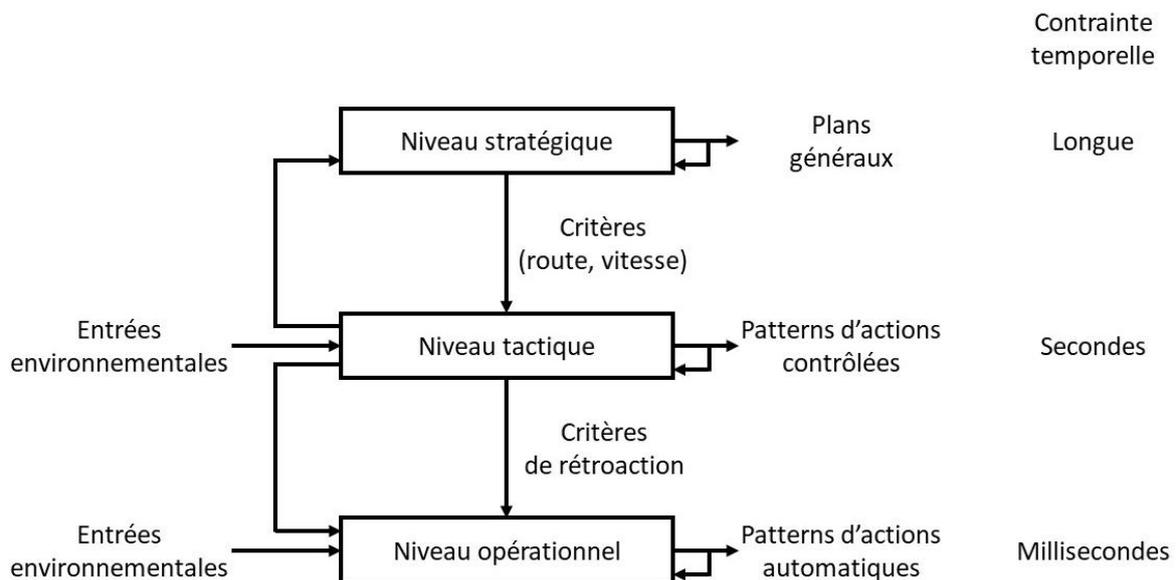


Figure A.2. Modèle hiérarchique de l'activité de conduite, Michon (1985)

Le niveau stratégique est composé des tâches demandant un investissement cognitif élevé mais avec une exigence temporelle relativement faible car elles sont planifiées à l'avance. C'est à ce niveau-là que se situent la planification de l'itinéraire et les activités la navigation : le choix de la route, les stratégies pour éviter les embouteillages, le temps de l'itinéraire, ...

Au niveau tactique, on retrouve l'ensemble des manœuvres mises en œuvre dans les secondes à venir en fonction de l'itinéraire planifié. Ce niveau rassemble les actions de pilotage du véhicule comme le dépassement, la gestion de la distance inter-véhicules, l'arrêt pour céder le passage, l'anticipation d'une situation, ... Le coût cognitif de la tâche est inférieur au niveau stratégique, mais l'exigence temporelle est plus forte.

Le niveau opérationnel correspond à l'exécution de patterns d'actions automatisées (contrôle de trajectoire, accélérer, freiner, ...) dédiées à la mise en œuvre des décisions prises au niveau tactique. Leur coût cognitif est faible mais l'exigence temporelle est très élevée (millisecondes).

Hale et al. (1990) proposent des parallèles entre les 3 niveaux de contrôle de l'activité de Rasmussen (1983) et les 3 niveaux de l'activité de conduite de Michon (1985). Le niveau sur les habiletés correspondrait au niveau opérationnel, le niveau avec les règles au niveau tactique et les comportements basés sur les connaissances à celui du niveau stratégique. Ce parallèle est valable seulement pour la conduite manuelle et les conducteurs expérimentés. Les auteurs proposent différents exemples sous une forme de matrice de tâches (cf. Figure A.3).

	Niveau stratégique	Niveau tactique	Niveau opérationnel
Connaissances	Naviguer dans une ville inconnue	Contrôler une perte d'adhérence sur une route verglacée	Conducteur débutant à sa première leçon
Règles	Le choix parmi des itinéraires familiers	Dépasser des voitures	Conduite une nouvelle voiture
Habilitété	Trajet maison / travail	Négocier des intersections familières	Contrôler la trajectoire de la voiture

Figure A.3. Parallèles entre le modèle de Rasmussen (1983) et le modèle de Michon (1985) selon Hale et al. (1990)

Dans cette section, l'activité de conduite a été considérée selon le modèle de Michon (1985). Michon propose une hiérarchie à trois niveaux de l'activité de conduite différenciés par la contrainte temporelle et l'investissement cognitif nécessaire à la réalisation de tâche. Au niveau stratégique, les tâches demandent un engagement cognitif important avec une pression temporelle faible. Au niveau tactique, on retrouve les tâches avec un engagement cognitif moins important qu'au niveau stratégique mais avec une pression temporelle plus forte. Le niveau opérationnel demande un investissement cognitif faible et une contrainte temporelle importante. Ce modèle présente l'intérêt de décrire simplement l'activité de la conduite. Dans la prochaine section, ce modèle va être utilisé pour décrire l'effet des niveaux d'automatisation sur l'activité de conduite.

A.2. Activité de conduite automatisée

Depuis de nombreuses années, les conducteurs peuvent utiliser des systèmes automatisés tel que le régulateur de vitesse adaptatif qui permet de déléguer le contrôle longitudinal ou le système de suivi de voie qui permet de déléguer le contrôle latéral du véhicule. Par conséquent, le conducteur partage le contrôle du véhicule avec le système automatisé. Avec l'arrivée de systèmes automatisés de plus hauts niveaux, la conduite sera à terme totalement déléguée au système automatisé. Le conducteur pourra alors arrêter de superviser la route et s'engager dans des activités non liées à la conduite. Dans la première section (cf. section A.2.1), les 6 niveaux d'automatisation de la SAE sont présentés. La modification de l'activité de conduite manuelle est présentée dans la section A.2.2 pour les véhicules de niveau 2 SAE et dans la section A.2.3 pour les véhicules de niveau 3.

A.2.1. Les niveaux d'automatisation SAE

La SAE International (2016) a défini une taxonomie de référence de l'automatisation des véhicules. Cette taxonomie s'appuie sur 6 niveaux : du niveau 0, sans automatisation, au niveau 5 où le véhicule est totalement autonome (cf. Figure A.4).

Niveau SAE	Nomenclature SAE	Contrôle du véhicule	Supervision de la route	Mode de repli	Contextes routiers
0	Pas d'automatisation	Conducteur	Conducteur		
1	Conduite assistée	Conducteur	Conducteur		Limité
		Automate			
2	Automatisation partielle	Automate	Conducteur		Limité
3	Automatisation conditionnelle	Automate	Automate	Conducteur	Limité
4	Automatisation élevée	Automate	Automate	Automate	Limité
5	Automatisation complète	Automate	Automate	Automate	Tous

Figure A.4. Niveau d'automatisation du véhicule selon la SAE International (2016)

Au niveau 0, le conducteur est en charge de la conduite, c'est-à-dire, du contrôle du véhicule (latéral et longitudinal) et de la supervision continue de la scène routière. Les seules aides à la conduite dont il dispose sont des alertes ou assistances n'agissant pas sur le contrôle du véhicule telles que l'alerte d'angle mort.

Au niveau 1, le conducteur dispose d'aide à la conduite continue comme le système d'alerte involontaire de franchissement de ligne. Il peut également partager le contrôle du véhicule avec des aides à la conduite. Il peut au choix soit déléguer le contrôle latéral, soit le contrôle longitudinal du véhicule. Lors de la délégation longitudinale, la vitesse est gérée par l'automate et le conducteur garde le contrôle du volant. Pour la délégation latérale, c'est l'inverse, l'automate contrôle la trajectoire et le conducteur gère la vitesse. On retrouve des systèmes d'aide comme le centrage dans la voie (latéral) ou le régulateur adaptatif de la vitesse (longitudinal). Cependant, le conducteur reste en charge de la supervision de l'environnement de la conduite. Le conducteur est responsable de l'activation de ces systèmes.

Au niveau 2, le conducteur a la possibilité d'activer des aides à la conduite qui vont prendre en charge le contrôle latéral (suivi de voie) et longitudinal du véhicule (régulateur de vitesse adaptatif), mais pas la supervision de la scène routière. C'est le conducteur qui reste en charge de surveiller la scène. Les aides à la conduite vont garder le véhicule dans la voie et gérer sa vitesse. Si elles détectent un véhicule devant, elles vont adapter la vitesse sur ce dernier et respecter une distance de sécurité. Elles ne sont cependant pas capables d'effectuer des manœuvres de leurs propres initiatives. Des véhicules avec des automates de niveau 2 ont déjà été commercialisés comme la Tesla Autopilot, la Mercedes Distronic Plus System, le Nissan ProPilot Assist. Pour ces modèles, le conducteur doit garder en permanence les mains sur le volant même s'il a délégué le contrôle du véhicule aux aides à la conduite. Si le système détecte une absence des mains sur le volant, alors il alerte le conducteur qu'il va couper la conduite automatisée. Cadillac propose le système Super Cruise, qui propose la conduite automatisée de niveau 2 sans obligation de présence des mains sur le volant. Pour autant, le rôle du conducteur reste le même.

Au niveau 3, le conducteur peut déléguer la conduite et la supervision de la scène au système automatisé dans certaines portions de routes (domaine de validité), comme par exemple les autoroutes. Pour un trajet qui se situe en dehors de ces portions, le conducteur reste en charge de l'activité de conduite. Quand l'automate est activé, le conducteur a la possibilité de s'engager dans des activités non liées à la conduite. Cependant, il doit rester capable de reprendre la main à tout moment si le système automatisé le requiert. Au bout du temps imparti, si le conducteur ne réagit pas, le système automatisé enclenche une « manœuvre de risque minimal » qui

correspond à un arrêt dans la voie. Cette procédure a pour but de réduire les risques d'accident lorsque le conducteur ne réagit pas à une demande de reprise en main. Elle est automatiquement réalisée par le système autonome.

Au niveau 4, le véhicule est totalement autonome dans son domaine de validité. Le système automatisé ne demande plus au conducteur de reprendre la main en cas de problème, il peut se mettre en sécurité pour éviter un accident. Lors de la sortie de son domaine de validité, le système automatisé demande au conducteur de reprendre en main le véhicule. Pour certains véhicules comme les navettes automatiques et les taxis locaux sans conducteurs, les volants et les pédales ne sont plus là. Ces types de véhicule sont restreints au domaine de validité et ne sortent jamais de cette zone.

Le niveau 5 est identique au niveau 4 mais sans restriction concernant les contextes routiers. En effet, le niveau 5 est autonome sur n'importe quelle route.

Les niveaux 4 et 5 sont des perspectives encore lointaines. Actuellement, les travaux se concentrent donc principalement sur les niveaux 2 et 3, mais les conséquences sur le comportement des conducteurs sont encore mal connues. C'est pourquoi l'impact de l'automatisation de niveau 2 SAE et de niveau 3 SAE sur l'activité de conduite selon le modèle de Michon va être détaillé.

A.2.2. Activité de conduite de niveau 2

Au niveau 2, le conducteur délègue le contrôle longitudinal et latéral du véhicule à des aides à la conduite. Le niveau opérationnel du conducteur n'est donc plus sollicité, le conducteur n'effectuant plus les patterns d'actions qui déterminent habituellement le contrôle du véhicule (cf. Figure A.5). Cependant, le conducteur a l'obligation de continuer à surveiller la route et conserve le contrôle tactique du véhicule.

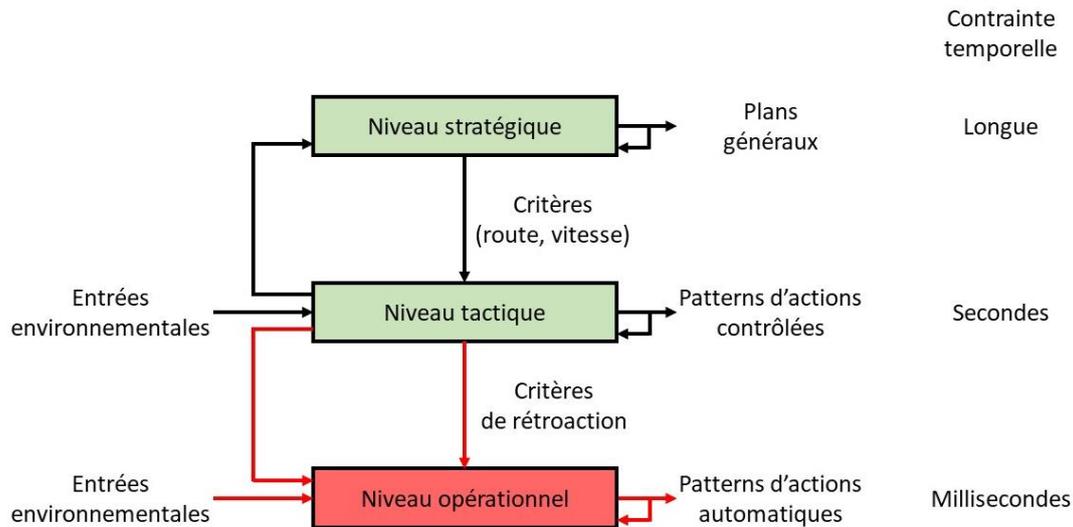


Figure A.5. Modification de l'activité de conduite de Michon (1985) avec la conduite automatisée de niveau 2. Le conducteur acquiert et transmet des informations aux niveaux stratégique et tactique. Mais il n'acquiert et ne transmet plus d'informations nécessaire au niveau opérationnel qui est géré par le système automatisé.

A.2.3. Activité de conduite de niveau 3

Avec l'arrivée des véhicules automatisés de niveau 3, l'activité du conducteur ne se limite plus à l'activité de conduite manuelle. Poisson (2015), en se basant sur des modèles d'activité de conducteur de métro, de pilote d'avion de ligne, de conducteur automobile sur autoroute embouteillée et de situations de référence, a proposé un modèle conceptuel de l'activité du conducteur adapté pour les véhicules automatisés de niveau 3 (cf. Figure A.6). Ce modèle a l'avantage de décrire l'activité de conduite automatisée de niveau 3 en sous activités (planification, conduite manuelle, transitions et conduite en AD) avec les tâches correspondantes à chaque sous activité.

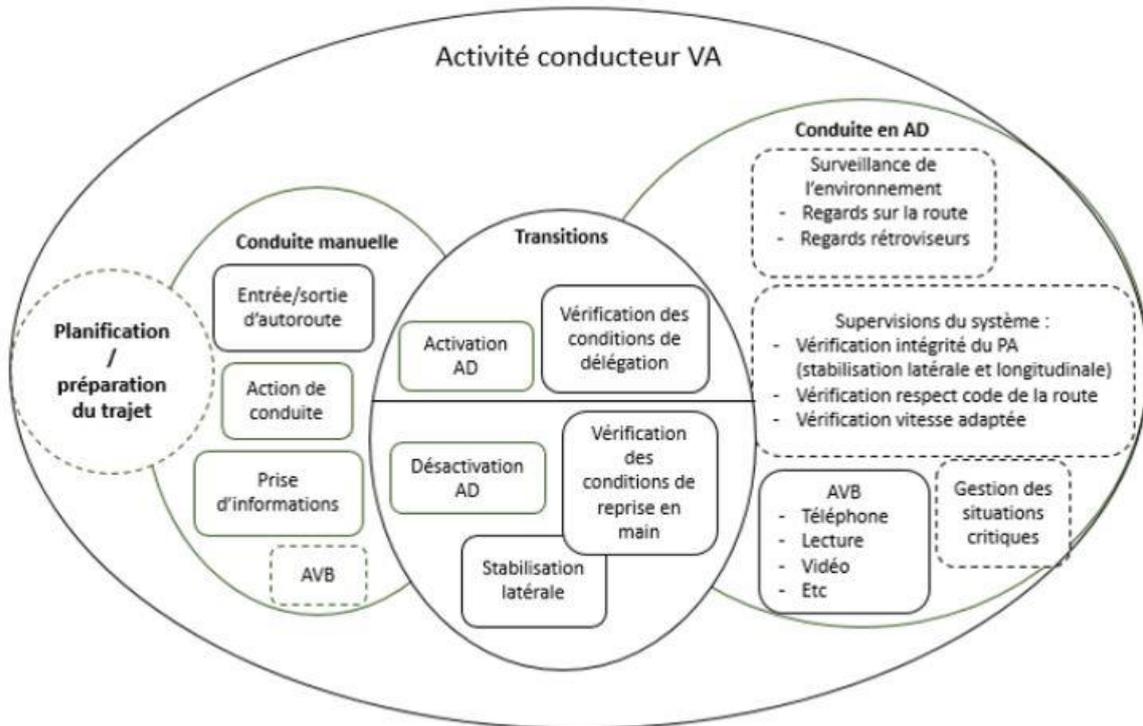


Schéma 4 : Modèle de l'activité en conduite autonome

VA : véhicule autonome

MD : Manual driving : conduite manuelle

Les pointillés correspondent à des activités moins fréquentes

AVB : activités de vie à bord

AD : autonomous driving : conduite autonome

Figure A.6. Activité du conducteur en conduite automatisée de niveau 3 SAE selon Poisson (2015)

Au niveau 3, le conducteur délègue le contrôle du véhicule et la supervision de la route au système automatisé. Il n'est sollicité qu'au niveau stratégique et l'automate prend en charge le niveau tactique et le niveau opérationnel (cf. Figure A.7).

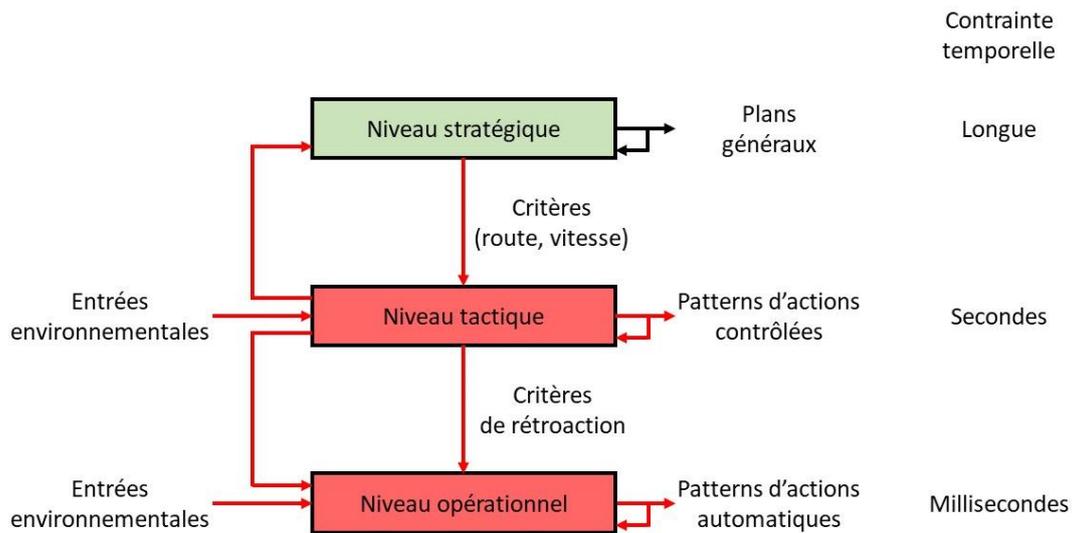


Figure A.7. Modification de l'activité de conduite de Michon (1985) avec la conduite automatisée de niveau 3 SAE. Le système automatisé est responsable des niveaux tactique et opérationnel du véhicule.

Le conducteur est impliqué seulement au niveau stratégique.

Bien que le conducteur ait la possibilité de s'engager dans des activités de vie à bord, il doit être capable de reprendre en main le véhicule lors d'une requête de reprise en main. La reprise en main peut être planifiée par le système automatisé avant la fin du domaine de validité. Mais, elle peut être non planifiée si les conditions d'utilisation du mode autonome ne sont pas remplies dans le domaine de validité (perte de marquage au sol, GPS défectueux, problème dans le trafic, etc.). Dans le cas de la reprise en main planifiée, les conducteurs disposent de temps pour rétablir les boucles de contrôle et superviser la route avant l'arrêt de la conduite autonome. Les conducteurs vont pouvoir progressivement réactiver le niveau opérationnel et le niveau tactique. Par contre lors d'une reprise en main non planifiée, le conducteur dispose d'un temps court et il peut alors avoir des difficultés à réengager les contrôles opérationnels et superviser correctement le contexte routier. Le risque étant que le conducteur réalise une action avant d'avoir totalement acquis le niveau opérationnel et le niveau tactique.

Au fur et à mesure de l'augmentation du niveau de l'automatisation, on observe un désengagement progressif du conducteur de l'activité de conduite. Dès l'automatisation de niveau 2, le conducteur sort de la boucle du contrôle opérationnel du véhicule. A partir du niveau 3, en plus de ne plus contrôler le véhicule, le conducteur cesse de superviser la route et n'acquiert plus d'informations pour le niveau tactique. Cette sortie du conducteur des différents niveaux de l'activité de conduite est à l'origine du phénomène de sortie de boucle (cf. section A.3)

A.3. Phénomène de sortie de boucle

Cette section présente la définition du concept de la sortie de boucle (section A.3.1), puis le lien entre la sortie de boucle et les différents niveaux d'automatisation (section A.3.2). La section aborde également le concept de la conscience de la situation et son lien avec la sortie de boucle (cf. section A.3.3), les déterminants internes au conducteur de la sortie de boucle (cf. section A.3.4), et enfin l'impact du phénomène de la sortie de boucle sur les performances de conduite (cf. section A.3.5).

A.3.1. Définition

La première référence au phénomène de la sortie de boucle apparaît en 1972 (Meilander, 1972) dans le contexte de l'automatisation de l'aéronautique (pilote automatique). Le pilote n'a plus besoin de piloter l'avion et peut donc être laissé hors de la boucle de pilotage. Des premières recherches ont examiné la conséquence de la sortie de boucle sur la capacité des pilotes à détecter des changements de la dynamique de l'avion. Les pilotes en dehors de la boucle de contrôle détectaient les changements plus lentement que les pilotes qui contrôlaient manuellement l'avion (Wickens, 2002; Wickens & Kessel, 1979; Wickens & Kessel, 1981). Endsley & Kiris (1995) et Kaber & Endsley (1997) sont les premiers à avoir formalisé le concept de la sortie de boucle : « lorsqu'un opérateur est sorti d'une boucle de contrôle du fait de la délégation d'une partie de ses fonctions à un automate, le niveau d'interaction système-humain est limité, et par conséquent la connaissance de l'état du système par l'opérateur peut être réduite » (page 127). La capacité des opérateurs humains à intervenir dans les boucles de contrôle du système, pour reprendre le contrôle manuel lorsque cela est nécessaire, est diminuée. En plus des retards dans la détection d'un problème nécessitant une intervention, les opérateurs peuvent avoir besoin d'une plus grande période de temps pour réorienter leur attention vers l'état actuel du système et développer une compréhension suffisante de l'état afin d'agir de manière appropriée. Ce retard peut empêcher les opérateurs d'exécuter les tâches qu'ils sont tenus de réaliser ou diminuer l'efficacité des mesures prises pour reprendre le contrôle (Kaber & Endsley, 2004).

En conduite automobile, la référence à la problématique de la sortie de boucle est employée dès que le conducteur n'a plus le contrôle du véhicule (Brookhuis et al., 2001). Comme pour l'aéronautique, la problématique est appliquée aux véhicules équipés de systèmes automatisés et est due au changement de rôle du conducteur, d'un rôle d'acteur à un rôle de

superviseur du système et de l'environnement routier (Strand et al., 2014). La sortie de boucle ne se limite pas à l'aspect physique de l'activité de conduite mais également à un aspect cognitif lié à la surveillance de l'automate/ou de la scène de conduite (Louw & Merat, 2017; Radlmayr et al., 2014).

En 2019, une communauté scientifique a proposé une définition de référence de la sortie de boucle (Merat et al., 2019). Cette définition s'organise autour de 3 niveaux de la sortie de boucle (cf. Figure A.8). Le 1^{er} niveau est appelé « dans la boucle », le conducteur contrôle manuellement le véhicule et effectue les opérations de surveillance. Au 2^{ème} niveau, le conducteur est « sur la boucle », il n'a plus le contrôle du véhicule cependant il doit continuer à surveiller l'environnement de conduite. Le 3^{ème} niveau correspond à un état « hors de la boucle », le conducteur ne contrôle pas le véhicule et ne surveille pas la route, ou le conducteur contrôle le véhicule mais ne surveille pas la route.

	Dans la boucle	Sur la boucle	Hors de la boucle	
Contrôle du véhicule	Oui	Non	Non	Oui
Supervision	Oui	Oui	Non	

Figure A.8. Niveaux de la sortie de boucle du conducteur selon Merat et al. (2019)

La section suivante présente les liens entre la sortie de boucle de conduite et les différents niveaux d'automatisation (SAE). L'objectif est de définir, en fonction du niveau d'automatisation, dans quels niveaux de sortie de boucle les conducteurs peuvent se trouver.

A.3.2. Sortie de boucle et niveaux d'automatisation

L'avantage de cette définition est qu'elle s'adapte à l'automatisation des véhicules. Avec une conduite manuelle (SAE niveau 0-1), le conducteur est dans la boucle. Par contre si une distraction détourne l'attention du conducteur de la route, il est considéré comme hors de la boucle.

Au niveau 2, le conducteur est censé superviser la route ce qui le place sur la boucle. Cependant, s'il ne le fait pas, il sera considéré hors de la boucle.

Au niveau 3, la supervision continue de la route est également déléguée à l'automate, le conducteur n'a pas d'obligation de regarder la route. Le conducteur est alors considéré comme hors de la boucle. Cependant, il doit être capable de reprendre le contrôle du véhicule si

l'automate le requiert. Autrement dit, il doit être capable de revenir sur, puis dans la boucle en un temps donné.

A partir du niveau 4, l'automate est capable de gérer le véhicule dans toutes les situations (avec un domaine de validité plus restreint pour le niveau 4 comparé au niveau 5). Aux niveaux 4 et 5, le conducteur peut rester hors de la boucle en permanence sans compromettre sa sécurité. Que le conducteur soit en niveau 2 ou niveau 3, il n'a plus le contrôle physique du véhicule. D'après l'effet du niveau d'automatisation sur le modèle de Michon (1985) (cf. Figure 4 et cf. Figure 5), cette perte de contrôle correspond à la perte du niveau opérationnel. Pour ces deux niveaux, c'est la supervision de la route par le conducteur qui va permettre de déterminer si le conducteur est sur la boucle ou hors de la boucle de conduite. Si le conducteur supervise la route, il va pouvoir construire la conscience de la situation (section A.3.3).

A.3.3. La conscience de la situation

La conscience de la situation est décrite comme « la perception des éléments dans l'environnement dans un volume de temps et d'espace, la compréhension de leur signification et la projection de leur statut dans le futur proche » (Endsley & Kiris, 1995). Endsley propose un modèle à trois niveaux : la perception, la compréhension et la projection. Au premier niveau, l'opérateur va percevoir l'état, les attributs et la dynamique des éléments nécessaires à la réalisation de son but. Au niveau intermédiaire, les éléments vont être interprétés en fonction des objectifs de l'opérateur. Au dernier niveau, à l'aide des connaissances acquises grâce au niveau 1 et 2, l'opérateur va pouvoir anticiper l'influence des éléments perçus sur son environnement futur (cf. Figure A.9).

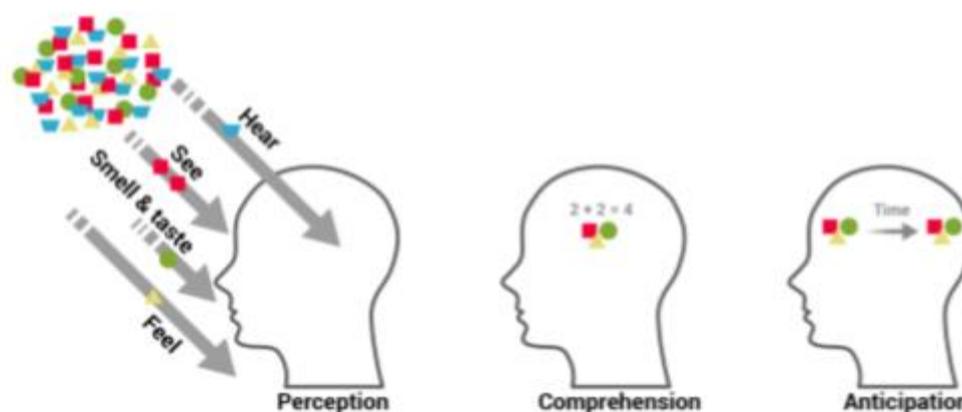


Figure A.9. Niveaux de conscience de la situation dans le modèle d'Endsley (1995)

Appliqué à la conduite, au niveau 1, le conducteur va être conscient de la présence d'autres usagers autour de lui mais ne sera pas capable d'anticiper leurs trajectoires et leurs impacts sur son environnement futur. Dès le niveau supérieur, il va être capable de comprendre les actions des autres conducteurs. Au dernier niveau, le conducteur va projeter ces actions dans les secondes suivantes et va pouvoir adapter son comportement à cette projection.

Les niveaux de la conscience de la situation sont hiérarchiquement dépendants. Une mauvaise perception des éléments dans l'environnement (SA niveau 1), amène à une interprétation incomplète de la situation (SA niveau 2) et donc à une projection inadéquate (SA niveau 3). A l'inverse, une projection erronée (niveau 3 SA), peut amener à une mauvaise interprétation des éléments du niveau 2 et à une perception inexacte des éléments dans l'environnement (niveau 1 SA) (Ward, 2000). Par exemple, lors de la conduite sur une route en dévers, le véhicule se déplace latéralement. Le conducteur doit percevoir le déplacement latéral du véhicule (SA niveau 1) et comprendre la cause (SA niveau 2). Au niveau 3 SA, le conducteur doit anticiper l'effet futur du déplacement latéral du véhicule. A la fin de ces 3 étapes, le conducteur prend la décision nécessaire pour corriger la direction du véhicule. De même, si le modèle mental de l'itinéraire n'est pas correct (SA niveau 3), les éléments du contexte routier seront mal interprétés (SA niveau 2) et la perception des éléments (SA niveau 1) sera guidée par le modèle mental inadapté. L'activité de conduite dépend donc d'une connaissance adéquate de la situation à tous les niveaux (cf. Figure A.10).

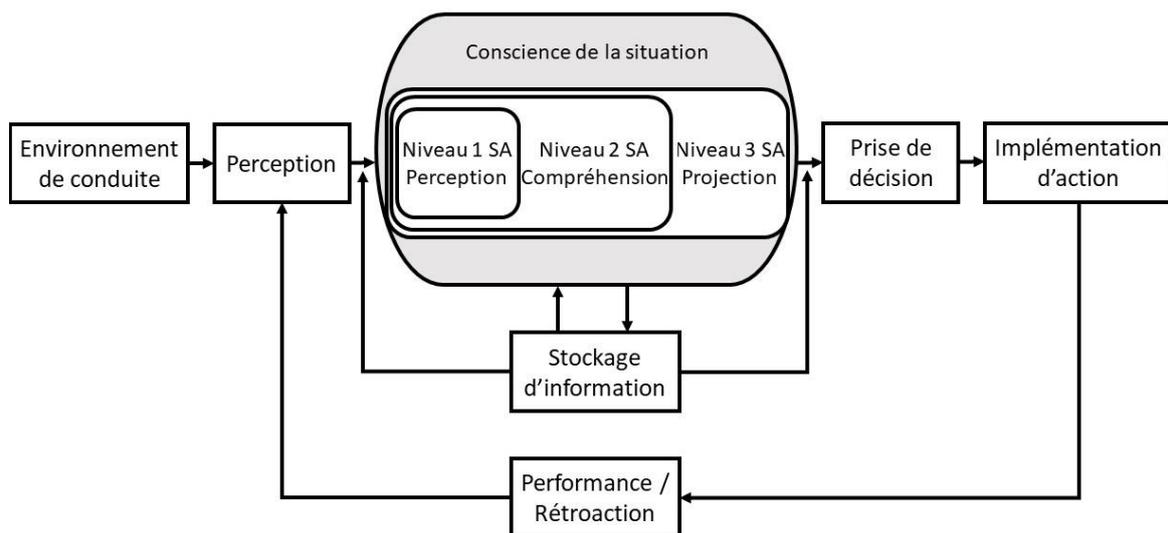


Figure A.10. Conscience de la situation dans le processus de traitement de l'information en conduite (adapté de Ma and Kaber 2005)

En conduite manuelle, la réalisation d'une tâche secondaire ou même simplement discuter avec une autre personne peut affecter négativement la conscience de la situation (Gugerty et al., 2003; Heikoop et al., 2018; Kass et al., 2007; Ma & Kaber, 2005). Lorsque les conducteurs choisissent de réaliser une activité non liée à la conduite (conduite niveau 3 SAE), la conscience de la situation est détériorée dû à une surveillance de la route moins efficace (Carsten et al., 2012; Merat et al., 2012). Yang et al. (2020) ont comparé l'impact de différentes activités non liées à la conduite lors d'une conduite automatisée de niveau 3. Ils ont mis en évidence que lors de la réalisation d'activités avec une interaction active (jouer à un jeu vidéo ou répondre à un questionnaire sur une tablette), les conducteurs étaient moins sensibles au changement de la situation de conduite comparé aux conducteurs qui avaient des activités passives (lire l'actualité ou regarder un film sur une tablette). Ce qui suggère que l'activité active aurait un impact négatif plus important qu'une activité passive sur la conscience de la situation.

La capacité des conducteurs à percevoir des dangers est un concept proche de la conscience de la situation (Horswill & Mckenna, 2004). Elle se traduit par la capacité à détecter des indices montrant qu'une situation dangereuse est potentiellement en train de se développer. Des études ont montré un risque de collision plus élevée lorsque les conducteurs ont de mauvaises capacités de détection d'aléas (Horswill & Mckenna, 2004; Horswill et al., 2015), une faible expérience de conduite (Scialfa et al., 2012) ou sont distraits (Borowsky et al., 2015). Samuel et al., (2016) ont étudié la détection de danger chez les jeunes conducteurs. Les conducteurs réalisaient une activité non liée à la conduite sur une tablette en console centrale pendant une conduite autonome de niveau 3 lorsqu'il leur a été demandé de reprendre en main le véhicule. Les auteurs ont manipulé différents temps de transition (2s, 4s, 6s, 8s et 12 secondes) entre la conduite automatisée et la conduite manuelle. Leurs résultats ont montré qu'à partir de 8 secondes, le nombre de danger détecté n'augmentait plus et était similaire au nombre de danger détecté en conduite manuelle. Les conducteurs novices avaient donc besoin de 8 secondes pour reconstruire une conscience de la situation de façon comparable à celle d'une conduite manuelle. Wright et al., (2016) ont reproduit l'étude de Samuel et al., (2016) avec des conducteurs plus expérimentés et montré que ces conducteurs n'avaient besoin que de 6 secondes pour reconstruire la conscience de la situation.

Il existe plusieurs façons de mesurer la conscience de la situation. La première consiste à utiliser la méthode des sondes. Une des méthodes des sondes est le rappel impromptu. Elle a été mesurée par la première fois à l'aide du SAGAT (« Situation Awareness Global Assessment Technique » - technique d'évaluation globale de la conscience de la situation) (Endsley, 1995).

Endsley (1995) a utilisé cette technique lors de l'entraînement de pilote de ligne sur simulateur. A un moment du vol, les écrans étaient coupés et des questions sur la conscience de la situation étaient posées aux pilotes. Les réponses étaient enregistrées et comparées à la réalité pour calculer un score de conscience de la situation. L'avantage de cette méthode est qu'elle est directe et objective. Cependant, elle est difficile à mettre en place pendant la réalisation d'activité dans le monde réel. Un autre désavantage est que cette méthode s'appuie sur la mémoire et qu'un faible rappel des éléments de l'environnement peut impliquer des difficultés de rappel de ces éléments plutôt qu'une faible conscience de ces éléments. La seconde technique de sondes est utilisée en temps réel. Des questions sur la conscience de la situation sont posées pendant la réalisation de la tâche sans interruption de cette dernière. La conscience de la situation est évaluée à l'aide de la méthode d'évaluation de la situation actuelle (SPAM) (Durso et al., 1999). Cette méthode utilise le temps de latence de la réponse aux questions sur la conscience de la situation comme variable dépendante et ne s'appuie pas sur le rappel des éléments en mémoire. L'avantage de ce questionnaire est qu'il permet de récupérer la conscience de la situation pendant l'activité en cours. Cette méthode ne peut être appliquée que dans des environnements facilement prévisibles car les questions doivent être générées en temps réel. L'autre difficulté vient du fait que poser des questions sur la conscience de la situation pendant la réalisation de l'activité peut amener les sujets à réorienter leur attention vers les informations pertinentes à la question.

Le SART (technique d'évaluation du taux de conscience) permet de récupérer un score de conscience de la situation basé sur des mesures subjectives à la fin de l'exécution de la tâche (Taylor, 2011). L'avantage de cette technique est qu'elle ne gêne pas l'exécution de la tâche en cours car le questionnaire est passé à la fin de la réalisation de la tâche. Un des inconvénients est similaire à la méthode des sondes avec le rappel impromptu. Le score de la conscience de la situation peut refléter les capacités mémorielles et non pas la conscience de la situation sur laquelle les questions sont posées. De plus, les scores peuvent être influencés par la perception que les sujets ont de leur performance.

L'échelle d'évaluation comportementale de la conscience de la situation (SABARS) est une méthode basée sur l'observation du sujet par un expert. Le score de la conscience de la situation est obtenu sur la base des observations du comportement lors de la réalisation d'une activité. La notation de l'observateur se fait à l'aide d'une échelle de notation en cinq points (Matthews & Beal, 2002). Cette méthode présente l'avantage de ne pas être intrusive. Cependant, un point faible réside dans le fait qu'il peut être difficile pour des observateurs d'évaluer les processus internes de la conscience de la situation des participants. Un autre biais

possible est la modification du comportement du participant dû au fait qu'il prend conscience d'être observé.

Une autre méthode consiste à enregistrer les mesures physiologiques du participant lors d'une activité pour estimer son niveau de conscience de la situation. Zhang et al. (2020), dans une revue de la littérature, se sont intéressés au lien entre les mesures physiologiques indirectes et les mesures directes de la conscience de la situation. Les 25 études analysées avaient au moins utilisé une technique d'évaluation directe de la SA, ainsi qu'au moins une mesure physiologique, et avaient fait la corrélation entre les deux mesures. Seize articles ont utilisé des données oculaires, 6 des données cardiovasculaires et 5 d'autres types de données physiologiques (activité électrodermale, respiration, ...). Parmi les articles retenus, deux articles concernaient la conduite. Le premier utilisait les données oculaires. Le comportement oculaire peut être enregistré à l'aide d'un oculomètre ou de lunettes d'oculométrie. Kunze et al. (2019), en conduite autonome, ont montré que lorsque le temps de fixations des conducteurs sur l'activité non liée à la conduite était plus faible alors le score au SAGAT était plus élevé, et les conducteurs présentaient donc une meilleure conscience de la situation dans les 40 secondes avant la demande de reprise en main. Plus récemment, Liang et al. (2021) ont montré que regarder la scène de conduite plus longtemps et avoir une plus grande dispersion visuelle contribuaient à obtenir des scores plus élevés au SAGAT, et par conséquent une meilleure conscience de la situation des conducteur en conduite autonome. Une des difficultés de cette méthode est qu'il peut être compliqué de mettre en place des systèmes d'enregistrement oculaire dans des voitures ou de demander à des conducteurs de porter des lunettes pour enregistrer leurs données oculaires. De plus, il est nécessaire d'évaluer la conscience de la situation du participant en tenant compte des éléments présents dans l'environnement. De plus, il est possible qu'un participant fixe un élément de son environnement sans le percevoir. Ce phénomène « regarder mais ne pas voir » est un facteur de risque lors de la conduite (Brown et al., 2005; Koustanai et al., 2008).

La conscience de la situation est donc importante pour savoir si le conducteur est soit dans la boucle soit sur la boucle soit hors de la boucle de conduite. L'état interne des conducteurs peut être à l'origine de la baisse de la conscience de la situation, ce que la section suivante va aborder maintenant.

A.3.4. Facteurs internes au conducteur déterminant pour la sortie de boucle

Dans cette section, on s'intéressera aux états internes du conducteur qui peuvent être à l'origine de la dégradation de la conscience de la situation et donc de la sortie de boucle du conducteur. La première sous-section (cf. section A.3.4.1) concernera la complaisance et la confiance, la deuxième (cf. section A.3.4.2) se focalisera sur la somnolence et la dernière (cf. section A.3.4.3) sur le vagabondage de la pensée

A.3.4.1. Complaisance et confiance

La complaisance est le phénomène selon lequel les opérateurs adoptent des comportements non adaptés basés sur la confiance excessive envers les capacités du système automatisé en raison d'une minimisation de la probabilité de défaillance de l'automatisation (Innes-Jones & Scandpower, 2012; Moray & Inagaki, 2000; Parasuraman et al., 1993). La survenue de la complaisance arrive quand certaines conditions sont remplies : (1) un opérateur surveille un système automatisé, (2) le comportement de surveillance du système est sous-optimale ou inférieure à un taux normatif et (3) la surveillance sous-optimale entraîne une baisse de la performance (Parasuraman & Manzey, 2010). Körber et al. (2018) sur un simulateur de conduite ont montré que les conducteurs qui avaient le plus confiance dans le véhicule automatisé passaient moins de temps à regarder la route et plus de temps à regarder l'activité non liée à la conduite. Les conducteurs les plus confiants avaient également moins bien réussi l'évitement d'un obstacle suite à une demande de reprise en main avec un temps de reprise en main plus élevé et un temps à la collision (i.e., le temps restant avant l'accident si la trajectoire des véhicules et la vitesse des véhicules sont maintenues (Naseralavi et al., 2013)) plus faible que les groupes ayant une confiance inférieure dans le système. De plus, ils ont également eu plus de collisions avec l'obstacle. Banks et al. (2018) ont analysé des vidéos d'une étude sur route avec un modèle Tesla S. Avec ce modèle, quand les conducteurs activent l'autopilot (Niveau 2 SAE), ils peuvent retirer les mains du volant et les pieds des pédales. Cependant, ils doivent continuer à surveiller l'environnement routier et être prêt à reprendre le contrôle du véhicule si l'autopilot le demande. L'analyse des vidéos a montré que les conducteurs avaient des comportements révélateurs de complaisance et d'excès de confiance envers le système automatisé. De plus, les conducteurs qui font preuve de confiance excessive envers le système automatisé montrent un déficit d'attention envers les systèmes automatisés à la faveur d'autres tâches ou activités (Manchon et al., 2021; Parasuraman & Manzey, 2010) et montrent également un manque de compréhension de ces systèmes dû au manque d'attention (Choi & Ji, 2015).

Pendant la conduite autonome de niveau 4, le niveau de confiance des conducteurs, pour la conduite autonome, augmente même si les conducteurs sont, à priori, méfiant envers la conduite autonome (Manchon et al., 2021).

La confiance peut être évalué de deux manières : la première méthode utilise des questionnaires (méthode subjective) et la seconde est basée sur les indicateurs comportementaux (mesures objectives). Pour la méthode subjective la confiance est mesurée à l'aide de questionnaire de (Jian et al., 1998, 2000; Lee & Moray, 1994; Madsen & Gregor, 2000; Muir & Moray, 1996; Singh et al., 1993). Plus récemment, Merritt et al. (2019) ont développé une nouvelle mesure appelé AICP-R (Automation Induced Complacency Potential Revised Scale) en proposant une version améliorée du questionnaire de Singh et al. (1993). L'objectif de cette mesure est d'être plus générale vis-à-vis de l'automatisation et non spécifiques à certains technologies comme l'est l'échelle de Singh et al. (1993).

La confiance peut également être mesurée à l'aide de mesures comportementales. Des études ont montré que la surveillance du système automatisé est négativement corrélée avec la confiance dans le système (Hergeth et al., 2016). De plus, les conducteurs qui ont davantage confiance dans le système, surveillent moins la route, et prêtent plus d'attention aux activités non liées à la conduite (Walker et al., 2018). A l'opposé, un manque de confiance dans le système est lié avec une augmentation de la surveillance de ce dernier (Robert 2016).

A.3.4.2. La somnolence

Carskadon & Dement (1982) ont défini la somnolence comme la tendance à s'endormir. C'est un état psychophysique intermédiaire entre l'éveil et le sommeil, qui réduit le niveau de conscience et d'alerte d'une personne. Plusieurs facteurs peuvent expliquer la survenue de la somnolence : un sommeil insuffisant ou de mauvaise qualité (Maia et al., 2013; Otmani et al., 2005), les horaires de conduite (Horne & Reyner, 1999; Pack et al., 1995), la durée de la conduite (Otmani et al., 2005), l'environnement de conduite (Philip et al., 2010), la consommation de substances tel que l'alcool (Ebrahim et al., 2013) ou les médicaments (Amato, 2011), la personnalité (Karrer-Gauß et al., 2004; Thiffault & Bergeron, 2003) et l'âge (Philip et al., 2004, 2010). La somnolence s'accompagne de différents symptômes : réduction du tonus musculaire, bâillements répétés, difficulté à garder les yeux ouverts, modification du rythme cardiaque et respiration, ...

D'après l'Association Française de la sécurité des autoroutes, la somnolence et la fatigue sont la première cause d'accidents mortels et représentent 22% des accidents mortels sur les

autoroutes. MacLean et al. (2003) suggèrent que 20% des accidents sont directement liés à la somnolence. La somnolence est à l'origine d'une détérioration de la qualité du changement de voie (Arnedt et al., 2001; Lenné et al., 1998; Skipper & Wierwille, 1986), d'une variabilité plus élevée de la vitesse et de la position dans la voie (Arnedt et al., 2000, 2001; Hack et al., 2001; Haraldsson et al., 1990; Juniper et al., 2000) ainsi qu'une augmentation du temps de réaction (Haraldsson et al., 1990) et des sorties de la route (Arnedt et al., 2000, 2001; Hack et al., 2001; Haraldsson et al., 1990; Juniper et al., 2000).

En conduite autonome sans activité, la somnolence apparaît plus rapidement qu'en conduite manuelle et certains conducteurs en conduite autonome ferment les yeux pendant de longues périodes de temps (Schömig et al., 2015; Vogelpohl et al., 2019). Merlhiot & Bueno, (2021) ont réalisé une méta-analyse de 14 articles sur comment la somnolence et la distraction peuvent interférer avec la performance de la reprise en main. Ils ont mis en évidence une augmentation du temps de réaction de 0,89 seconde en moyenne lors de la reprise en main en présence de somnolence. Seulement 42% des études ont montré une augmentation significative du temps de réaction lors de la reprise en main et un tiers des études ont montré un effet négatif significatif de la somnolence sur l'accélération longitudinale et latérale lors de la reprise en main. Deux études ont montré une augmentation du taux de collision avec la somnolence (Feldhütter et al., 2019; Wu et al., 2020) et une n'a trouvé aucun effet (Feldhütter et al., 2018).

Il est possible d'évaluer la somnolence à l'aide de l'évaluation subjective. L'échelle la plus utilisée est l'échelle de somnolence de Karolinska (KSS). Les participants doivent évaluer leur niveau de somnolence sur une échelle de 1 à 9. Une autre échelle, l'échelle de Stanford, permet d'évaluer la somnolence de 1 à 7. Ces échelles ont l'avantage d'être faciles à mettre en place cependant les participants peuvent avoir des difficultés à évaluer leur niveau de somnolence avec la KSS lorsque l'expérience dure plus de 3h (Friedrichs & Yang, 2010; Schmidt et al., 2009). L'évaluation subjective peut être intrusive si le participant doit rapporter son niveau de somnolence à un intervalle régulier et il n'est pas possible de connaître le niveau de somnolence en continu. Une autre possibilité est de réaliser un codage vidéo. (Wierwille & Ellsworth, 1994) ont proposé une échelle « Trained observer rating » permettant de classer l'état du conducteur de façon continue de « alerte » à « extrêmement somnolent ». L'avantage de cette analyse repose sur l'ensemble des comportements mais est très coûteuse en post-traitement et nécessite au moins un observateur expert.

L'état de somnolence s'accompagne par des changements psychophysologiques, il est donc possible de l'étudier à travers des mesures physiologiques telle que l'activité cérébrale (Liu et al., 2009; Otmani et al., 2005). Ces mesures ont l'avantage d'être des indicateurs directs

de l'activité cérébrale. Cependant la technique est invasive, demande une pose précise d'électrodes et peut être bruitée par les mouvements du participant. Un autre indicateur physiologique est l'activité cardiaque avec une diminution de la fréquence cardiaque lors de l'augmentation de la somnolence (Lal & Craig, 2001). Le rythme cardiaque présente l'avantage d'être enregistré avec des systèmes moins complexes que les dispositifs enregistrant l'activité cérébrale. Cependant, le signal cardiaque peut être bruité par les mouvements du conducteur ou peut être modifié par la prise de substance (drogue, alcool, médicament). Le rythme cardiaque peut être identique entre différents états du participant et il peut être compliqué de l'associer au niveau de somnolence sans autres méthodes. Wierwille & Ellsworth (1994) ont utilisé le PERCLOS (pourcentage de temps passé avec l'œil fermé) pour mesurer la somnolence. Ils ont considéré le conducteur comme étant somnolent lorsque que le PERCLOS dépassait 80%, c'est-à-dire, lorsque l'œil du sujet participant est fermé plus de 80% du temps. Les données oculaires ont l'avantage de pouvoir être enregistrées à l'aide de système non-invasif.

Les mesures basées sur les données du véhicule peuvent servir à la détection de la somnolence. Ingre et al. (2006) ont trouvé des estimations numériques précises de la déviation de la position latérale du véhicule dans la voie en fonction des niveaux de somnolence mesurés à l'aide de l'échelle KSS. La déviation latérale augmente de façon progressive en fonction du niveau de l'échelle KSS. Thiffault & Bergeron, (2003) ont distingué les mouvements du volant entre petit (de 1 à 5 degrés) et grand (de 6 à 10 degrés). Leurs résultats ont montré une augmentation du nombre de grand mouvement et une diminution des petits mouvements avec l'augmentation de la durée de la conduite monotone. Ces méthodes ont l'avantage d'être non invasives. Par contre, elles sont dépendantes de l'environnement et notamment de la détection du marquage par le conducteur (par exemple, si les marquages sont peu visibles, le conducteur peut réaliser des mouvements similaires à la conduite monotone).

A.3.4.3. Vagabondage

De nombreuses études scientifiques ont réalisé des recherches avec des caractéristiques proches du vagabondage de la pensée en abordant d'autres constructions psychologiques : les pensées sans rapport à la tâche (Smallwood et al., 2002, 2003, 2004; Smallwood et al., 2003) ; les pensées et les images sans rapport à la tâche (Giambra, 1995); les pensées indépendantes du stimuli (Teasdale et al., 1993, 1995), le saut de l'esprit (Kvavilashvili & Mandler, 2004) et les sorties de zone (Schooler, 2002; Schooler et al., 2004). Pour autant, le terme vagabondage de la pensée (« mind wandering ») est utilisé pour la première fois par Smallwood & Schooler

(2006) et connaît une utilisation de plus en plus fréquente (Callard et al., 2013; Murray et al., 2019). Dans une revue plus récente, Smallwood & Schooler, (2015) ont défini le vagabondage de la pensée comme « un changement dans le contenu de la pensée loin d'une tâche en cours et/ou des événements de l'environnement extérieur » (page 31.2). Ce phénomène peut être spontané ou intentionnel (Seli et al., 2016) et émerger lors de la réalisation d'une activité ou au repos (Smallwood et al., 2003).

Galera et al. (2012) ont montré qu'environ 50% des conducteurs en conduite manuelle ont rapporté du vagabondage juste avant un accident et que la réalisation du vagabondage augmente significativement la probabilité d'avoir un accident à cause d'une attention dégradée. Le vagabondage interfère avec le traitement des informations sensorielles liées à l'activité principale et dégrade l'attention liée à cette activité (Schooler et al., 2011). Les conducteurs, en conduite manuelle, faisant état de vagabondage de la pensée présentent des temps de réponse plus longs lors de l'apparition d'un événement soudain, conduisent plus rapidement et maintiennent des distances plus courtes par rapport au véhicule de devant comparés à des conducteurs concentrés sur l'activité de conduite (Yanko & Spalek, 2014). D'autres études ont également montré des performances de conduite dégradées lors de la conduite manuelle avec vagabondage (Baldwin et al., 2017; Qu et al., 2015). Le vagabondage de la pensée est donc responsable de la dégradation de l'activité de conduite et notamment de la supervision de l'environnement de conduite.

Le vagabondage de la pensée est plus important lors de la conduite autonome comparé à la conduite manuelle (Gouraud et al., 2018). En conduite automatisée sur simulateur, à l'aide de deux questionnaires (Task Irrelevant Thought et Task Relevant Thought), Körber et al. (2015) ont montré une augmentation du vagabondage tout le long d'un parcours de 42,5 minutes sur autoroute.

Gouraud et al. (2017) se sont intéressés au lien entre la problématique de la sortie de boucle et du vagabondage de la pensée. Ils ont conclu que le vagabondage est lié à la sortie de boucle dans le sens où ces deux concepts amènent à l'éloignement de la tâche principale, une diminution de la perception et des problèmes de compréhension de la situation. Ce lien permettrait d'utiliser les méthodes de mesure du vagabondage pour détecter la sortie de boucle et les mécanismes sous-jacents.

Un des outils pour mesurer subjectivement le vagabondage est l'expérience d'échantillonnage (Kahneman et al., 2004). Cette mesure subjective s'appuie sur les déclarations des participants. Il existe différentes méthodes pour l'expérience d'échantillonnage. La méthode des sondes « probe-caught » consiste à arrêter les participants

de façon aléatoire ou non pendant l'étude pour leur demander leur niveau de vagabondage de la pensée,... (Smallwood & Schooler, 2006). L'expérimentateur peut facilement manipuler les sondes en les plaçant à des intervalles réguliers afin de mesurer l'évolution du vagabondage, l'impact sur la tâche et comparer le niveau de vagabondage au cours de la réalisation de différentes tâches. L'inconvénient de cette technique est qu'elle interrompt le flux naturel de la tâche. Une autre méthode consiste à demander aux participants de déclarer spontanément les moments où ils prennent conscience qu'ils réalisent du vagabondage (Smallwood & Schooler, 2006) (« self-caught »). Cette méthode permet aux participants de reporter le vagabondage au moment où ils le réalisent et ne sont pas limités au moment où l'expérimentateur le demande. L'avantage de la technique des sondes auto-déclarées comparé à la technique de sondes interrompues est que le vagabondage est déclaré au moment temporel où a lieu les modifications physiologiques et comportementales alors que la technique des sondes « probe-caught » peut se situer au début, au milieu ou à la fin du vagabondage. Le désavantage est que l'expérimentateur ne contrôle pas le moment où le participant reporte le vagabondage et ne peut donc pas cibler un événement spécifique dans le protocole. Un autre point négatif est que le report auto-déclaré s'appuie sur la méta-conscience des participants.

Il est également possible d'administrer un questionnaire aux participants à la fin de l'expérimentation : c'est la méthode rétrospective. Cette méthode permet de ne pas couper l'activité en cours (Barron et al., 2011). Les méthodes « Open-ended method » permettent de récupérer les verbatim sur l'expérience vécue par les participants pendant la réalisation de la tâche (Baird et al., 2011). Cette méthode ne contraint pas le participant à des catégories imposées sur l'expérience vécue. Le désavantage des méthodes après l'activité se situe au niveau d'une possible difficulté des participants de se remémorer leur précédent état interne. L'autre moyen de mesurer le vagabondage est les mesures objectives qui mesurent des variables de performance de tâches comme le temps de réaction, les mesures physiologiques comme les données oculaires (Reichle et al., 2010).

Dans la suite de cette section, on s'intéressera aux conséquences de la sortie de boucle sur les performances de la conduite en fonction du niveau d'automatisation et la réalisation d'activités non liées à la conduite.

A.3.5. Impact du phénomène de sortie de boucle sur les performances de conduite

La dégradation des performances de conduite est un indicateur du phénomène de la sortie de boucle. Dans cette section, on étudiera la performance de conduite selon le niveau de conduite et la réalisation d'une activité distractive. On comparera également l'effet du niveau de l'automatisation sur les performances de conduite.

La première section est consacrée à la conduite manuelle avec tâche secondaire (cf. section A.3.5.1). Les deux sections suivantes compareront la conduite manuelle à une conduite avec un régulateur de vitesse adaptatif (cf. section A.3.5.2) et à la conduite automatisée de niveau 3 sans activité non liée à la conduite (cf. section A.3.5.3). La comparaison suivante concernera la conduite manuelle avec une conduite automatisée de niveau 3 accompagnée d'une activité non liée à la conduite (cf. section A.3.5.4). La dernière section présentera la comparaison entre conduite automatisée de niveau 3 sans tâche distractive à une conduite de niveau 3 avec la réalisation d'une activité non liée à la conduite (cf. section A.3.5.5)

A.3.5.1. Conduite manuelle avec tâche secondaire

En conduite manuelle, de nombreuses études se sont intéressées à l'effet du téléphone sur les performances de conduite. Caird et al. (2014) ont réalisé une méta-analyse de 28 articles sur les effets des SMS pendant la conduite manuelle. Les conducteurs qui écrivent un SMS ou lisent un SMS ont des difficultés à détecter les feux de circulation (Strayer & Johnston, 2001). Les conducteurs distraits présentent également des temps de réaction plus longs lors de l'apparition de dangers (Yannis et al., 2014). Ils ont également des difficultés à maintenir correctement leur véhicule dans la voie (Crisler et al., 2008; Horrey et al., 2008; Hosking et al., 2009). Papadakaki et al. (2016) ont noté dans leur étude une déviation latérale seulement pour l'écriture, la déviation diminue lors de la lecture. Les conducteurs distraits ont tendance à rouler moins vite (Caird et al., 2014; Choudhary & Velaga, 2017; Yannis et al., 2014) et à rouler plus loin du véhicule de devant le leur. Papadakaki et al. (2016) ont trouvé des résultats contraires avec une diminution de la distance de suivi. Les conducteurs présentent également des variations de la vitesse plus importantes que les conducteurs sans tâche secondaire (Cooper et al., 2011; Rudin-Brown et al., 2013; Stavrinou et al., 2013). Le temps de réaction à un événement particulier augmente avec la lecture et l'écriture d'un SMS (Drews et al., 2009; Pilgerstorfer & Boets, 2017; Yan et al., 2015). Le risque d'accident est aussi plus élevé que ce soit pour l'écriture (Choudhary & Velaga, 2017; Drews et al., 2009; Hosking et al., 2009; C. Rudin-Brown et al., 2013; Stavrinou et al., 2013) ou la lecture d'un SMS (Hosking et al., 2009; Pilgerstorfer & Boets, 2017). La lecture d'un SMS affecte négativement la conduite mais dans

des proportions moindres comparé à l'écriture ou la combinaison de l'écriture et la lecture d'un SMS (Caird et al., 2014).

Des résultats similaires ont été trouvés avec d'autres tâches secondaires visuelles sur la déviation latérale (Greenberg et al., 2003; Peng et al., 2013; Salvucci et al., 2007). Lors de la réalisation d'une tâche cognitive secondaire, Kubose et al. (2006) ont trouvé une augmentation de la vitesse alors que Son et al. (2010) n'ont trouvé aucun changement sur la vitesse. Engström et al. (2005) ont mené une étude sur les effets de la charge mentale et cognitive pendant la conduite sur simulateur et route fermée. Ils ont également trouvé une déviation latérale plus importante lors de la réalisation d'une tâche secondaire visuelle. Cependant, lors de la réalisation d'une activité secondaire avec une charge cognitive et sans distraction visuelle, la déviation latérale a été réduite.

A.3.5.2. Conduite manuelle versus conduite avec régulateur de vitesse adaptatif

Des études ont montré que les conducteurs qui conduisent avec le régulateur de vitesse adaptatif (système qui maintient une vitesse constante et une distance de sécurité au véhicule qui le précède) ont des réactions plus lentes à des événements critiques comparé aux conducteurs qui ne l'utilisent pas que ce soit sur simulateur (Bianchi Piccinini et al., 2014; Larsson et al., 2014; Lee et al., 2007; MarkVollrath et al., 2011; Nilsson, 1995) ou sur route fermée (Rudin-Brown & Parker, 2004). Avec l'utilisation du régulateur de vitesse adaptatif, (Stanton et al., 2001; Stanton et al., 1997) ont trouvé un nombre de collisions plus élevé. Nilsson (1995) a étudié l'effet du régulateur adaptatif de vitesse dans 3 situations critiques sur une autoroute : freinage fort de la voiture de devant, voiture coupant la route du participant (changement de voie) et un bouchon avec des véhicules arrêtés. Les conducteurs avec le régulateur ont eu plus de collisions seulement dans le cas des bouchons avec les véhicules arrêtés. (Kondo et al., 1999) n'ont pas trouvé de différence sur le temps de réaction pour freiner entre les conducteurs sans régulateur et ceux avec dans 4 différents scénarios.

A.3.5.3. Conduite manuelle versus conduite automatisée de niveau 3 sans activité non liée à la conduite

Des études se sont intéressées à l'influence de l'automatisation de niveau 3 sans activité liée à la conduite sur les performances de conduite comparée à la conduite manuelle. Merat et al. (2012) ont trouvé des temps de réponse similaires à un événement critique entre la conduite manuelle et la conduite automatisée lorsque que les conducteurs en conduite autonome ne sont

pas distraits par une activité non liée à la conduite. Kaduk et al., (2021) ont montré que les performances de conduite manuelle après la conduite autonome sont dégradées par rapport à la conduite manuelle avant la conduite autonome (variabilité de la position dans la voie, variabilité de l'angle du volant, variabilité de l'angle de cap du véhicule, variabilité de la vitesse longitudinale). Cette dégradation est d'autant plus importante de nuit.

A.3.5.4. Conduite manuelle versus conduite automatisée de niveau 3 avec activité non liée à la conduite

Plusieurs travaux ont comparé les performances de conduite entre la conduite manuelle (niveau 0) ou la conduite manuelle avec un régulateur de vitesse adaptatif (niveau 1) et la conduite automatisée de niveau 3 avec une activité non liée à la conduite. Des temps de réponse plus longs aux événements critiques sont observés lors de la conduite automatisée de niveau 3 avec une activité non liée à la conduite comparé à une conduite manuelle (Bourrelly et al., 2019; Bueno et al., 2016; Damböck et al., 2013; Gold et al., 2013). Les reprises en main sont également plus abruptes (Bueno et al., 2016) et le nombre de collisions est également plus important (Louw et al., 2015). Des études ont trouvé une dégradation de la performance de conduite après la demande de reprise en main (Choi et al., 2020; Lee et al., 2021). En revanche, Bueno et al. (2016) n'ont pas trouvé d'effet de l'automatisation sur la phase de stabilisation après la demande de reprise en main. Les conducteurs ayant eu une conduite autonome avec une activité secondaire présentent un comportement de conduite plus dangereux lors de dépassement de véhicule plus lent dans la période de conduite manuelle suivant la conduite autonome (Calvi et al., 2020). Louw et al. (2021) ont également montré que les conducteurs après la conduite automatisée suivaient de plus près les véhicules devant eux comparé à une conduite manuelle.

A.3.5.5. Conduite automatisée de niveau 3 avec activité versus sans activité non liée à la conduite

Des études ont comparé les performances de conduite entre la conduite autonome sans activité non liée à la conduite versus la conduite autonome avec une activité liée à la conduite. Récemment, Zhang et al. (2019) ont réalisé une méta-analyse de 129 études sur les déterminants du temps de reprise en main en conduite autonome. Les études sélectionnées devaient répondre à plusieurs critères : présenter une transition d'un mode de conduite automatisé vers une conduite manuelle, une reprise en main opérée par le conducteur et une transition en réponse à

une demande de reprise en main ou à un événement critique dans l'environnement. Les études sélectionnées rapportaient un temps de reprise en main médian ou moyen, défini comme l'intervalle de temps entre l'alerte ou le stimulus de reprise en main et le moment de l'intervention du conducteur. Le temps de reprise en main est compris entre 0,69 et 19,79 secondes pour un temps moyen de 2,72 secondes. L'utilisation d'un appareil tenu en main, comme un téléphone, augmentait le temps moyen de reprise en main de 1,33 secondes. A l'inverse, Neubauer et al., (2012) ont trouvé que les conducteurs qui utilisent le téléphone pendant une conduite automatisée freinent plus tôt que les conducteurs en conduite autonome sans activité de non conduite. L'utilisation du téléphone permettrait de garder un niveau d'alerte plus haut que dans le groupe sans téléphone où pourrait s'installer une fatigue passive. L'effet de la manipulation d'un téléphone semble donc dépendre du cas d'usage. Dans la majorité des cas, la qualité de la reprise en main est dégradée lors de la réalisation d'une activité non liée à la conduite (Eriksson & Stanton, 2017; Merat et al., 2012; Shen & Neyens, 2017; Zeeb et al., 2016).

Le phénomène de sortie de boucle dépend de plusieurs facteurs : le niveau d'automatisation avec la délégation du contrôle du véhicule et de la supervision de la route, les facteurs internes du conducteur, la conscience de la situation et/ou la réalisation d'une activité non liée à la conduite. Même avec un niveau de sortie de boucle faible, les performances de conduite sont impactées. Et ces performances le sont d'autant plus que la sortie de boucle est forte, ce qui pose des problèmes de sécurité et augmente le risque d'accident. Du point de vue du conducteur, il est important d'évaluer son état pour savoir à quel niveau de sortie de boucle il se trouve (cf. section A.4).

A.4. Vision, activité cardiaque et conduite

Des systèmes pour aider les conducteurs à rester dans la boucle de conduite sont envisagés dans les véhicules autonomes pour garantir leur sécurité. Dans le cadre du projet AutoConduct, une interface Homme-Machine (IHM) a été conçue pour être adaptée à l'état du conducteur. Il est donc important d'évaluer l'état de sortie de boucle pour proposer au conducteur une interface qui soit cohérente, ou adapter l'automatisation à cet état.

L'étude des stratégies visuelles (cf. section A.4.1) des conducteurs pour la supervision de l'environnement de conduite est critique pour définir quelles stratégies sont potentiellement dangereuses. Il serait également possible de mesurer l'engagement des conducteurs à l'aide des données cardiaques (cf. section A.4.2).

A.4.1. Stratégies visuelles

Dans cette section, la physiologie de l'œil (cf. section A.4.1.1) puis le fonctionnement de l'attention visuelle et les mouvements oculaires (cf. section A.4.1.2) vont être présentés. Ensuite, il sera abordé ensuite les stratégies visuelles en conduite manuelle (cf. section A.4.1.3) et en conduite autonome (A.4.1.4) puis le lien entre stratégie visuelle et sortie de boucle (cf. section A.4.1.5).

A.4.1.1. Physiologie de l'œil

La fonction du système visuel est d'interpréter les signaux lumineux captés par l'œil. Les signaux lumineux traversent l'œil à partir de la pupille jusqu'à la rétine, située au fond de l'œil au plus près du nerf optique. C'est à cet endroit que les signaux sont transformés en signaux électriques par les cellules photoréceptrices de la rétine. Les signaux électriques sont envoyés au cerveau pour être traités et interprétés en images.

La vision centrale de la rétine ou vision fovéale est assurée par la macula. Cette région est constituée des cônes, ce sont des photorécepteurs uniquement activés quand la lumière est intense (vision diurne). Ils permettent la distinction des couleurs ainsi qu'une perception avec une acuité visuelle maximale (capacité à distinguer deux points très proches). Au centre de la rétine est présente une plus forte densité de cônes, c'est la fovéa. Dans cette zone l'acuité visuelle est maximale, elle représente 2 degrés autour du point focal de fixation de l'œil (Rayner, 1998).

La région de la vision périphérique est essentiellement composée de bâtonnets. Ils sont activés lorsque la luminosité est faible (vision scotopique) et la vision n'est qu'en noir, blanc et nuances de gris. L'analyse précise d'une scène est réalisée dans la région fovéale (Anstis, 1989; Anstis, 1974). En dehors de cette région, l'acuité visuelle diminue rapidement. L'Homme n'est plus capable de discerner les couleurs, les détails et les formes. Par contre, il perçoit les objets en mouvement.

A.4.1.2. Attention visuelle et mouvements oculaires

Les yeux se déplacent de façon discontinue de trois à six fois par seconde (Pieters & Wedel, 2008). Pendant le déplacement, l'œil réalise une saccade qui peut durer en moyenne entre 10 et 100 ms. L'Homme réalise environ 3 saccades par seconde (Henderson, 2003) et l'œil ne peut pas capter d'informations visuelles pendant ce laps de temps : c'est la suppression saccadique (Bridgeman et al., 1975). L'information visuelle est captée seulement entre ces saccades, lors de périodes de stabilité oculaire appelées fixations. La saccade va permettre d'amener le stimulus en vision fovéale. Les informations du stimulus sont seulement extraites à ce moment-là (Rayner, 1998).

La focalisation attentionnelle consiste à consacrer des ressources cognitives au traitement des informations les plus pertinentes en zone fovéale. Cette focalisation est influencée par deux types de processus : des processus ascendants (bottom-up) et des processus descendants (top-down). Les processus ascendants, appelés également bottom-up ou exogènes, sont des processus automatiques ou réflexe déclenchés par l'apparition d'un stimulus saillant qui va attirer notre attention. L'autre type de processus, appelés endogènes ou top-down, résulte de l'orientation de l'attention par l'individu vers des stimuli. Les mouvements de l'œil, pendant la réalisation d'une activité, sont principalement dirigés vers les éléments pertinents pour la réalisation de la tâche. Ces mouvements s'appuient sur des processus descendants, et sont peu influencés par les processus ascendants (Land & Hayhoe, 2001). Les mouvements des yeux sont motivés par les besoins de mettre en valeur les informations les plus pertinentes à traiter de manière à ce que les fixations puissent être à l'origine d'actions de guidage, de reconnaissance d'objets et d'événements (Land & Hayhoe, 2001). Chaque tâche a des patterns caractéristiques de mouvements oculaires associés. Les yeux ont un mode de recherche proactif et recherchent principalement les informations nécessaires à la réalisation d'une action dans la seconde avant le début de cette action. Et ils quittent cette action souvent avant sa fin pour anticiper la suivante (Land, 2006).

Dès 1935, Buswell (cité par Wade (2020)) a mis en évidence l'influence de la tâche sur les mouvements oculaires lors de l'observation d'une image de la « tribune tower » de Chicago. Les participants devaient regarder l'image de façon libre puis il devait regarder l'image en cherchant une personne qui regardait par une des fenêtres de la tour. En fonction de la consigne, la façon dont les participants ont observé l'image de façon différait (cf. Figure A.11). Ils ont réalisé plus de fixations et des fixations plus longues sur la tour avec la consigne de recherche.

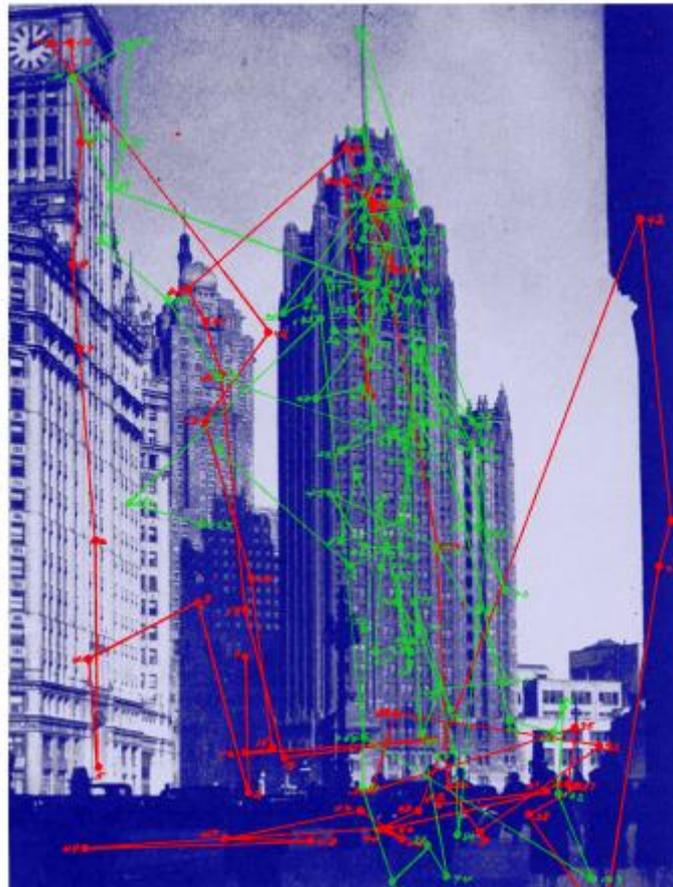


Figure A.11. Mouvements oculaires sans précision d'instructions (en rouge) et avec la recherche d'une personne regardant par une fenêtre de la tour (en vert). (Cité par Wade (2020))

Yarbus (1967) a montré des résultats similaires en demandant aux participants d'observer la même image en fonction de 7 consignes différentes (déterminer l'âge des personnes, rappeler les vêtements portés, rappeler la position des objets et des personnes, etc.). Les participants ont montré des stratégies visuelles différentes (fixations et saccades) selon les instructions données lors de la recherche à effectuer dans l'image. Ces résultats ont été confirmés par des études plus récentes (DeAngelus & Pelz, 2009; Henderson et al., 2013; Tatler

et al., 2010). Greene et al. (2012) ont demandé à des participants d'observer pendant 10 secondes des images en fonction de différentes tâches. Ils n'ont pas réussi prédire la tâche en fonction du chemin obtenu que l'observation de l'image ait duré 10 secondes ou 60 secondes. Borji & Itti (2014) ont ré-analysé les résultats obtenus dans l'étude de Greene et al. (2012) et ont montré qu'il était possible de prédire la tâche du participant en utilisant une autre méthode statistique. Après avoir reproduit l'expérimentation de Yarbus (1967), ils ont également montré qu'il était possible de prédire la tâche à l'aide de cette méthode.

D'autres études se sont intéressées aux stratégies visuelles dans un environnement dynamique et ont mis en évidence que les stratégies visuelles dépendaient de la tâche. Ces résultats ont été soulignés par différentes études en situation naturelle comme préparer du thé (Land et al., 1999), un sandwich (Hayhoe et al., 2003; Hayhoe, 2000) (cf. Figure A.12), jouer du piano (Land & Furneaux, 1997), se laver les mains (Pelz & Canosa, 2001), conduire (Land & Lee, 1994), ou taper une balle au cricket (Land & McLeod, 2000). Dans un monde virtuel, des résultats similaires ont été trouvés que ce soit lors de tâches spécifiques pendant la marche (Rothkopf et al., 2007; Tong et al., 2017) ou la manipulation de blocs (Droll et al., 2005; Jovancevic et al., 2006).

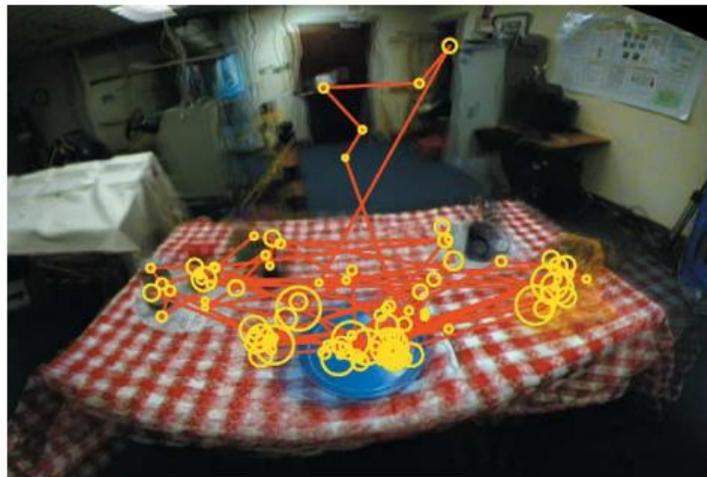


Figure A.12. Illustration provenant de Hayhoe & Ballard (2005). Fixations réalisées par un participant lors de la fabrication d'un sandwich dans l'étude de Hayhoe et al. (2003). En rouge les saccades et en jaune les fixations (plus le diamètre du cercle est grand plus la fixation est longue). Les fixations sont dirigées sur les objets pertinents pour la tâche.

Les fixations sont donc principalement orientées vers les objets importants pour la tâche et également étroitement liées à l'évolution de cette tâche (Hayhoe & Ballard, 2005). Ballard

et al. (1995) ont appelé cette stratégie « just-in-time strategy » dans laquelle les opérateurs acquièrent des informations pertinentes pour la tâche juste avant qu'elle ne soit requise. L'objectif de cette stratégie est de réduire le coût en mémoire des différentes actions nécessaires à la réalisation d'une tâche. Cette anticipation visuelle a également été mise en avant dans d'autres études (Hayhoe et al., 2003; Land et al., 1999; Pelz & Canosa, 2001) dans lesquelles les participants réalisaient des fixations sur l'objet pertinent pour l'action suivante avant la réalisation de l'action suivante. Pelz & Canosa (2001), font référence à des fixations « look-ahead » dépendantes de l'action à suivre. Bien qu'une majorité des fixations sont dédiées à l'action en cours, des fixations « look-ahead » sont dédiées à l'action suivante. Dans leur étude, les participants réalisaient déjà des fixations sur le distributeur de savon alors qu'ils étaient encore dans la phase d'approche de l'évier. Mennie et al. (2007), afin de mieux comprendre le fonctionnement des fixations « look-ahead », ont réalisé une expérimentation pendant laquelle les participants devaient assembler des pièces dans un ordre séquentiel. Leurs résultats montrent qu'environ 20% des fixations seraient des fixations « look-ahead » et seraient réalisées 3 secondes avant de saisir l'objet nécessaire à l'action suivante. Pour autant, ils n'ont pas trouvé de facilitation des mouvements pour atteindre et saisir une pièce grâce aux fixations « look-ahead ». Les mouvements oculaires permettent donc d'avoir des indices sur le comportement discret et en temps réel du traitement visuel cognitif en cours.

A.4.1.3. Stratégie visuelle et conduite manuelle

A.4.1.3.1. *Sans tâche secondaire*

La conduite manuelle est une activité complexe qui s'appuie fortement sur les informations visuelles (Sivak, 1996). Donges (1978) propose un modèle du guidage du véhicule à deux niveaux se reposant sur deux types d'informations additionnelles alimentées par des informations visuelles : les informations de guidage et les informations de stabilisation. Les informations de guidage s'appuient sur des fixations lointaines et vont permettre aux conducteurs d'anticiper la route à venir. Les informations de stabilisation vont servir à corriger les écarts latéraux du véhicule et à le garder sur la voie. Ce niveau s'appuie sur des informations visuelles proches. L'information, provenant de la partie la plus éloignée de la route, permet une adaptation de la courbe précise mais un contrôle dans la voie médiocre et réciproquement l'information proche permet un contrôle précis dans la voie mais un contrôle dans la courbe médiocre (Land & Horwood, 1995). Ni les informations lointaines, ni les informations à courtes distances ne sont suffisantes pour la conduite, seule la combinaison des deux permet une

conduite précise et fluide (Frissen & Mars, 2014; Land & Horwood, 1995; Summala et al., 1996).

Sur des routes sinueuses, les yeux doivent fournir des informations aux bras et aux mains pour tourner le volant au bon angle et au bon moment. Land & Horwood (1995) ont distingué deux différentes régions pour la prise d'informations visuelles lors de la conduite manuelle sur route sinueuse : (1) une région lointaine située environ 4 degrés sous l'horizon qui fournit des informations sur la courbe de la route et (2) une région plus proche environ 7 degrés sous l'horizon qui fournit des informations pour la position précise dans la voie. Les deux localisations distinguées par Land & Horwood (1995) supportent le modèle proposé par Donges (1978). Avec des fixations plus lointaines qui permettent d'anticiper la courbe et des fixations plus courtes qui permettent de stabiliser le véhicule dans la courbe. Land & Lee (1994) ont montré que les conducteurs réalisaient des fixations au niveau du point tangent, situé au bord intérieur de la voie de la courbe, 1 à 2 secondes avant d'y entrer et y retournaient pendant la courbe. L'angle entre ce point et le cap de la voiture permet de prédire la courbe de la route suivante. D'autres études proposent que le regard des conducteurs était principalement dirigé vers le point de la trajectoire envisagée dans 1 à 2 secondes et au-delà du point tangent (Lappi et al., 2017; Wann & Swapp, 2000; Wilkie et al., 2010). Observer la caractéristique de la route à l'aide du point tangent ne serait pas suffisant pour contrôler le véhicule. Pour amener le véhicule là où ils le souhaitent, les conducteurs auraient besoin de fixer l'endroit où ils souhaitent se diriger. Salvucci & Gray (2004) ont proposé un modèle à deux points pour le guidage du véhicule pendant une courbe. Un point proche permettant aux conducteurs de maintenir le véhicule au centre de la voie et un point lointain qui permet de guider le véhicule en fonction de la route. Mars & Navarro (2012) suggèrent que les conducteurs regardent dans une zone proche du point tangent plutôt que le point tangent précisément. Le regard permettrait de chercher près du bord de voie les limites d'une enveloppe de trajectoires acceptables. Dans la littérature, les auteurs font référence aux fixations de guidage (« guiding fixations »). Ces fixations vont permettre la coordination visuomotrice du conducteur et alimentent la boucle opérationnelle. Victor, (2005) propose une région centrale de la route, appelée PRC « Percent Road Centre » (de diamètre 16 degrés d'angle visuel), comme zone principale de prise d'informations pendant la conduite. Les conducteurs utilisent cette zone pour prendre des informations nécessaires au guidage du véhicule et passent 80% du temps dans cette zone durant une conduite manuelle sans activité secondaire.

D'autres auteurs ont distingué les fixations de guidage et des fixations d'anticipation encore plus lointaines. Mars & Navarro (2012) ont utilisé le terme de fixations « look-ahead »

pour définir ces fixations. D'après Mars & Navarro (2012), les conducteurs utiliseraient ces fixations pour prendre des informations sur le contexte et anticiper des objets ou des dangers potentiels. Ces fixations alimenteraient donc le niveau tactique de la conduite. Lehtonen et al. (2013, 2014) ont repris le terme de fixations « look-ahead » et ont attribué deux rôles à ces fixations. Ces fixations serviraient à la fois à planifier à l'avance la trajectoire de conduite (i.e., à la réalisation d'un modèle mental de la trajectoire et planifier les mouvements à venir) et à anticiper les potentiels dangers. Schnebelen et al. (2019) ont divisé les fixations « look-ahead » en deux sous-catégories, d'excentricité moyenne et extrême, en fonction de l'angle visuel des conducteurs. Les fixations « look-ahead » d'excentricité moyenne permettraient de planifier les futures actions sur le volant alors que les fixations « look-ahead » d'excentricité lointaine concerneraient davantage l'anticipation des aléas potentiels en amont.

A.4.1.3.2. Avec une tâche secondaire

Le PRC proposé par Victor (2005) présente l'avantage d'être sensible à la réalisation d'activité non liée à la conduite. Lors de la réalisation d'une activité secondaire visuelle, les conducteurs réalisaient des fixations hors de la route et ne passaient plus que 28% sur le PRC contre 80% du temps quand ils ne réalisaient pas d'activité secondaire. Cependant, le reste des fixations réalisées sur la route sont fortement concentrées dans la zone du PRC au dépend des zones périphériques. Le balayage visuel de la route est réduit de deux tiers. D'autres études ont trouvé des résultats similaires avec une diminution de l'exploration visuelle et une concentration visuelle lors de la réalisation d'activité secondaire cognitive (Engström et al., 2005; Harbluk et al., 2002; Nilsson et al., 2020; Nunes & Recarte, 2002; Recarte & Nunes, 2000; Reimer et al., 2012; Wang et al., 2014). Les conducteurs ont passé plus de temps à regarder la route et moins de temps à regarder les zones alentour.

Li & Busso (2015) ont enregistré les comportements des conducteurs en condition manuelle sur route. Ils ont observé l'influence de différentes activités secondaires (Radio, suivi du GPS, opération sur le GPS, ...) sur les actions de contrôle des rétroviseurs et ont montré que la fréquence et la durée des fixations sur les rétroviseurs sont réduites pendant la réalisation de tâche secondaire comparé à une conduite sans activité secondaire.

Le vagabondage de la pensée, résultante de pensée sans rapport avec l'activité en cours, modifie également les stratégies visuelles des conducteurs. Pendant le vagabondage, l'exploration visuelle diminue et l'attention se focalise principalement sur la route (Lemerrier et al., 2014).

A.4.1.4. Stratégie visuelle et conduite autonome

A.4.1.4.1. Conduite manuelle vs conduite autonome sans activité non liée à la conduite

Mars et Navarro (2012) ont étudié l'influence de l'automatisation sur la distribution du regard en distance angulaire (degré) au point tangent lors de la conduite sur une route sinueuse. Dans la condition automatisée de niveau 1, le suivi de voie était géré par un système automatisé et la vitesse par le conducteur. Les conducteurs ont eu pour instruction de garder les mains sur le volant et de continuer de surveiller la route dans la condition automatisée. Les résultats ont montré que les conducteurs en condition automatisée regardaient moins souvent dans la région proche du point tangent et plus souvent dans une région supérieure à 15 degrés. Les conducteurs réduisaient les fixations de guidage pendant la conduite automatisée et augmentaient les fixations « look-ahead » comparé à la conduite manuelle (cf. Figure A.13).

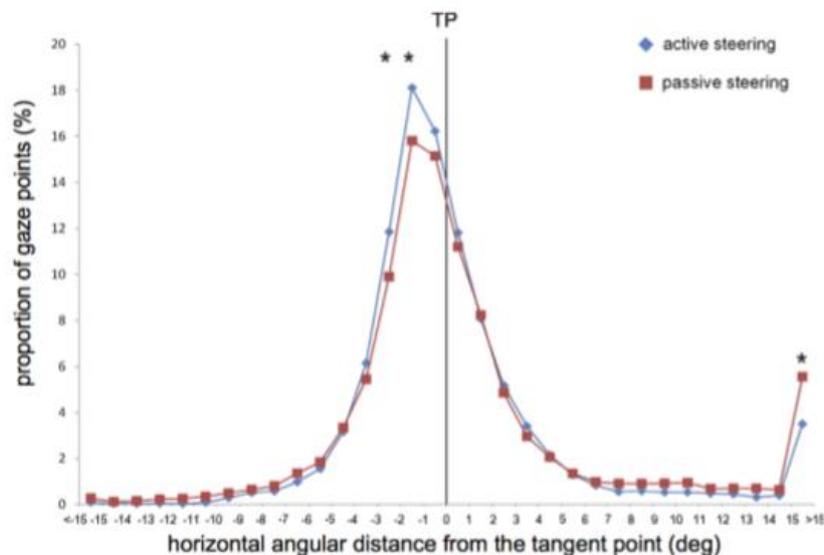


Figure A.13. Distribution du regard par rapport au point tangent (Mars & Navarro (2012))

Schnebelen et al. (2019) ont étudié le comportement visuel des conducteurs à l'approche d'un virage en fonction de la vitesse et du niveau d'automatisation. Le premier niveau était une conduite manuelle et le second une conduite autonome de niveau 3. Dans les deux cas la vitesse était gérée par le régulateur avec 3 différentes vitesses : 60 km/h, 75 km/h ou 90 km/h. Les auteurs ont observé des résultats similaires à Mars et Navarro (2012) avec une diminution des fixations de guidage et une augmentation des fixations « look-ahead » avec l'augmentation du

niveau d'automatisation. Les fixations « look-ahead » représentaient 10% des fixations des conducteurs en conduite manuelle contre 30% pour les conducteurs en conduite autonome. D'autres études ont mis en évidence des résultats similaires avec augmentation des fixations d'anticipation au dépend des fixations de guidage lors de la conduite autonome (Louw & Merat, 2017; Mackenzie & Harris, 2015).

Carsten et al. (2012) ont étudié le pourcentage de temps passé sur différentes aires d'intérêts en fonction du niveau d'automatisation des conducteurs avec un simulateur de conduite sur autoroute (cf. Figure A.14). Ils ont comparé un niveau de conduite manuelle avec un niveau de conduite semi autonome (contrôle latéral ou longitudinal) avec un niveau autonome (combinaison du contrôle latéral et longitudinal) équivalent au niveau 3 d'automatisation. Ils ont défini une région centrale avec un rayon de 6 degrés et ont découpé le reste du champ visuel en 4 zones. Cette zone se rapproche de la zone proposée par Victor et al. (2005) qui ont proposé une zone de rayon 8 degrés.



Figure A.14. Aires d'intérêt (Carsten et al., (2012))

Leurs résultats ont montré une diminution du temps passé à regarder au centre de la route avec l'augmentation du niveau d'automatisation, de 76% en conduite manuelle à 57% en conduite autonome. Avec l'augmentation de l'automatisation, les conducteurs passaient moins de temps sur la zone centrale au profit des aires latérales (gauche et droite du centre de la route).

A.4.1.4.2. Conduite autonome avec ou sans une activité non liée à la conduite

Lors de la conduite autonome, les conducteurs peuvent s'engager dans des activités non liées à la conduite, ce qui n'est pas sans conséquence sur le comportement visuel. Jamson et al. (2013) ont montré une diminution significative du temps passé sur le PRC. Dans leur étude, en

conduite manuelle, les conducteurs passaient 74,5% du temps dans cette zone contre 54% lors de la conduite autonome (équivalent à une conduite automatisée de niveau 3) avec des activités non liées à la conduite. Carsten et al. (2012) ont montré une diminution du temps passé sur la zone centrale de 57% lors d'une conduite autonome sans activité à 49% lors d'une conduite autonome avec le visionnage d'un DVD. Nakajima & Tanaka (2017) ont étudié l'effet de 3 activités non liée à la conduite sur le temps passé à regarder la route pendant une conduite automatisée de niveau 2. Les conducteurs devaient soit tenir une discussion avec un passager, soit regarder une vidéo sur un écran fixé sur le simulateur soit jouer à jeu sur un téléphone tenu en main. Les conducteurs non distraits ont passé 51% du temps à regarder la route, ils ont trouvé une différence significative pour la vidéo avec 25% du temps à regarder la route et l'utilisation du téléphone avec 14% du temps à regarder la route. Les conducteurs qui devaient tenir une conversation ont regardé la route 48% du temps ce qui n'était pas différent des conducteurs non distraits. La diminution du nombre de regards diminuait avec une tâche visuelle et cette diminution était encore plus importante si l'activité demandait de tenir un appareil.

La dispersion du regard est également modifiée lors de la réalisation d'activité de non conduite. Gold et al. (2016) ont posé 20 questions aux conducteurs pendant la conduite autonome (équivalent au niveau 3) pour simuler une conversation au téléphone. Ils ont trouvé une très forte influence de la réalisation de l'activité sur la dispersion horizontale du regard. Les conducteurs qui ne réalisaient pas la tâche avaient une dispersion horizontale du regard de 50% plus large que ceux ayant le questionnaire.

Du et al. (2020) ont manipulé la charge cognitive à l'aide de la difficulté de l'activité non liée à la conduite pendant une conduite autonome de niveau 3. Ils ont trouvé une dispersion plus faible avec l'augmentation de la charge mentale et également une diminution du temps passé à regarder le centre de la route.

A.4.1.5. Stratégie visuelle et sortie de boucle

Avec l'automatisation, on observe une diminution des fixations de guidage qui sont nécessaires à la boucle opérationnelle et une augmentation des fixations « look-ahead » qui permettent d'obtenir des informations transmises à la boucle tactique quand les conducteurs ne sont pas distraits. La réalisation d'activités non liées à la conduite réduit encore plus le temps passé à faire des fixations de guidage et en plus, diminue la dispersion du regard. En effet, le conducteur consacre de l'attention visuelle à la réalisation de l'activité, Zeeb et al. (2015) ont montré que les conducteurs pouvaient passer jusqu'à 55 secondes sans regarder la route pendant

une conduite automatisée de niveau 3. Dans leur étude, ils ont catégorisé les conducteurs selon les risques de collisions (faible, moyen ou élevé). Leurs résultats ont mis en évidence que les participants qui réalisaient le moins de fixation sur la route et les fixations les plus longues en dehors de la route présentaient des temps de réaction plus longs et des risques de collision plus élevés lors d'une demande de reprise en main. Il est donc possible de détecter la réalisation d'une activité non liée à l'aide des stratégies visuelles mais également de lier les stratégies visuelles avec le niveau de la sortie de boucle et la qualité de la reprise en main.

D'autres études ont fait le lien entre la sortie de boucle et la durée du temps d'automatisation. Feldhütter et al. (2017) ont comparé les performances de conduite et le temps de réaction d'une reprise en main après 5 ou 20 minutes de conduite autonome (équivalent au niveau 3). Le temps passé à regarder la route diminue au fil de la conduite autonome ainsi que la durée maximale d'une fixation. Les conducteurs qui ont eu une période de 20 minutes de conduite autonome ont présenté des temps de réaction plus lents lors de la reprise en main et donc présentaient un niveau de sortie de boucle plus élevé. Greenlee et al. (2018) ont montré que le taux de détection de dangers diminuait et que le temps de réaction augmentait au cours du temps d'une conduite automatisée de niveau 3 de 40 minutes alors qu'il avait été demandé aux participants de surveiller la route pour détecter les dangers potentiels. On peut déduire que la diminution du taux de détection de dangers potentiels au cours de la conduite résulte d'une diminution de la conscience de la situation et donc une sortie de boucle plus prononcée.

Le lien entre la sortie de boucle et les stratégies visuelles peut également être abordé du point de vue du vagabondage. Körber et al. (2015) ont montré que le niveau de vagabondage de la pensée a un effet sur les données oculométriques avec l'augmentation de la fréquence des clignements des yeux et de la durée des clignements des yeux ; et la diminution du diamètre des pupilles au cours de la conduite autonome pendant une conduite autonome (de niveau 2) de 42,5 minutes. Schnebelen et al. (2020) ont étudié le comportement visuel des conducteurs pendant une conduite autonome de niveau 3 pendant 18 minutes sur simulateur. Ils ont considéré 13 zones d'intérêts et ont analysé les transitions entre les différentes aires et le temps passé sur chaque aire pendant la conduite autonome pour estimer le score de vagabondage déclaré par les conducteurs. Ils ont trouvé des stratégies visuelles associées à la sortie de boucle des conducteurs et également les stratégies permettant aux conducteurs de revenir dans la boucle (cf. Figure A.15).

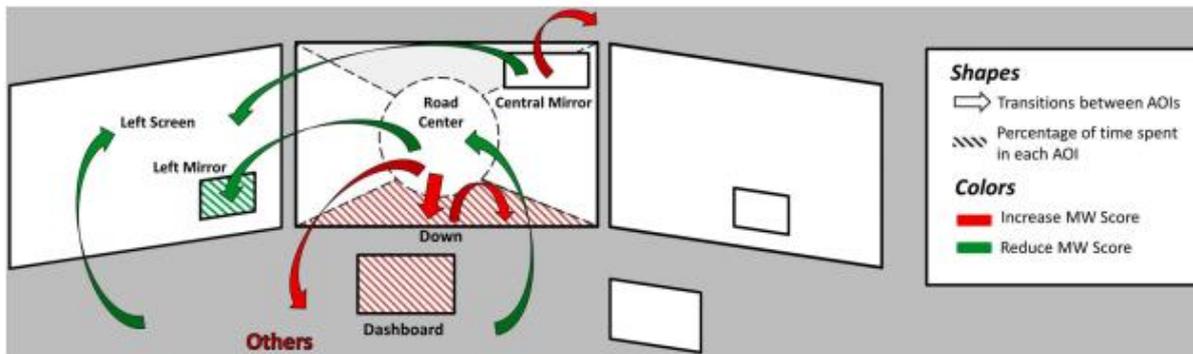


Figure A.15. Indicateurs visuels déterminants pour prédire le score de vagabondage, en vert les transitions entre les aires qui permettent de diminuer le score de vagabondage et en rouge les transitions qui augmentent le score de vagabondage (Schnebelen et al. (2020)).

A.4.2. Activité cardiaque

A.4.2.1. Anatomie et physiologie du cœur

Le cœur est un muscle composé de 4 chambres ayant pour objectif d'approvisionner en sang, enrichi par des nutriments et de l'oxygène, les organes du corps. Les battements du cœur peuvent être écoutés à l'aide d'un stéthoscope et l'activité électrique est enregistrée avec un électrocardiographe. Chaque battement correspond à une contraction du cœur pour envoyer du sang dans les différentes aires du corps.

Le mécanisme interne du battement de cœur est dû à un système spécialisé de fibres dont le nœud sinusal. Le nœud sinusal est localisé à l'arrière de la paroi de l'atrium droit, et sa décharge électrique régulière est à l'origine de la contraction rythmique normale du cœur. Il est également connu comme le pacemaker avec un rythme cardiaque de 120 battements par minute à la température normale du corps. Cependant, le nerf vague inhibe le nœud sinusal et maintient le rythme cardiaque approximativement entre 70 et 80 battements par minute.

Le rythme de contraction du muscle cardiaque peut également être contrôlé par les nerfs provenant du système nerveux autonome et par ceux provenant du système nerveux central. Ce sont des contrôles externes du rythme cardiaque. Le système parasympathique influence le nœud sinusal par le nerf vague et va diminuer le rythme cardiaque (effet chrono topique négatif). Le système nerveux sympathique a l'effet opposé, il produit une augmentation du rythme cardiaque (effet chrono topique positif).

Le système nerveux sympathique agit pour augmenter le rythme cardiaque lors de certaines situations émotionnelles ou pour des niveaux élevés d'exercice. Les changements du rythme cardiaque dépendent de l'activité du système nerveux sympathique et du système

nerveux parasympathique, de façon qu'une augmentation du rythme cardiaque peut être causée par la diminution de l'activité du système nerveux parasympathique ou par une augmentation du systèmes nerveux sympathique.

Le signal cardiaque (activité électrique du cœur) enregistré correspond à un ensemble d'ondes électriques représenté par les ondes PQRST. Le complexe QRS est le plus souvent utilisé dans la littérature. La contraction de l'oreillette correspond à l'onde P et les ondes QRS qui rassemblent les contractions successives des ventricules. L'onde T, quant à elle, représente le retour à la phase de repos des ventricules. Ainsi, ces différentes ondes traduisent l'enchaînement des contractions/décontractions des différentes composantes musculaires du cœur (cf. Figure A.16). Dans la littérature, deux principaux indicateurs sont particulièrement utilisés : le rythme cardiaque (RC) qui correspond au nombre de pics R par minute, et la variabilité de ce rythme cardiaque (VRC) qui représente la variation de la durée des intervalles R-R, mesurable dans les domaines temporel, géométrique et fréquentiel (Billman, 2011).

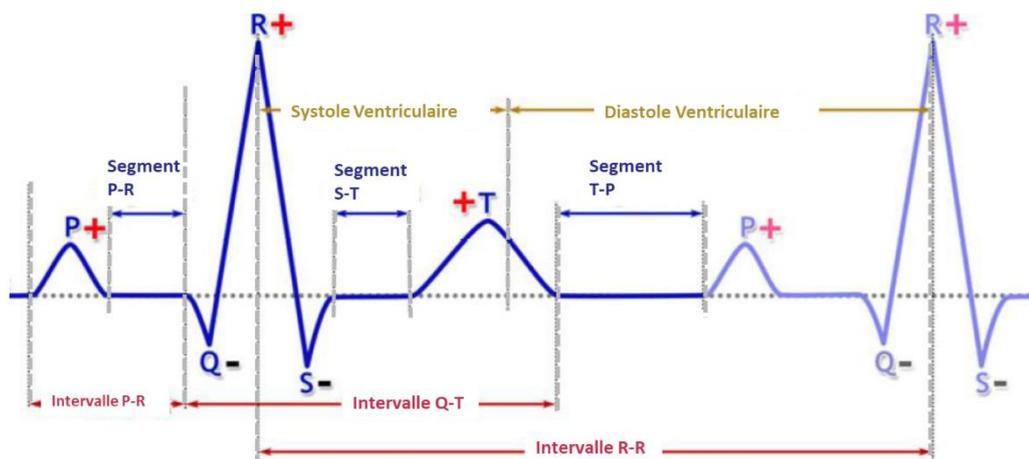


Figure A.16. Composant du signal ECG et évènements électriques du cycle cardiaque

A.4.2.2. Cardiaque et conduite manuelle

En conduite manuelle, les conducteurs présentaient une augmentation du rythme cardiaque lors de la réalisation de manœuvres plus complexes (Brookhuis et al., 2004). Que ce soit sur simulateur (Mehler et al., 2009) ou sur route ouverte (Reimer et al., 2009), il a été trouvé une augmentation du rythme cardiaque avec l'augmentation de la difficulté d'une double tâche auditive. Des résultats similaires ont été trouvés avec l'augmentation d'une tâche de mémoire de travail avec une présentation auditive et une réponse verbale (Mehler et al., 2012).

L'augmentation du rythme cardiaque est couplé avec une diminution de la variabilité du rythme cardiaque (Heine et al., 2017; Hidalgo-Muñoz et al., 2018). Hidalgo-Muñoz et al. (2018) ont mis évidence que l'augmentation du rythme cardiaques augmentait plus lorsque l'activité secondaire demandait davantage de ressources cognitives. La variabilité du rythme cardiaque serait également un bon indicateur pour détecter la somnolence au volant (Fujiwara et al., 2019; Furman et al., 2008; Vicente et al., 2016).

A.4.2.3. [Activité cardiaque et conduite automatisée](#)

Conduire une Tesla avec les aides à la conduite activées (niveau 2) diminuait le rythme cardiaque comparé à une conduite manuelle sur une autoroute réelle. En conduite autonome, Biondi et al. (2016) ont trouvé une augmentation du rythme cardiaque lors de l'interaction avec le système d'info-divertissement du véhicule à l'aide de la voix. Du et al. (2020) ont utilisé une tâche n-back pendant la conduite autonome pour introduire deux niveaux de charges mentales. Ils ont trouvé une diminution de la variabilité du rythme cardiaque avec l'augmentation de la charge mentale.

De nombreuses études ont utilisé les stratégies visuelles pour évaluer les prises d'information des conducteurs. Avec l'automatisation, on observe une augmentation des fixations « look-ahead » au détriment des fixations de guidage nécessaire à la conduite manuelle. Lors de la réalisation d'une activité non liée à la conduite les conducteurs passent moins de temps à regarder la route et présentent une dispersion du regard moins importante. Des études ont montré qu'il était possible de lier les stratégies visuelles avec le niveau de sortie de boucle des conducteurs et la qualité de la reprise en main. En ce sens, l'évaluation des stratégies visuelles des conducteurs semblent prometteuses pour assurer la sécurité du conducteur. L'utilisation des données cardiaques, en complément des stratégies visuelles, peut être un moyen d'affiner le diagnostic de l'état du conducteur. En effet, des études ont trouvé une augmentation du rythme cardiaque et une diminution de la variabilité du rythme cardiaque avec l'augmentation de la difficulté d'une activité non liée à la conduite. L'analyse du rythme cardiaque peut donc donner des informations sur la charge mentale du conducteur.

B. Objectifs et organisation de la thèse

L'arrivée de l'automatisation modifie l'activité de conduite et apporte des problématiques nouvelles. Avec la délégation de la conduite, les niveaux de contrôle opérationnel et tactique de la conduite sont modifiés en profondeur, car c'est le système automatisé qui prend en charge au moins partiellement ces deux niveaux. Les conducteurs n'ont plus la nécessité ni de réaliser des fixations de guidage pour maintenir la boucle perceptivo-motrice (Mole et al., 2019), ni de réaliser les fixations nécessaires à la boucle tactique servant à acquérir une conscience de la situation. La connaissance du type de contrôle du véhicule et de la supervision de la route va permettre de déduire l'état du conducteur dans la boucle de conduite (Merat et al., 2019). En conduite manuelle, les conducteurs sont dans la boucle s'ils surveillent le contexte routier. En conduite autonome, si les conducteurs surveillent l'environnement routier, ils sont considérés sur la boucle. Dans le cas contraire, si les conducteurs n'entretiennent pas la conscience de la situation, ils sont définis comme étant hors de la boucle.

L'objectif de cette thèse est d'étudier l'état attentionnel des conducteurs pendant et après la conduite autonome dans différentes situations de distraction exogène (réalisation d'une activité non liée à la conduite) ou endogène (vagabondage de la pensée) à partir des comportements oculaires.

B.1. Charge mentale induite par l'activité non liée à la conduite et qualité de reprise en main

La première étude s'intéresse à l'impact de la difficulté d'une activité non liée à la conduite sur la qualité de reprise en main, les stratégies visuelles et les données cardiaques.

Bueno et al. (2016) ont étudié l'impact de différents niveaux de charge mentale (faible ou élevée) associée à une activité non liée à la conduite sur la qualité de la reprise en main. L'expérience s'est déroulée sur un simulateur de conduite statique. Le véhicule automatisé de niveau 3 circulait à 110 km/h sur la voie de droite d'une autoroute 3 voies. Pendant la conduite automatisée, le conducteur devait réaliser une activité (cognitive, visuelle et motrice) non liée à la conduite sur une tablette située au niveau de la console centrale. Après 10 minutes de conduite autonome, une alerte de reprise en main était notifiée aux conducteurs. A ce moment-là, un obstacle était situé à 10 secondes sur leur voie. Ils devaient reprendre le contrôle du véhicule et éviter l'obstacle. Les conducteurs étaient divisés en 3 groupes : condition manuelle, conduite automatisée avec charge mentale faible et conduite automatisée avec charge élevée.

Les auteurs ont analysé les données du véhicule pendant la reprise en main pour observer les qualités de reprise en main. Ils ont conclu que la qualité de la reprise en main dépendait principalement de l'effet de l'automatisation (conduite manuelle versus conduite autonome) et qu'il n'existait pas d'effet de la charge mentale induite par l'activité non liée à la conduite sur la qualité de la reprise en main.

L'objectif de notre étude est d'explorer plus en profondeur le lien entre la charge mentale d'une activité non liée à la conduite et la qualité de reprise en main lors d'une reprise en main non planifiée critique caractérisée par l'évitement d'un obstacle. Pour ce faire, les données oculaires et cardiaques des participants ont été enregistrées pendant toute l'expérimentation afin de voir quels sont les effets de la charge mentale induite par l'activité de non conduite sur ces deux types de données, et s'il existe un lien entre elles et la qualité de la reprise en main.

B.2. Conscience de la situation et qualité de reprise en main

La deuxième étude porte sur la conscience de la situation et la qualité de reprise en main des conducteurs en véhicule autonome lors d'une reprise en main non planifiée et critique.

Pendant la conduite automatisée, les conducteurs souhaitent s'engager dans des activités non liées à la conduite (Pfleging et al., 2016; Shi & Frey, 2021) ce qui détourne leur attention de la route (Naujoks et al., 2016). Zeeb et al. (2015), dans leur étude, ont montré que les conducteurs passaient jusqu'à 55 secondes à regarder hors de la route lors de la réalisation d'une activité non liée à la conduite. Cet engagement empêche l'actualisation de la conscience de la situation nécessaire à l'activité de conduite (Merat et al., 2019). Les conducteurs avec des fixations plus longues sur l'activité non liée à la conduite et avec des fixations moins fréquentes présentaient plus de risque d'avoir une collision lors d'une reprise en main non planifiée avec un obstacle à éviter (Zeeb et al., 2015).

Le but de cette expérimentation est donc de manipuler le temps d'engagement des conducteurs dans une activité non liée à la conduite pour leur permettre de construire ou non une conscience de la situation et de voir s'il existe un lien entre conscience de la situation et qualité de la reprise en main non planifiée avec un évitement d'obstacle. Un groupe de participant ne sera jamais distrait, à l'inverse de l'autre groupe. D'après Rockwell (1988), les conducteurs en conduite manuelle sont réticents à quitter les routes des yeux plus de deux secondes. Autrement dit, les conducteurs prennent des informations visuelles sur le contexte routier au moins toutes les deux secondes. Cette règle a été utilisée pour faire deux conditions supplémentaires : des conducteurs distraits pendant toute la conduite autonome sauf les deux

dernières secondes avant l'alerte de reprise en main et des conducteurs qui sont distraits seulement les deux secondes avant la reprise en main et qui ont pu donc au préalable construire une conscience de la situation. Il a été demandé aux participants de replacer les véhicules dont ils avaient conscience avant l'alerte sur un schéma pour mesurer la conscience de la situation. L'oculométrie a été utilisée pour déterminer s'il existait des patterns de contrôle visuel qui distinguent les différents groupes expérimentaux.

B.3. Influence du niveau d'automatisation sur le vagabondage de la pensée

La dernière étude s'intéresse à l'influence du niveau d'automatisation sur le vagabondage de la pensée et explore la possibilité d'estimer l'évolution du vagabondage sur la base d'une modélisation des stratégies visuelles.

Körber et al. (2015) ont mené une étude sur la baisse de la vigilance et la fatigue passive causée par la monotonie pendant la conduite autonome. Les conducteurs ont délégué le contrôle latéral et longitudinal au système automatisé sur une autoroute durant 42,5 minutes. Les participants ont déclaré plus de vagabondage de la pensée dans les dernières minutes de la conduite comparé aux cinq premières minutes ce qui montre une augmentation du niveau de sortie de la boucle de la conduite. D'autres études ont montré une augmentation du niveau de vagabondage de la pensée après une longue période d'automatisation. Schnebelen et al., (2020) ont estimé le phénomène de la sortie de boucle à l'aide des stratégies visuelles et du niveau de vagabondage déclaré par les participants après la conduite autonome. Leurs résultats ont montré des patterns visuels différents entre les conducteurs ayant rapporté un haut niveau de vagabondage et ceux ayant rapporté un faible niveau de vagabondage. Il est donc possible de mesurer le niveau de vagabondage à l'aide des stratégies visuelles. Dans notre étude la méthode utilisée par Schnebelen et al. (2020) va être mise en œuvre pour mesurer l'effet de différents niveaux d'automatisation sur la survenue et sur le score maximal du vagabondage. De plus, l'évolution du vagabondage au cours du temps pendant la conduite va être étudiée.

C. Matériel

Pour tester nos hypothèses, trois expérimentations ont été menées sur le simulateur de conduite du LS2N (C.1) sur lequel a été implémenté l'IHM du véhicule automatisé (C.2). Pour les données oculaires, l'oculomètre SmartEye (C.3) a été utilisé dans chaque expérimentation. Ce matériel commun est présenté dans les sous-sections suivantes.

C.1. Simulateur de conduite

Le simulateur de conduite est constitué d'une base fixe équipée d'un siège conducteur réglable, d'un volant à retour de force, d'un levier de vitesse, d'un embrayage et des pédales d'accélérateur et de frein (cf. Figure C.1). La scène de conduite a été développée à l'aide de SCANeR Studio (V1.8 / V1.9) et est affichée sur 3 écrans qui recouvrent environ 120 degrés du champ visuel. Un écran est dédié au compteur et une tablette a été ajoutée au niveau de la console centrale pour présenter l'état de l'IHM et les activités de vie à bord aux participants. Les données du scénario sont enregistrées par le logiciel du simulateur à une fréquence de 60 Hz.



Figure C.1. Simulateur de conduite du LS2N

C.2. IHM du système automatisé

L'état du véhicule était décrit par 4 pictogrammes affichés sur la tablette :

- Pictogramme conduite Manuelle : le véhicule est en conduite manuelle, les participants sont responsables de l'activité de conduite et de la supervision de la scène. Ils doivent conduire comme ils le feraient dans la vie courante.
- Pictogramme A (cf. Figure C.2.A) : la conduite autonome est disponible, les conducteurs doivent activer la conduite autonome dès qu'ils se sentent prêts.
- Pictogramme B (cf. Figure C.2.B) : La conduite autonome est activée, en fonction du niveau d'automatisation du véhicule.
- Pictogramme C (cf. Figure C.2.C) : C'est une reprise en main non planifiée, le conducteur à 8 secondes pour reprendre le contrôle du véhicule.
- Pictogramme D (cf. Figure C.2.D) : C'est une reprise en main planifiée de fin de zone. Le pictogramme s'affiche 45 secondes avant la fin de zone.



Figure C.2. Pictogrammes affichées sur la l'IHM de la tablette: A: conduite autonome disponible; B: conduite autonome activée; C: demande de reprise en main non planifiée (8s); D: demande de reprise en main de fin de zone de conduite autonome (45s)

C.3. Oculomètre Smart Eye Pro

Les données oculaires ont été enregistrées par l'oculomètre Smart Eye Pro (V5.9) composé de 4 caméras placées sous les écrans (une caméra sous l'écran de gauche, deux caméras sous l'écran central et une caméra sous l'écran de droite). La calibration débutait par la détection de points sur le visage du participant à l'aide d'une calibration en 11 points. Le participant devait regarder ces différents points à la suite en orientant le visage vers chaque point pour amener les pupilles en face des points. La seconde partie s'intéressait à l'orientation des pupilles dans le visage et le participant devait regarder 13 points en gardant la tête fixe face à l'écran central et en bougeant uniquement les yeux. Les données oculaires ont été enregistrées en même temps que le scénario soit à 60 Hz.

D. Expérimentation 1 : Effet de la distraction du conducteur sur la charge mentale et la qualité de reprise en main

Ces travaux ont été publiés dans les actes de la conférence *Driving Simulation Conference Europe 2021 VR*, pp 99-106 en 2021 sous le titre : « Effect of driver's distraction on gaze behaviour, mental workload and takeover quality ».

D.1. Objectifs et hypothèses

Cette étude s'est intéressée à l'impact de la difficulté d'une activité non liée à la conduite sur la qualité de la reprise en main, les stratégies visuelles et les données cardiaques (cf. Section B.1). Le premier objectif de cette expérimentation était d'étudier l'influence de la difficulté de l'activité sur les données électrocardiaques, la charge mentale subjective et le comportement oculaire. Pour ce faire, les conducteurs devaient s'engager dans une activité avec deux niveaux de difficulté pendant les deux minutes avant la demande de reprise en main. Le second objectif de l'expérimentation était de déterminer s'il existait des liens potentiels entre la charge mentale associée à l'activité, le comportement visuel du conducteur et la qualité de la reprise en main. Les données du véhicule pendant la reprise en main ont été analysées pour en définir la qualité. Il a été émis l'hypothèse qu'une activité non liée à la conduite plus exigeante influencerait davantage les prises d'informations visuelles pendant la l'activité, ce qui en conséquence réduirait la qualité de la reprise en main.

D.2. Méthodes

D.2.1. Participants

18 participants (9 hommes et 9 femmes) ont réalisé l'expérimentation, avec un âge moyen de 24.7 ans (SD = 4.7). Les participants devaient avoir une vue normale ou corrigée avec des lentilles de contact pour faciliter l'enregistrement des données oculaires et aucun problème cardiaque pouvant interférer avec l'enregistrement des données cardiaques. Ils avaient tous un permis de conduire valable (moyenne : 5496.84 km/an, SD = 5267.7) et avaient signé un formulaire de consentement pour participer à l'étude.

D.2.2. Activité non liée à la conduite

L'activité non liée à la conduite consistait en un calcul mental d'opérations successives. Les opérations étaient affichées sur la tablette installée en console centrale et étaient composées

de 3 nombres à additionner ou soustraire. L'activité de calcul facile qui servait à induire une charge mentale faible se limitait à des nombres à 1 chiffre alors que l'activité difficile utilisée pour l'induction de la charge mentale élevée à des nombres à deux chiffres. Chaque opération était affichée pendant 10 secondes, dont 6 secondes avec une barre de temps bleu et 4 secondes avec une barre de temps rouge. Uniquement pendant les 4 dernières secondes, les participants pouvaient sélectionner le résultat de l'opération parmi un cercle de chiffre entre 0 et 9 (cf. Figure D.1).

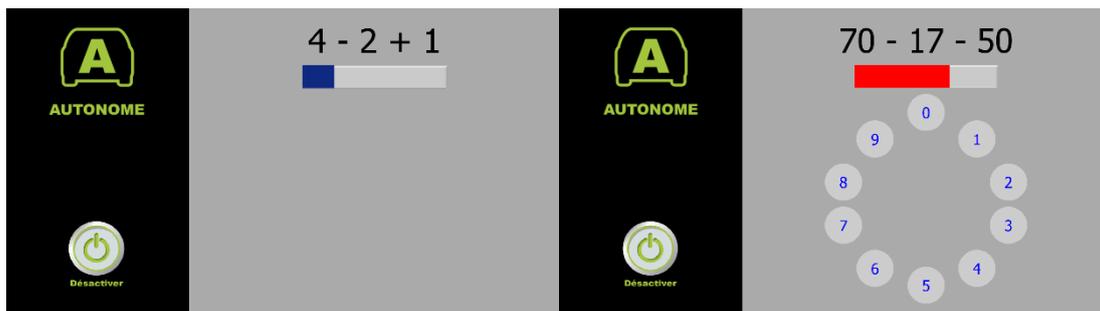


Figure D.1. L'activité de calcul mental. A gauche : la première phase du calcul facile (0-6 secondes). A Droite : la phase finale de l'activité de calcul difficile avec le cercle de réponse (6-10 secondes).

D.2.3. Reprises en main critique et non critique

Pendant la session, les participants recevaient une requête de reprise en main non planifiée et critique à 8 secondes d'un obstacle (cf. Figure D.2). Un véhicule (en blanc) circulait à 3 secondes devant le véhicule du participant (en vert) et cachait le véhicule arrêté (en rouge) sur la voie. Quand le véhicule en blanc commençait à changer de voie pour éviter la collision, le participant avait alors une vue partielle sur le véhicule arrêté. Cet événement survenait au moment où le participant pouvait sélectionner une réponse pour l'activité de calcul. La requête de reprise en main était alors déclenchée et l'activité de calcul était remplacée par l'icône de la demande de reprise en main (cf. Figure C.2. C). Le participant devait alors reprendre en main son véhicule et éviter la collision avec le véhicule arrêté. Cependant, un autre véhicule (en bleu) était en train de le doubler et le participant devait alors freiner pour laisser passer le véhicule et ensuite éviter l'obstacle.

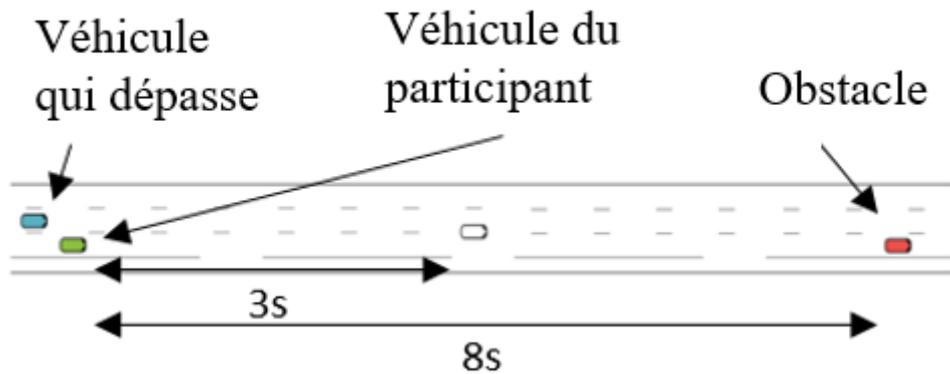


Figure D.2. Cas critique : du véhicule le plus à gauche à celui le plus à droite ; véhicule en bleu : véhicule qui dépasse ; véhicule en vert : véhicule du participant ; véhicule en blanc : véhicule de tête ; véhicule en rouge : véhicule obstacle

Pour éviter que les participants s'attendent à réaliser un évitement à chaque demande de reprise en main, des reprises en main non planifiées et non critiques ont été introduites. Ces reprises en main consistaient à une légère déviation du véhicule dans la voie. Les participants devaient alors reprendre le contrôle du véhicule et le stabiliser dans la voie.

D.2.4. Plan expérimental

Après avoir reçu les instructions sur le fonctionnement du véhicule autonome, les participants testaient les différentes transitions entre la conduite manuelle et autonome sur des parcours de familiarisation. Ils réalisaient également, pendant la conduite autonome, chaque niveau de difficulté de l'activité sur une autoroute 3 voies avec un trafic modéré. La partie de l'expérimentation enregistrée se déroulait en 4 essais (cf. Figure D.3). Chaque essai comprenait plusieurs activités non liées à la conduite durant entre 1 minute 40 secondes et 2 minutes 20 secondes pour éviter que les participants s'habituent à la durée de la réalisation des activités et anticipent la demande de reprise en main. Toujours dans l'optique d'éviter que les participants anticipent la suite du scénario, les activités étaient parfois suivies par une reprise non planifiée (critique ou non critique) ou par une conduite autonome sans activité non liée à la conduite. L'activité non liée à la conduite précédant la reprise en main non planifiée durait toujours 2 minutes. Après chaque essai, les participants devaient répondre au NASA-TLX pour évaluer leur charge mentale subjective liée à la réalisation de l'activité. L'ordre de présentation des essais était contrebalancé entre les participants.

correspondaient aux deux minutes de la conduite automatisée avec l'activité non liée à la conduite « activité ». Pour l'analyse, le ratio « baseline » / sur la conduite automatisée avec l'activité a été calculé.

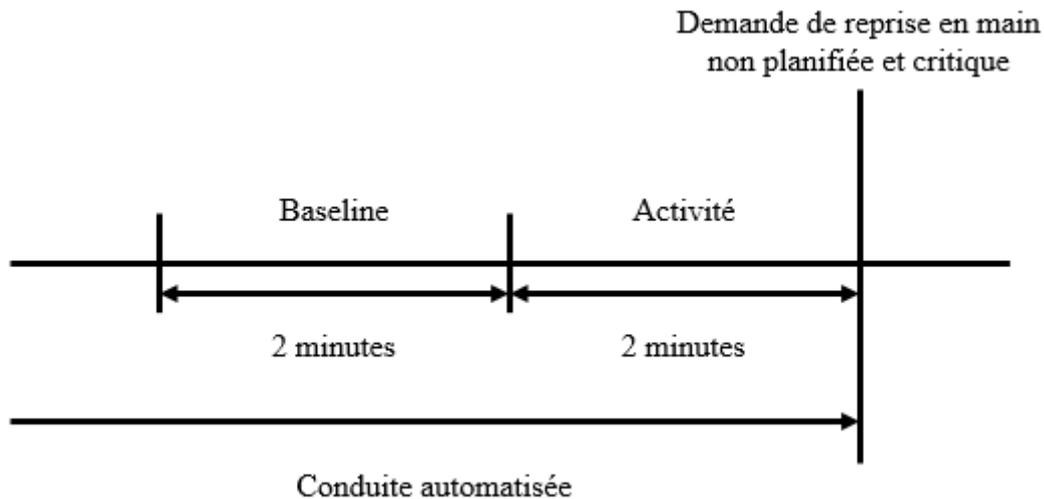


Figure D.4. Les 2 minutes de « baseline » et les 2 minutes de conduite automatisée avant la demande de reprise en main non planifiée et critique servant pour le calcul du ratio des données cardiaques

D.3.2. Les aires d'intérêt

La scène visuelle a été séparée en deux parties (cf. Figure D.5). La première aire, appelée « situation » (zones vertes) incluait toutes les zones qui donnaient des informations sur l'environnement soit les 3 écrans du simulateur dans lesquels se trouvaient les rétroviseurs. La seconde aire, appelée « distraction » (zones rouges) faisait référence à toutes les zones qui ne permettaient pas aux conducteurs de prendre des informations sur la route. Elle comprenait le compteur, la tablette et l'environnement du simulateur situé en dehors des écrans.

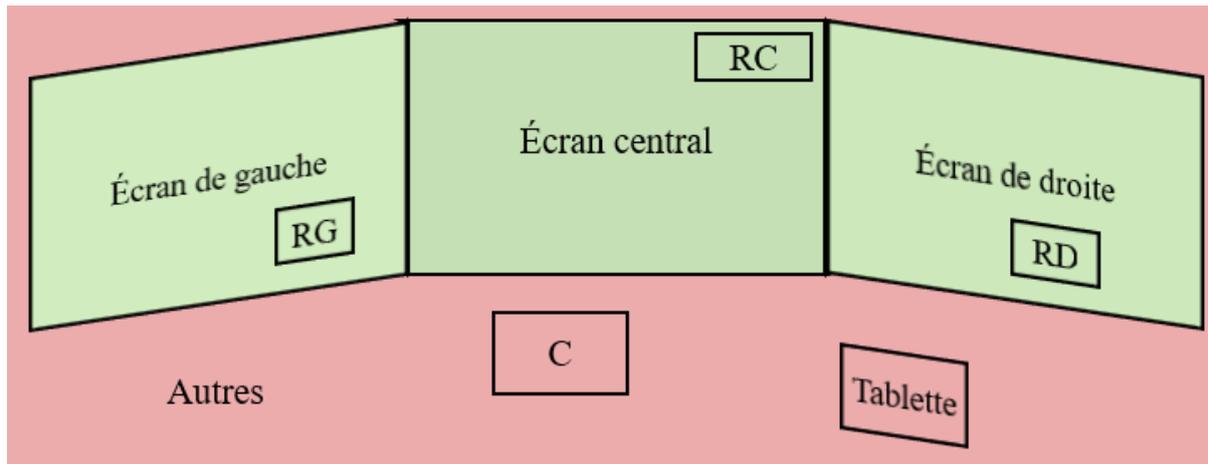


Figure D.5. Distribution des aires d'intérêt. En vert : les aires pour la situation. En rouge : les aires pour la distraction

D.3.3. Qualité de la reprise en main

Pour calculer la qualité de la reprise en main, deux phases de reprise en main ont été distinguées :

- « Phase 1 » commençait au moment de la requête de reprise en main et se finissait quand le participant réalisait sa première action sur le véhicule
- « Phase 2 » débutait directement après la phase 1 et s'arrêtait quand le parechoc avant du véhicule du participant arrivait au même niveau que le parechoc arrière du véhicule obstacle, que le véhicule du participant soit dans la voie de gauche (dans le cas, d'un évitement de l'obstacle par la gauche) ou dans la voie identique à l'obstacle (dans ce dernier cas, le participant a eu une collision avec le véhicule arrêté).

Les critères de la qualité de la reprise en main ont été définis en fonction des données des véhicules. Pour la phase 1, il a été seulement considéré le temps mis par le participant pour réaliser sa première action sur le véhicule après l'alerte de reprise en main. Pour la phase 2, plusieurs indicateurs ont été considérés : vitesse minimale, déviation latérale gauche maximale, accélération latérale gauche maximale, angle du volant maximal vers la gauche, temps de collision à l'obstacle, distance latérale minimale avec le véhicule dans la voie de gauche (seulement quand le véhicule dans la voie de gauche est au même niveau que le véhicule du participant) et la collision avec un autre véhicule. La collision était le seul critère binaire : soit le participant avait une collision avec l'un des véhicules présents soit il n'y avait pas de

collision. Pour les autres critères, des intervalles du type [moyenne – écart-type ; moyenne + écart-type] ont été définis pour isoler les valeurs très différentes des autres. Sur cette base, la qualité de la reprise en main a été caractérisée comme mauvaise quand l'un des critères suivants a été rencontré :

- Le temps avant collision avec le véhicule obstacle était inférieur à 1,5 seconde
- La déviation latérale gauche était supérieure à 5 mètres par rapport à l'axe de la voie de départ, la plus à droite (dans ce cas, une partie du véhicule ou le véhicule complet a traversé la voie centrale et a fini dans la voie la plus à gauche)
- Une presque collision avec le véhicule en train de doubler caractérisée par une distance inférieure à 1 mètre entre les deux véhicules était observée
- Une collision avec un véhicule était observée

Sur les 66 reprises en main, 16 ont été catégorisées comme des reprises en main de mauvaises qualités sur la base de ces critères.

D.3.4. Variables dépendantes

Un test de normalité de Shapiro-Wilk a été effectué pour les scores du NASA-TLX, les données cardiaques et les données oculaires. Les résultats des tests n'ont pas trouvé de déviation significative de la normalité pour chaque échantillon.

Pour l'évaluation de la charge mentale, l'effet de la complexité de l'activité non liée à la conduite et de la répétition de l'activité sur la charge mentale subjective a été analysé à l'aide d'ANOVAs. La charge mentale a été étudiée au travers des scores du NASA-TLX (évaluation subjective) et des données cardiaques (rythme cardiaque et variabilité du rythme cardiaque).

Les données oculaires ont fait l'objet d'une analyse de variance (ANOVA) à deux facteurs : répétition et difficulté de l'activité. 4 indicateurs ont été considérés : le nombre de fixations (NF), le temps cumulé de fixation (TF), le nombre de fixations courtes inférieures à 2 secondes ($TF < 2s$) et le nombre de fixations longues supérieures à 2 secondes ($TF > 2s$). Les indicateurs ont été calculés pour la zone de la situation et pour la zone de la distraction. La distinction des deux secondes a été basée sur la règle des deux secondes de Rockwell (1988), disant que les conducteurs en conduite manuelle étaient réticents à quitter la route des yeux plus de deux secondes.

Le test du khi-deux carré a été utilisé pour analyser les effets de la localisation du regard au moment de la demande de la reprise sur la qualité de la reprise en main et également pour analyser l'effet de la difficulté de l'activité sur la qualité de la reprise en main.

D.4. Résultats

Chaque participant a complété les 4 essais. 72 essais ont été obtenus incluant les données du véhicule, les données cardiaques, les données oculaires et les réponses au questionnaire de charge mentale. A cause de problèmes techniques, 6 jeux de données incomplets ont été exclus des analyses.

L'évaluation de la charge mentale

Les scores de NASA-TLX

L'ANOVA a montré une augmentation de la charge mentale subjective avec l'augmentation de la difficulté du calcul mental [$F(1,62) = 16.62$; $p < 0.001$; $\eta^2 = 0.197$] et une diminution de la charge mentale subjective lors de la seconde présentation de l'activité non liée à la conduite [$F(1,62) = 4.2$; $p < 0.05$; $\eta^2 = 0.05$] (cf. Figure D.6).

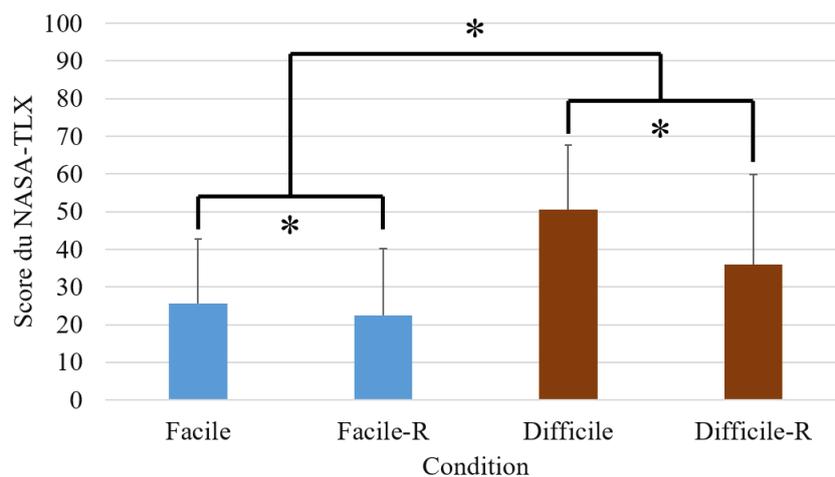


Figure D.6. Score du NASA-TLX par condition (Facile : activité facile ; Facile-R : répétition de l'activité facile ; Difficile : activité difficile ; Difficile-R : répétition de l'activité difficile)

Les données cardiaques

Des mesures répétées pour les ANOVAs des variables cardiaques ont été effectuées pour deux catégories prédictives : difficulté de l'activité et la répétition.

Le rythme cardiaque augmentait quand les participants réalisaient l'activité non liée à la conduite [$F(1,62) = 60.21$; $p < 0.001$; $\eta^2 = 0.48$]. Cependant aucun effet de la répétition ($F < 1$), de la difficulté de l'activité ($F < 1$), et de la difficulté de l'activité * la répétition ($F < 1$) n'a été trouvé.

La variabilité du rythme cardiaque diminuait lorsque les participants réalisaient l'activité non liée à la conduite comparée à la conduite automatisée sans activité [$F(1,62) = 34.0305$; $p < .001$; $\eta^2 = 0.48$]. Les analyses n'ont montré aucun effet de la répétition ($F < 1$), de la difficulté de l'activité ($F < 1$), et de la répétition * la difficulté de l'activité ($F < 1$).

L'analyse des données visuelles pendant l'activité non liée à la conduite

Prises d'information dans les zones renseignant sur la situation de conduite

Pour cette analyse, seul les regards dirigés vers les zones renseignant sur la situation de conduite ont été pris en compte. L'ANOVA a montré un effet de la difficulté de l'activité avec une réduction significative de tous les indicateurs avec l'augmentation de la difficulté : nombre de fixation [$F(1,62) = 5$; $p < .05$; $\eta^2 = 0.075$] (cf. Figure D.7.A), temps cumulé des fixations [$F(1,62) = 10.52$; $p < .05$; $\eta^2 = 0.145$] (cf. Figure D.7.B), nombre de fixation inférieur à 2 secondes [$F(1,62) = 4.06$; $p < .05$; $\eta^2 = 0.061$] (cf. Figure D.7.C), nombre de fixation supérieur à 2 secondes [$F(1,62) = 9.78$; $p < .05$; $\eta^2 = 0.134$] (cf. Figure D.7.D). Aucun effet de la répétition ($F < 1$), ni d'effet de l'interaction entre la difficulté de l'activité et de la répétition ($F < 1$) n'a été trouvé.

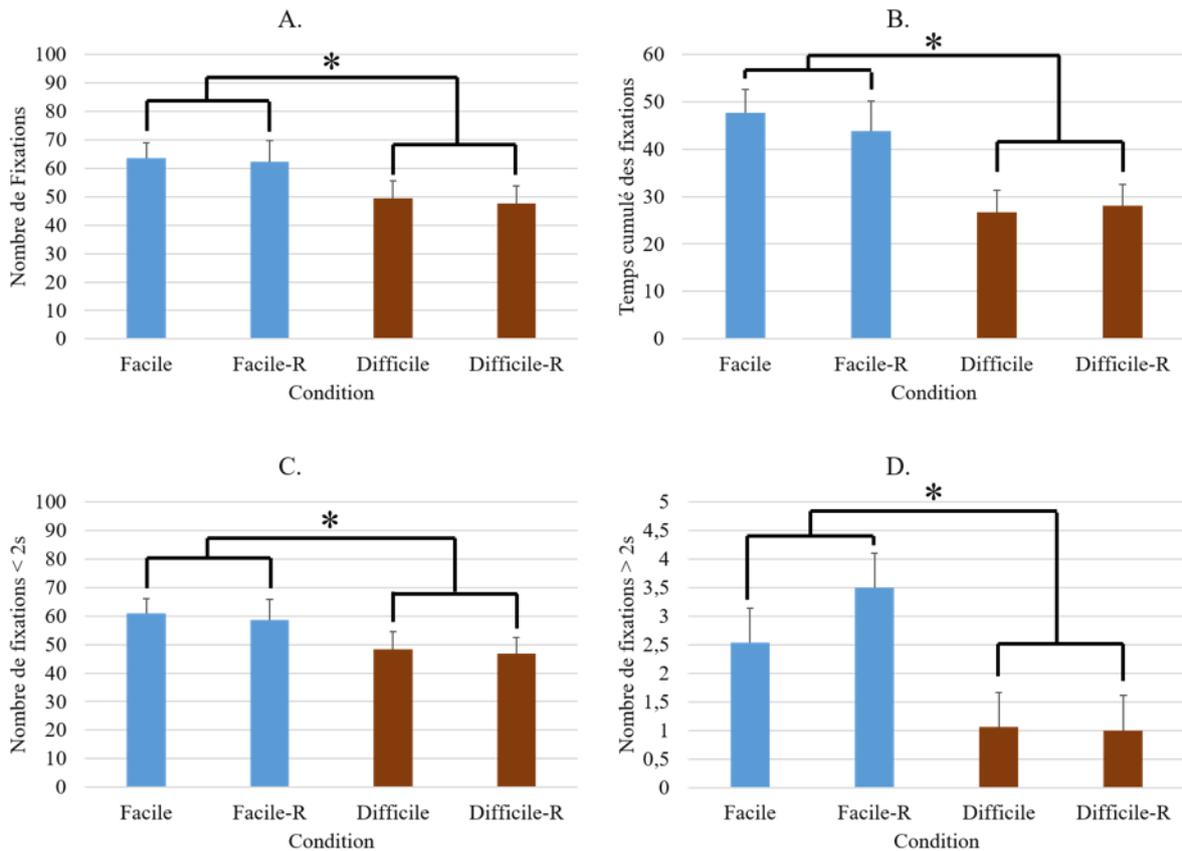


Figure D.7. A. Nombre de fixation sur la situation. B. Temps cumulé des fixations sur la situation. C. Nombre de fixations, sur la situation, inférieur à deux secondes. D. Nombre de fixations, sur la situation, supérieur à deux secondes

Prises d'information dans les zones renseignant sur la distraction de conduite

Pour les regards dirigés vers les aires distractives, les analyses ont révélé un effet significatif de l'activité sur le temps de fixation [$F(1,62) = 8.94; p < .05; \eta^2 = 0.126$] (cf. Figure D.8.B) et le nombre de fixations supérieures à 2 secondes [$F(1,62) = 10.2; p < .05; \eta^2 = 0.141$] (cf. Figure D.8.D). Par contre, aucun effet pour le nombre de fixations (cf. Figure D.8.A) ($F < 1$) et le nombre de fixations inférieures à 2 secondes (cf. Figure D.8.C) ($F < 1$) n'a été trouvé. Les résultats de l'ANOVA n'ont pas montré d'effet de la répétition ou de l'interaction entre la répétition et la difficulté l'activité.

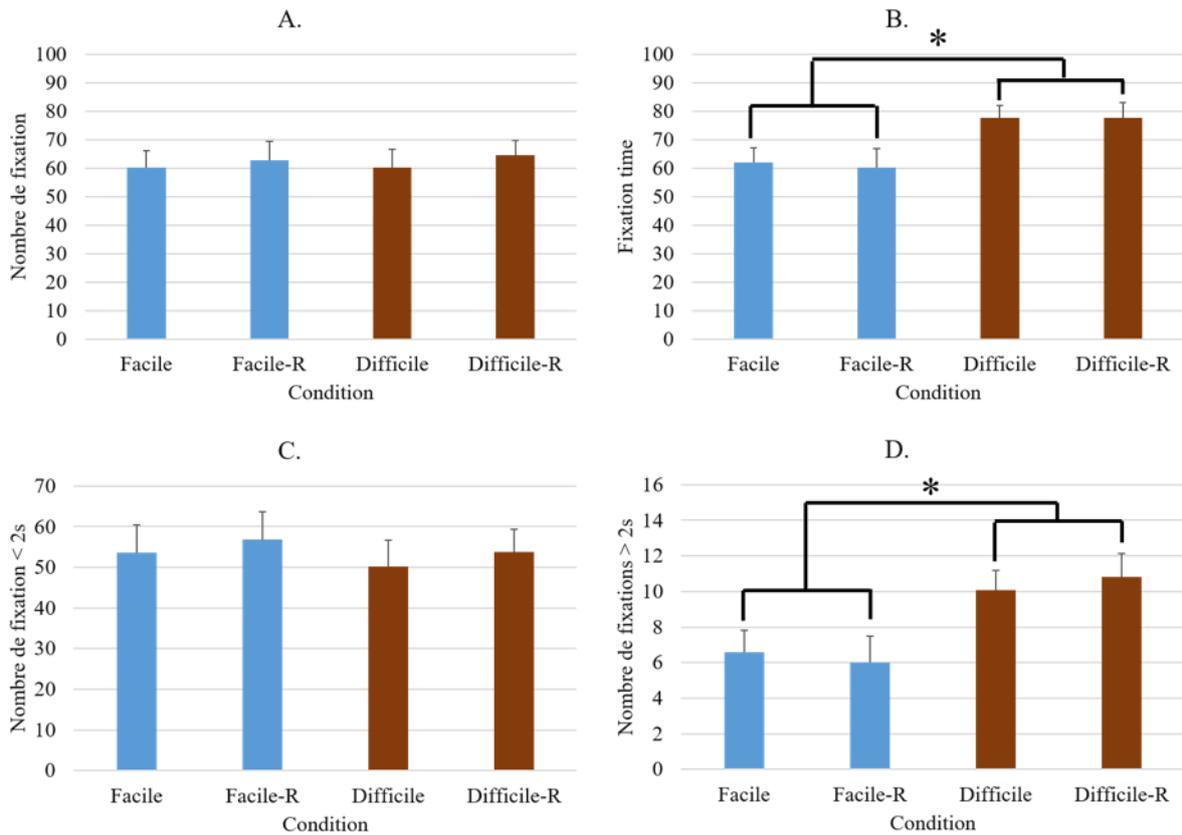


Figure D.8. A. Nombre de fixation sur la situation. B. Temps cumulé des fixations sur la situation. C. Nombre de fixations, sur la situation, inférieur à deux secondes. D. Nombre de fixations, sur la situation, supérieur à deux secondes

Relation entre les données visuelles et la qualité de la reprise en main

Pour déterminer le lien entre les données visuelles et la qualité de la reprise en main, plusieurs analyses ont été menées. Une analyse en profondeur de matrices de transitions entre 13 zones d'intérêts (cf. Figure D.9) a été réalisée en utilisant la régression partielle des moindres carrés (PLS).

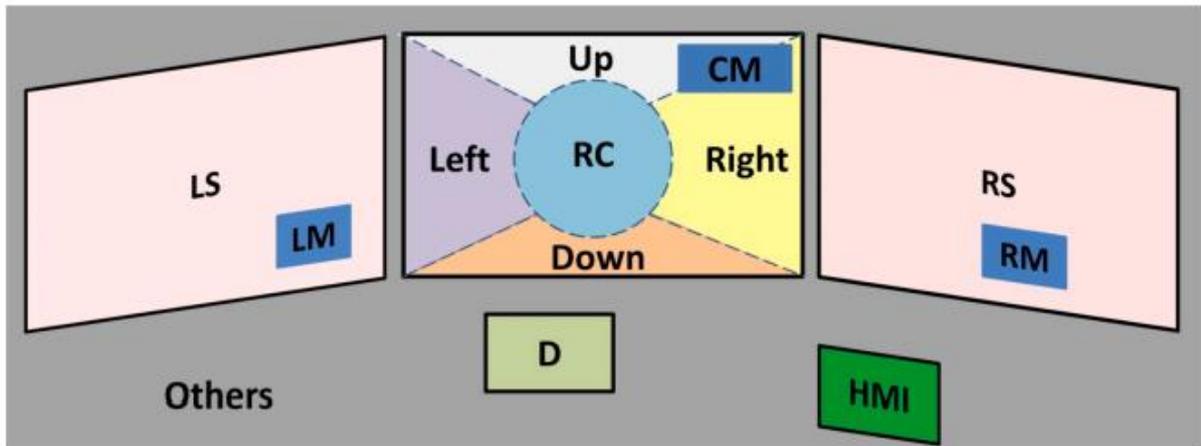


Figure D.9. Divisions en 13 zones de l'environnement de conduite

Une méthode similaire a été utilisée par Schnebelen et al (2019, 2020) pour estimer les conséquences de la conduite automatisée sur le comportement visuel des conducteurs (cf. section F.4). L'objectif de cette méthode était de trouver la meilleure estimation de la variable Y par les variables X. Dans notre étude, Y correspondait à la qualité de la reprise en main et X la matrice de transition entre les 13 aires d'intérêt pendant l'activité non liée à la conduite juste avant l'alerte de la reprise en main avec l'évitement du véhicule arrêté. Les résultats de ces analyses n'ont pas été reportés car ils n'étaient pas satisfaisants. Il n'était pas possible de prédire avec précision la qualité de la reprise en main en se basant sur le pattern visuel pendant une période de 15, 30 ou 60 secondes avant la reprise en main. Des tests de Khi-carré (ou khi-deux) ont été réalisés pour tester des hypothèses spécifiques sur la relation entre la qualité de la reprise en main et la localisation des fixations juste avant la demande de reprise en main, au moment exact de la demande de reprise en main et pendant la reprise en main. Parmi toutes les analyses, une seule a montré des résultats significatifs : la localisation du regard au moment de la demande de reprise en main (cf. Table D.1).

Table D.1. Lien entre la localisation du regard au moment de la demande de reprise en main et de la qualité de la reprise en main

	Situation	Distraction	Total
Reprise en main de mauvaise qualité	5	11	16
Nombre total de reprise en main	36	30	66

Les résultats du test du khi-carré ($\text{Chi}^2 = 4.62, p=0.03$) ont montré que la fixation était plus souvent dirigée vers la zone distractive au moment de la reprise en main dans le cas d'une reprise en main de mauvaise qualité.

Analyse de la difficulté de l'activité et de la qualité de la reprise en main

Le lien entre la difficulté de l'activité non liée à la conduite et la qualité de la reprise en main a également été examiné. Le Khi-carré ($\text{Chi}^2 = 0.33, p=0.56$) a montré qu'il n'existait aucun lien (cf. Table D.2).

Table D.2. Lien entre la difficulté de l'activité non liée à la conduite et de la qualité de la reprise en main

	Activité facile	Activité difficile	Total
Reprise en main de faible qualité	7	9	16
Nombre total de reprise en main	33	33	66

D.5. Discussion et conclusion

Cette étude avait deux objectifs complémentaires. Le premier était d'examiner l'impact de l'activité non liée à la conduite avec deux niveaux de charge mentale sur les prises d'informations visuelles, les données cardiaques et la qualité de la reprise en main. L'autre objectif était de prédire la qualité de la reprise en main à partir des données visuelles.

Les résultats ont révélé un effet de la difficulté de l'activité non liée à la conduite sur la charge mentale subjective. Les conducteurs ont eu des scores au NASA-TLX plus élevé avec l'activité plus difficile comparé aux résultats de l'activité plus facile, ce qui correspondait à nos attentes. Bien que les données cardiaques aient permis de distinguer la conduite autonome sans activité à la conduite autonome avec une activité, il n'a pas été possible de distinguer la différence de difficulté entre les deux activités à l'aide de ces indicateurs, comme cela avait été observé dans d'autres études (Hidalgo-Muñoz et al., 2018; Mehler et al., 2009, 2012). Comme Veltman & Gaillard (1998) le suggèrent, il semblerait que l'effort subjectif et les mesures physiologiques ne donnerait pas les mêmes informations sur l'effort mental et que le lien entre la difficulté de la tâche et la charge mentale pourrait être difficilement mesuré par les données

physiologiques. En outre, l'activité non liée à la conduite incluait une composante motrice avec la sélection de la réponse sur la tablette, ce qui pourrait avoir influencé les données cardiaques (Matsuda & Makikawa, 2008). Du et al. (2020) ont utilisé une tâche de n-back pendant une conduite automatisée de niveau 3 similaire à celle utilisée dans notre expérimentation. Ils ont trouvé une augmentation du rythme cardiaque avec la difficulté de l'activité malgré les mouvements nécessaires pour sélectionner la réponse sur une tablette en console centrale. La composante motrice n'aurait eu aucun effet dans leur expérimentation. On peut donc supposer que le manque d'effet de la difficulté de l'activité sur les données cardiaques provient de l'activité plus que de la composante motrice. La tâche de n-back demande un effort continu alors que l'activité proposée dans notre étude, pouvait peut-être se faire sans un effort continu. Les participants disposaient de 6 secondes pour faire le calcul, mais si le calcul était réalisé plus rapidement, il disposait du temps restant pour faire ce qu'ils souhaitaient. Alors que pour la tâche de n-back dès qu'une itération est finie elle passe automatiquement à la suivante, ce qui maintient un effort continu.

Bien que l'augmentation de la difficulté de l'activité ait été à l'origine de l'augmentation de la charge mentale subjective et du désengagement visuel de la scène de conduite, cela n'a pas affecté la qualité de la reprise en main. Les participants ont réussi l'évitement du véhicule arrêté dans la même proportion, qu'ils étaient en train d'effectuer l'activité facile ou l'activité complexe au moment de la demande de reprise en main. Ces résultats étaient similaires à ceux trouvés par Bueno et al. (2016) qui n'ont pas trouvé d'association entre la charge mentale et la qualité de la reprise en main. Dans leur étude, ils ont utilisé deux niveaux de difficulté de l'adaptation visuelle du test d'association à distance pour induire une charge cognitive, visuelle et motrice.

Les analyses n'ont pas permis d'établir un modèle prédictif de la qualité de la reprise en main en fonction des stratégies mises en place avant la demande de reprise en main. Cependant, un examen détaillé des données oculométriques a révélé que le seul déterminant de la qualité de la reprise en main était la localisation de la fixation au moment de la demande de la reprise en main. 13,89% des conducteurs qui regardaient la route à ce moment-là ont eu une mauvaise qualité de la reprise en main contre 36,67% pour les conducteurs qui regardaient une zone distractive. Le risque d'avoir une mauvaise qualité de reprise en main était donc 2,64 fois plus élevé pour les conducteurs qui regardent la tablette au moment de la demande de reprise en main. Les conducteurs qui regardaient la scène de conduite avaient plus de chance de réussir l'évitement que ceux qui avaient le regard détourné. Pendant l'activité non liée à la conduite, les conducteurs continuaient de regarder par intermittence la route. Les conducteurs, qui réalisaient

l'activité la plus complexe, regardaient la route moins souvent et avec des fixations moins longues comparées aux conducteurs avec l'activité facile. Ils réalisaient également des fixations plus longues et plus fréquente sur la tablette. Cependant, bien que les conducteurs surveillaient différemment la route, cela n'a pas eu d'impact sur la qualité de la reprise en main. Il semblerait donc que dans notre cas, la perception immédiate de l'environnement au moment de la demande de reprise en main était plus importante que la compréhension globale de la scène.

Même s'il est bien documenté que les simulateurs à base fixe offrent une bonne validité relative par rapport aux simulateurs haut de gamme ou aux véhicules instrumentés (Blaauw, 1982), l'immersion offerte par le simulateur utilisé est limitée. D'autres études avec des configurations plus sophistiquées et des scénarios de conduite plus riches sont encore nécessaires pour parvenir à une meilleure compréhension des mécanismes attentionnels en jeu lors des reprises en main.

En conclusion, nos résultats s'accordent avec ceux de travaux antérieurs (Bueno et al., 2016) montrant que la difficulté de l'activité non liée à la non conduite n'a pas eu d'effet sur la qualité de la reprise en main. Bien que les participants aient eu des fixations plus longues et plus fréquentes sur la tablette, il semble qu'ils aient été capables de diviser leur attention entre l'activité non liée à la conduite et l'environnement routier. Finalement, l'élément le plus décisif pour expliquer les difficultés de reprise en main est la localisation du regard au moment de la demande de reprise en main, alors même que les participants avaient 8 secondes pour éviter l'entrer en collision. Il peut être pertinent de rediriger l'attention des conducteurs le plus rapidement possible vers la route dès que la reprise en main est demandée pour laisser le temps aux conducteurs distraits de rediriger leur attention sur l'environnement. Pour approfondir l'analyse des stratégies visuelles pendant l'activité, il serait intéressant d'évaluer la conscience de la situation des conducteurs pour tenter de déterminer si le succès de la reprise en main dépend principalement de la localisation du regard au moment de la reprise en main ou s'il existe un effet de la conscience de la situation construite avant la demande de reprise en main.

E. Expérimentation 2 : Impact de l'engagement visuel du conducteur sur la conscience de la situation et la qualité de reprise en main

Cet article a été soumis avec révision à la revue *Transportation Research part F : Traffic Psychology and Behaviour* en septembre 2021 sous le titre : « Impact of the driver's visual engagement on situation awareness and takeover quality ».

E.1. Objectifs et hypothèses

L'objectif de cette étude est de savoir dans quelle mesure la qualité de la conscience de la situation détermine l'habileté des conducteurs à reprendre le contrôle du véhicule lors de situation critique (cf. section B.2). Cela est particulièrement vrai dans des situations complexes, telle que l'évitement d'obstacles inattendus. Une question est de savoir combien de temps il faut pour reconstruire une conscience de situation suffisamment élaborée. L'hypothèse est la suivante : si la perception du conducteur du contexte immédiat est suffisante (conscience de la situation de niveau 1, cf. section A.3.3), regarder la route 2 secondes avant la demande de reprise en main serait efficace pour une bonne qualité de reprise en main. Ce résultat serait indépendant du comportement visuel lors de la phase de conduite automatisée précédente. En revanche, s'il y a un avantage à avoir une conscience de la situation plus élaborée (c'est-à-dire, un modèle mental approprié de la situation construit au fil du temps, la qualité de la reprise en main devrait être meilleure lorsque le conducteur n'a pas été distrait pendant longtemps avant la demande de reprise en main. La présente étude examine l'impact de la distraction visuelle sur la conscience de la situation et sur la qualité de la reprise en main en manipulant le temps d'engagement dans une activité non liée à la conduite ou la durée de surveillance de la route.

E.2. Méthodes

E.2.1. Participants

88 participants (33 femmes et 55 hommes) âgé entre 18 et 56 ans (Moyenne = 24.01, SD = 7.67) ont réalisé cette étude. Ils avaient tous un permis de conduite valide avec une expérience de conduite moyenne de 7704 km/an (SD = 8500, Minimum = 200, Maximum = 40000). Ils avaient une vision normale ou corrigée avec des lentilles de contact. Chaque participant avait signé un formulaire de consentement en accord avec la déclaration de Helsinki. L'expérience a été approuvée par le comité d'éthique 191 pour la recherche non

interventionnelle de l'Université de Nantes (CERNI, IRB #IORG0011023; approbation #08072021-3).

E.2.2. Activité non liée à la conduite

Dans l'étude de (Shi & Frey, 2021) les conducteurs ont rapporté vouloir principalement lire pendant la conduite autonome. On a donc choisi comme activité non liée à la conduite une lecture à voix haute. L'histoire à raconter, qui défilait sur la tablette en console centrale, était celle de Tom Sawyer. La vitesse de défilement avait été réglé de telle façon que les participants ne pouvaient pas lire à voix haute le texte et surveiller la route en même temps.

E.2.3. Reprise en main critique

Les participants étaient en conduite autonome depuis 8 minutes lorsque survenait la demande de reprise en main. Ils devaient alors reprendre le contrôle du véhicule dans une situation complexe (cf. Figure E.1.) qui se déroulait de telle manière :

(1). 5 minutes avant la demande de repris en main, le véhicule du participant commençait à suivre à 3 secondes d'écart un véhicule situé devant lui (nommé véhicule de tête)

(2). 3 minutes avant la reprise en main, le véhicule du participant et le véhicule de tête commençait à se déplacer vers la voie du centre pour dépasser deux véhicules plus lents.

(3). 1 minute avant la demande de repris en main, deux véhicules rapides espacés de 2 secondes approchaient par la voie de gauche. Ils circulaient à une vitesse de 120 km/h et commençait à dépasser le véhicule du participant. Le premier véhicule rapide a été appelé VR1 et le second VR2. Ils étaient visibles dans le rétroviseur central et le rétroviseur de gauche environ 20 secondes avant la demande de reprise en main.

(4). Une seconde avant la demande de reprise en main, le véhicule de tête commençait à changer de voie pour éviter un véhicule arrêté en travers des voies du milieu et de droite.

(5). Au moment de la demande de reprise en main, les participants avaient une vue directe mais partielle du véhicule arrêté, car le véhicule de tête était encore en train de changer de voie. La demande de reprise en main était délivrée et si une activité de non conduite était en cours elle était alors coupée.

Les participants avaient 8 secondes pour reprendre le contrôle du véhicule avant la collision avec le véhicule arrêté. Pour réussir leur intervention, les participants pouvaient soit

freiner et passer entre les deux véhicules rapides, soit changer de voie après le passage des deux véhicules rapides. Ils pouvaient également s'arrêter sur leur voie avant l'obstacle.

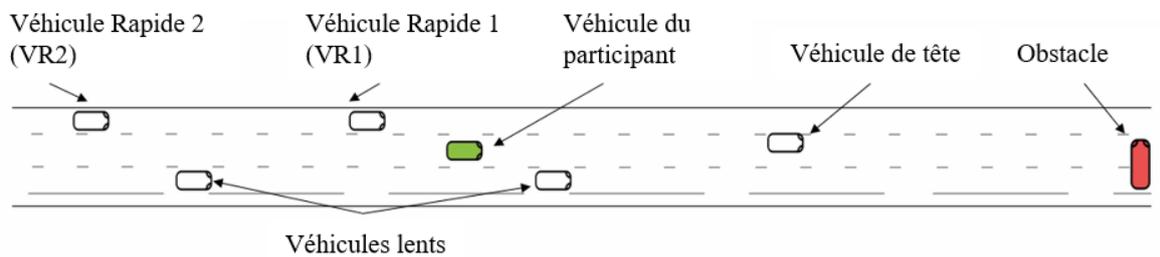


Figure E.1. Cas critique.

E.2.4. Plan expérimental

Les participants ont été invités à s'asseoir au simulateur et l'oculomètre a été calibré. Ensuite, ils ont été informés du fonctionnement d'un véhicule automatisé de niveau 3 et qu'ils pouvaient désactiver le mode autonome soit en appuyant sur une pédale, soit en tournant le volant ou en appuyant sur le bouton présent sur la tablette.

Avant de réaliser l'essai expérimental, les participants ont complété deux parcours de familiarisation. Le premier permettait aux conducteurs de tester les transitions entre la conduite manuelle et la conduite automatisée. Pendant le second parcours, les conducteurs ont testé l'activité non liée à la conduite pendant une phase de conduite automatisée. Ensuite, les participants passaient l'essai expérimental. Les participants conduisaient sur une autoroute 3 voies, avec un trafic modéré, pendant 8 minutes avant l'apparition d'une demande de reprise en main critique non planifiée. 1 minute après être parti d'une bretelle d'insertion en conduite manuelle, les participants ont été invités par le système automatisé à passer en conduite autonome. Après deux minutes de conduite autonome, il restait 5 minutes avant la demande de reprise en main. Pendant ce temps, les participants devaient réaliser l'activité à laquelle ils ont été assignés (cf. Figure E.2.) :

- Full_SA : aucune activité non liée à la conduite n'est demandée.
- SA_NDT : l'activité non liée à la conduite est affichée seulement pendant les deux secondes juste avant la demande de reprise en main.
- NDT_SA : les participants doivent réaliser la lecture à voix haute pendant les 5 minutes sauf pendant les deux secondes qui précède la demande de reprise en main.

- Full_NDT : les participants doivent réaliser l'activité non liée à la conduite pendant toute la conduite autonome jusqu'à la reprise en main.

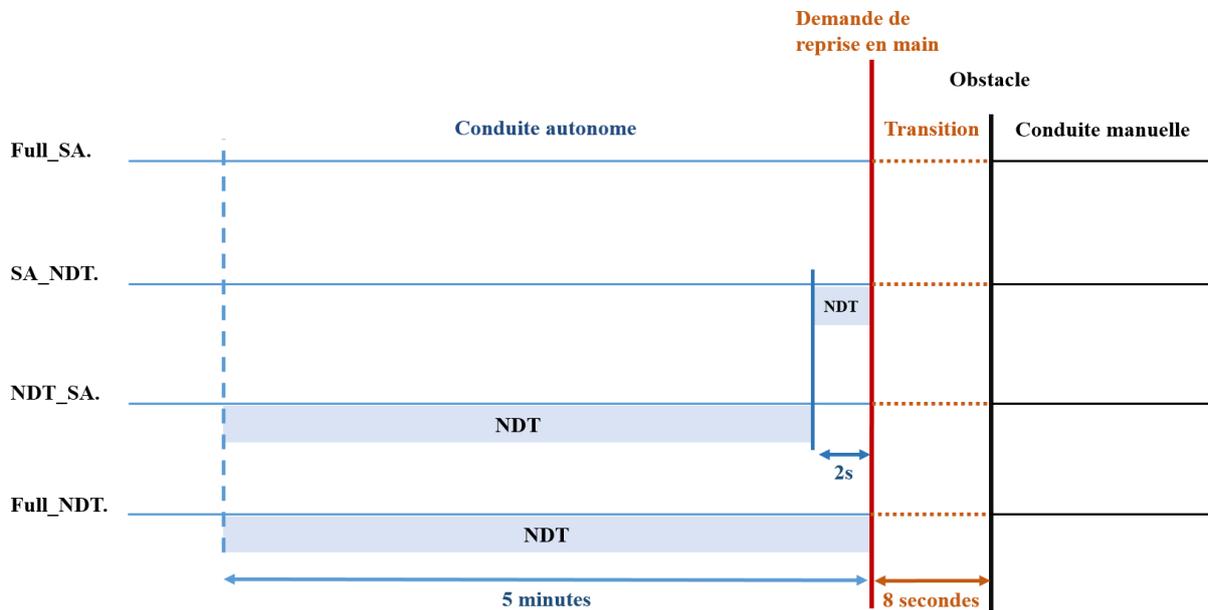


Figure E.2. Chronologie des conditions expérimentales (NDT : activité non liée à la conduite)

A la fin du scénario, les écrans étaient éteints et les participants devaient reporter leur SA. Les participants devaient replacer les véhicules dont ils avaient conscience au moment de l'alerte de la demande de reprise en main sur un schéma représentant l'environnement routier vu de haut. Leur véhicule et le véhicule obstacle étaient déjà placés et ils devaient seulement placer les véhicules qu'ils avaient vu avant la demande de reprise en main.

E.3. Analyse des données

E.3.1. Données visuelles

Pour le traitement des données visuelles, 3 aires d'intérêt ont été définies (cf. Figure E.3). La première aire en bleu était constituée du rétroviseur central et du rétroviseur gauche. Elle apportait des informations sur les véhicules rapides situés sur la voie de gauche par rapport au participant. L'aire grise concernait toutes les autres zones qui permettaient au participant de récupérer des informations sur l'environnement de conduite. La zone en orange était attribuée à la tablette où était affichée l'activité non liée à la conduite ainsi que les informations relatives à l'état du véhicule (cf. Figure C.2).

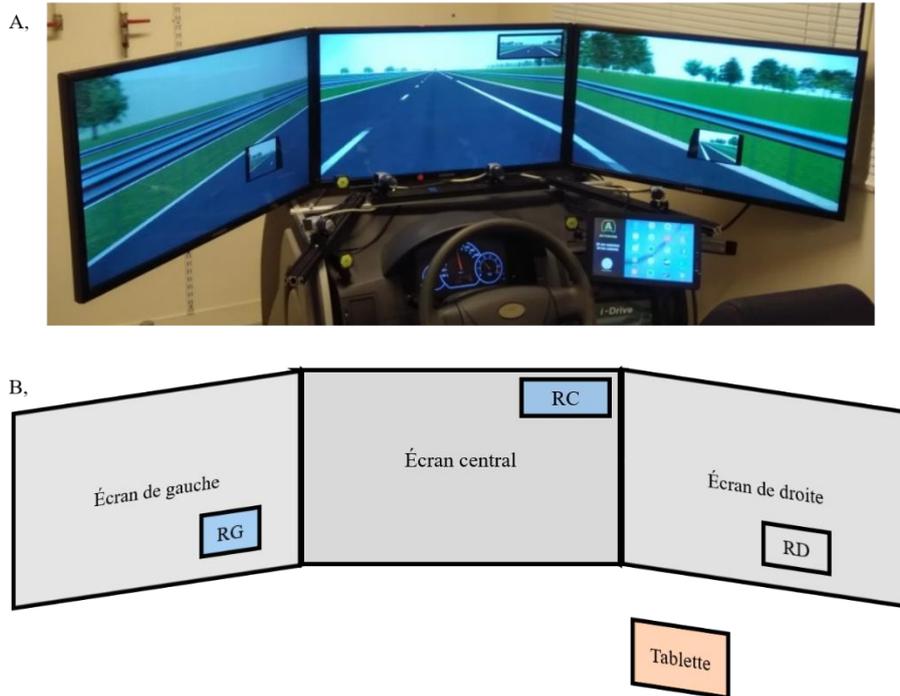


Figure E.3. A. Simulateur du LS2N. B. Aires d'intérêt considérées pour l'analyse du comportement visuel : la route en gris (central screen), le rétroviseur gauche (LM) et le rétroviseur central (CM) en bleu, la tablette (tablet) en orange.

E.3.2. Qualité de la reprise en main

Pour la qualité de la reprise en main, on a considéré soit la réussite à la reprise en main, c'est-à-dire, un évitement de l'obstacle sans collision ou un arrêt dans la voie sans collision, soit un échec à la reprise en main caractérisé par une collision avec au moins un véhicule.

E.3.3. Phase critique

Le véhicule rapide 1 disparaissait dans l'angle mort du véhicule du participant en moyenne 3.2 secondes ($SA = 0.1$) après l'alerte de demande de reprise en main. Une phase critique de 3.2 secondes, qui débutait au moment de l'alerte de la demande de reprise en main, a donc été défini. Si les participants ne réalisaient pas les contrôles adéquats et n'avaient pas pris conscience de la présence du véhicule rapide 1 pendant cette phase critique, ils pouvaient commencer une manœuvre de changement de voie pour éviter l'obstacle ce qui pouvait résulter en une collision avec le véhicule rapide 1 et donc à un échec de la reprise en main.

E.3.4. Variables dépendantes

Les effets des conditions expérimentales sur le nombre de collision et le nombre de fois où VR1 a été reporté en utilisant le test du khi-carré. Parce que la présence de VR2 n'a pas été suffisamment souvent rapporté, le test exact de Fisher a été utilisé.

Les données oculaires pendant la phase critique ont été analysées en considérant 3 aires d'intérêt : la route, les rétroviseurs gauche et central, et la tablette (cf. Figure E.3.). Pour chaque participant, les fixations et les saccades ont été extraits des données oculaires.

Premièrement, le temps entre la demande de reprise en main et celui de la première fixation sur la route ou sur les rétroviseurs a été calculé pour chaque participant. Le test de Shapiro a montré que les données ne suivaient pas une distribution normale. La méthode non paramétrique de Kruskal-Wallis a été utilisée pour évaluer l'effet des conditions expérimentales.

Deuxièmement, pour chaque aire d'intérêt et en fonction de la condition expérimentale, le nombre de participants qui a réalisé au moins une fixation sur cette aire d'intérêt après la demande de reprise en main a été comparé en utilisant le test du khi-carré.

La proportion du temps des fixations cumulées sur les différentes aires d'intérêt a également été comparé. Pour chaque participant, cette période correspondait au temps de fixation cumulé sur chaque aire d'intérêt, divisé par le temps de fixation total pendant la phase critique. Étant donné que l'ensemble des données n'était pas normalement distribué, le test de Kruskal-Wallis a été utilisé. Les temps de saccade n'ont pas été pris en compte.

Enfin, l'évolution de la distribution du regard pendant les 3 secondes après la demande de reprise en main a été examinée plus en détail. Pour chaque seconde pendant cette période, le pourcentage de temps passé sur chaque aire d'intérêt calculé. Comme les données n'étaient pas distribuées normalement, le test de Kruskal-Wallis a été utilisé pour comparer l'effet des conditions sur le pourcentage moyen de temps pour chaque aire d'intérêt à chaque seconde en fonction de la condition expérimentale.

E.4. Résultats

88 jeux de données ont été recueillis. 45 participants ont eu des collisions avec un autre véhicule : 23 avec VR1, 10 avec VR2 et 12 avec le véhicule arrêté. Aucune collision n'a eu lieu avec les véhicules circulant dans la voie de droite.

Effet des conditions sur la survenue des collisions

Un effet principal des conditions expérimentales a été trouvé ($\chi^2 = 8.50$, $p = <.05$) sur l'occurrence des collisions. La figure E.4 montre que le pourcentage de collision était plus élevé dans la condition Full_NDT (73% soit 16/22 participants) que dans la condition NDT_SA (59% soit 13/22 participants).

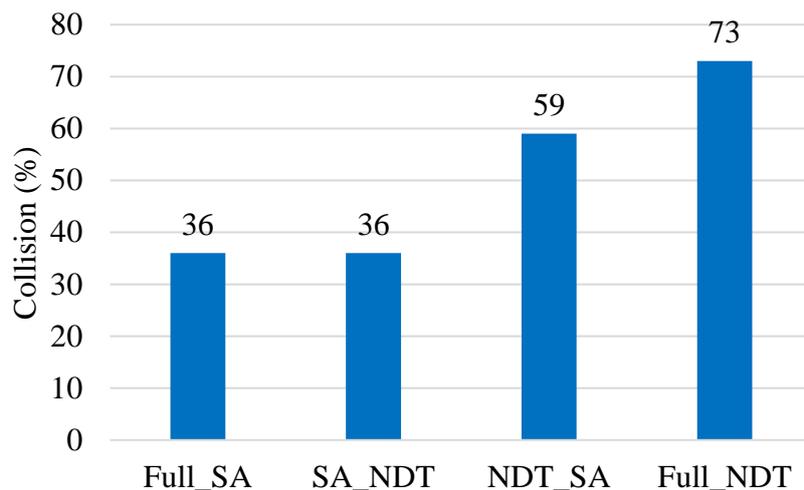


Figure E.4. Pourcentage des participants qui ont eu une collision dans chaque condition.

Effet des conditions sur la conscience des véhicules rapides

Aucun des participants n'a essayé d'éviter l'obstacle par la droite en passant par la bande d'arrêt d'urgence. Par conséquent, seuls les deux véhicules rapides dans la voie de gauche étaient donc importants. Le véhicule rapide VR2 était loin et peu saillant dans les rétroviseurs au moment de l'alerte de reprise en main. De ce fait, il a été peu rapporté par les participants (4/22 participants en Full_SA, 6/22 participants pour SA_NDT, 3/22 participants pour NDT_SA et 0/22 participants pour Full_NDT). Les résultats au test exact de Fisher ($p > .05$)

n'ont pas montré d'effet significatif des conditions sur le report de VR2. Au contraire, comme montré sur la figure E.5, VR1 a été souvent reporté dans les conditions Full_SA et SA_NDT (82% soit 18/22 participants dans les deux cas), moins souvent reporté par le groupe NDT_SA (45% ou 10/22 participants) et rarement par le groupe Full_NDT (9% soit 2/22 participants). Les résultats ont montré un effet significatif des conditions pour la conscience de VR1 ($\chi^2 = 32.267$, $p < .05$).

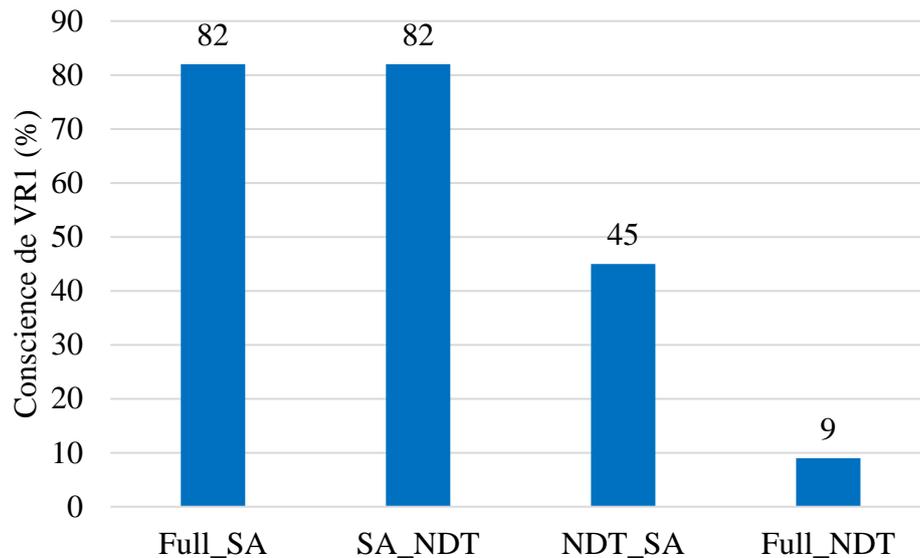


Figure E.5. Pourcentage des participants dans chaque condition expérimentale qui avaient conscience de VR1 au moment de la demande de la reprise en main

Effet des conditions sur les fixations pendant la phase critique

Temps moyen entre la demande de reprise en main et la première fixation sur la route ou les rétroviseurs

Les analyses statistiques ont montré un effet significatif des conditions expérimentales sur le temps moyen entre la demande de reprise en main et la première fixation sur la route ou les rétroviseurs ($\chi^2 = 47.835$, $p < 0.05$). Alors que presque tous les participants des groupes Full_NDT et SA_NDT regardaient la route ou les rétroviseurs au moment de la demande de reprise en main ou peu de temps après, ceux des groupes SA_NDT et Full_NDT ont mis plus d'une seconde en moyenne pour le faire (cf. Figure E.6).

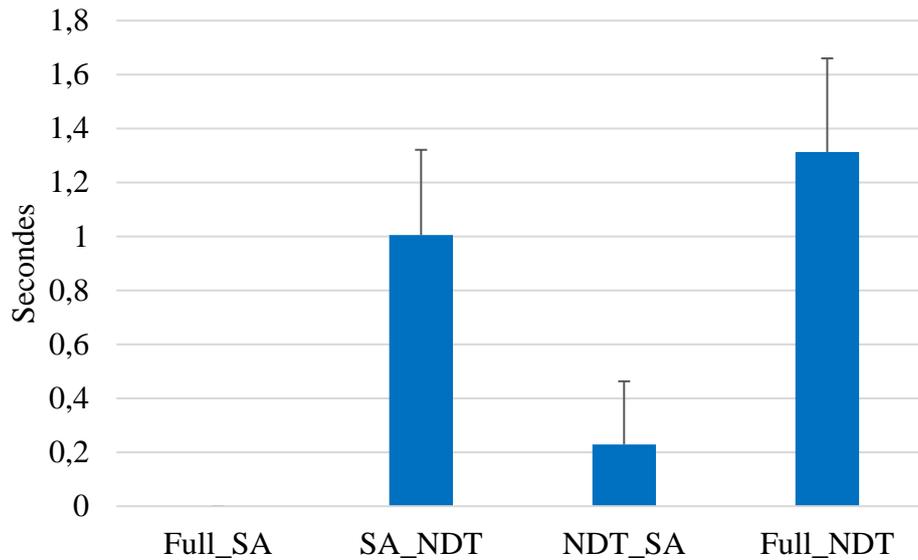


Figure E.6. Temps moyen entre la demande de reprise en main et la première fixation sur la route ou les rétroviseurs

Pourcentage de participants qui ont regardé les aires d'intérêt

Une plus grande partie des participants ont regardé le rétroviseur gauche et / ou le rétroviseur central dans les groupes Full_SA et NDT_SA que dans les groupes Full_NDT et SA_NDT ($\chi^2 = 13.149$, $p < 0.05$). Aucun effet des conditions n'a été trouvé pour les fixations sur la route ou la tablette ($p > .05$) (cf. Figure E.7).

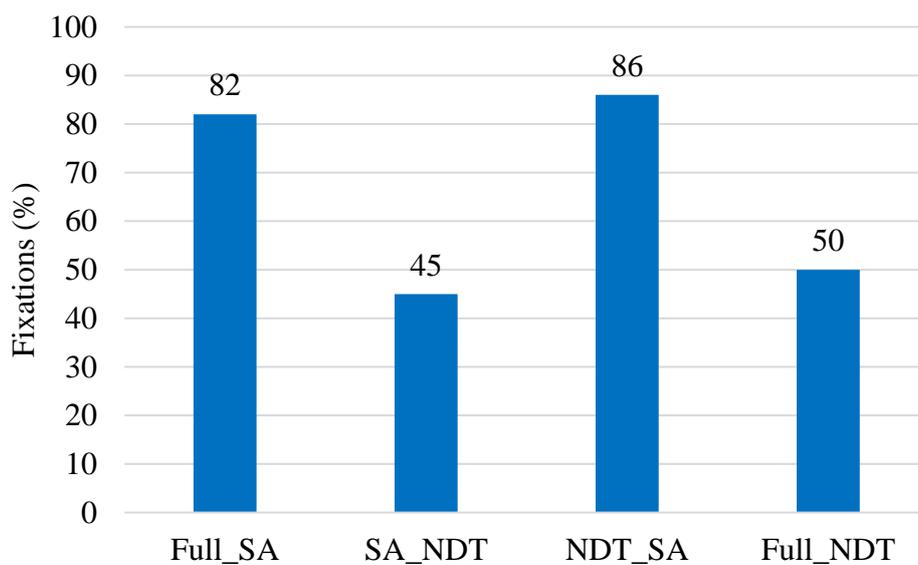


Figure E.7. Pourcentage de participants ayant regardé le rétroviseur gauche et / ou le rétroviseur central en fonction des conditions expérimentales

Proportion du temps passé sur chaque aire d'intérêt

La figure E.8 montre la proportion du temps passé sur chaque aire d'intérêt. Les participants passaient plus de temps à regarder le rétroviseur gauche et / ou le rétroviseur central dans les conditions Full_SA et NDT_SA que dans les conditions Full_NDT et SA_NDT ($\chi^2 = 17.35$, $p < 0.05$). A l'inverse, les participants passaient plus de temps à regarder la tablette dans les conditions Full_NDT et SA_NDT que dans les conditions Full_SA et NDT_SA ($\chi^2 = 14.83$, $p < 0.05$). La proportion du temps passé sur la route n'était pas significativement différente entre les conditions ($\chi^2 = 1.17$, $p = 0.328$).

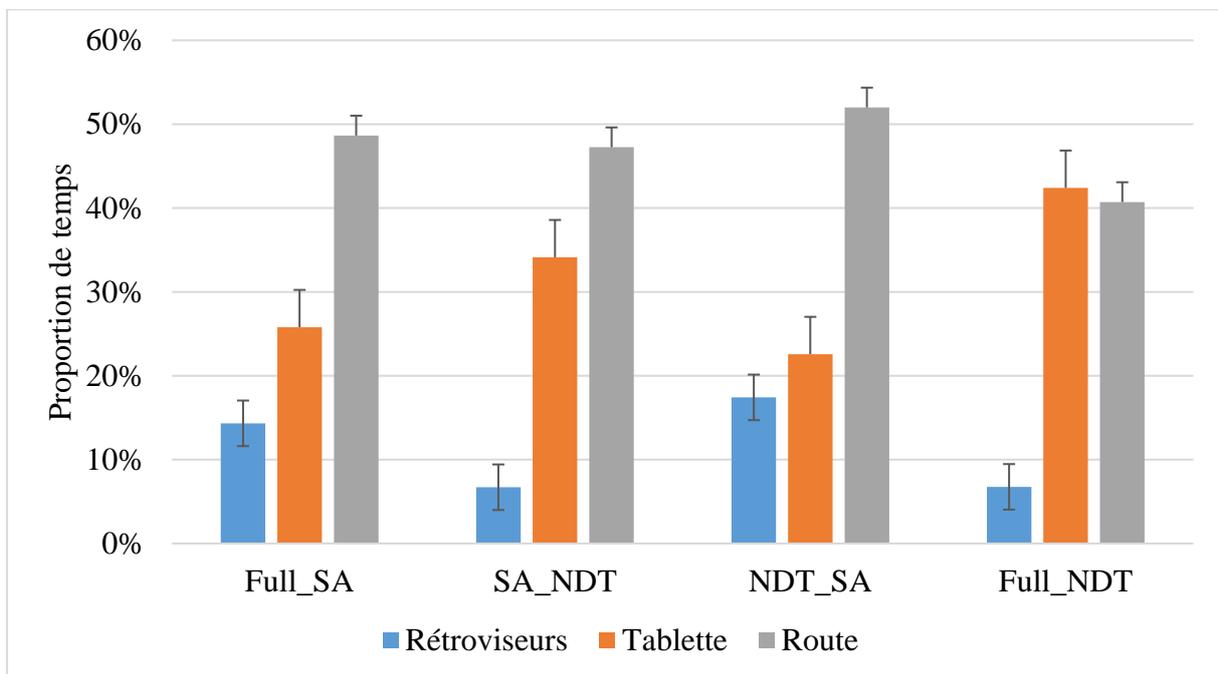


Figure E.8. Influence de la condition expérimentale sur la distribution des fixations pendant la phase critique après la demande de reprise en main.

Pourcentage de temps passé à regarder les différentes aires pendant les 3 secondes après la demande de reprise en main

La Figure E.9.A présente le pourcentage de temps passé à regarder la route pendant chacune des 3 premières secondes après la demande de la reprise en main. Un effet des conditions expérimentale a été observé pour la première seconde après la demande de reprise en main ($\chi^2 = 32.077$, $p < 0.05$). Le groupe Full_NDT a passé significativement moins de temps sur la route que les groupes NDT_SA et Full_SA. Le groupe SA_NDT différait

uniquement du groupe Full_SA. La même analyse a été effectuée sur le temps passé à regarder la tablette (cf. Figure E.9.B). Un effet des conditions expérimentales a été trouvé uniquement pour la première seconde après la demande de reprise en main ($\chi^2 = 42.824$, $p < 0.05$). Les groupes Full_SA et NDT_SA étaient significativement différents des groupes Full_NDT et SA_NDT. Considérant maintenant le temps passé sur les rétroviseurs (cf. Figure E.9.C), encore une fois, l'effet des conditions n'a été trouvé que pour la première seconde ($\chi^2 = 23.388$, $p < 0.05$), avec le groupe SA_NDT passant significativement moins de temps sur les rétroviseurs que les groupes Full_SA et NDT_SA.

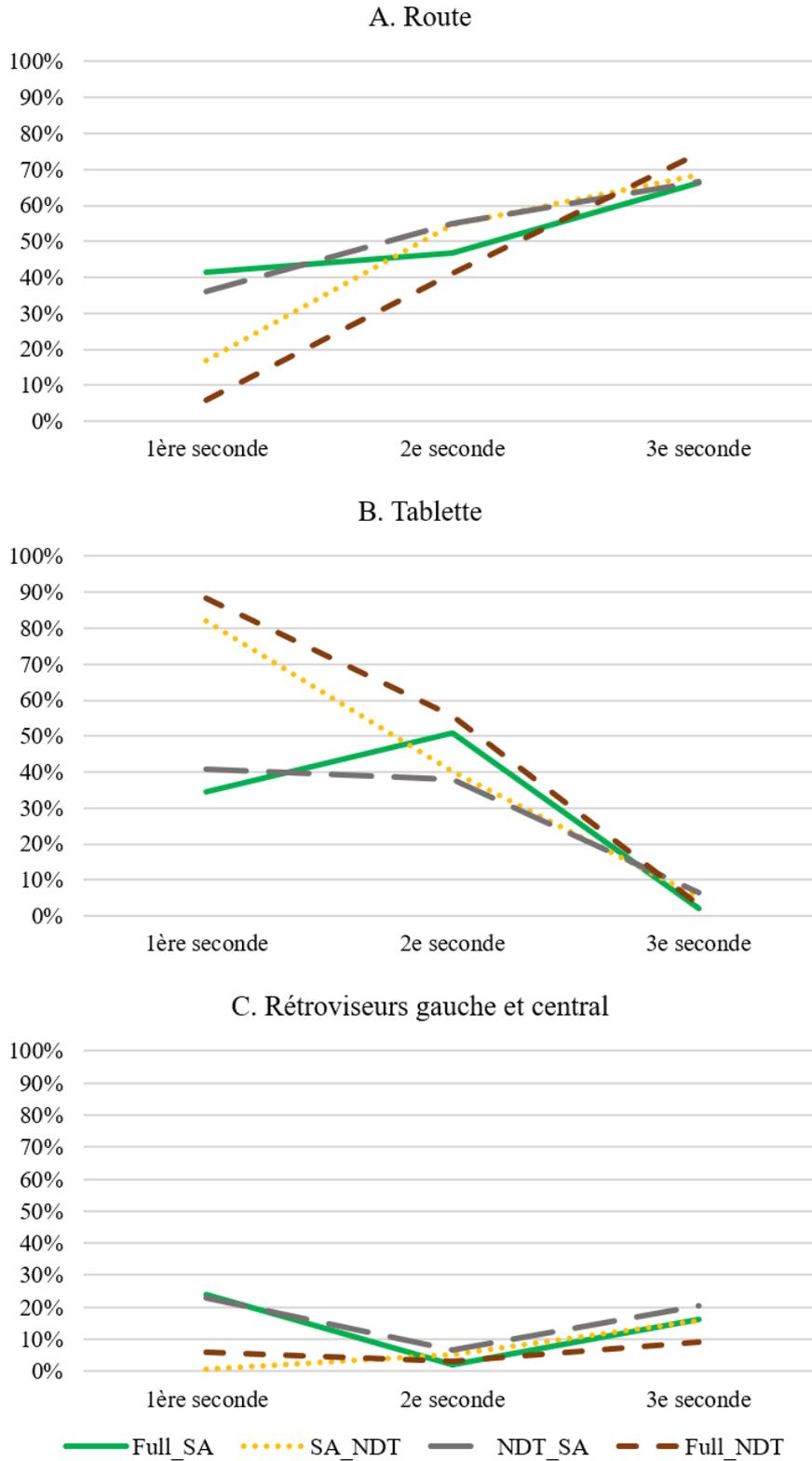


Figure E.9. Pourcentage du temps passé, pendant les 3 secondes après la reprise en main, sur A. la route, B. la tablette, C. les rétroviseurs, en fonction de la condition expérimentale.

E.5. Discussion et conclusion

Dans cette étude, la capacité du conducteur à surveiller la scène de conduite pendant une longue période ou seulement pendant les deux secondes avant la demande de reprise en main a été manipulée à l'aide d'une activité non liée à la conduite. De cette manière, il a été possible d'évaluer l'importance d'être sur la boucle ou d'avoir une conscience de la situation relativement élaborée au moment de la demande de reprise en main. En d'autres mots, il a été cherché à savoir si donner deux secondes aux conducteurs avant la demande de reprise en main était suffisant pour restaurer la conscience de la situation. A la fin, les participants devaient indiquer s'ils étaient conscients des véhicules présents dans le contexte routier juste avant la demande de reprise en main. Les résultats ont montré que deux secondes de distraction avant la reprise en main n'impactaient pas la conscience de la situation si elle était bien construite précédemment. Dans les conditions SA_NDT et Full_SA, la plupart des conducteurs ont reporté avoir conscience du véhicule rapide 1 arrivant dans la voie de gauche. Cependant, retrouver la capacité de surveiller la route deux secondes avant la demande de reprise en main était utile pour les conducteurs qui ont été distraits pendant les minutes précédentes. Les conducteurs dans la condition NDT_SA ont reporté plus fréquemment le véhicule rapide 1 comparé aux conducteurs dans la condition Full_NDT. Les résultats suggèrent que stopper l'activité de non conduite deux secondes avant l'alerte permet aux participants de développer un certain degré de conscience de la situation (niveau 1, voir 2), qui a compensé partiellement l'absence d'un modèle mental élaboré de la situation (niveau 3).

Avoir une bonne conscience de la situation n'implique pas forcément une reprise en main en douceur. En effet, la situation critique définie dans cette étude était difficile à négocier, ce qui explique le nombre élevé de collisions. Bien que le rôle de la réalisation d'une activité non liée à la conduite dans la survenue des collisions a été démontré dans notre étude, la complexité et la cinématique du scénario de conduite ont été identifiées dans la littérature comme l'un des facteurs responsables de la réduction de la qualité de la reprise en main (Gold et al., 2016; Louw et al., 2017; Radlmayr et al., 2014; Scharfe et al., 2020; Zhang et al., 2019). Un autre point critique est le temps disponible pour le cas critique. Damböck & Bengler (2012) ont testé des durées de 4, 5, 6 et 8 secondes pour la reprise en main. Ils ont montré que les conducteurs en conduite automatisée avaient plus de collisions que les conducteurs en conduite manuelle sauf quand ils disposaient de 8 secondes pour reprendre le contrôle du véhicule. Gold et al., (2013) ont également trouvé une meilleure performance de reprise en main avec 7 secondes pour la

reprise en main comparé à 5 secondes. Dans l'étude de Mok et al. (2017), les conducteurs qui réalisaient une activité non liée à la conduite pouvaient gérer un cas critique avec un temps de reprise en main compris entre 5 et 8 secondes. Nos résultats ont montré que même avec un temps de 8 secondes et une bonne conscience de la situation, les conducteurs pouvaient avoir des difficultés à reprendre le contrôle du véhicule dans une situation complexe. En effet, 1/3 des conducteurs ont eu une collision dans les groupes Full_SA et SA_NDT, même s'ils ont signalé la présence du véhicule le plus dangereux dans la voie de gauche. Dans des situations similaires au cas critique de notre étude, rendre le contrôle du véhicule au conducteur ne serait pas la meilleure solution. Il serait probablement préférable que le système automatisé décide, en fonction de l'évaluation de la criticité de la situation, d'effectuer un freinage d'urgence plutôt que d'émettre une demande de reprise en main.

Cependant, la qualité de la reprise en main était en lien avec un niveau de conscience de la situation hautement élaboré. Les conducteurs dans les conditions Full_SA et SA_NDT ont réussi le cas critique avec le même niveau de succès (64%), ce qui est meilleur que le groupe NDT_SA (41%), qui à son tour avait une meilleure performance que le groupe Full_NDT (27%). Les conducteurs ont bénéficié d'avoir pu observer la scène de conduite bien avant la demande de la reprise en main. Les deux dernières secondes n'étaient pas suffisantes pour obtenir une bonne qualité de reprise si la conscience de la situation était faible au départ.

Des études précédentes ont montré que le niveau de charge mentale associé à l'activité de non conduite au moment de la demande de la reprise en main n'était pas prédictive de la qualité de la reprise en main (Bueno et al., 2016; cf. Section D). Ce point ne cadre pas bien avec l'idée que plus une activité non liée à la conduite est distrayant, plus la reprise en main serait difficile. La différence principale entre ces études et là notre est que l'on a manipulé le temps d'engagement des conducteurs dans l'activité non liée à la conduite avant la demande de reprise en main, plutôt que la difficulté de l'activité. De plus, les résultats de la section D ont montré que le seul déterminant du succès au cas critique était de savoir si le conducteur regardait la route plutôt que l'activité non liée à la conduite au moment de la reprise en main quel que soit la difficulté de l'activité. Ce résultat aurait pu se refléter dans les résultats de notre expérience si les participants qui regardaient la tablette au moment de la demande de la reprise en main SA_NDT et Full_NDT avaient montré plus de difficultés à reprendre la main que les conducteurs non distraits Full_SA et NDT_SA. Ce qui n'est pas le cas. Au lieu de cela, l'analyse du regard juste après la demande de reprise en main a montré un effet de persévérance, les conducteurs dans les conditions SA_NDT et Full_NDT passent plus de temps à regarder la tablette et moins de temps à vérifier leurs rétroviseurs. Ceci est cohérent avec l'observation que

la première fixation vers la route ou vers les rétroviseurs après la demande de reprise en main était effectué 1 seconde plus tard pour les groupes SA_NDT et Full_NDT comparé au groupe Full_SA et NDT_SA. Les conducteurs qui n'effectuaient pas d'activité non liée à la conduite au moment de la demande de reprise en main, même s'ils avaient passé environ 5 minutes à le faire auparavant (groupe NDT_SA) n'ont pas pris significativement plus de temps pour regarder la route ou les rétroviseurs après la demande de reprise en main. Des analyses supplémentaires ont été menées pour examiner plus en détail l'évolution de la distribution du regard pendant les secondes après la demande de reprise en main. Elles ont montré que l'effet de la persévérance ne durait qu'environ 1 seconde. Ceci est cohérent avec Louw et al. (2017) qui ont observé que les conducteurs hors de la boucle de conduite passaient moins de temps à regarder la route pendant la première seconde après une demande de reprise en main inattendue. Dans notre cas, les participants qui réalisaient l'activité non liée à la conduite continuaient à regarder la tablette même si seul un pictogramme demandant la reprise en main était affiché. L'avertissement sur la console centrale pourrait être une source de distraction alors que le conducteur devrait accorder une attention complète et immédiate à la reconstruction de la conscience de la situation pour assurer le succès de la reprise en main. Cela suggère qu'éviter l'affichage d'informations sur la console centrale pendant une demande de reprise en main (par exemple, masquer l'écran) afin de décourager les conducteurs de consulter les informations sur l'appareil conduirait à de meilleures performances. Cette hypothèse pourrait être testée dans de futures études.

Cette persévérance n'a pas entraîné une augmentation des collisions dans la condition SA_NDT, probablement parce que les conducteurs étaient conscients des véhicules qui allaient le dépasser avant de commencer l'activité de non conduite. Pris tous ensemble, les résultats suggèrent que continuellement, ou du moins de façon vraiment fréquente, surveiller la scène routière est essentiel pour construire le niveau 3 du modèle de la conscience de la situation selon la terminologie d'Endsley. C'est-à-dire que le niveau 3 de la conscience de la situation nécessite de développer un modèle mental de la situation qui permet d'anticiper son état futur. Le désengagement tardif de l'activité non liée à la conduite peut être suffisant pour percevoir correctement l'environnement immédiat (SA niveau 1) ; cependant, il peut être insuffisant pour considérer la dynamique de la situation. Si la demande de reprise en main intervient alors que le conducteur est engagé dans une activité sur la console centrale, cela peut conduire à une forme d'acharnement à regarder la tablette. Cependant, cette persévérance était moins critique pour le succès de la reprise en main que d'avoir une conscience de la situation suffisamment élaborée dans notre cas critique.

Des solutions ont été explorées dans la littérature pour aider les constructeurs à reconstruire leur conscience de la situation. Par exemple, Yousfi (2018) a testé différents dispositifs d'alerte d'angle mort pendant une reprise en main. Elle a montré que l'utilisation d'un tel système réduit le taux de collision avec un véhicule dans la voie de gauche. White et al. (2019) ont proposé un contrôle de guidage « top-down » après l'alerte de reprise en main, les conducteurs qui avaient ce système ont plus regardé leurs rétroviseurs que les conducteurs qui ne l'avaient pas. Dans le même esprit, Carsten & Martens (2019) ont proposé un ensemble de principes de conception pour améliorer l'interface homme-machine pour les voitures automatisées.

En conclusion, le concept de la conscience de la situation est central dans les problématiques liées à l'automatisation des véhicules. La question de savoir comment aider les conducteurs à maintenir ou restaurer une conscience de la situation suffisante n'a pas encore reçu de réponse définitive. Nos résultats confirment l'idée qu'un effort particulier doit être fait par les concepteurs pour restaurer rapidement un bon niveau de conscience de la situation lorsque le conducteur est hors de la boucle de conduite. Des travaux supplémentaires sont nécessaires pour mieux identifier les marqueurs comportementaux de la conscience de la situation, par exemple en termes de routine pour vérifier les rétroviseurs ou en séquences d'action sur le véhicule. Pour conclure, on fera référence à Louw et al. (2015) qui ont déclaré : « jusqu'à ce qu'il y ait une stratégie efficace pour aider les conducteurs à regagner la conscience de la situation pendant la reprise en main d'une conduite hautement automatisée, ils devraient être encouragés à rester dans la boucle de conduite » (page 1).

F. Expérimentation 3 : Effet du niveau d'automatisation sur l'évolution du vagabondage de la pensée

Cette expérimentation n'a pas encore fait l'objet d'une publication. La méthode d'analyse des séries temporelles a été conçue et mise en œuvre par Camilo Charron, enseignant-chercheur au Laboratoire des Sciences du Numérique de Nantes (LS2N).

F.1. Objectifs et hypothèses

Cette étude s'est intéressée à l'influence du niveau d'automatisation sur le vagabondage de la pensée et explore la possibilité d'estimer l'évaluation du vagabondage sur la base d'une modélisation des stratégies visuelles (cf. section B.3). Le premier objectif est d'estimer le vagabondage à l'aide des stratégies visuelles. Le second est d'étudier l'influence du niveau d'automatisation sur la survenue et l'évolution du vagabondage de la pensée à partir de l'estimation de l'évolution du vagabondage en fonction des stratégies visuelles au cours du temps. Chaque participant a expérimenté un niveau d'automatisation parmi les suivants : niveau 2 Hands_On, niveau 2 Hands_Off, et niveau 3. Le niveau 2 Hands_On était identique au niveau 2 SAE décrit dans la section A.2.1. La condition niveau 2 Hands_Off était presque identique au niveau 2 SAE (cf. section A.2.1) sauf qu'il a été demandé aux participants de ne pas tenir le volant pendant la phase de conduite automatisée. Le dernier mode de conduite était une conduite de niveau 3 SAE sans activité non liée à la conduite. A la fin de l'expérimentation qui durait 21 minutes, les participants devaient déclarer le temps qu'ils avaient passé à penser à autre chose que la conduite. Si l'on considère les niveaux d'automatisation du point de vue de la définition de la SAE (cf. section A.2.1), quelle que soit la consigne, les conducteurs en niveau 2 devraient avoir une apparition moins rapide du vagabondage et celui-ci devrait être moins élevé qu'en conduite automatisée du niveau 3. En effet, les conducteurs en conduite automatisée de niveau 2 doivent continuellement surveiller l'environnement routier contrairement aux conducteurs en conduite automatisée de niveau 3. De plus, les conducteurs en conduite automatisée peuvent s'engager dans des distractions exogènes ou endogènes. En revanche, d'un point de vue psychologique, il est possible qu'enlever les mains du volant induise une forme de désengagement supplémentaire, dirigée par l'idée selon laquelle un système qui permet de ne pas garder les mains sur le volant (niveau 2 Hands_Off) serait plus sûr qu'un système ne le permettant pas (niveau 2 Hands_On) (Forzy et al., 2021). Selon cette hypothèse, le niveau 2 Hands_Off pourrait être appréhendé par le conducteur comme un niveau intermédiaire entre le

niveau 2 Hands_On et le niveau 3. Dans le cadre de cette expérience, cela pourrait se traduire par une survenue du vagabondage et une évolution qui seraient également intermédiaires.

F.2. Méthodes

F.2.1. Participants

39 personnes (19 hommes et 20 femmes) d'un âge compris entre de 19 ans et 59 ans (Moyenne = 33.41, SD = 9.96) ont passé l'expérimentation. Ils étaient tous titulaires d'un permis de conduite valide avec une expérience de conduite moyenne de 13811 km/an (SD = 9355.8). Ils avaient tous une vision normale ou corrigée avec des lentilles de contact. Chaque participant a signé un formulaire de consentement en accord avec la déclaration de Helsinki. L'expérience a été approuvée par le comité d'éthique 191 pour la recherche non interventionnelle de l'Université de Nantes (CERNI, IRB IORG0011023; approbation 08072021-4).

F.2.2. Activité non liée à la conduite

Pour cette étude, aucune activité non liée à la conduite n'a été mise en place. L'objectif est d'éviter de distraire les participants pour ne pas nuire à la survenue du vagabondage de la pensée.

F.2.3. Plan expérimental et procédure

L'influence du niveau 2 et niveau 3 d'automatisation sur le vagabondage de la pensée a été étudié dans cette expérimentation. Le niveau 2 d'automatisation a été décliné en deux catégories. La première était le niveau Hands-On pendant lequel le conducteur devait continuellement garder les mains sur le volant et activer les clignotants pour que le véhicule réalise une manœuvre de changement de voie. Le système automatisé gérait la vitesse et la distance au véhicule devant lui. La seconde catégorie était le niveau Hands-Off qui fonctionnait comme le niveau Hands-On sauf que le conducteur ne devait pas garder les mains sur le volant. Pour le niveau 3, le système automatisé n'avait besoin d'aucune intervention de la part du conducteur. Le système automatisé gérait les changements de voie et les dépassements tout en respectant les limites de vitesse et les distances de sécurité. Chaque participant expérimentait un seul niveau d'automatisation.

Au début de l'expérimentation, les participants s'installaient dans le simulateur et réalisaient la calibration de l'oculomètre. Les données étaient enregistrées à 60Hz et synchronisées avec le scénario. Chaque participant passait une seule conduite automatisée choisie aléatoirement. Ils recevaient donc les instructions liées à leur niveau d'automatisation et testaient le niveau d'automatisation qui leur a été attribué sur un parcours de familiarisation.

La conduite se déroulait sur une autoroute 3 voies limitée à 110 km/h. Les participants commençaient par s'insérer sur l'autoroute en mode manuel (environ 1 minute) puis devaient activer le mode automatisé dès que le véhicule le demande. Pendant les 5 premières minutes en conduite automatisée, les participants rencontraient un trafic dense sur leur voie et devaient initier des changements de voie fréquents pour les niveaux Hands-On et Hands-Off alors que le véhicule de niveau 3 gérait totalement la conduite. L'objectif de ces 5 minutes de conduite était de permettre aux participants de bien expérimenter le niveau d'automatisation avec lequel ils circulaient, au-delà de la description qui leur a été donné en consigne. Lors des 15 minutes suivantes, la conduite automatisée était monotone et sans trafic. Cela évitait que les participants dans les conditions Hands-On et Hands-Off n'utilisaient le clignotant, et rendait comparable leur niveau d'activité motrice et d'implication dans la tâche à celle de la condition de niveau 3. Pour différencier les deux niveaux 2, l'autoroute était sinueuse ce qui permettait d'avoir un retour au niveau du volant pour les participants dans la condition Hands-On. Il a été demandé aux participants de cette condition de placer les mains en bas du volant pour éviter de forcer sur le moteur du volant.

A la fin de l'essai, les participants devaient répondre à la question suivante : « Pendant la conduite autonome, combien de temps avez-vous passé à penser à autre chose que la conduite ? ». Les participants répondaient librement à la question, aucune proposition de réponse ne leur était présentée.

F.3. Analyse des données

F.3.1. Score de vagabondage déclaré

Des tests de Student deux à deux ont été utilisés pour évaluer l'effet du niveau de conduite sur le score de vagabondage déclaré par les participants après avoir vérifié la normalité des échantillons à l'aide du test de Shapiro et l'égalité des variances à l'aide du test de Fisher.

F.3.2. Estimation du vagabondage à partir des données oculaires

Le score de vagabondage déclaré par les participants a été estimé à partir de la méthode développée par Schnebelen et al. (2020). Cette méthode permet de construire un modèle de l'estimation du score de vagabondage déclaré par les participants à partir des stratégies visuelles. Cette méthode a été appliquée à nos données (cf. section 3.2.1). Une fois le modèle obtenu, dans la seconde partie (cf. section 3.2.2), il a été appliqué aux données de chaque participant afin de reconstruire par fenêtre glissante une courbe d'évolution du vagabondage au fil du temps de conduite. Puis les courbes ont été moyennées en fonction de la condition expérimentale. Ces courbes moyennes ont été analysées à l'aide de la méthode des séries temporelles. Les paramètres obtenus ont permis de comparer l'évolution des courbes moyennes selon le type d'automatisation. La Figure F.1 récapitule les étapes de l'analyse des données.

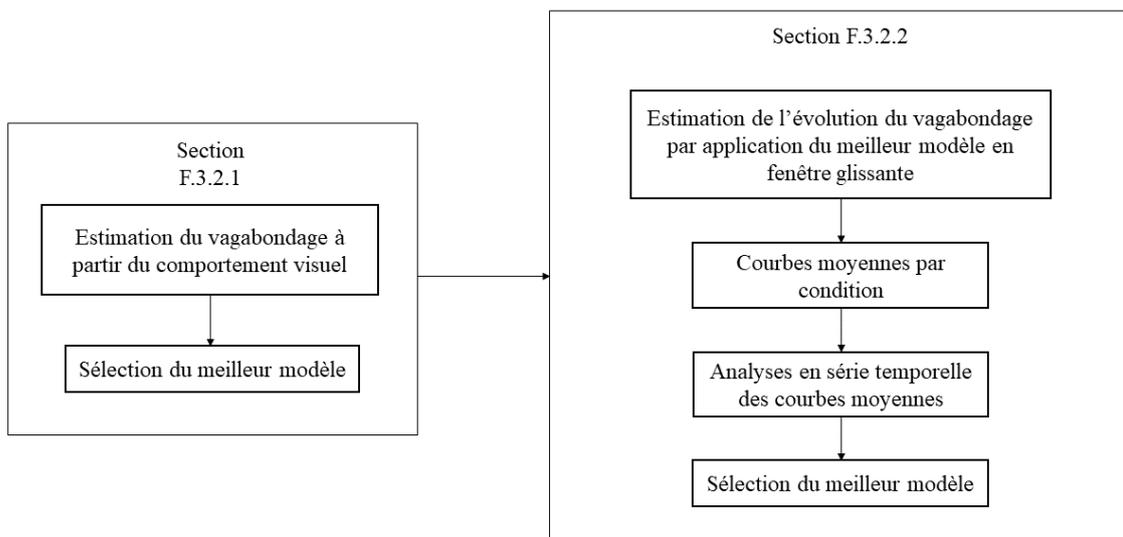


Figure F.1. Étapes de l'estimation du vagabondage et de son évolution à partir des données oculaires

F.3.2.1. Construction du niveau de vagabondage à partir du comportement visuel

Schnebelen et al. (2020) ont enregistré le comportement visuel des participants pendant qu'ils expérimentaient une conduite automatisée de niveau 3 sur le simulateur du LS2N (cf. section C.1). Après les 18 minutes du parcours, les participants devaient déclarer le pourcentage

de temps passer à penser à autre chose que la conduite. Pour l'analyse des données visuelles, la scène de conduite a été divisée en 13 aires d'intérêt (cf. Figure D.9.). L'écran central a été divisé en 6 zones dont le centre (RC, pour road center tel que défini par Victor, 2005) qui fait 8 degrés de rayon en face du conducteur, le rétroviseur central (CM) et 4 positionnées relativement au RC (Up, Left, Down, Right). Chaque écran latéral est composé de deux zones : la zone du rétroviseur (LM à gauche et RM à droite) et le reste de l'écran (LS à gauche et RS à droite). La zone du compteur a été nommée D et celle de la tablette est appelé HMI. Toutes les données oculaires à l'extérieur de ces écrans ont été regroupées dans une zone autre.

Pour chaque participant, les auteurs ont calculé la probabilité de passer d'une aire d'intérêt à une autre aire d'intérêt à l'aide des chaînes de Markov pour obtenir des matrices de transitions entre les aires. Cette matrice était de dimension 13 x 13. Comme la somme des probabilités en ligne devait être égale, si une aire n'était pas consultée, alors il lui était associé une loi uniforme. La matrice de transition est considérée comme un indicateur dynamique du comportement visuel. Ils ont également considéré des indicateurs statiques comme le pourcentage de temps passé sur chaque zone. Un participant était donc caractérisé par un vecteur de 182 indicateurs (la matrice de transition étant transformée en vecteur de 169 indicateurs + le vecteur composé des 13 pourcentages de temps passé sur chaque zone). Par la suite, les auteurs ont utilisé le modèle de régression des moindres carrés (partial least squares - PLS) pour estimer le score de vagabondage déclaré par les conducteurs à partir des vecteurs de 182 indicateurs. Ils ont fait varier le temps de construction du vecteur d'entraînement de 2 à 12 minutes et ont trouvé le meilleur modèle pour un vecteur d'entraînement de 10 minutes et un vecteur de validation de 2 minutes pour évaluer le modèle. Comme le vagabondage de la pensée augmente avec la durée de l'automatisation (Körber et al., 2015) et que le score de vagabondage est rapporté par les participants à la fin de l'expérimentation, les données nécessaires pour la validation sont construites à partir des dernières données visuelles récupérées. Les données pour l'entraînement sont composées des données oculaires précédant la validation. A l'aide de cette méthode, ils ont pu estimer le score de vagabondage à partir de 12 indicateurs sélectionnés dans les vecteurs de 182 indicateurs.

Dans notre étude, la méthode qui vient d'être décrite a été appliquée afin de trouver le meilleur modèle adapté à nos données pour estimer le score de vagabondage des participants. Les aires d'intérêt utilisées étaient identiques à celles de Schnebelen et al. (2020) ainsi que la méthode pour créer les vecteurs de 182 indicateurs. Pour trouver le meilleur modèle, les 14 dernières minutes du scénario, durant lesquelles la conduite automatisée était monotone et sans

trafic ont été considérées. Le meilleur modèle a été déterminé en faisant varier de façon systématique la longueur des matrices d'entraînement et de validation. Dans tous les cas, le temps d'entraînement était au moins égal au temps de validation (par exemple, pour une durée de validation de 2 minutes, le temps d'entraînement pouvait être compris entre 2 et 12 minutes, alors que pour une durée de validation de 6 minutes, le temps d'entraînement était de 6, 7 ou 8 minutes). Ce qui a permis d'obtenir 48 combinaisons différentes caractérisées par un temps d'entraînement (t) et un temps de validation (v). Autrement dit, pour chaque conducteur, 48 vecteurs de transition $X_{t,v}$ ont été calculés.

L'objectif était de trouver la meilleure prédiction du score de vagabondage Y en fonction de $X_{t,v}$ (vecteurs de transition) selon les conditions suivantes :

- Les indicateurs visuels ($X_{t,v}$) étaient corrélés. L'environnement de conduite était divisé en 13 aires d'intérêt, le pourcentage de temps passé sur les 12 aires d'intérêt permettait de calculer le pourcentage de temps passé sur la 13^e aire d'intérêt. En termes mathématiques, $X_{t,v}$ n'était pas de rang complet.
- Le nombre d'indicateurs visuels (182) pouvant expliquer Y était plus élevé que le nombre d'observations faites sur les participants (35).

Compte tenu de ces contraintes, le meilleur modèle de régression des moindres carrés a été choisi pour fournir la meilleure estimation de Y avec un modèle linéaire étant donné la matrice $X_{t,v}$.

Au final, pour chaque combinaison de temps (48 en tout), on obtenait 35 vecteurs (identique au nombre de participants) de 182 indicateurs visuels. La prédiction du score de vagabondage en utilisant la régression des moindres carrés a été faite sur chacune des 48 combinaisons en 3 étapes consécutives. Les deux premières étapes s'effectuaient à l'aide du vecteur d'entraînement et avaient pour but de définir le nombre de composante optimale (cf. section 3.2.1.1) et de réduire le nombre d'indicateurs visuels (cf. section 3.2.1.2). La 3^{ème} étape consistait à calculer le MSEF (cf. section 3.2.1.3). Pour la 4^{ème} étape, le MSEF obtenu pour chaque combinaison était comparé. Le meilleur modèle est caractérisé par le MSEF le plus petit (cf. section 3.2.1.4). La figure F.2, ci-dessous, présente les différentes étapes pour obtenir le meilleur modèle.

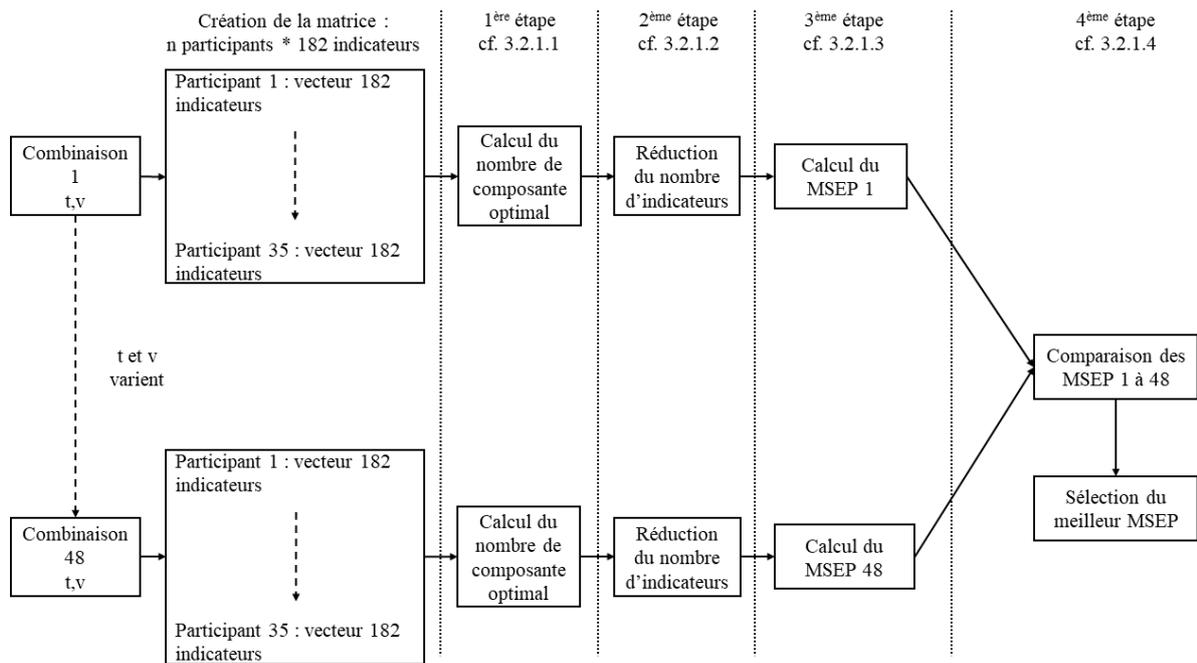


Figure F.2. Etapes de la construction du modèle de l'estimation du niveau de vagabondage jusqu'à la sélection du meilleur modèle en fonctions du comportement visuel

F.3.2.1.1. 1^{ère} étape : calcul du nombre de composants optimal

Le but de cette étape était de calculer la structure idéale du modèle de prédiction. Le modèle de régression des moindres carrés est basé sur de nombreux composants orthogonaux qui constituent la structure du modèle de prédiction. Plus le nombre de composants est important, plus le modèle est complexe et spécifique aux données. Avec moins de composants, le modèle est plus simple et généralisable à d'autres données. Il fallait donc calculer un nombre de composants de façon à éviter d'être trop spécifique tout en gardant une grande précision pour la prédiction. Un nombre de composants de 1 et 6 a été testé. Le nombre de composants optimal était celui qui minimisait l'erreur quadratique moyenne de prédiction (MSEP), avec une procédure de « leave-one-out ».

F.3.2.1.2. 2^{ème} étape : réduction du nombre d'indicateurs visuels

Le but de cette étape était de réduire le nombre d'indicateurs visuels pour prédire le vagabondage de la pensée et d'augmenter la prédiction de Y en sélectionnant moins d'indicateurs. La relation entre le vecteur de d'entraînement ($X_{t,v}$) et la dépendante variable $\hat{Y}_{t,v}$ entraînement était linéaire :

$\hat{Y}_{t,v \text{ entraînement}} = X_{t,v} * C_{t,v}$ avec $C_{t,v}$ la matrice des coefficients de régression.

Les coefficients pouvaient être interprétés de deux manières :

- Le signe du coefficient indiquait comment l'indicateur visuel influençait l'estimation du score de vagabondage ($\hat{Y}_{t,v \text{ entraînement}}$). Si le signe était positif alors le score de vagabondage augmentait, s'il était négatif alors le score diminuait.
- L'amplitude du coefficient indiquait l'importance de l'indicateur. Si l'amplitude était proche de 0 alors l'indicateur visuel avait une influence négligeable sur $\hat{Y}_{t,v \text{ entraînement}}$. A l'opposé si l'amplitude était forte, l'influence de l'indicateur était importante.

Pour réduire le nombre d'indicateurs visuels de $X_{t,v}$, l'amplitude des coefficients était comparée à un seuil croissant qui partait de 0 et augmentait de 0.1 à chaque itération. Pour chaque matrice partielle (la matrice d'origine seulement composée des indicateurs visuels retenus), on calculait une nouvelle régression des moindres carrés. Le seuil était augmenté de 0.1 jusqu'à ce que le pourcentage de variance de Y expliqué par le modèle n'augmentait plus.

Au final, on obtenait un vecteur partiel du comportement visuel incluant seulement les indicateurs les plus pertinents pour le modèle. Ce vecteur était calculé pour les données d'entraînement ($X_{t,v}^p$) et les données de validation ($X_{t,v}^p \text{ validation}$).

F.3.2.1.3. 3^{ème} étape : calcul du MSEP

Les étapes précédentes permettaient de trouver les paramètres du modèle de régression des moindres carrés en fonction des fenêtre temporelles t,v. Un nouveau modèle $C_{t,v}^p$ en prenant en compte ces paramètres a été utilisé dans la suite de cette étape. L'objectif de cette étape a été d'estimer les scores de vagabondage à partir des données d'entraînement et des données de validation en fonction de la fenêtre t,v du modèle comme suit :

- $\hat{Y}_{t,v \text{ entraînement}}^p = X_{t,v}^p * C_{t,v}^p$
- $\hat{Y}_{t,v \text{ validation}}^p = X_{t,v \text{ validation}}^p * C_{t,v}^p$

L'erreur quadratique moyenne de prédiction a été estimée à partir de ces estimations :

- $MSEP_{t,v \text{ entraînement}} = \sqrt{((Y - \hat{Y}_{t,v \text{ entraînement}}^p)^2)}$
- $MSEP_{t,v \text{ validation}} = \sqrt{((Y - \hat{Y}_{t,v \text{ validation}}^p)^2)}$

F.3.2.1.4. 4^{ème} étape : sélection du modèle en fonction du MSEP

Dans cette étape, le modèle qui a présenté le MSEP le plus faible a été sélectionné pour l'estimation du score de vagabondage de la fenêtre de validation. Le modèle a permis d'avoir le temps d'entraînement, le temps de validation ainsi que le nombre de composantes et d'indicateurs.

F.3.2.2. Estimation de l'évolution du vagabondage en fonction du temps

Le modèle sélectionné a été appliqué sur les données oculaires de chaque participant pour obtenir une courbe de l'évolution de son vagabondage. Ensuite, ces courbes ont été moyennées pour obtenir des courbes moyennes de l'évolution du vagabondage pour chaque condition expérimentale.

Pour estimer l'évolution du vagabondage à partir des courbes moyennes, on a utilisé la théorie des séries temporelles définie comme une suite de réels finie $(x_t)_{1 \leq t \leq n}$ ($n \in \mathbb{N}^*$). L'indice t représentait l'unité de temps qui, dans notre expérimentation, était en millisecondes. L'objectif de cette méthode est de décrire l'évolution dans le temps d'un phénomène (dans notre cas le vagabondage de la pensée) pour le décrire, l'expliquer puis prévoir ce phénomène dans le futur.

F.3.2.2.1. 1^{ère} étape : construction de la courbe chronologique des données

Une fois que le meilleur modèle a été obtenu pour l'estimation du score de vagabondage, une courbe moyenne de l'évolution du vagabondage estimée (\hat{y}) a été calculée pour chaque condition expérimentale. Les courbes ont été réalisées à l'aide d'une fenêtre glissante (FG), de la taille de la fenêtre de validation du modèle. FG était décalée à chaque nouvelle donnée (le taux d'enregistrement de l'oculomètre était de 60 Hz) pour calculer un nouveau \hat{y} . Les courbes moyennes de l'estimation du score de vagabondage commençaient à la fin de la première FG car il n'existait pas de \hat{y} pour les données avant la fin de la première FG. (cf. Figure F.3). La première valeur de \hat{y} est considérée comme le début de l'axe des ordonnées pour la suite.

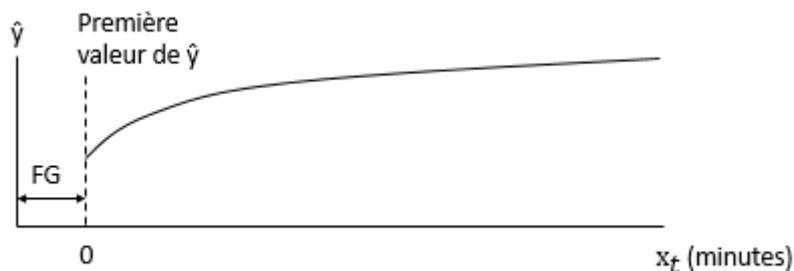


Figure F.3. Représentation du décalage du début des y dû à la taille de la fenêtre FG

F.3.2.2.2. 2^{ème} étape : calcul des paramètres

Le but de la décomposition était de distinguer dans l'évolution de la série une tendance, des variations saisonnières qui se répétaient, des variations résiduelles et des autocorrélations. Deux phases ont été distinguées : la première phase (T1) démarrait à la fin du premier F et s'arrêtait à la fin de la période avec des dépassements soit à la 6^e minute ; la seconde phase (T2) était constituée des données oculaires pendant la conduite monotone entre la 6^e et 21^e minute. La méthode ci-dessous a été appliquée pour les deux phases indépendamment l'une de l'autre. Considérons y_t le vagabondage de la pensée estimé au pas temporel t et x_t l'abscisse au même pas temporel suivant un modèle mixte linéaire et non linéaire :

- $$y_t = a + b * x_t + c * \sin\left(\frac{2\pi}{w} * x_t\right) + d * \cos\left(\frac{2\pi}{w} * x_t\right) + e * \sin\left(\frac{4\pi}{w} * x_t\right) + f * \cos\left(\frac{4\pi}{w} * x_t\right) + g * x_{(t-1)} + h * x_{(t-2)} + \varepsilon_t$$

Où w était une période estimée par l'analyse spectrale des résidus de la régression linéaire ($\hat{y}_t = a + b * x_t$) pour chaque groupe.

Interprétation des paramètres pour chaque phase :

- La tendance : $a + b * x_t$
 - a représentait le niveau de vagabondage estimé au début de chaque phase.
 - b donnait l'évolution du vagabondage estimé avec soit une diminution du score lorsque le signe était négatif soit une augmentation du score lorsque le signe était positif. En outre, plus la valeur absolue de b était grande, plus l'évolution était forte.

- Les saisonnalités : $c * \sin\left(\frac{2\pi}{w} * x_t\right) + d * \cos\left(\frac{2\pi}{w} * x_t\right) + e * \sin\left(\frac{4\pi}{w} * x_t\right) + f * \cos\left(\frac{4\pi}{w} * x_t\right)$
 - c, d, e et f donnaient le poids des fluctuations autour de la tendance.
 - 2π ou 4π donnaient la fréquence des fluctuations (qui était d'autant plus grande que le w était petit).
- Autocorrélations : $g * x(t - 1) + h * x(t - 2) + \varepsilon_t$
 - g et h indiquaient les autocorrélations respectivement d'ordre 1 et 2.
- Les variations résiduelles
 - ε_t était le résidu, un bruit blanc si le modèle était bon.

Le nombre et la fréquence des fluctuations ont été déterminés de façon empirique pour ajuster au mieux le modèle aux données tout en étant le plus parcimonieux possible. Les autocorrélations et les variations résiduelles n'avaient pas de vocation à être interprétées du point de vue psychologique mais étaient indispensables pour rendre compte des dépendances temporelles entre les données. Les résultats ont permis d'interpréter la tendance et les saisonnalités. A l'aide du paramètre a, on a pu comparer les niveaux du vagabondage estimés au début de chaque phase. Les paramètres b, c, d, e et f permettaient de comparer la tendance aux saisonnalités (fluctuations), si la valeur absolue de b était proportionnellement plus élevée que la valeur absolue du paramètre le plus élevé parmi c, d, e, f alors la tendance était plus importante que la saisonnalité. Par contre, dans le cas inverse, la tendance était considérée comme négligeable et la saisonnalité importante.

F.4. Résultats

39 participants ont complété l'étude soit 13 dans chaque groupe. Après l'analyse des données oculaires, 5 participants ont été exclus à cause d'une mauvaise qualité des données. Au final, les groupes Hands-On et Hands-Off étaient chacun composés de 12 participants et le groupe Niveau 3 de 11 participants.

Effet du niveau d'automatisation sur le score auto déclaré de vagabondage de la pensée

Les résultats ont montré que les scores moyens de vagabondage déclarés étaient du même ordre dans les conditions Hands_On et Niveau 3, supérieurs aux scores observés dans la

condition Hands_Off. Lorsque qu'on comparait les groupes deux à deux à l'aide du test de Student, aucun effet du niveau d'automatisation n'a été trouvé entre le groupe Hands-On et le groupe Niveau 3 ($p > 0.1$). La différence était significative entre les groupes Hands-Off et Niveau 3 ($t[21] = -2.558$, $p = 0.01978$). En revanche, la différence entre les groupes Hands-On et Hands-Off n'était pas significative au seuil de .05 ($t[21] = 1.938$, $p = 0.06618$) (cf. Figure F.4).

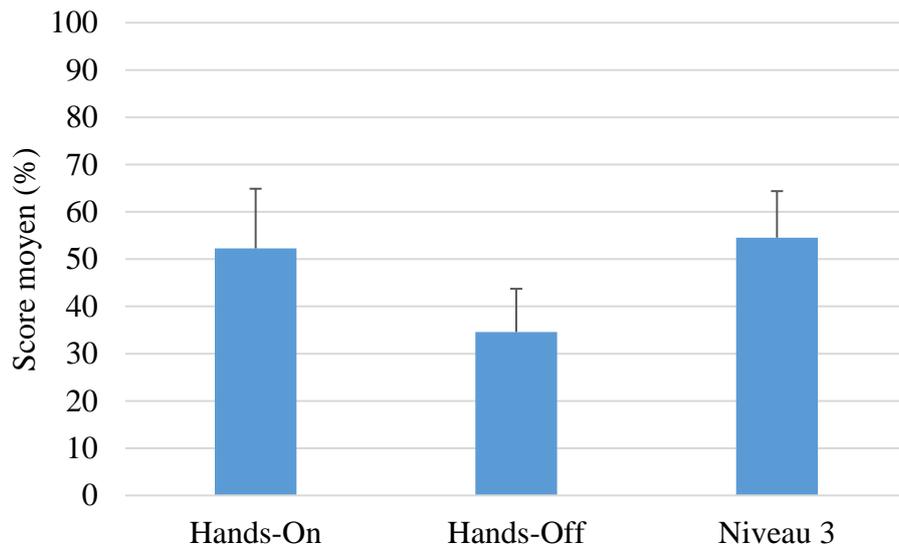


Figure F.4. Score moyen du vagabondage de la pensée en fonction de la condition expérimentale

Sélection du meilleur modèle de régression des moindres carrés

Pour calculer le meilleur modèle de régression des moindres carrés pour notre étude, on a fait varier le temps d'apprentissage et de validation sur les données oculaires des 14 dernières minutes du parcours sans tenir compte de la condition expérimentale. L'objectif était d'avoir un modèle commun aux trois conditions expérimentales. Le meilleur modèle, celui avec la MSEF la plus faible pour l'échantillon de validation, a été obtenu en utilisant les 3 dernières minutes pour la validation (de la 18^e à la 21^e minute) et les 3 minutes précédentes (de la 15^e à la 18^e minute) pour l'entraînement. Ce modèle a retenu 89 indicateurs visuels sur les 182 et 4 composantes (cf. Table F.1).

Table F.1. Meilleur modèle pour la méthode de régression des moindres carrés

Temps (minutes)		Nombre de composantes	Nombre d'indicateurs	MSEP	
Apprentissage	Validation			Apprentissage	Validation
3	3	4	89	4,4278	30,54815

Réalisation des courbes moyennes du score de vagabondage estimé

Ensuite, une courbe moyenne du score estimé du vagabondage par condition expérimentale a été calculée en fonction des indicateurs retenus (cf. Figure F.5). Comme FG était égale à la fenêtre de validation, qui était de 3 minutes, les courbes du score estimé démarraient à la 3^e minute. La période T1, correspondant au temps de conduite automatisée avec des dépassements de véhicules, commençait à la 3^{ème} minute et finissait à la 6^e minute. La période T2, sans dépassement de véhicule, démarrait à la 6^e minute et se terminait à la 21^e minute.

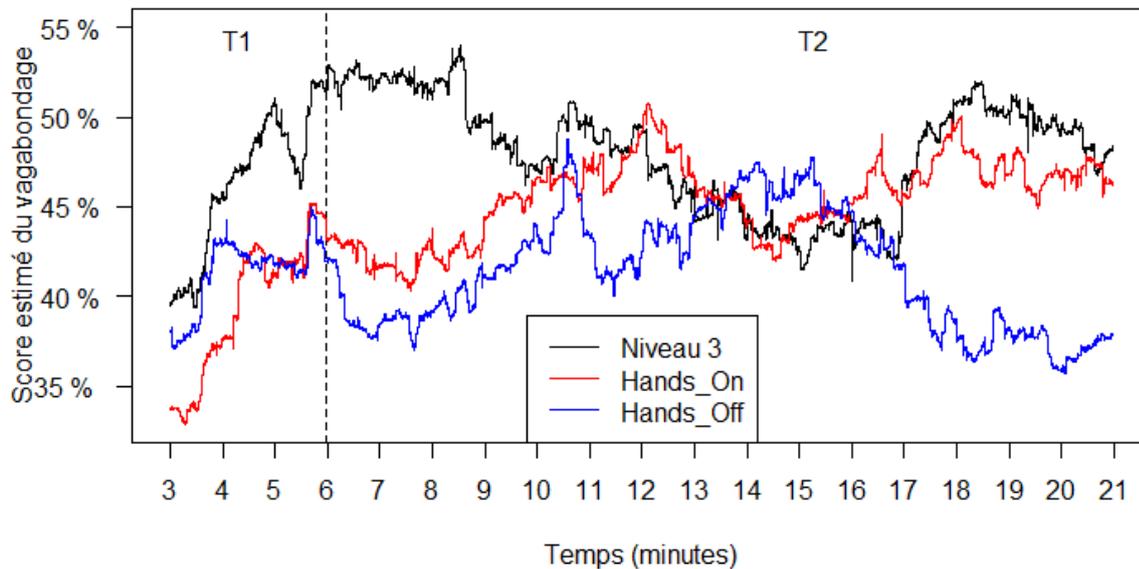


Figure F.5. Courbes du score estimé du vagabondage de la pensée en fonction des conditions expérimentales

Analyse des séries temporelles

Pour l'analyse en séries chronologiques, les périodes T1 et T2 ont été traitées séparément.

T1 (cf. Table F.2) :

Les groupes Niveau 3 ($a = 39.36$) et Hands_Off ($a = 38.28$) ont eu des scores de vagabondage estimés proches au début de T1, alors que le groupe Hands-On ($a = 33.29$) présentait un niveau de vagabondage légèrement plus faible. La tendance, objectivée par le paramètre b , était à la hausse dans les trois conditions. Cependant, les groupes Niveau 3 et Hands_On ont eu un paramètre b très proche et deux fois supérieur au groupe Hands-On. Si l'on comparait la valeur absolue de b (Niveau 3 : $b = 4.69$, Hands_On : $b = 4.15$, Hands_Off : $b = 2.03$) aux paramètres de saisonnalité de T1 en valeur absolue, la valeur de b était proportionnellement plus élevée que la valeur absolue maximale de T1 dans toutes les conditions (Niveau 3 : $d = 1.57$, Hands_On : $d = 1.13$, Hands_Off : $c = 1.22$). Cela montre que la tendance à l'augmentation avait bien plus de poids dans le modèle que les fluctuations autour de cette tendance.

Table F.2. Paramètres a, b, c, d, e , et f pour T1 en fonction des conditions

	Tendance (cf. Figure F.6)		Saisonnalité (cf. Figure F.7)			
	a	b	c	d	e	F
Niveau 3	39.36	4.69	0.94	-1.57	0.29	0.69
Hands_On	33.29	4.15	0.22	-1.13	-0.12	0.9
Hands_Off	38.28	2.03	1.22	-1.18	-0.73	- 0.23

T2 (cf. Table F.3) :

Au début de T2, les 3 groupes présentaient des niveaux de vagabondage estimés (paramètre a) différents, avec un niveau plus élevé pour le groupe Niveau 3 (51.46) que pour les groupes Hands_On (44.6) et Hands_Off (41.51). L'évolution du vagabondage était très faible dans les groupes Hands_On ($b = 0.14$) et Hands_Off ($b = -0.02$). Elle était légèrement plus élevée, avec une tendance à la baisse, dans le groupe Niveau 3 ($b = -0.45$). Cette fois, contrairement à T1, la valeur absolue du paramètre b était inférieure aux valeurs absolues des paramètres de la saisonnalité dans chaque condition (Niveau 3 : $d = 3.27$, Hands_On : $c = 2.11$, Hands_Off : $e = 1.12$). Cela montre que les fluctuations autour de la tendance étaient plus fortes que la tendance elle-même.

Table F.3. Paramètres a , b , c , d , e , et f pour $T2$ en fonction des conditions

	Tendance (cf. Figure F.6)		Saisonnalité (cf. Figure F.7)			
	a	b	c	d	e	F
Niveau 3	51.46	-0.45	-0.57	3.27	-2.01	-0.28
Hands_On	44.6	0.14	-2.11	-0.65	-0.5	0.31
Hands_Off	41.51	-0.02	0.51	-3.93	1.12	0.19

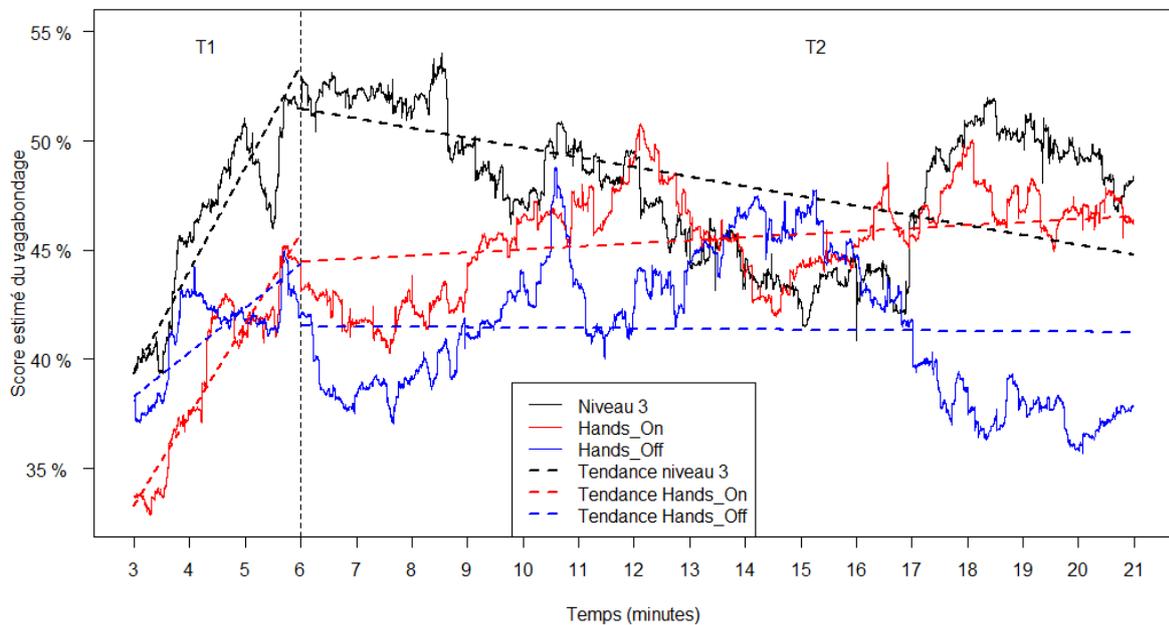


Figure F.6. Tendances des courbes de vagabondage en fonction de la condition expérimentale

La lecture de la Figure F.7 montrait que les groupes Hands_On et Hands-Off avaient des comportements proches entre la 6e et la 13e minute. Par contre après la 13e minutes, les groupes Hands_On et Niveau 3 évoluaient de façon similaire tout en divergeant du groupe Hands_Off.

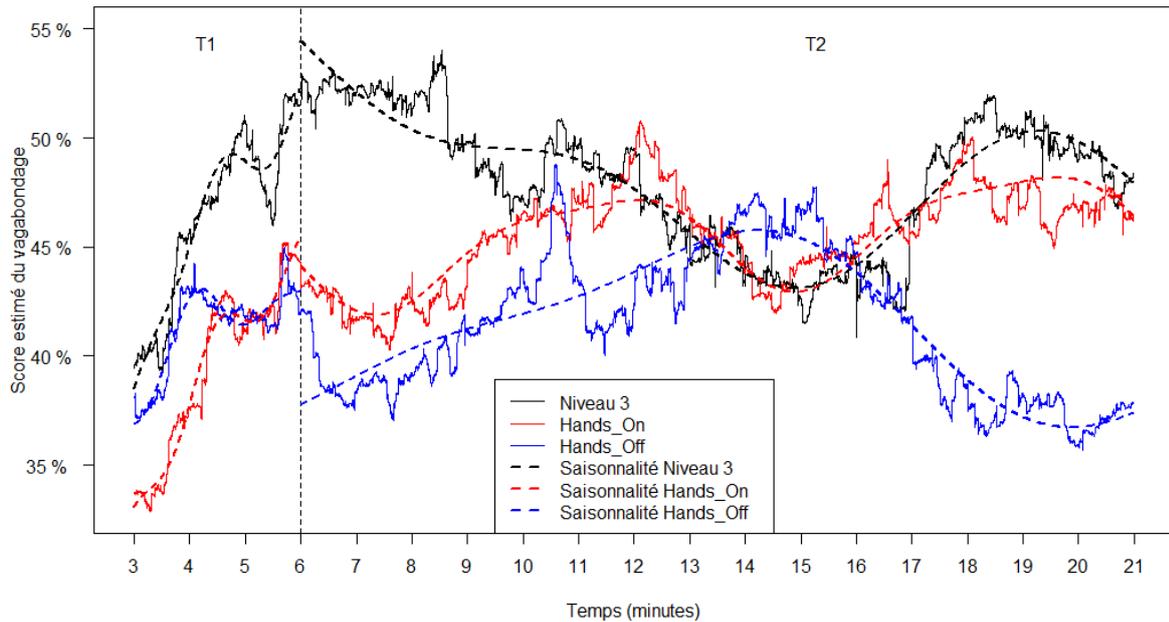


Figure F.7. Fluctuations des courbes de vagabondage en fonction de la condition expérimentale

F.5. Discussion et conclusion

Dans cette étude, les participants ont expérimenté un niveau d'automatisation pendant 20 minutes parmi les 3 suivants : niveau Hands_On, niveau 2 Hands_Off, ou niveau 3. A la fin du parcours, ils devaient exprimer le pourcentage de temps passé à penser à autre chose que l'activité de conduite. La méthode de régression des moindres carrées présentée dans les travaux de Schnebelen et al. (2020) a été utilisée pour trouver le meilleur modèle prédisant le score rapporté par les participants à partir des données oculaires recueillies. Le modèle obtenu a servi à créer une courbe de vagabondage moyenne par condition expérimentale. Les courbes ont été analysées en tendances et en fluctuations en utilisant les séries temporelles. Les résultats montrent que le vagabondage de la pensée démarrait très tôt et augmentait de façon très rapide pour atteindre des niveaux élevés dès la 6^e minute. Par contre, passé la 6^e minute, la tendance moyenne du vagabondage restait stable. On observait plutôt une variation du vagabondage des participants autour de cette tendance.

Si l'on considère le score global du vagabondage reporté par les participants, les scores des groupes Hands_On et Niveau 3 étaient quasiment identiques avec un peu plus de 50% du temps passé à penser à autre chose que la conduite. Il semble donc que, dès lors que les conducteurs n'étaient plus totalement dans la boucle de contrôle opérationnel du véhicule, le vagabondage

de la pensée apparaissait de façon quasiment identique quelle que soit la condition d'automatisation. De là, on aurait pu s'attendre à ce que le score de vagabondage des conducteurs de niveau 2 Hands_Off soit du même ordre. Or, ce groupe a rapporté vagabonder 35% du temps ce qui était plus faible que les autres groupes. Une caractéristique de ce type d'automatisation limitait donc le développement du vagabondage de la pensée des participants. Une explication possible serait que ne pas avoir les mains sur le volant tout en étant susceptible d'avoir à agir sur les commodos pour dépasser ou se rabattre mettrait les conducteurs dans une situation quelle que peu paradoxale, peut-être inconfortable, qui les incitait à superviser davantage la situation de conduite, limitant ainsi le développement du vagabondage de la pensée.

La principale originalité de ce travail a été de reconstruire l'évolution du vagabondage au fil du temps de conduite à partir d'un modèle qui prédit le score de vagabondage en fonction du comportement visuel des participants. La démarche de modélisation et de reconstruction par fenêtre glissante a abouti à trois séries temporelles, une par condition, dont les paramètres ont été évalués. Il convient de noter que les scores de vagabondage estimés en fin de parcours correspondent de près aux scores réels auto-rapportés par les participants, ce qui tend à montrer que les modèles obtenus sont pertinents. L'analyse des séries temporelles permet d'aller plus loin dans la différenciation des conditions, en distinguant deux périodes : une première période de trois minutes qui inclut une phase de conduite avec trafic et une seconde période de 15 minutes, sans trafic et donc plus monotone. Le premier point de vagabondage estimé correspondant aux trois premières minutes de conduite, il définit la valeur de départ du vagabondage estimé. Dès ce point du scénario, la valeur de départ diffère selon la condition, avec en l'occurrence un score estimé moins élevé dans la condition Hands-off. Lors de la première période, on note une augmentation franche du vagabondage estimé, quelle que soit la condition expérimentale avec très peu de saisonnalité. Cette évolution est cependant plus rapide dans les conditions Hands_Off et Niveau 3. La condition Niveau 3 qui combine un score de départ élevé et une forte augmentation aboutit à un score de vagabondage nettement plus élevé à la fin de cette première phase de conduite pour que les deux conditions de niveau 2. Durant les 15 minutes qui suivent, le vagabondage estimé reste stable pour les différents groupes. Seule la condition Niveau 3 montre une tendance à la baisse du vagabondage, mais on observe surtout des fluctuations du niveau de vagabondage de la pensée, comme dans les autres conditions. Aux alentours de la 15^e minute de conduite, le vagabondage estimé est sensiblement le même dans toutes les conditions. Il semblerait que, durant les dernières minutes de l'expérimentation, les conditions Hands_On et Niveau 3 présentent une évolution proche, alors que le groupe

Hands_Off se distingue avec une baisse du niveau de vagabondage. Ceci conforte l'idée que ce type d'automatisation a davantage incité les conducteurs à rester attentif à la conduite.

Dans l'étude de Körber et al. (2015), les conducteurs devaient reporter leur vagabondage de la pensée pendant les 5 premières minutes et les 5 dernières minutes de l'expérimentation. Pour ce faire, les conducteurs devaient répondre à la fin de l'expérimentation, aux deux sous échelles du questionnaire d'état de stress de Dundee (DSSQ) : les pensées non relatives à la tâche et les pensées relatives à la tâche. Les conducteurs avaient reporté plus de vagabondage pendant les 5 premières minutes que pendant les 5 dernières minutes de l'expérimentation. Dans notre étude, les scores de vagabondage estimés étaient aux alentours de leur maximum dès la 6^e minute, puis ont fluctué jusqu'à la fin du parcours. Dans le cas du groupe Hands_Off, le vagabondage a même eu une tendance à diminuer, ce qui est contradictoire avec les résultats trouvés avec Körber et al. (2015). Si on estime que les courbes moyennes reconstruites par la méthode utilisée étaient fiables et que le score de vagabondage fluctuait pendant la conduite automatisée, alors, selon le moment du recueil du vagabondage des participants, il serait possible d'avoir des résultats totalement différents. Par exemple pour le groupe Hands_Off, le score estimé était d'environ 37% à la 7^e minute et de 47% à la 15^e minute ce qui montre une augmentation du vagabondage. Par contre, si l'on considère la 6^e minute, le score estimé du vagabondage était d'environ 42% et à la 20^e, il était d'environ 37%. D'après, ces estimations, le score estimé du vagabondage diminuait. Il est donc important d'augmenter le nombre de mesure du vagabondage au cours du temps pour mieux estimer son évolution.

Les résultats de cette étude peuvent également être mis en rapport avec ceux de Schnebelen et al. (2020). Dans notre étude, le meilleur modèle pour la régression des moindres carrés a retenu beaucoup d'indicateurs visuels. A l'opposé, Schnebelen et al. (2020) ont trouvé un modèle à 12 indicateurs avec des coefficients soit négatifs s'ils font diminuer le score de vagabondage de la pensée, soit positifs s'ils font augmenter ce score. A partir de ces indicateurs et coefficients, ils ont pu déterminer un ensemble critique de transitions entre les aires d'intérêt et le temps passé sur certaines aires responsables de l'augmentation ou de la diminution du score prédit du vagabondage de la pensée (cf. Figure A.15).

Pour comprendre la différence entre les modèles de régression PLS obtenus dans les deux expérimentations, une analyse complémentaire a été réalisée. Elle a consisté à déterminer le modèle en ne considérant que la condition expérimentale avec un niveau 3 d'automatisation, comme dans l'expérience menée par Schnebelen et al. (2020). Le meilleur modèle présentait une corrélation de 0.99994 entre score prédit et score observé (MSEP = 0.0003) pour la phase d'apprentissage et de 0.447 (MSEP = 9.66) pour la phase de validation, avec 73 indicateurs et

5 composantes. Le même simulateur, le même oculomètre, la même condition d'automatisation que Schnebelen et al. (2020) a été utilisé dans notre étude. Seul le scénario était différent, c'est-à-dire la route et le trafic. L'estimation du score de vagabondage sur la base des stratégies visuelles semble donc très dépendante du contexte de conduite. Une différence majeure entre les deux expérimentations réside dans l'environnement routier : en ligne droite dans le cas de Schnebelen et al. (2020), sur autoroute plus sinueuse dans notre cas. L'introduction de rayons de courbure plus importants a été motivée par la volonté de voir l'action des systèmes sur le volant, et même de le ressentir dans la condition Hands_On. Cela a possiblement influencé les stratégies visuelles des conducteurs et a contribué à l'obtention d'un modèle plus complexe faisant intervenir davantage d'indicateurs.

Une autre différence avec l'étude de Schnebelen et al. (2020) est le niveau de vagabondage déclaré par les conducteurs. Leurs participants ont passé en moyenne 43% du temps à réaliser du vagabondage sur 18 minutes de parcours automatisé contre 54% du temps sur 20 minutes pour les participants dans notre étude, dans la condition expérimentale de conduite automatisée de niveau 3 comparable à leur étude. Geden & Feng (2015) ont montré une augmentation du vagabondage en condition de charge perceptuelle faible, c'est-à-dire, avec un trafic plus fluide, moins de croisements et de bâtiments. De plus, le vagabondage est favorisé par des conduites monotones sur autoroute et le fait d'être seul dans la voiture (Berthié et al., 2015). Comparé à notre étude où le trafic était inexistant dans la partie de conduite automatisée, les participants dans l'étude de Schnebelen et al. (2020) expérimentaient un trafic fluide avec 8 situations de dépassement. Ces situations de dépassement pouvaient être responsable d'une charge perceptuelle plus élevée. Par conséquent, les différences de contextes routiers peuvent expliquer des niveaux de vagabondage différents dans des études portant sur des systèmes de conduite automatisée de niveau 3 identiques.

G. Discussion générale

Ce travail s'est centré sur l'étude de l'état attentionnel du conducteur, manipulé par le biais d'une activité non liée à la conduite ou apparaissant spontanément sous la forme d'un vagabondage de la pensée, à partir des stratégies visuelles. Les deux premières études se sont intéressées à l'impact de l'activité non liée à la conduite sur la qualité de la reprise en main lors de la conduite automatisée de niveau 3 (cf. section G.1). La dernière étude porte sur l'influence du niveau d'automatisation (niveau 2 avec les mains, niveau 2 sans les mains et niveau 3) sur le vagabondage de la pensée (cf. section G.2). La dernière section abordera les perspectives et les recommandations (cf. section G.3).

G.1. Activité non liée à la conduite et qualité de reprise en main

Le premier objectif de ce travail a été d'étudier le lien entre la charge mentale de l'activité non liée à la conduite et la qualité d'une reprise main non planifiée et critique. Pour étudier ce lien, les données oculaires et cardiaques ont des participants ont été enregistrées. Les participants devaient réaliser une activité non liée à la conduite de deux niveaux de difficulté pendant une conduite automatisée de niveau 3. Suite au déclenchement de l'alerte pour la demande de la reprise en main non planifiée et critique, les participants disposaient de 8 secondes pour reprendre la main et éviter la collision avec un véhicule obstacle arrêté dans sa voie. Ils devaient alors soit s'arrêter avant l'obstacle soit faire un évitement par la gauche en évitant la collision avec un véhicule le dépassant.

Les résultats ont montré que l'augmentation de la difficulté de l'activité était responsable de l'augmentation du nombre de fixations supérieure à 2 secondes sur la tablette et de la diminution du temps passé à regarder la route. On s'attendait à ce que les participants réalisant l'activité la plus difficile, présentent de plus grandes difficultés à reprendre la main dues à des stratégies visuelles plus orientées vers l'activité. Pour autant, la difficulté de l'activité non liée à la conduite n'est pas déterminante pour la qualité de la reprise en main ce qui est similaire aux résultats de Bueno et al. (2016). L'activité non liée à la conduite imposée laissait la possibilité de surveiller la route. On peut donc supposer que les conducteurs ont été capables d'adapter leur stratégie visuelle pour maintenir un certain niveau de conscience de la situation pendant la réalisation de l'activité quel que soit son niveau de difficulté. Par contre, un effet significatif de la direction du regard au moment de la demande de reprise en main était

observable. Les conducteurs qui regardaient la route à ce moment-là, c'est-à-dire, ceux sur la boucle de conduite selon la définition de Merat et al. (2019) ont montré un risque de collision plus faible (cf. Figure G.1.A). On peut donc supposer qu'ils avaient un niveau suffisant de conscience de la situation pour gérer correctement l'évitement d'obstacle. En revanche, les conducteurs, qui regardaient la tablette, étaient hors de la boucle (Merat et al., 2019) au moment de la demande de reprise en main (cf. Figure G.1.B). Le délai nécessaire pour acquérir les informations utiles à la reprise en main a probablement induit des difficultés dans la réalisation de celle-ci. Cependant, les résultats de cette première expérimentation ne permettaient pas de valider cette hypothèse et ceci pour deux raisons. Premièrement, pour tester des hypothèses sur la conscience de la situation, une mesure objective de celle-ci est nécessaire. Deuxièmement, il convenait de contrôler davantage la distribution de l'attention en amont de la demande de reprise en main au travers d'activités non liées à la conduite plus exigeantes et mieux maîtrisées dans le temps.

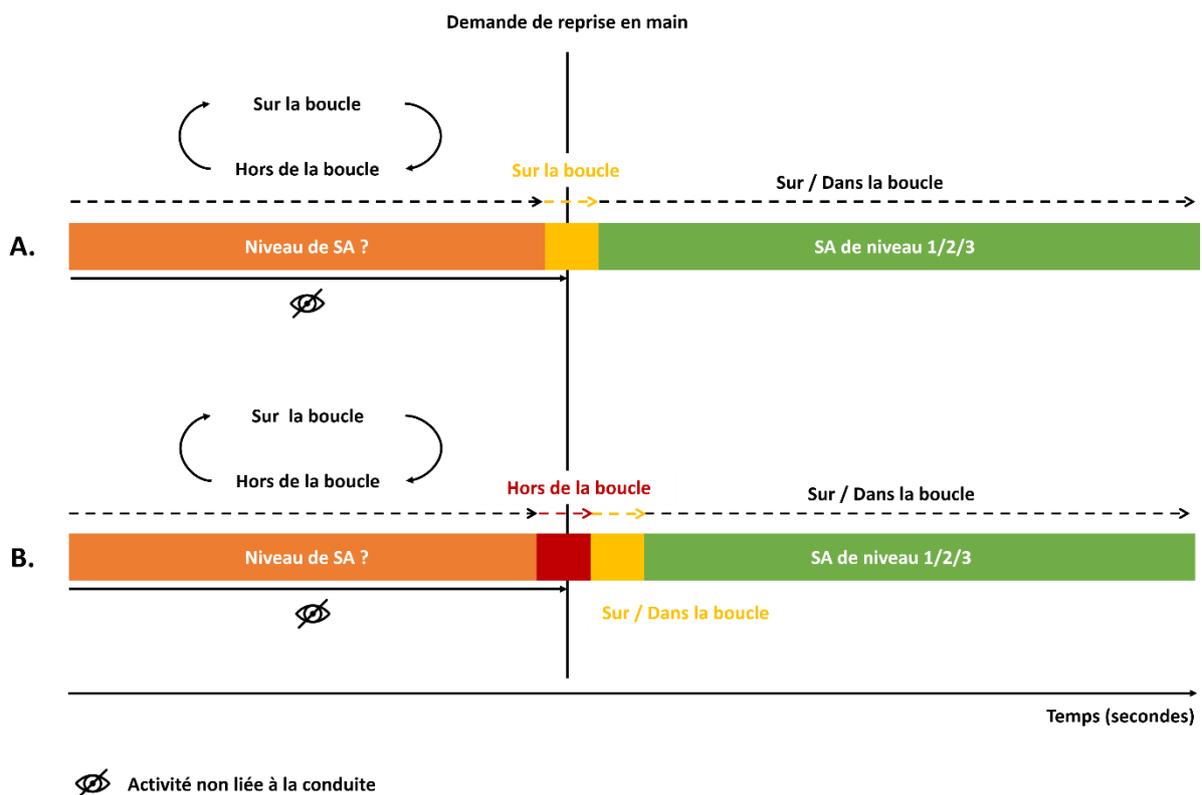


Figure G.1. A. Les conducteurs réalisent une activité non liée à la conduite pendant laquelle ils alternent entre un état sur la boucle et un état hors de la boucle. Au moment de la reprise en main, comme ils regardent la route, ils sont sur la boucle. B. Les conducteurs réalisent une activité non liée à la conduite pendant laquelle ils alternent entre un état sur la boucle et un

état hors de la boucle. Au moment de la reprise, comme ils regardent la tablette, ils sont hors de la boucle.

La deuxième expérimentation a été conçue dans cet esprit, en manipulant le temps d'engagement dans une activité non liée à la conduite pour empêcher ou permettre aux conducteurs de construire une conscience de la situation plus ou moins élaborée. Cette expérimentation avait donc pour objectif d'étudier un possible lien entre conscience de la situation et qualité de reprise en main lors d'une reprise en main non planifiée et critique.

Si on extrapole les résultats de la première expérimentation à la seconde, en reprenant le concept de la sortie de boucle de Merat et al. (2019), les conducteurs qui étaient sur la boucle (cf. Figure G.1.A) au moment de la demande de reprise en main devaient mieux réussir l'évitement que les autres (cf. Figure G.1.B). Or, les résultats de l'expérimentation 2 ne vont pas totalement dans ce sens. Certes, pour les conducteurs hors de la boucle depuis longtemps, pouvoir être sur la boucle en amont de la demande de reprise en main, même pour un court laps de temps (cf. Figure G.2.B), permettait de réduire le nombre de collisions comparé aux conducteurs qui étaient hors de la boucle jusqu'à la demande (cf. Figure G.2.A). Les deux secondes sur la boucle, aidant à réacquérir de l'information sur le contexte routier, semblent avoir permis de reconstruire une conscience de niveau 1, voire 2, selon la terminologie d'Endsley (1995). Cependant, les résultats suggèrent également l'importance d'avoir une conscience de la situation plus élaborée, construite et maintenue à jour sur le temps long avant la demande de reprise en main. En effet, les conducteurs hors de la boucle au moment de la demande de reprise en main mais qui ont pu construire une conscience de la situation élaborée auparavant (cf. Figure G.2.C) ont eu moins de collisions que les conducteurs qui étaient sur la boucle avec une conscience de la situation moins élaborée (cf. Figure G.2.B). Un conducteur sur la boucle avec une conscience de la situation élaborée qui passe hors de la boucle conserve une capacité de projection future des éléments du contexte routier (SA de niveau 3) pendant un court laps de temps (cf. Figure G.2.C). Par contre, il ne peut plus apporter d'informations au niveau 1 et niveau 2 de la conscience de la situation s'il ne prend plus d'informations visuelles sur le contexte routier. Au vu de nos résultats, cet état transitoire dure au moins deux secondes. Par ailleurs, un conducteur hors de la boucle sans conscience de la situation, a besoin de temps pour reconstruire une conscience de la situation complète quand il passe sur la boucle (cf. Figure G.2.B). Les conducteurs peuvent donc être sur la boucle sans avoir acquis une pleine conscience de la situation, et par conséquent ne pas être dans les conditions optimales pour réussir une demande de reprise en main.

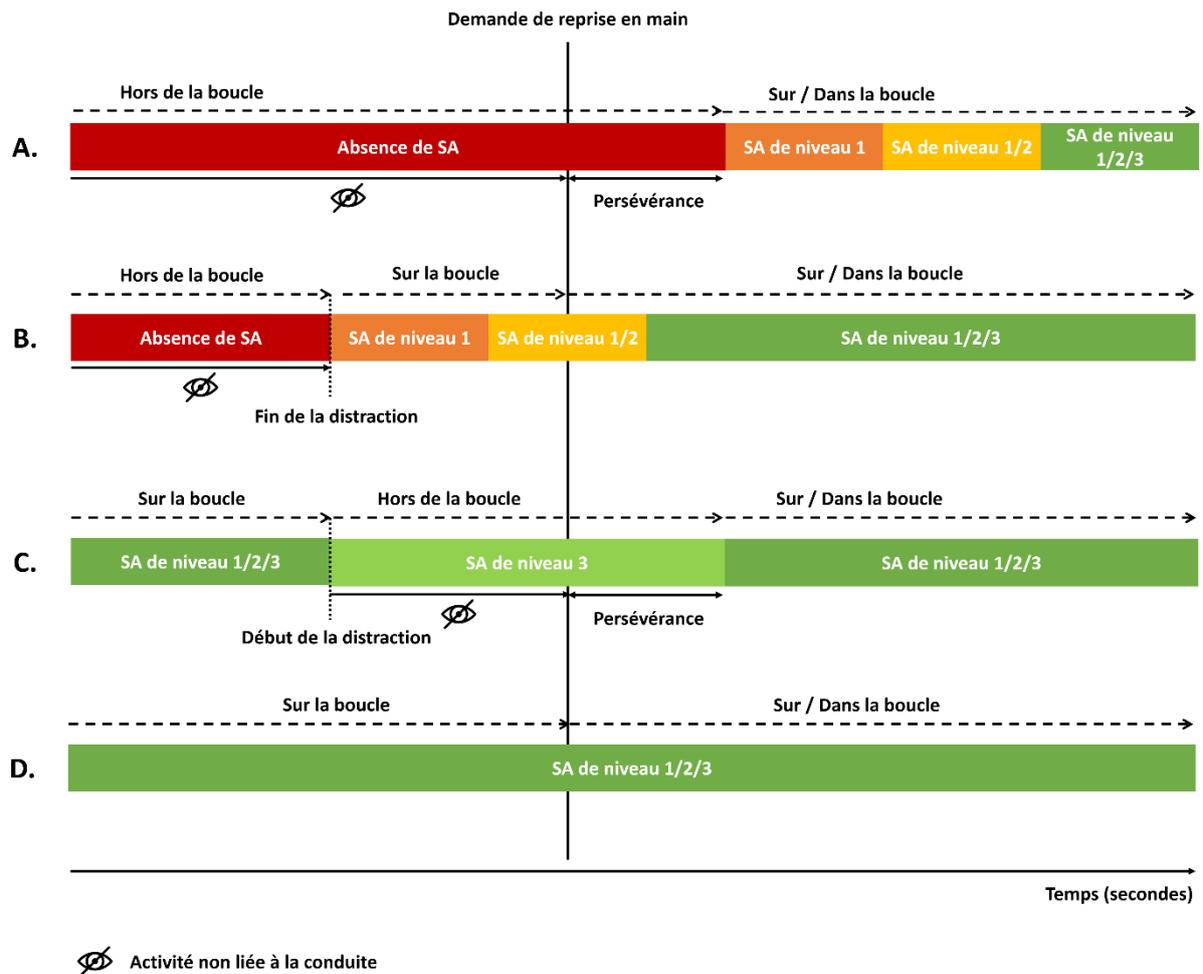


Figure G.2. Transitions entre les différents états du concept de la sortie de boucle en prenant en compte la conscience de la situation (SA). A. Le conducteur est hors de la boucle jusqu'à la demande de reprise en main (similaire au groupe Full_SA, cf. section E.2.4). B. Le conducteur est hors de la boucle depuis longtemps et passe sur la boucle juste avant la demande de reprise en main (similaire au groupe NDT_SA, cf. section E.2.4). C. Le conducteur est sur la boucle de conduite avec une conscience de la situation élaborée puis est hors de la boucle un court instant avant la demande de reprise en main (similaire au groupe SA_NDT, cf. section E.2.4). D. Le conducteur est en permanence sur la boucle et a une conscience de la situation élaborée (similaire au groupe Full_SA, cf. section E.2.4).

Le degré d'élaboration de la conscience de la situation à proprement parler est majoritairement déterminé par le temps d'engagement dans l'activité non liée à la conduite. Nos résultats pointent en outre un effet de persévérance à regarder l'IHM centrale lorsque la demande de reprise intervient alors que le conducteur est engagé dans une activité affichée sur

cette IHM. Cet effet, attesté par l'analyse visuelle, est transitoire. Dans le cas d'usage considéré, l'effet ne durait qu'une seconde après l'alerte de demande de reprise en main. Des résultats similaires ont été trouvés par Louw et al. (2017) avec une harmonisation des stratégies visuelles passé la première seconde après la reprise en main. Dans les cas où les conducteurs avaient pu maintenir une bonne conscience de la situation (cf. Figure G.2.A), cela ne semble pas avoir prêté à conséquence, puisqu'aucune augmentation de la fréquence des collisions n'a été observée comparativement à la situation sans aucune distraction. En revanche, la persévérance a pu retarder la construction de la conscience de la situation dans le cas où celle-ci était absente ou très détériorée (cf. Figure G.3.A). On peut supposer que la persévérance à regarder l'IHM a été causée par l'affichage de l'alerte visuelle à l'endroit où les conducteurs étaient en train de réaliser l'activité non liée à la conduite. Les conducteurs pouvaient donc rester focalisés sur l'alerte au lieu d'orienter leur attention vers la route. Si l'on suppose que la persévérance est liée à l'alerte visuelle, il faudrait mener de nouvelles études en proposant de changer la modalité du type d'alerte afin d'orienter l'attention des conducteurs vers la route et supprimer cet effet de persévérance (cf. Figure G.3.B). Par conséquent, les conducteurs pourraient commencer à reconstruire la conscience de la situation plus tôt après la demande de reprise en main. De plus, il pourrait également être envisagé de mettre en place des aides à la conduite pour permettre aux conducteurs d'atteindre plus facilement et rapidement le niveau 3 de la conscience de la situation (cf. Figure G.3.C). De telles aides pourraient mettre en avant les éléments pertinents au vu de la situation. Yousfi (2018) a testé des systèmes d'alerte d'angle mort pendant une reprise en main avec l'évitement d'un obstacle. Elle a montré que l'utilisation de ce système réduit le risque de collision avec un véhicule en train de dépasser dans la voie de gauche lors de la manœuvre d'évitement. On peut donc supposer que ce système a permis aux conducteurs de percevoir les éléments pertinents dans le contexte routier plus rapidement, et également, d'atteindre un niveau plus élevé de conscience de la situation plus rapidement. Il est possible d'imaginer d'autres systèmes d'aide à la conduite avec une mise en valeur des éléments pertinents pour la situation dans le rétroviseur central ou même sur le pare-brise à l'aide de réalité augmentée. Cependant, la mise en place de tels systèmes devra prendre en compte le coût cognitif de la compréhension des informations présentées aux conducteurs afin d'en assurer l'efficacité.

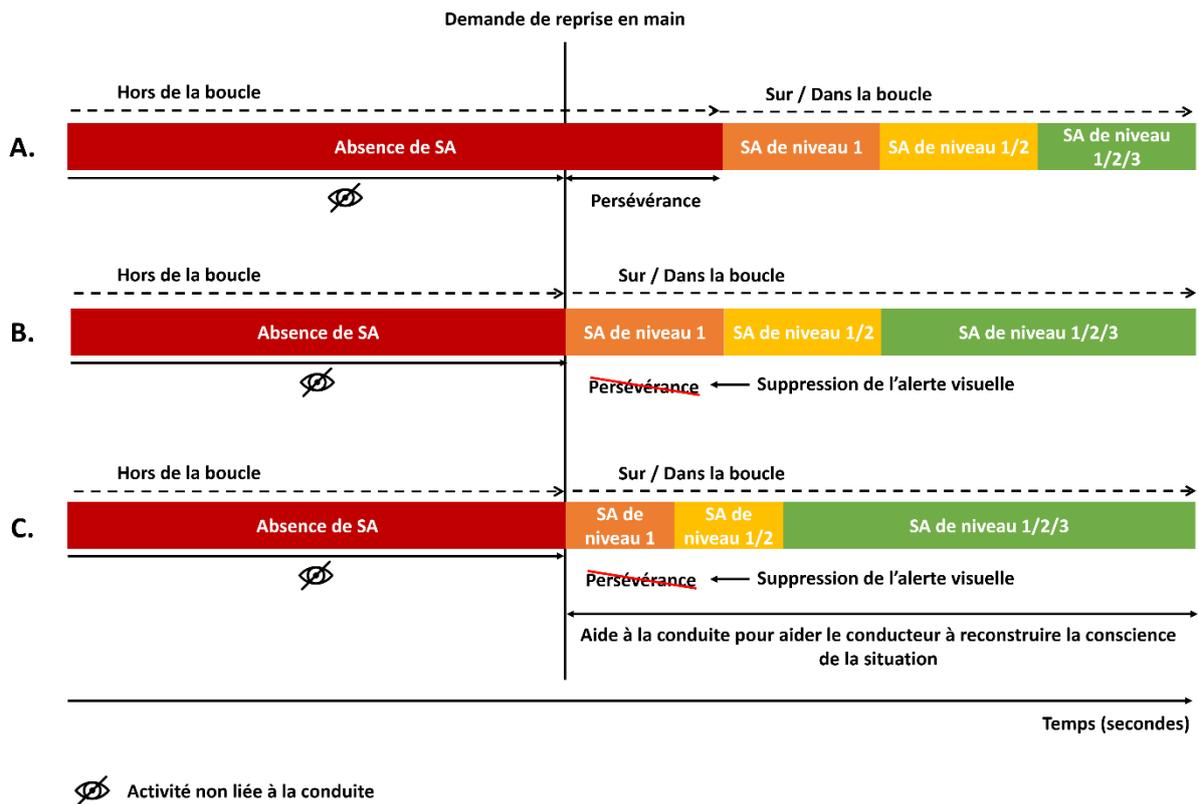


Figure G3. A. Les conducteurs sont distraits depuis longtemps au moment de la demande de reprise en main, ils disposent d'une alerte visuelle et d'aucune aide à la conduite pour les aider à reconstruire la conscience de la situation (similaire au groupe Full_NDT, cf. section E.2.4) B. Les conducteurs sont distraits depuis longtemps et n'ont pas d'alerte visuelle. C. Les conducteurs sont distraits depuis longtemps et n'ont pas d'alerte visuelle et dispose d'aide à la conduite pour reconstruire la conscience de la situation.

Limites

Lien entre les stratégies visuelles et le traitement de l'information

Les stratégies visuelles dans l'expérimentation 1 et 2 ont été traitées en termes de fixations sur les différentes aires d'intérêt dans la scène visuelle. La zone regardée par les conducteurs était donc connue. Dès lors, on a supposé que lorsque les conducteurs, notamment dans l'expérimentation 2, regardaient dans la zone des rétroviseurs au moment de la demande de reprise en main ou juste après la demande de reprise en main, ils prenaient des informations visuelles sur les véhicules le dépassant. Cependant, il a été montré qu'un individu peut fixer un élément de son environnement sans le percevoir (Brown et al., 2005; Koustanai et al., 2008).

Aucunes données supplémentaires dans l'expérimentation 1 permettent de s'assurer que les conducteurs aient bien vu les véhicules dans l'environnement. Dans l'expérimentation 2, pour s'assurer que les conducteurs aient bien vu les véhicules, il leur a été demandé de replacer les véhicules dont ils avaient conscience au moment de l'alerte de reprise en main sur un schéma représentant la situation critique. Cependant les participants ont pu avoir des difficultés à rappeler les éléments présents dans l'environnement au moment de la demande de reprise en main à cause du délai entre le moment de l'alerte de la reprise en main et le moment du rappel de la conscience de la situation. En effet, le scénario s'arrêtait 10 secondes après la demande de reprise et, ensuite, il était indiqué aux conducteurs sur la démarche à suivre pour rappeler la conscience de la situation. Pour être sûr que la mémoire de la conscience de la situation ne soit pas altérée, il aurait fallu arrêter le scénario au moment où on souhaitait obtenir la conscience de la situation et adresser de suite aux conducteurs le questionnaire de la conscience de la situation comme Endsley (1995) l'a réalisé pour évaluer la conscience de pilotes de ligne à l'aide du SAGAT (cf. section A.3.3). Cependant, cette méthode a pour inconvénient d'arrêter le déroulement naturel du scénario, ce qui empêche d'étudier la qualité de la reprise en main. Pour étudier au mieux la conscience de la situation, il faudrait disposer d'un système qui permettrait de déterminer finement et de façon robuste les intersections entre la direction du regard et les éléments mobiles dans l'environnement, comme les véhicules du trafic. Il pourrait s'agir aussi d'étudier la dynamique du regard pour s'assurer que le conducteur regarde l'élément de façon active, c'est-à-dire qu'il va regarder cet élément spécifiquement, et non juste un endroit dans lequel un élément passe.

Activité non liée à la conduite et conduite autonome de niveau 3

Lors d'une conduite automatisée de niveau 3, les conducteurs ont la possibilité de s'engager dans une activité non liée à la conduite. Dans nos deux premières expérimentations, la réalisation d'une activité a été imposée aux conducteurs. Dans la première expérimentation, une opération mathématique à résoudre a été affichée, puis le regard des participants a été contraint vers la tablette lorsqu'ils devaient sélectionner une réponse. Cette activité de calcul mental peut difficilement être comparable avec une activité écologique. L'activité non liée à la conduite de l'expérimentation 2 était une lecture, choisie en accord avec l'étude de Shi & Frey (2021). En effet, ils ont montré que la lecture est une activité souhaitée par les conducteurs pendant la conduite autonome. Les conducteurs ont donc dû lire à voix haute une histoire qui défilait automatiquement sur la tablette, contraignant de fait les participants à regarder la tablette. En

condition réelle, les conducteurs, sans défilement automatique du texte, auraient probablement des stratégies visuelles différentes, revenant régulièrement sur la scène de conduite, pour maintenir une bonne conscience de la situation. En conclusion, si les activités non liées à la conduite ont permis d'atteindre nos objectifs expérimentaux, elles n'ont probablement qu'une validité écologique relative.

G.2. Vagabondage de la pensée et niveau d'automatisation

Dans les deux premières expérimentations, on s'est intéressé à des distractions exogènes, sous la forme d'activités non liées à la conduite, avec des demandes de reprise en main non planifiées et critiques. La troisième expérimentation a considéré une distraction endogène sous la forme d'un vagabondage de la pensée et sans demande de reprise en main. Dans les deux cas, l'attention est détournée de l'activité de conduite, mais la nature de la distraction et ses conséquences sur les prises d'information diffèrent. Dans le cas de la distraction exogène, l'attention visuelle est dirigée vers la réalisation de l'activité non liée à la conduite. Dans le cas du vagabondage de la pensée, la distraction est endogène, et le comportement visuel est libre. Il est également important de considérer les comportements visuels libres sans distraction exogène car ils peuvent être également considérés comme un indice de l'état interne du conducteur comme dans le cas du vagabondage (Schnebelen et al., (2020), cf. section F). Cet état peut être déterminant pour la sécurité routière avec un risque plus important de collision lors du vagabondage de la pensée (Galera et al., 2012).

L'un des objectifs de la troisième expérimentation était d'explorer la possibilité d'estimer l'évolution du vagabondage sur la base d'une modélisation des stratégies visuelles. Pour modéliser les stratégies visuelles, la méthode de Schnebelen et al. (2020) a été adaptée à nos données pour estimer le score de vagabondage déclaré par les participants à partir des comportements visuels. Le modèle obtenu était beaucoup plus complexe que celui de Schnebelen et al. (2020). La complexification du modèle a pu être due à un plus grand nombre de participants dans notre étude et parce que le modèle a été calculé à partir de données issues de différentes conditions expérimentales là où Schnebelen et al. (2020) n'ont utilisé qu'une seule condition expérimentale. Ces différences pourraient être à l'origine d'une plus grande variabilité des stratégies visuelles et par conséquent d'un modèle plus complexe. Pour s'en assurer, le modèle a été recalculé seulement pour les conducteurs de la condition niveau 3 qui était équivalente à la condition de l'expérimentation de Schnebelen et al. (2020). Si le nombre

de participants et la diversité des conditions expérimentales étaient la cause de la complexité du modèle, en ne prenant en compte que cette condition, on aurait dû obtenir un modèle similaire à celui de Schnebelen et al. (2020). Or, le modèle obtenu pour les conducteurs de niveau 3 était toujours complexe. Ces différences pourraient donc s'expliquer par les différences dans les scénarios. En effet, le parcours utilisé est différent. Pour s'assurer que les conducteurs en niveau 2 avec les mains sur le volant aient bien une sensation du mouvement du volant, l'autoroute a été construite de façon à être très sinueuse et avec des lignes droites très courtes. On peut supposer que les variations de courbures de la route ont agi comme un facteur exogène qui a pu largement influencer le regard du conducteur. La négociation de virages repose sur des coordinations visuomotrices spécifiques, avec le regard dirigé en amont vers les bords de voie, la trajectoire future ou d'éventuels aléas, par exemple (cf. section A.4.1.3.1). Ces coordinations peuvent être modifiées sous l'influence de la délégation du contrôle de la direction avec moins de fixations de guidage et plus de fixations d'anticipation, mais subsistent en partie (Mars & Navarro, 2012; Navarro et al., 2016; Schnebelen et al., 2019). Les patterns d'exploration caractéristiques de ces coordinations s'ajoutant à ceux sous-jacents à la supervision de la scène routière pourraient donner lieu à un modèle plus complexe que celui obtenu par Schnebelen et al. (2020) en ligne droite. La complexité du modèle obtenu le rend plus difficilement interprétable, mais pas moins performant, notamment lorsqu'il a été utilisé pour reconstruire l'évolution du vagabondage au fil du temps. En effet, le score de vagabondage estimé à la fin de la conduite (dernier point des courbes d'évolution ; cf. Figure F.6) de chaque condition est proche du score moyen déclaré par les participants. La méthode des séries temporelles a permis d'observer une augmentation rapide du vagabondage dès les premières minutes de l'expérimentation. Puis, une fois atteint un niveau élevé, des variations autour d'une tendance ont été observées.

D'après les niveaux SAE, les conducteurs en conduite de niveau 2 doivent surveiller la route et s'acquitter de la détection et de la réponse aux événements pouvant survenir. Au niveau 3, le système automatisé a été conçu de manière à ce que les conducteurs puissent se désengager de l'activité de conduite. Le système automatisé doit détecter les événements qui surviennent sur la route et alerter les conducteurs pour qu'ils réalisent une reprise en main. D'après les niveaux SAE, comme les conducteurs en conduite automatisée de niveau 2 doivent rester attentifs à la route, ils devraient présenter un niveau de vagabondage inférieur aux conducteurs de niveau 3. Et enlever les mains du volant dans la condition niveau 2, ne devrait pas avoir d'incidence sur l'apparition du vagabondage.

Une autre hypothèse est que les conducteurs sans les mains sur le volant (niveau 2) auraient un vagabondage intermédiaire entre le niveau 2 avec les mains et le niveau 3. Forzy et al. (2021) ont comparé une conduite automatisée de niveau 2 avec les mains sur le volant à une conduite automatisée de niveau 2 sans les mains sur le volant. Les conducteurs ont reporté se sentir moins vigilants, moins connectés à la conduite, avoir moins conscience de l'état du système et du trafic autour avec moins d'anticipation de ce que le système va faire lors de la conduite automatisée sans les mains. Finalement, les conducteurs se sentaient plus comme des passagers dans cette condition. Cela peut s'expliquer par le fait que le niveau 2 sans les mains est perçu comme ayant plus de capacité que le niveau 2 avec les mains par les conducteurs. Et que le contact avec le volant jouerait un rôle important dans la connexion du conducteur avec l'activité de conduite (Forzy et al., 2021). Les conducteurs de niveau 2 sans les mains pourraient donc avoir un niveau de vagabondage supérieur dans la condition sans les mains comparé à la condition avec les mains.

Cependant dans notre expérimentation, le score de vagabondage moyen et la reconstitution de son évolution ont montré un vagabondage très proche pour les conditions niveau 2 avec les mains sur le volant et niveau 3. Par contre, contrairement aux hypothèses, le groupe niveau 2 sans les mains sur le volant a eu un vagabondage inférieur aux deux autres groupes.

Tout d'abord, il est problématique, du point la sécurité routière, que les conducteurs de niveau 2 avec les mains sur le volant présentent un vagabondage identique au niveau 3. Car le vagabondage de la pensée est étroitement lié au phénomène de la sortie de boucle (Gouraud et al., 2017) et serait alors un indicateur de la sortie de boucle. Si les conducteurs de niveau 2 avec les mains sur le volant développent un vagabondage similaire à ceux de niveau 3, cela sous-entend qu'ils seraient hors de la boucle comme les conducteurs de niveau 3. Or le système automatisé de niveau 2 n'autorise pas les conducteurs à être hors de la boucle, ils doivent être en permanence sur la boucle car ils sont responsables de la supervision, de la détection et de la réponse aux événements. De plus, le vagabondage peut engendrer une incapacité à surveiller l'environnement de conduite avec une concentration de l'attention visuelle proche du centre de la route (He et al., 2011) et augmente le risque d'accident (Galera et al., 2012). Il faut donc s'assurer que les conducteurs dans la condition niveau 2 garde un niveau de surveillance adapté et ne présentent pas de niveaux de vagabondage élevés.

Le moindre niveau de vagabondage des participants sans les mains sur le volant provient peut-être du paradoxe de devoir actionner soi-même les commandes des clignotants pour déclencher les changements de voie pour un système perçu comme plus autonome. De plus, Forzy et al. (2021) et Cahour et al. (2021) ont montré que les conducteurs sans les mains ont

plus de difficultés à gérer les situations critiques avec des déviations de trajectoire plus importantes et une diminution du temps à la collision, comparé aux conducteurs avec les mains sur le volant. Ces difficultés peuvent s'expliquer par le temps nécessaire pour repositionner les mains sur le volant. Les auteurs n'ont pas évalué le vagabondage des participants, mais on peut imaginer qu'une augmentation du vagabondage augmente le risque de collision comparé à des conducteurs qui n'en présentent pas.

Limites

Questionnaire du vagabondage de la pensée et sortie de boucle

Des études utilisant des mesures objectives basées sur des indicateurs physiologiques ont montré une dilatation des pupilles (Franklin et al., 2013; Smallwood et al., 2011), une augmentation du rythme cardiaque (Smallwood et al., 2004) et une activité électroencéphalographie spécifique (Baldwin et al., 2017; Barron et al., 2011; Broadway et al., 2015; Chaparro, 2015; Pepin, 2018; Smallwood et al., 2008) lors du vagabondage de la pensée. Il aurait été intéressant d'utiliser, en complément de nos mesures, des mesures objectives et de déterminer si leur évolution est cohérente avec la courbe estimée du vagabondage.

Les courbes d'évolution du vagabondage ont été créées à partir d'un modèle basé sur l'auto-évaluation faite à la fin du parcours par les participants. Premièrement, il peut être difficile pour les participants d'évaluer eux-mêmes leur niveau de vagabondage. Deuxièmement, ce score mesurait de façon globale le pourcentage de temps passé à penser à autre chose que la conduite. Ce n'est évidemment pas parce que le participant a déclaré avoir passé en moyenne 50% du temps de la conduite automatisée que le score de vagabondage était réellement de 50% tout au long de l'expérimentation. Le niveau de vagabondage a pu fluctuer tout au long de l'expérimentation, et c'est ce que suggèrent les résultats de notre expérimentation. Il aurait été intéressant de pouvoir récupérer ce score à d'autres moments de l'expérimentation pour vérifier que l'évolution du score rapporté correspondait à la courbe estimée. Cependant, récupérer le score de vagabondage avec la technique des sondes « probe-caught » (cf. section A3.4.3) présente également des inconvénients. En effet, elle interrompt le flux naturel de l'activité. Par conséquent, les conducteurs peuvent être interrompus pendant le développement du vagabondage.

G.3. Perspectives et recommandations

Bien que les données cardiaques dans notre première étude n'aient pas fourni les résultats escomptés, l'utilisation de données cardiaques dans la détection des épisodes de vagabondage de la pensée a été montrée dans plusieurs études. Ainsi, il a été constaté que des fréquences cardiaques plus rapides accompagnaient les déficits de performance élevés associés au vagabondage de la pensée chez les personnes souffrant de dysphorie, un état psychiatrique caractérisé par une humeur négative persistante (Smallwood et al., 2007). Le vagabondage de la pensée entraînerait une augmentation de la fréquence cardiaque (Ottaviani et al., 2014; Smallwood et al., 2004). Il semble donc approprié d'étudier le vagabondage de la pensée en utilisant des mesures comportementales et physiologiques. Des augmentations de la fréquence cardiaque ont été observées à la suite d'épisodes autodéclarés de vagabondage de la pensée au volant, ce qui peut refléter l'effort cognitif des conducteurs pour recentrer leur attention (Pepin, 2018). De plus, ces auteurs ont utilisé des fenêtres temporelles d'analyses spécifiques : entre [-5,5s ; +5,5s] au moment de la déclaration de la conscience du vagabondage par le participant. Ainsi, les auteurs ont montré que la fréquence cardiaque était significativement plus basse pendant le vagabondage de la pensée qu'après en avoir pris conscience. Cela suggère que des fenêtres temporelles précises autour des épisodes de vagabondage de la pensée seraient nécessaires pour détecter leur présence par l'utilisation des mesures cardiaques. La combinaison de données cardiaques et de données oculaires pourrait permettre une étude plus approfondie des fluctuations du vagabondage de la pensée avec une augmentation du rythme cardiaque lors d'une fluctuation ascendante et une diminution du rythme cardiaque avec une fluctuation descendante.

Dans l'expérimentation 2, un temps de deux secondes avant la demande de reprise en main a été utilisé soit pour permettre à des conducteurs distraits depuis 5 minutes de reconstruire leur conscience de la situation, soit pour empêcher des conducteurs avec une conscience de la situation élaborée d'acquérir des informations visuelles. Il serait intéressant de reproduire l'expérimentation en faisant varier cette fenêtre de temps afin d'estimer à partir de combien de temps la conscience de la situation élaborée se dégrade, de façon à ce que les conducteurs distraits pendant ce laps de temps aient des résultats similaires au groupe sans conscience de la situation. A l'inverse, il faudrait savoir de combien de temps les conducteurs ont besoin entre la fin de la distraction et la demande de la reprise en main pour obtenir des résultats similaires au groupe avec une conscience de la situation élaborée. Ces résultats permettraient de mieux appréhender la façon dont la conscience de la situation se construit mais également se

déconstruit. Dans l'idée d'un diagnostic de l'état du conducteur connaître ce temps permettrait de pouvoir signaler aux conducteurs à partir de quel moment la perte d'informations visuelles est potentiellement dangereuse.

Même avec 8 secondes pour effectuer la reprise en main et avec une conscience de la situation élaborée, les conducteurs ont eu des difficultés lors de la reprise en main. Environ 1/3 des participants ont eu une collision dans l'expérimentation 2. Il serait peut-être plus judicieux dans des cas critiques que le système automatisé opère une manœuvre de risque minimal (pour un véhicule automatisé de niveau 3) plutôt que de rendre le contrôle du véhicule au conducteur dans une situation dangereuse. Des recherches pourraient alors être menées pour que les systèmes automatisés mesurent en temps réel la criticité de l'environnement. Par exemple, le système automatisé pourrait prendre en compte en temps réel le trafic, l'environnement, la vitesse des véhicules et les distances entre les véhicules parmi les critères de la criticité. Si une demande de reprise en main survient à un moment où le niveau de criticité est déjà trop élevé (par exemple : dans une situation où le conducteur ne pourrait pas faire un évitement par la gauche à cause du trafic si un obstacle apparaît dans sa voie) alors le système automatisé déclencherait automatiquement une manœuvre de risque minimal (pour éviter le risque que le conducteur change de voie sans vérifier son angle mort et percute un véhicule sur la voie de gauche ou effectue trop tardivement un freinage d'urgence).

Conclusion

Les travaux présentés dans ce manuscrit portent sur la façon d'utiliser les stratégies visuelles en conduite automatisée pour évaluer l'état attentionnel des conducteurs, pour des formes de distraction endogènes et exogènes. Les résultats montrent dans l'ensemble qu'il est possible de faire le lien entre certains marqueurs du comportement visuel (fixation critique au moment de la reprise en main, temps passé sans regarder la route, pattern d'exploration) et des processus psychologiques potentiellement important pour la sécurité (conscience de la situation, vagabondage, persévérance). Pour autant, l'observation du comportement visuel ne peut pas permettre à lui seul de caractériser l'état du conducteur. Pour avoir une évaluation plus complète de cet état, il faudrait associer d'autres éléments de diagnostic de son état psychophysologique comme la posture ou la respiration, par exemple. Le projet ANR AutoConduct, dans cette optique, a cherché à établir une combinaison de mesures en temps réel de l'état du conducteur pour adapter la coopération Homme-Machine aux besoins et aux états des conducteurs. L'utilisation d'autres mesures de cet état pourrait permettre de comprendre pourquoi certains participants présentant des stratégies visuelles et des conditions expérimentales similaires réussissent différemment lors de la demande de reprise en main non planifiée et critique. L'objectif serait d'atteindre un diagnostic global intégrant un ensemble d'observations complémentaires du conducteur et permettant in fine d'établir si le conducteur est apte à reprendre en main le véhicule.

Ces études sur l'état du conducteur participent non seulement à assurer la sécurité du véhicule autonome mais également à l'acceptabilité du véhicule autonome par les conducteurs. En effet, 39,1% des conducteurs préfèrent avoir recours à un véhicule ordinaire sur autoroute et 46% des conducteurs préfèrent avoir recours à un véhicule ordinaire en ville (Bel & Kraiem, 2018), il reste donc encore à convaincre le public d'utiliser de tels véhicules. D'après les résultats de l'étude menée par Bel & Kraiem (2018), dans le cadre du projet Autoconduct, la confiance envers les performances techniques et sécuritaires est le plus fort prédicteur de l'intention d'utiliser le véhicule autonome. De plus, ils ont montré que le monitoring des conducteurs, pour mesurer leur état, est accepté dès lorsqu'une contrepartie avantageuse peut en être tirée notamment pour le confort et la sécurité. Ainsi, intégrer des systèmes de diagnostic/monitoring semble essentiel pour l'acceptabilité du véhicule autonome d'où la nécessité de continuer à poursuivre des recherches telles que celles entreprises dans ce doctorat.

Liste des figures

Figure A.1. Modèle comportemental Habiletés-Règles-Connaissances, Rasmussen (1983)....	13
Figure A.2. Modèle hiérarchique de l'activité de conduite, Michon (1985).....	14
Figure A.3. Parallèles entre le modèle de Rasmussen (1983) et le modèle de Michon (1985) selon Hale et al. (1990).....	15
Figure A.4. Niveau d'automatisation du véhicule selon la SAE International (2016).....	17
Figure A.5. Modification de l'activité de conduite de Michon (1985) avec la conduite automatisée de niveau 2. Le conducteur acquiert et transmet des informations aux niveaux stratégique et tactique. Mais il n'acquiert et ne transmet plus d'informations nécessaire au niveau opérationnel qui est géré par le système automatisé.....	20
Figure A.6. Activité du conducteur en conduite automatisée de niveau 3 SAE selon Poisson (2015).....	21
Figure A.7. Modification de l'activité de conduite de Michon (1985) avec la conduite automatisée de niveau 3 SAE. Le système automatisé est responsable des niveaux tactique et opérationnel du véhicule. Le conducteur est impliqué seulement au niveau stratégique.....	22
Figure A.8. Niveaux de la sortie de boucle du conducteur selon Merat et al. (2019).....	25
Figure A.9. Niveaux de conscience de la situation dans le modèle d'Endsley (1995).....	26
Figure A.10. Conscience de la situation dans le processus de traitement de l'information en conduite (adapté de Ma and Kaber 2005).....	27
Figure A.11. Mouvements oculaires sans précision d'instructions (en rouge) et avec la recherche d'une personne regardant par une fenêtre de la tour (en vert). (Cité par Wade (2020)).....	43
Figure A.12. Illustration provenant de Hayhoe & Ballard (2005). Fixations réalisées par un participant lors de la fabrication d'un sandwich dans l'étude de Hayhoe et al. (2003). En rouge les saccades et en jaune les fixations (plus le diamètre du cercle est grand plus la fixation est longue). Les fixations sont dirigées sur les objets pertinents pour la tâche.....	44
Figure A.13. Distribution du regard par rapport au point tangent (Mars & Navarro (2012))....	48
Figure A.14. Aires d'intérêt (Carsten et al., (2012)).....	49

Figure A.15. Indicateurs visuels déterminants pour prédire le score de vagabondage, en vert les transitions entre les aires qui permettent de diminuer le score de vagabondage et en rouge les transitions qui augmentent le score de vagabondage (Schnebelen et al. (2020)).....	52
Figure A.16. Composant du signal ECG et évènements électriques du cycle cardiaque.....	53
Figure C.1. Simulateur de conduite du LS2N.....	58
Figure C.2. Pictogrammes affichées sur la l’IHM de la tablette: A: conduite autonome disponible; B: conduite autonome activée; C: demande de reprise en main non planifiée (8s); D: demande de reprise en main de fin de zone de conduite autonome (45s).....	59
Figure D.1. L’activité de calcul mental. A gauche : la première phase du calcul facile (0-6 secondes). A Droite : la phase finale de l’activité de calcul difficile avec le cercle de réponse (6-10 secondes).....	61
Figure D.2. Cas critique : du véhicule le plus à gauche à celui le plus à droite ; véhicule en bleu : véhicule qui dépasse ; véhicule en vert : véhicule du participant ; véhicule en blanc : véhicule de tête ; véhicule en rouge : véhicule obstacle.....	62
Figure D.3. Organisation des essais.....	63
Figure D.4. Les 2 minutes de « baseline » et les 2 minutes de conduite automatisée avant la demande de reprise en main non planifiée et critique servant pour le calcul du ratio des données cardiaques.....	64
Figure D.5. Distribution des aires d’intérêt. En vert : les aires pour la situation. En rouge : les aires pour la distraction.....	65
Figure D.6. Score du NASA-TLX par condition (Facile : activité facile ; Facile-R : répétition de l’activité facile ; Difficile : activité difficile ; Difficile-R : répétition de l’activité difficile).....	67
Figure D.7. A. Nombre de fixation sur la situation. B. Temps cumulé des fixations sur la situation. C. Nombre de fixations, sur la situation, inférieur à deux secondes. D. Nombre de fixations, sur la situation, supérieur à deux secondes.....	69
Figure D.8. A. Nombre de fixation sur la situation. B. Temps cumulé des fixations sur la situation. C. Nombre de fixations, sur la situation, inférieur à deux secondes. D. Nombre de fixations, sur la situation, supérieur à deux secondes.....	70

Figure D.9. Divisions en 13 zones de l'environnement de conduite.....	71
Figure E.1. Cas critique.....	77
Figure E.2. Chronologie des conditions expérimentales (NDT : activité non liée à la conduite).....	78
Figure E.3. A. Simulateur du LS2N. B. Aires d'intérêt considéré pour l'analyse du comportement visuel : la route en gris (central screen), le rétroviseur gauche (LM) et le rétroviseur central (CM) en bleu, la tablette (tablet) en orange.....	79
Figure E.4. Pourcentage des participants qui ont eu une collision dans chaque condition.....	81
Figure E.5. Pourcentage des participants dans chaque condition expérimentale qui avaient conscience de VR1 au moment de la demande de la reprise en main.....	82
Figure E.6. Temps moyen entre la demande de reprise en main et la première fixation sur la route ou les rétroviseurs.....	83
Figure E.7. Pourcentage de participant ayant regardé le rétroviseur gauche et / ou le rétroviseur central en fonction des conditions expérimentales.....	83
Figure E.8. Influence de la condition expérimentale sur la distribution des fixations pendant la phase critique après la demande de reprise en main.....	84
Figure E.9. Pourcentage du temps passé, pendant les 3 secondes après la reprise en main, sur A. la route, B. la tablette, C. les rétroviseurs, en fonction de la condition expérimentale.....	86
Figure F.1. Étapes de l'estimation du vagabondage et de son évolution à partir des données oculaires	94
Figure F.2. Etapes de la construction du modèle de l'estimation du niveau de vagabondage jusqu'à la sélection du meilleur modèle en fonctions du comportement visuel.....	97
Figure F.3. Représentation du décalage du début des y dû à la taille de la fenêtre FG.....	100
Figure F.4. Score moyen du vagabondage de la pensée en fonction de la condition expérimentale.....	102
Figure F.5. Courbes du score estimé du vagabondage de la pensée en fonction des conditions expérimentales.....	103

Figure F.6. Tendances des courbes de vagabondage en fonction de la condition expérimentale.....105

Figure F.7. Fluctuations des courbes de vagabondage en fonction de la condition expérimentale.....106

Figure G.1. A. Les conducteurs réalisent une activité non liée à la conduite pendant laquelle ils alternent entre un état sur la boucle et un état hors de la boucle. Au moment de la reprise en main, comme ils regardent la route, ils sont sur la boucle. B. Les conducteurs réalisent une activité non liée à la conduite pendant laquelle ils alternent entre un état sur la boucle et un état hors de la boucle. Au moment de la reprise, comme ils regardent la tablette, ils sont hors de la boucle.....111

Figure G.2. Transitions entre les différents états du concept de la sortie de boucle en prenant en compte la conscience de la situation (SA). A. Le conducteur est hors de la boucle jusqu'à la demande de reprise en main (similaire au groupe Full_SA, cf. section E.2.4). B. Le conducteur est hors de la boucle depuis longtemps et passe sur la boucle juste avant la demande de reprise en main (similaire au groupe NDT_SA, cf. section E.2.4). C. Le conducteur est sur la boucle de conduite avec une conscience de la situation élaborée puis est hors de la boucle un court instant avant la demande de reprise en main (similaire au groupe SA_NDT, cf. section E.2.4). D. Le conducteur est en permanence sur la boucle et a une conscience de la situation élaborée (similaire au groupe Full_SA, cf. section E.2.4).....113

Figure G3. A. Les conducteurs sont distraits depuis longtemps au moment de la demande de reprise en main, ils disposent d'une alerte visuelle et d'aucune aide à la conduite pour les aider à reconstruire la conscience de la situation (similaire au groupe Full_NDT, cf. section E.2.4) B. Les conducteurs sont distraits depuis longtemps et n'ont pas d'alerte visuelle. C. Les conducteurs sont distraits depuis longtemps et n'ont pas d'alerte visuelle et dispose d'aide à la conduite pour reconstruire la conscience de la situation.....115

Liste des tables

Table D.1. Lien entre la localisation du regard au moment de la demande de reprise en main et de la qualité de la reprise en main.....	71
Table D.2. Lien entre la difficulté de l'activité non liée à la conduite et de la qualité de la reprise en main.....	72
Table F.1. Meilleur modèle pour la méthode de régression des moindres carrés.....	103
Table F.2. Paramètres a, b, c, d, e, et f pour T1 en fonction des conditions.....	104
Table F.3. Paramètres a, b, c, d, e, et f pour T2 en fonction des conditions.....	105

Références

- Allen, T. M., Lumenfeld, H., & Alexander, G. J. (1971). Driver information needs. *Highway Research Record*, 366, Article HS-011 999. <https://trid.trb.org/view/116960>
- Amato, J.-N. (2011). *Effets de la prise de médicaments psychotropes et de l'âge du conducteur sur la conduite, l'éveil et les fonctions attentionnelles*. [Phdthesis, Université de Caen].
<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00597555>
- Anderson, J. M., Kalra, N., Stanley, K. D., Sorensen, P., Samaras, C., & Oluwatola, T. A. (2016). *Autonomous Vehicle Technology : A Guide for Policymakers*. RAND Corporation.
https://www.rand.org/pubs/research_reports/RR443-2.html
- Anstis, S. (1989). Models and Experiments on Directional Selectivity. *Working models of human perception*, 233-249. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-238050-1.50016-0>
- Anstis, S. M. (1974). Letter : A chart demonstrating variations in acuity with retinal position. *Vision Research*, 14(7), 589-592. [https://doi.org/10.1016/0042-6989\(74\)90049-2](https://doi.org/10.1016/0042-6989(74)90049-2)
- Arnedt, J. T., Wilde, G., Munt, P., & Maclean, A. (2000). Simulated driving performance following prolonged wakefulness and alcohol consumption : Separate and combined contributions to impairment. *Journal of sleep research*, 9, 233-241. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2869.2000.00216.x>
- Arnedt, J. T., Wilde, G., Munt, P., & Maclean, A. (2001). How do prolonged wakefulness and alcohol compare in the decrements they produce on a simulated driving task? *Accident; analysis and prevention*, 33, 337-344. [https://doi.org/10.1016/S0001-4575\(00\)00047-6](https://doi.org/10.1016/S0001-4575(00)00047-6)
- Autoconduct. (2016, 2021). *Projet Autoconduct*. <https://autoconduct.fr/accueil/>
- Autodrive. (2021). *AUTODRIVE*. Université Lumière Lyon 2; Webmestre Université Lumière Lyon 2.
<https://www.univ-lyon2.fr/recherche/les-projets-de-recherche/autodrive>

- Baird, B., Smallwood, J., & Schooler, J. W. (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>
- 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>
- Ballard, D., Hayhoe, M., & Pelz, J. (1995). Memory Representations in Natural Tasks. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 7, 66-80. <https://doi.org/10.1162/jocn.1995.7.1.66>
- Banks, V. A., Eriksson, A., O'Donoghue, J., & Stanton, N. A. (2018). Is partially automated driving a bad idea? Observations from an on-road study. *Applied Ergonomics*, 68, 138-145.
<https://doi.org/10.1016/j.apergo.2017.11.010>
- 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>
- Bel, M., & Kraiem, S. (2018). From Autonomous Driving Acceptability to Autonomous Vehicles' Functions Acceptability : A Questionnaire Study Among 2708 Participants. *ICAP*.
https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/Monographie_Acceptabilite_VA.pdf
- Berthié, G., Lemercier, C., Paubel, P.-V., Cour, M., Fort, A., Galéra, C., Lagarde, E., Gabaude, C., & Maury, B. (2015). The restless mind while driving : Drivers' thoughts behind the wheel. *Accident Analysis & Prevention*, 76, 159-165. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2015.01.005>
- Bianchi Piccinini, G. F., Rodrigues, C. M., Leitão, M., & Simões, A. (2014). Driver's behavioral adaptation to Adaptive Cruise Control (ACC) : The case of speed and time headway. *Journal of Safety Research*, 49, 77.e1-84. <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2014.02.010>
- Billman, G. (2011). Heart Rate Variability – A Historical Perspective. *Frontiers in Physiology*, 2.
<https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fphys.2011.00086>

- Biondi, F., Coleman, J. R., Cooper, J. M., & Strayer, D. L. (2016). Average heart rate for driver monitoring systems. *International Journal of Human Factors and Ergonomics*, 4(3-4).
<https://trid.trb.org/view/1469933>
- Blaauw, G. J. (1982). Driving Experience and Task Demands in Simulator and Instrumented Car : A Validation Study. *Human Factors*, 24(4), 473-486.
<https://doi.org/10.1177/001872088202400408>
- Borji, A., & Itti, L. (2014). Defending Yarbus : Eye movements reveal observers' task. *Journal of Vision*, 14(3), 29. <https://doi.org/10.1167/14.3.29>
- Borowsky, A., Horrey, W. J., Liang, Y., Garabet, A., Simmons, L., & Fisher, D. L. (2015). The Effects of Momentary Visual Disruption on Hazard Anticipation and Awareness in Driving. *Traffic Injury Prevention*, 16(2), 133-139. <https://doi.org/10.1080/15389588.2014.909593>
- Bourrelly, A., Jacobé de Naurois, C., Zran, A., Rampillon, F., Vercher, J.-L., & Bourdin, C. (2019). Long automated driving phase affects take-over performance. *IET Intelligent Transport Systems*, 13. <https://doi.org/10.1049/iet-its.2019.0018>
- Bridgeman, B., Hendry, D., & Stark, L. (1975). Failure to detect displacement of the visual world during saccadic eye movements. *Vision Research*, 15(6), 719-722.
[https://doi.org/10.1016/0042-6989\(75\)90290-4](https://doi.org/10.1016/0042-6989(75)90290-4)
- 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., & Samyn, N. (2004). Effects of MDMA (ecstasy), and multiple drugs use on (simulated) driving performance and traffic safety. *Psychopharmacology*, 173(3-4), 440-445. <https://doi.org/10.1007/s00213-003-1714-5>
- Brookhuis, K., Waard, D. D., & Janssen, W. (2001). Behavioural impacts of Advanced Driver Assistance Systems-an overview. *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, 1.
<https://doi.org/10.18757/EJTIR.2001.1.3.3667>

- Brown, I. D., Great Britain, & Department for Transport. (2005). *Review of the « Looked but failed to see » accident causation factor*. Dept. for Transport.
- Bueno, M., Dogan, E., Hadj Selem, F., Monacelli, E., Boverie, S., & Guillaume, A. (2016). How different mental workload levels affect the take-over control after automated driving. *2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 2040-2045.
<https://doi.org/10.1109/ITSC.2016.7795886>
- Buswell, G. T. (1935). *How People Look At Pictures : A Study Of The Psychology Of Perception In Art*. Literary Licensing, LLC.
- Cahour, B., Forzy, J.-F., & KOUSTANAI, A. (2021). Driving a partially automated car with the hands on or off the steering wheel : Users' subjective experiences. *In Proceedings of the 21st Congress of the IEA, vol.3: Sector Based Ergonomics, Vancouver, Canada*. <https://hal.telecom-paris.fr/hal-03264792>
- Caird, J. K., Johnston, K. A., Willness, C. R., Asbridge, M., & Steel, P. (2014). A meta-analysis of the effects of texting on driving. *Accident Analysis & Prevention*, *71*, 311-318.
<https://doi.org/10.1016/j.aap.2014.06.005>
- Callard, F., Smallwood, J., Golchert, J., & Margulies, D. (2013). The era of the wandering mind? Twenty-first century research on self-generated mental activity. *Frontiers in Psychology*, *4*, 891. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00891>
- Calvi, A., D'Amico, F., Ciampoli, L. B., & Ferrante, C. (2020). Evaluation of driving performance after a transition from automated to manual control : A driving simulator study. *Transportation Research Procedia*, *45*, 755-762. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.02.101>
- Carskadon, M. A., & Dement, W. C. (1982). Nocturnal determinants of daytime sleepiness. *Sleep*, *5*, Suppl 2, S73-81. <https://doi.org/10.1093/sleep/5.s2.s73>
- Carsten, O., Lai, F., Barnard, Y., Jamson, A., & Merat, N. (2012). Control Task Substitution in Semiautomated Driving : Does It Matter What Aspects Are Automated? *Human factors*, *54*, 747-761. <https://doi.org/10.1177/0018720812460246>

- Carsten, O., & Martens, M. (2019). How can humans understand their automated cars? HMI principles, problems and solutions. *Cognition, Technology & Work*, 21.
<https://doi.org/10.1007/s10111-018-0484-0>
- 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]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01314225>
- Choi, D., Sato, T., Ando, T., Abe, T., Akamatsu, M., & Kitazaki, S. (2020). Effects of cognitive and visual loads on driving performance after take-over request (TOR) in automated driving. *Applied Ergonomics*, 85, 103074. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2020.103074>
- Choi, J. K., & Ji, Y. G. (2015). Investigating the Importance of Trust on Adopting an Autonomous Vehicle. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 31(10), 692-702.
<https://doi.org/10.1080/10447318.2015.1070549>
- Choudhary, P., & Velaga, N. R. (2017). Mobile phone use during driving : Effects on speed and effectiveness of driver compensatory behaviour. *Accident; Analysis and Prevention*, 106, 370-378. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2017.06.021>
- CoCoVelA. (2013, 2017). *Coopération Conducteur Véhicule Intelligent Autonome*.
<http://www.uphf.fr/cocoveia/fr/presentation>
- Cooper, J., Yager, C., & Chrysler, S. T. (2011). *An investigation of the effects of reading and writing text-based messages while driving* (SWUTC/11/476660-00024-1; p. 69). Texas Transportation Institute. <https://cts.tti.tamu.edu/files/2011/10/textingdriving-study-100511.pdf>
- Crisler, M. C., Brooks, J. O., Ogle, J. H., Guirl, C. D., Alluri, P., & Dixon, K. K. (2008). Effect of Wireless Communication and Entertainment Devices on Simulated Driving Performance. *Transportation Research Record*, 2069(1), 48-54. <https://doi.org/10.3141/2069-07>
- Cyganski, R., Fraedrich, E., & Lenz, B. (2015). *Travel-time valuation for automated driving : A use-case-driven study*. In proceedings of the 94th annual meeting of the transportation research board, Washington. <https://elib.dlr.de/95260/>

- Damböck, D., & Bengler, K. (2012). Übernahmezeiten beim hochautomatisierten Fahren [Takeover times for highly automated driving]. *Tagung Fahrerassistenz, 15*, 16-28.
<https://mediatum.ub.tum.de/doc/1142102/file.pdf>
- Damböck, D., Weißgerber, T., Kienle, M., & Bengler, K. (2013). Requirements for cooperative vehicle guidance. *16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2013)*, 1656-1661. <https://doi.org/10.1109/ITSC.2013.6728467>
- DeAngelus, M., & Pelz, J. (2009). Top-down control of eye movements : Yarbus revisited. *Visual Cognition - VIS COGN, 17*, 790-811. <https://doi.org/10.1080/13506280902793843>
- Dickmanns, E., Behringer, R., Dickmanns, D., Hildebrandt, T., Maurer, M., Thomanek, F., & Schiehlen, J. (1994). The seeing passenger car « VaMoRs-P ». *Proceedings of the Intelligent Vehicles '94 Symposium*. <https://doi.org/10.1109/IVS.1994.639472>
- Dingus, T. A., Guo, F., Lee, S., Antin, J. F., Perez, M., Buchanan-King, M., & Hankey, J. (2016). Driver crash risk factors and prevalence evaluation using naturalistic driving data. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 113*(10), 2636-2641.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1513271113>
- Donges, E. (1978). A two-level model of driver steering behavior. *Human Factors, 20*(6), 691-707.
<https://doi.org/10.1177/001872087802000607>
- 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.
<https://doi.org/10.1177/0018720809353319>
- Droll, J. A., Hayhoe, M. M., Triesch, J., & Sullivan, B. T. (2005). Task demands control acquisition and storage of visual information. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance, 31*(6), 1416-1438. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.31.6.1416>
- Du, N., Yang, X. J., & Zhou, F. (2020). Psychophysiological responses to takeover requests in conditionally automated driving. *Accident Analysis & Prevention, 148*, 105804.
<https://doi.org/10.1016/j.aap.2020.105804>

- Durso, F. T., Hackworth, C. A., Truitt, T. R., Crutchfield, J., & Nikolic, D. (1999). Situation awareness as a predictor of performance in en route air traffic controllers. *Air Traffic Control Quarterly* 6(1):15. <https://doi.org/10.2514/atcq.6.1.1>
- Ebrahim, I. O., Shapiro, C. M., Williams, A. J., & Fenwick, P. B. (2013). Alcohol and sleep I : Effects on normal sleep. *Alcoholism, Clinical and Experimental Research*, 37(4), 539-549. <https://doi.org/10.1111/acer.12006>
- Egloff, E. (2014, mai 28). Google dévoile son prototype de voiture électrique sans conducteur. *LE FIGARO*. <https://www.lefigaro.fr/secteur/high-tech/2014/05/28/32001-20140528ARTFIG00367-google-devoile-son-prototype-de-voiture-electrique-sans-conducteur.php>
- Endsley, M. R. (1995). Measurement of Situation Awareness in Dynamic Systems. *Human Factors*, 37(1), 65-84. <https://doi.org/10.1518/001872095779049499>
- Endsley, M. R., & Kiris, E. O. (1995). The Out-of-the-Loop Performance Problem and Level of Control in Automation. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 37(2), 381-394. <https://doi.org/10.1518/001872095779064555>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2005.04.012>
- Eriksson, A., & Stanton, N. A. (2017). Takeover Time in Highly Automated Vehicles : Noncritical Transitions to and From Manual Control. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 59(4), 689-705. <https://doi.org/10.1177/0018720816685832>
- European Eureka Project. (1987). *PROgramMme for a European Traffic of Highest Efficiency and Unprecedented Safety (PROMETHEUS)*.
- European Transport Safety Council. (2016). *Prioritising the Safety Potential of Automated Driving in Europe*. ADVI | Australia and New Zealand Driverless Vehicle Initiative.

<https://advi.org.au/media-centre/prioritising-the-safety-potential-of-automated-driving-in-europe/>

Feldhütter, A., Gold, C., Schneider, S., & Bengler, K. (2017). How the duration of automated driving influences take-over performance and gaze behavior. *(Heidelberg: Springer)*, 309-318.

Feldhütter, A., Kroll, D., & Bengler, K. (2018). Wake Up and Take Over ! The Effect of Fatigue on the Take-over Performance in Conditionally Automated Driving. *2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 2080-2085.

<https://doi.org/10.1109/ITSC.2018.8569545>

Feldhütter, A., Ruhl, A., Feierle, A., & Bengler, K. (2019). The Effect of Fatigue on Take-over Performance in Urgent Situations in Conditionally Automated Driving. *2019 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC)*, 1889-1894.

<https://doi.org/10.1109/ITSC.2019.8917183>

Forzy, J.-F., Cahour, B., & Koustanai, A. (2021). Which impacts of the hands-off modality on drivers disconnection for level automation driving systems? *In Proceedings of the 7th International Conference on DDI, Lyon, France*. <https://hal.telecom-paris.fr/hal-03100203>

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. *Quarterly Journal of Experimental Psychology (2006)*, 66(12), 2289-2294.

<https://doi.org/10.1080/17470218.2013.858170>

Friedrich, B. (2016). The Effect of Autonomous Vehicles on Traffic. *Autonomous Driving: Technical, Legal and Social Aspects*, 317-334. https://doi.org/10.1007/978-3-662-48847-8_16

Friedrichs, F., & Yang, B. (2010). Drowsiness monitoring by steering and lane data based features under real driving conditions. *2010 18th European Signal Processing Conference*, 209-213.

Frissen, I., & Mars, F. (2014). The Effect of Visual Degradation on Anticipatory and Compensatory Steering Control. *Quarterly journal of experimental psychology (2006)*, 67, 499-507.

<https://doi.org/10.1080/17470218.2013.819518>

- Fujiwara, K., Abe, E., Kamata, K., Nakayama, C., Suzuki, Y., Yamakawa, T., Hiraoka, T., Kano, M., Sumi, Y., Masuda, F., Matsuo, M., & Kadotani, H. (2019). Heart Rate Variability-Based Driver Drowsiness Detection and Its Validation With EEG. *IEEE Transactions on Bio-Medical Engineering*, 66(6), 1769-1778. <https://doi.org/10.1109/TBME.2018.2879346>
- Furman, G. D., Baharav, A., Cahan, C., & Akselrod, S. (2008). Early detection of falling asleep at the wheel : A Heart Rate Variability approach. *2008 Computers in Cardiology*, 1109-1112. <https://doi.org/10.1109/CIC.2008.4749240>
- Galera, C., Orriols, L., M'Bailara, K., Laborey, M., Contrand, B., Ribereau-Gayon, R., Masson, F., Bakiri, S., Gabaude, C., Fort, A., Maury, B., Lemercier, C., Cours, M., Bouvard, M.-P., & Lagarde, E. (2012). Mind wandering and driving : Responsibility case-control study. *BMJ*, 345(dec13 8), e8105-e8105. <https://doi.org/10.1136/bmj.e8105>
- Geden, M., & Feng, J. (2015). Simulated Driving Environment Impacts Mind Wandering. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 59(1), 776-780. <https://doi.org/10.1177/1541931215591240>
- Giambra, L. M. (1995). A laboratory method for investigating influences on switching attention to task-unrelated imagery and thought. *Consciousness and Cognition*, 4(1), 1-21. <https://doi.org/10.1006/ccog.1995.1001>
- Gold, C., Damböck, D., Lorenz, L., & Bengler, K. (2013). "Take over!" How long does it take to get the driver back into the loop? *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 57(1), 1938-1942. <https://doi.org/10.1177/1541931213571433>
- Gold, C., Körber, M., Lechner, D., & Bengler, K. (2016). Taking Over Control From Highly Automated Vehicles in Complex Traffic Situations The Role of Traffic Density. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 58, 642–652. <https://doi.org/10.1177/0018720816634226>
- Goodall, N. J. (2014). Machine Ethics and Automated Vehicles. *arXiv:2010.15665 [cs]*, 93-102. https://doi.org/10.1007/978-3-319-05990-7_9

- Gouraud, J., Delorme, A., & Berberian, B. (2017). Autopilot, Mind Wandering, and the Out of the Loop Performance Problem. *Frontiers in Neuroscience, 11*, 541.
<https://doi.org/10.3389/fnins.2017.00541>
- Gouraud, J., Delorme, A., & Berberian, B. (2018). Influence of automation on mind wandering frequency in sustained attention. *Consciousness and Cognition, 66*, 54-64.
<https://doi.org/10.1016/j.concog.2018.09.012>
- Gouvernement Français. (2019a). *Article 125—LOI n° 2019-486 du 22 mai 2019 relative à la croissance et la transformation des entreprises (1)—Légifrance*.
https://www.legifrance.gouv.fr/loda/article_lc/JORFARTI000038496320/
- Gouvernement Français. (2019b). *LOI n° 2019-1428 du 24 décembre 2019 d'orientation des mobilités (1)*. [https://www.ecologie.gouv.fr/mobilite-routiere-automatisee-et-connectee#:~:text=PDF%20%2D%201.89%20Mo\),Cadre%20%3%A9gislatif%20et%20r%3%A9glementaire%20du%20d%3%A9ploiement%20des%20v%3%A9hicules%20et%20des,voie%20publique%20de%20v%3%A9hicules%20automatis%3%A9s](https://www.ecologie.gouv.fr/mobilite-routiere-automatisee-et-connectee#:~:text=PDF%20%2D%201.89%20Mo),Cadre%20%3%A9gislatif%20et%20r%3%A9glementaire%20du%20d%3%A9ploiement%20des%20v%3%A9hicules%20et%20des,voie%20publique%20de%20v%3%A9hicules%20automatis%3%A9s).
- Gouvernement Français. (2016). *Ordonnance n° 2016-1057 du 3 août 2016 relative à l'expérimentation de véhicules à délégation de conduite sur les voies publiques*.
<https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000032966695/>
- Gouvernement Français. (2020). *Stratégie Nationale de développement de la mobilité routière automatisée 2020-2022*. https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/20171_strategie-nationale-vehicule%20automatise_web_0.pdf
- Greenberg, J., Tijerina, L., Curry, R., Artz, B., Cathey, L., Kochhar, D., Kozak, K., Blommer, M., & Grant, P. (2003). Driver Distraction : Evaluation with Event Detection Paradigm. *Transportation Research Record, 1843*(1), 1-9. <https://doi.org/10.3141/1843-01>

- Greene, M. R., Liu, T., & Wolfe, J. M. (2012). Reconsidering Yarbus : A failure to predict observers' task from eye movement patterns. *Vision Research*, *62*, 1-8.
<https://doi.org/10.1016/j.visres.2012.03.019>
- Greenlee, E. T., DeLucia, P. R., & Newton, D. C. (2018). Driver Vigilance in Automated Vehicles : Hazard Detection Failures Are a Matter of Time. *Human Factors*, *60*(4), 465-476.
<https://doi.org/10.1177/0018720818761711>
- Gugerty, L., Rando, C., Rakauskas, M., Brooks, J., & Olson, H. (2003). Differences in Remote versus in-Person Communications While Performing a Driving Task. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, *47*, 1855-1859.
<https://doi.org/10.1177/154193120304701605>
- Hack, M. A., Choi, S. J., Vijayapalan, P., Davies, R. J., & Stradling, J. R. (2001). Comparison of the effects of sleep deprivation, alcohol and obstructive sleep apnoea (OSA) on simulated steering performance. *Respiratory Medicine*, *95*(7), 594-601.
<https://doi.org/10.1053/rmed.2001.1109>
- Hale, A. R., Stoop, J. A., & Hommels, J. (1990). Human error models as predictors of accident scenarios for designers in road transport systems. *Ergonomics*, *33*.
<https://doi.org/10.1080/00140139008925339>
- Haraldsson, P. O., Carenfelt, C., Laurell, H., & Törnros, J. (1990). Driving vigilance simulator test. *Acta Oto-Laryngologica*, *110*(1-2), 136-140. <https://doi.org/10.3109/00016489009122528>
- Harbluk, J. L., Noy, Y. I., & Eizenman, M. (2002). *The impact of cognitive distraction on driver visual behaviour and vehicle control*. Ottawa, Canada: Ergonomics Division, Road Safety Directorate and Motor Vehicle Regulation Directorate. <https://trid.trb.org/view/643031>
- Harper, C. D., Hendrickson, C. T., Mangones, S., & Samaras, C. (2016). Estimating potential increases in travel with autonomous vehicles for the non-driving, elderly and people with travel-restrictive medical conditions. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, *72*, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2016.09.003>

- Hayes, B., & Lives, H. W. (2011). Leave the Driving to It. *American Scientist* 99(5), 362-366.
<https://doi.org/10.1511/2011.92.362>
- Hayhoe, M. (2000). Vision Using Routines : A Functional Account of Vision. *Visual Cognition*, 7(1-3), 43-64. <https://doi.org/10.1080/135062800394676>
- Hayhoe, M., & Ballard, D. (2005). Eye movements in natural behavior. *Trends in Cognitive Sciences*, 9(4), 188-194. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2005.02.009>
- Hayhoe, M., Shrivastava, A., Mruczek, R., & Pelz, J. B. (2003). Visual memory and motor planning in a natural task. *Journal of Vision*, 3(1), 49-63. <https://doi.org/10.1167/3.1.6>
- He, J., Becic, E., Lee, Y.-C., & McCarley, J. S. (2011). Mind Wandering Behind the Wheel : Performance and Oculomotor Correlates. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 53(1), 13-21. <https://doi.org/10.1177/0018720810391530>
- Heikoop, D. D., de Winter, J. C. F., van Arem, B., & Stanton, N. A. (2018). Effects of mental demands on situation awareness during platooning : A driving simulator study. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 58, 193-209.
<https://doi.org/10.1016/j.trf.2018.04.015>
- Heine, T., Lenis, G., Reichensperger, P., Beran, T., Doessel, O., & Deml, B. (2017). Electrocardiographic features for the measurement of drivers' mental workload. *Applied Ergonomics*, 61, 31-43.
<https://doi.org/10.1016/j.apergo.2016.12.015>
- Henderson, J. M. (2003). Human gaze control during real-world scene perception. *Trends in Cognitive Sciences*, 7(11), 498-504. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2003.09.006>
- Henderson, J. M., Shinkareva, S. V., Wang, J., Luke, S. G., & Olejarczyk, J. (2013). Predicting Cognitive State from Eye Movements. *PLOS ONE*, 8(5), e64937.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0064937>
- Hergeth, S., Lorenz, L., Vilimek, R., & Krems, J. F. (2016). Keep Your Scanners Peeled : Gaze Behavior as a Measure of Automation Trust During Highly Automated Driving. *Human Factors: The*

- Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 58(3), 509-519.
<https://doi.org/10.1177/0018720815625744>
- Hidalgo-Muñoz, A. R., Béquet, A. J., Astier-Juvenon, M., Pépin, G., Fort, A., Jallais, C., Tattegrain, H., & Gabaude, C. (2018). Respiration and Heart Rate Modulation Due to Competing Cognitive Tasks While Driving. *Frontiers in Human Neuroscience*, 12, 525.
<https://doi.org/10.3389/fnhum.2018.00525>
- Horne, J., & Reyner, L. (1999). Vehicle accidents related to sleep : A review. *Occupational and Environmental Medicine*, 56(5), 289-294. <https://doi.org/10.1136/oem.56.5.289>
- Horrey, W. J., Lesch, M. F., & Garabet, A. (2008). Assessing the awareness of performance decrements in distracted drivers. *Accident; Analysis and Prevention*, 40(2), 675-682.
<https://doi.org/10.1016/j.aap.2007.09.004>
- Horswill, M., & Mckenna, F. (2004). Drivers' hazard perception ability : Situation awareness on the road. *A cognitive approach to situation awareness: Theory and application*, 155-175.
- Horswill, M. S., Hill, A., & Wetton, M. (2015). Can a video-based hazard perception test used for driver licensing predict crash involvement? *Accident Analysis & Prevention*, 82, 213-219.
<https://doi.org/10.1016/j.aap.2015.05.019>
- Hosking, S., Young, K., & Regan, M. (2009). The Effects of Text Messaging on Young Drivers. *Human factors*, 51, 582-592. <https://doi.org/10.1177/0018720809341575>
- Ingre, M., Åkerstedt, T., Peters, B., Anund, A., & Kecklund, G. (2006). Subjective sleepiness, simulated driving performance and blink duration : Examining individual differences. *Journal of Sleep Research*, 15(1), 47-53. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2869.2006.00504.x>
- Innes-Jones, G., & Scandpower, L. R. (2012). Complacency as a Casual Factor in Accidents-Fact or Fallacy? *Symposium Series No. 158*. 2012 IChemE.
- Jamson, A. H., Merat, N., Carsten, O. M. J., & Lai, F. C. H. (2013). Behavioural changes in drivers experiencing highly-automated vehicle control in varying traffic conditions. *Transportation*

Research Part C: Emerging Technologies, 30, 116-125.

<https://doi.org/10.1016/j.trc.2013.02.008>

Jian, J.-Y., Bisantz, A., & Drury, C. (2000). Foundations for an Empirically Determined Scale of Trust in Automated Systems. *International Journal of Cognitive Ergonomics*, 4, 53-71.

https://doi.org/10.1207/S15327566IJCE0401_04

Jian, J.-Y., Bisantz, A. M., & Drury, C. G. (1998). Towards an Empirically Determined Scale of Trust in Computerized Systems : Distinguishing Concepts and Types of Trust. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 42(5), 501-505.

<https://doi.org/10.1177/154193129804200512>

Jovancevic, J., Sullivan, B., & Hayhoe, M. (2006). Control of attention and gaze in complex environments. *Journal of Vision*, 6(12), 9. <https://doi.org/10.1167/6.12.9>

Juniper, M., Hack, M. A., George, C. F., Davies, R. J., & Stradling, J. R. (2000). Steering simulation performance in patients with obstructive sleep apnoea and matched control subjects. *The European Respiratory Journal*, 15(3), 590-595. <https://doi.org/10.1034/j.1399-3003.2000.15.27.x>

Kaber, D. B., & Endsley, M. R. (1997). Out-of-the-loop performance problems and the use of intermediate levels of automation for improved control system functioning and safety. *Process Safety Progress*, 16(3), 126-131. <https://doi.org/10.1002/prs.680160304>

Kaber, D. B., & Endsley, M. R. (2004). The effects of level of automation and adaptive automation on human performance, situation awareness and workload in a dynamic control task. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 5(2), 113-153.

<https://doi.org/10.1080/1463922021000054335>

Kaduk, S. I., Roberts, A. P. J., & Stanton, N. A. (2021). Driving performance, sleepiness, fatigue, and mental workload throughout the time course of semi-automated driving—Experimental data from the driving simulator. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, 31(1), 143-154. <https://doi.org/10.1002/hfm.20875>

- Kahneman, D., Krueger, A. B., Schkade, D. A., Schwarz, N., & Stone, A. A. (2004). A survey method for characterizing daily life experience : The day reconstruction method. *Science (New York, N.Y.)*, 306(5702), 1776-1780. <https://doi.org/10.1126/science.1103572>
- Karrer-Gauß, K., Vöhringer-Kuhnt, T., Baumgarten, T., & Briest, S. (2004). The role of individual differences in driver fatigue prediction. In *Proceeding of the Third International Conference on Traffic and Transport Psychology, Nottingham, United Kingdom*, 5-9.
- Kass, S. J., Cole, K. S., & Stanny, C. J. (2007). Effects of distraction and experience on situation awareness and simulated driving. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 10(4), 321-329. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2006.12.002>
- Kondo, S., Asanuma, N., Ishida, S., Ikegaya, M., & Tanaka, J. (1999). *Evaluation of driver assistance system*. Proceedings of 6th world congress on intelligent transport systems (ITS), Toronto, Canada. <https://trid.trb.org/view/714216>
- Körber, M., Baseler, E., & Bengler, K. (2018). Introduction matters : Manipulating trust in automation and reliance in automated driving. *Applied Ergonomics*, 66, 18-31. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2017.07.006>
- Körber, M., Cingel, A., Zimmermann, M., & Bengler, K. (2015). Vigilance Decrement and Passive Fatigue Caused by Monotony in Automated Driving. *Procedia Manufacturing*, 3, 2403-2409. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.07.499>
- Koustanai, A., Boloix, E., Van Elslande, P., & Bastien, C. (2008). Formation of expectations while driving : Influence of the possibility and the necessity to anticipate on the ability to identify danger. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 11(2). <https://trid.trb.org/view/849868>
- Kovacs, F. S., McLeod, S., & Curtis, C. (2020). Aged mobility in the era of transportation disruption : Will autonomous vehicles address impediments to the mobility of ageing populations? *Travel Behaviour and Society*, 20, 122-132. <https://doi.org/10.1016/j.tbs.2020.03.004>

- Kubose, T. T., Bock, K., Dell, G. S., Garnsey, S. M., Kramer, A. F., & Mayhugh, J. (2006). The Effects of Speech Production and Speech Comprehension on Simulated Driving Performance. *Applied Cognitive Psychology, 20*(1), 43-63. <https://doi.org/10.1002/acp.1164>
- Kunze, A., Summerskill, S., Marshall, R., & Filtness, A. (2019). Automation transparency : Implications of uncertainty communication for human-automation interaction and interfaces. *Ergonomics*. <https://doi.org/10.1080/00140139.2018.1547842>
- Kvavilashvili, L., & Mandler, G. (2004). Out of one's mind : A study of involuntary semantic memories. *Cognitive Psychology, 48*(1), 47-94. [https://doi.org/10.1016/s0010-0285\(03\)00115-4](https://doi.org/10.1016/s0010-0285(03)00115-4)
- Lal, S. K., & Craig, A. (2001). A critical review of the psychophysiology of driver fatigue. *Biological Psychology, 55*(3), 173-194. [https://doi.org/10.1016/s0301-0511\(00\)00085-5](https://doi.org/10.1016/s0301-0511(00)00085-5)
- Land, M. F. (2006). Eye movements and the control of actions in everyday life. *Progress in Retinal and Eye Research, 25*(3), 296-324. <https://doi.org/10.1016/j.preteyeres.2006.01.002>
- Land, M. F., & Furneaux, S. (1997). The knowledge base of the oculomotor system. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 352*(1358), 1231-1239. <https://doi.org/10.1098/rstb.1997.0105>
- Land, M. F., & Hayhoe, M. (2001). In what ways do eye movements contribute to everyday activities? *Vision Research, 41*(25-26), 3559-3565. [https://doi.org/10.1016/s0042-6989\(01\)00102-x](https://doi.org/10.1016/s0042-6989(01)00102-x)
- Land, M. F., & Lee, D. N. (1994). Where we look when we steer. *Nature, 369*(6483), 742-744. <https://doi.org/10.1038/369742a0>
- Land, M. F., & McLeod, P. (2000). From eye movements to actions : How batsmen hit the ball. *Nature Neuroscience, 3*(12), 1340-1345. <https://doi.org/10.1038/81887>
- Land, M., & Horwood, J. (1995). Which parts of the road guide steering? *Nature, 377*(6547), 339-340. <https://doi.org/10.1038/377339a0>
- Land, M., Mennie, N., & Rusted, J. (1999). The roles of vision and eye movements in the control of activities of daily living. *Perception, 28*(11), 1311-1328. <https://doi.org/10.1068/p2935>

- Lappi, O., Rinkkala, P., & Pekkanen, J. (2017). Systematic Observation of an Expert Driver's Gaze Strategy—An On-Road Case Study. *Frontiers in Psychology, 8*, 620.
<https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.00620>
- Larsson, A. F. L., Kircher, K., & Andersson Hultgren, J. (2014). Learning from experience : Familiarity with ACC and responding to a cut-in situation in automated driving. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 27*, 229-237.
<https://doi.org/10.1016/j.trf.2014.05.008>
- Lee, J. D., & Moray, N. (1994). Trust, self-confidence, and operators' adaptation to automation. *International Journal of Human-Computer Studies, 40*(1), 153-184.
<https://doi.org/10.1006/ijhc.1994.1007>
- Lee, S. C., Yoon, S. H., & Ji, Y. G. (2021). Effects of Non-Driving-Related Task Attributes on Takeover Quality in Automated Vehicles. *International Journal of Human-Computer Interaction, 37*(3), 211-219. <https://doi.org/10.1080/10447318.2020.1815361>
- Lee, W. S., Sung, D. H., Lee, J. Y., Kim, Y. S., & Cho, J. H. (2007). *Driving Simulation for Evaluation of Driver Assistance Systems and Driving Management Systems*. Driving Simulation Conference, North America, Iowa, USA. <https://www.scinapse.io>
- Lehtonen, E., Lappi, O., Koirikivi, I., & Summala, H. (2014). Effect of driving experience on anticipatory look-ahead fixations in real curve driving. *Accident; analysis and prevention, 70C*, 195-208.
<https://doi.org/10.1016/j.aap.2014.04.002>
- Lehtonen, E., Lappi, O., Kotkanen, H., & Summala, H. (2013). Look-ahead fixations in curve driving. *Ergonomics, 56*. <https://doi.org/10.1080/00140139.2012.739205>
- Lemercier, C., Pecher, C., Berthié, G., Valery, B., Vidal, V., Paubel, P.-V., Cour, M., Fort, A., Galera, C., Gabaude, C., Lagarde, E., & 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>

- Lenné, M., Triggs, T., & Redman, J. (1998). Interactive effects of sleep deprivation, time of day, and driving experience on a driving task. *Sleep*. <https://doi.org/10.1093/SLEEP/21.1.38>
- Li, N., & Busso, C. (2015). Detecting Drivers' Mirror-Checking Actions and Its Application to Maneuver and Secondary Task Recognition. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, *17*, 1-13. <https://doi.org/10.1109/TITS.2015.2493451>
- Liang, N., Yang, J., Yu, D., Prakah-Asante, K. O., Curry, R., Blommer, M., Swaminathan, R., & Pitts, B. J. (2021). Using eye-tracking to investigate the effects of pre-takeover visual engagement on situation awareness during automated driving. *Accident Analysis & Prevention*, *157*, 106143. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2021.106143>
- Liu, C. C., Hosking, S. G., & Lenné, M. G. (2009). Predicting driver drowsiness using vehicle measures : Recent insights and future challenges. *Journal of Safety Research*, *40*(4), 239-245. <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2009.04.005>
- Louw, T., Goncalves, R., Torrao, G., Radhakrishnan, V., Lyu, W., Puente Guillen, P., & Merat, N. (2021). Do drivers change their manual car-following behaviour after automated car-following? *Cognition, Technology & Work*, *23*(4), 669-683. <https://doi.org/10.1007/s10111-020-00658-5>
- Louw, T., Markkula, G., Boer, E., Madigan, R., Carsten, O., & Merat, N. (2017). Coming back into the loop : Drivers' perceptual-motor performance in critical events after automated driving. *Accident Analysis & Prevention*, *108*, 9-18. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2017.08.011>
- Louw, T., & Merat, N. (2017). Are you in the loop? Using gaze dispersion to understand driver visual attention during vehicle automation. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, *76*, 35-50. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2017.01.001>
- Louw, T., Merat, N., & Jamson, A. (2015). Engaging With Highly Automated Driving : To Be Or Not To Be In The Loop? *Driving Assessment Conference*, 190-196. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2788.9760>

- Lutin, J., Kornhauser, A., & Lerner-Lam, E. (2013). The Revolutionary Development of Self-Driving Vehicles and Implications for the Transportation Engineering Profession. *Ite Journal*, 83, 28-32.
- Ma, R., & Kaber, D. B. (2005). Situation awareness and workload in driving while using adaptive cruise control and a cell phone. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 35(10), 939-953. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2005.04.002>
- Mackenzie, A. K., & Harris, J. M. (2015). Eye movements and hazard perception in active and passive driving. *Visual Cognition*, 23(6), 736-757. <https://doi.org/10.1080/13506285.2015.1079583>
- MacLean, A. W., Davies, D. R. T., & Thiele, K. (2003). The hazards and prevention of driving while sleepy. *Sleep Medicine Reviews*, 7(6), 507-521. [https://doi.org/10.1016/S1087-0792\(03\)90004-9](https://doi.org/10.1016/S1087-0792(03)90004-9)
- Madsen, M., & Gregor, S. (2000). Measuring human-computer trust. *Proceedings of the 11 th Australasian Conference on Information Systems*, 6–8.
- Maia, Q., Grandner, M. A., Findley, J., & Gurubhagavatula, I. (2013). Short and Long Sleep Duration and Risk of Drowsy Driving and the Role of Subjective Sleep Insufficiency. *Accident; analysis and prevention*, 59, 618-622. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2013.07.028>
- Manchon, J. B., Bueno, M., & Navarro, J. (2021). *How the Initial Level of Trust in Automated Driving Impacts Drivers' Behaviour and Early Trust Construction*. PsyArXiv. <https://doi.org/10.31234/osf.io/9kmqh>
- MarkVollrath, Schleicher, S., & Gelau, C. (2011). The influence of Cruise Control and Adaptive Cruise Control on driving behaviour – A driving simulator study. *Accident Analysis & Prevention*, 43(3), 1134-1139. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2010.12.023>
- Mars, F. (2016). *Hiérarchie des niveaux de contrôle de l'activité en conduite automobile : Application au contrôle de trajectoire et à la coopération homme-machine* [Habilitation à diriger des recherches, Université de Rennes 2]. <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-02938094>

- Mars, F., & Navarro, J. (2012). Where We Look When We Drive with or without Active Steering Wheel Control. *PLoS ONE*, 7(8), e43858. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0043858>
- Marti, P., Jallais, C., Koustanai, A., Guillaume, A., & Mars, F. (2021). Effect of driver's distraction on gaze behaviour, mental workload and takeover quality. *Driving Simulation Conference Europe 2021 VR*, 99-106. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03343285>
- Matsuda, T., & Makikawa, M. (2008). ECG monitoring of a car driver using capacitively-coupled electrodes. *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Annual International Conference, 2008*, 1315-1318. <https://doi.org/10.1109/IEMBS.2008.4649406>
- Matthews, M., & Beal, S. A. (2002). *Assessing Situation Awareness in Field Training Exercises*. <https://doi.org/10.21236/ada408560>
- Mehler, B., Reimer, B., & Coughlin, J. F. (2012). Sensitivity of Physiological Measures for Detecting Systematic Variations in Cognitive Demand From a Working Memory Task : An On-Road Study Across Three Age Groups. *Human Factors*, 54(3), 396-412. <https://doi.org/10.1177/0018720812442086>
- Mehler, B., Reimer, B., Coughlin, J. F., & Dusek, J. A. (2009). Impact of Incremental Increases in Cognitive Workload on Physiological Arousal and Performance in Young Adult Drivers. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2138(1), 6-12. <https://doi.org/10.3141/2138-02>
- Meilander, W. C. (1972). *Method and apparatus for vehicle traffic control* (United States Patent N° US3668403A). <https://patents.google.com/patent/US3668403A/en>
- Mennie, N., Hayhoe, M., & Sullivan, B. (2007). Look-ahead fixations : Anticipatory eye movements in natural tasks. *Experimental Brain Research*, 179(3), 427-442. <https://doi.org/10.1007/s00221-006-0804-0>

- Merat, N., & Jamson, A. (2009). How do drivers behave in a highly automated car. *In proceedings of the Fifth International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design, Iowa, USA*, 514-521.
- Merat, N., Jamson, A. H., Lai, F. C. H., & Carsten, O. (2012). Highly Automated Driving, Secondary Task Performance, and Driver State. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 54(5), 762-771. <https://doi.org/10.1177/0018720812442087>
- Merat, N., Seppelt, B., Louw, T., Engström, J., Lee, J. D., Johansson, E., Green, C. A., Katasaki, S., Monk, C., Itoh, M., McGehee, D., Sunda, T., Unoura, K., Victor, T., Schieben, A., & Keinath, A. (2019). The “Out-of-the-Loop” concept in automated driving : Proposed definition, measures and implications. *Cognition, Technology & Work*, 21(1), 87-98.
<https://doi.org/10.1007/s10111-018-0525-8>
- Merlhiot, G., & Bueno, M. (2021). How drowsiness and distraction can interfere with take-over performance : A systematic and meta-analysis review. *Accident; Analysis and Prevention*, 106536. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2021.106536>
- Merritt, S. M., Ako-Brew, A., Bryant, W. J., Staley, A., McKenna, M., Leone, A., & Shirase, L. (2019). Automation-Induced Complacency Potential : Development and Validation of a New Scale. *Frontiers in Psychology*, 10, 225. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2019.00225>
- Michon, J. (1985). A critical view of driver behavior models : What do we know. *Human behavior and traffic safety*, 485-524. https://doi.org/10.1007/978-1-4613-2173-6_19
- Mok, B., Johns, M., Miller, D., & Ju, W. (2017). Tunneled In : Drivers with Active Secondary Tasks Need More Time to Transition from Automation. *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 2840–2844.
<https://doi.org/10.1145/3025453.3025713>
- Mole, C. D., Lappi, O., Giles, O., Markkula, G., Mars, F., & Wilkie, R. M. (2019). Getting Back Into the Loop : The Perceptual-Motor Determinants of Successful Transitions out of Automated Driving. *Human Factors*, 61(7), 1037-1065. <https://doi.org/10.1177/0018720819829594>

- Moray, N., & Inagaki, T. (2000). Attention and complacency. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 1(4), 354-365. <https://doi.org/10.1080/14639220052399159>
- Muir, B., & Moray, N. (1996). Trust in automation. Part II. Experimental studies of trust and human intervention in a process control simulation. *Ergonomics*, 39, 429-460. <https://doi.org/10.1080/00140139608964474>
- Murray, S., Krasich, K., Schooler, J., & Seli, P. (2019). What's in a task? Complications in the study of the task-unrelated-thought (TUT) variety of mind wandering. *Perspectives on Psychological Science*, 15. <https://doi.org/10.1177/1745691619897966>
- Nakajima, Y., & Tanaka, K. (2017). Effects of active and passive secondary tasks in a take-over situation during automated driving. *2017 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, 1161-1166. <https://doi.org/10.1109/SMC.2017.8122769>
- Naseralavi, S., Nadimi, N., Saffarzadeh, M., & Mamdoohi, A. R. (2013). A general formulation for time-to-collision safety indicator. *Proceedings of the ICE - Transport*, 166, 294-304. <https://doi.org/10.1680/tran.11.00031>
- Naujoks, F., Purucker, C., & Neukum, A. (2016). Secondary task engagement and vehicle automation – Comparing the effects of different automation levels in an on-road experiment. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 38, 67-82. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2016.01.011>
- Navarro, J., François, M., & Mars, F. (2016). Obstacle avoidance under automated steering : Impact on driving and gaze behaviours. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 43, 315-324. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2016.09.007>
- Neubauer, C., Matthews, G., & Saxby, D. (2012). The Effects of Cell Phone Use and Automation on Driver Performance and Subjective State in Simulated Driving. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 56(1), 1987-1991. <https://doi.org/10.1177/1071181312561415>
- NHTSA. (2008). *National motor vehicle crash causation survey : Report to congress* (DOT HS, 811,59).

- Nilsson, E., Victor, T., Ljung Aust, M., Svanberg, B., & Gustavsson, P. (2020). On-to-off-path gaze shift cancellations lead to gaze concentration in cognitively loaded car drivers : A simulator study exploring gaze patterns in relation to a cognitive task and the traffic environment. *Transportation Research Part F Traffic Psychology and Behaviour*, 75. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2020.09.013>
- Nilsson, L. (1995, novembre). SAFETY EFFECTS OF ADAPTIVE CRUISE CONTROLS IN CRITICAL TRAFFIC SITUATIONS (Volume 3). Article Volume 3. Steps Forward. Intelligent Transport Systems World CongressVERTIS. <https://trid.trb.org/view/462221>
- Nunes, L., & Recarte, M. A. (2002). COGNITIVE DEMANDS OF HANDS-FREE-PHONE CONVERSATION WHILE DRIVING. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 5(2). <https://trid.trb.org/view/732492>
- Otmani, S., Pebayle, T., Roge, J., & Muzet, A. (2005). Effect of driving duration and partial sleep deprivation on subsequent alertness and performance of car drivers. *Physiology & Behavior*, 84(5), 715-724. <https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2005.02.021>
- 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>
- Otte, D., Pund, B., & Jaensch, M. (2009). A New Approach of Accident Causation Analysis by Seven Steps ACASS. *Undefined*. <https://www.semanticscholar.org/paper/A-New-Approach-of-Accident-Causation-Analysis-by-Otte-Pund/6647a55f20cce1029cc7a84dc9c118e1345dd237>
- Pack, A. I., Pack, A. M., Rodgman, E., Cucchiara, A., Dinges, D. F., & Schwab, C. W. (1995). Characteristics of crashes attributed to the driver having fallen asleep. *Accident; Analysis and Prevention*, 27(6), 769-775. [https://doi.org/10.1016/0001-4575\(95\)00034-8](https://doi.org/10.1016/0001-4575(95)00034-8)
- Papadakaki, M., Tzamalouka, G., Gnardellis, C., Lajunen, T. J., & Chliaoutakis, J. (2016). Driving performance while using a mobile phone : A simulation study of Greek professional drivers.

- Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 38, 164-170.
<https://doi.org/10.1016/j.trf.2016.02.006>
- Parasuraman, R., & Manzey, D. H. (2010). Complacency and bias in human use of automation : An attentional integration. *Human Factors*, 52(3), 381-410.
<https://doi.org/10.1177/0018720810376055>
- Parasuraman, R., Molloy, R., & Singh, I. L. (1993). Performance consequences of automation-induced « complacency. » *The International Journal of Aviation Psychology*, 3(1), 1-23.
https://doi.org/10.1207/s15327108ijap0301_1
- Pelz, J. B., & Canosa, R. (2001). Oculomotor behavior and perceptual strategies in complex tasks. *Vision Research*, 41(25), 3587-3596. [https://doi.org/10.1016/S0042-6989\(01\)00245-0](https://doi.org/10.1016/S0042-6989(01)00245-0)
- Peng, Y., Boyle, L. N., & Hallmark, S. L. (2013). Driver's lane keeping ability with eyes off road : Insights from a naturalistic study. *Accident Analysis & Prevention*, 50, 628-634.
<https://doi.org/10.1016/j.aap.2012.06.013>
- Pepin, G. (2018). *Recherche d'indicateurs d'inattention en conduite automobile : Apports des mesures physiologiques et comportementales* [Phdthesis, Université de Lyon]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02071126>
- Pfleging, B., Rang, M., & Broy, N. (2016). Investigating user needs for non-driving-related activities during automated driving. *Proceedings of the 15th International Conference on Mobile and Ubiquitous Multimedia*, 91–99. <https://doi.org/10.1145/3012709.3012735>
- Philip, P., Sagaspe, P., Lagarde, E., Leger, D., Ohayon, M. M., Bioulac, B., Boussuge, J., & Taillard, J. (2010). Sleep disorders and accidental risk in a large group of regular registered highway drivers. *Sleep Medicine*, 11(10), 973-979. <https://doi.org/10.1016/j.sleep.2010.07.010>
- Philip, P., Taillard, J., Sagaspe, P., Valtat, C., Sanchez-Ortuno, M., Moore, N., Charles, A., & Bioulac, B. (2004). Age, performance and sleep deprivation. *Journal of Sleep Research*, 13(2), 105-110.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2869.2004.00399.x>

- Pieters, R., & Wedel, M. (2008). Informativeness of eye movements for visual marketing : Six cornerstones. In *Visual marketing : From attention to action* (p. 43-71). Taylor & Francis Group/Lawrence Erlbaum Associates.
- Pilgerstorfer, M., & Boets, S. (2017). The impact of distraction on driving behaviour in urban traffic. : Results of a simulator-based study. *KfV - Sicher Leben*, 7. <https://trid.trb.org/view/1498211>
- Qu, W., Ge, Y., Xiong, Y., Carciofo, R., Zhao, W., & Zhang, K. (2015). The relationship between mind wandering and dangerous driving behavior among Chinese drivers. *Safety Science*, 78, 41-48. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2015.04.016>
- Radlmayr, J., Gold, C., Lorenz, L., Farid, M., & Bengler, K. (2014). How Traffic Situations and Non-Driving Related Tasks Affect the Take-Over Quality in Highly Automated Driving. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 58(1), 2063-2067. <https://doi.org/10.1177/1541931214581434>
- Ranney, T. A. (1994). Models of driving behavior : A review of their evolution. *Accident Analysis & Prevention*, 26(6), 733-750. [https://doi.org/10.1016/0001-4575\(94\)90051-5](https://doi.org/10.1016/0001-4575(94)90051-5)
- Rasmussen, J. (1983). Skills, rules, and knowledge; signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, SMC-13*(3), 257-266. <https://doi.org/10.1109/TSMC.1983.6313160>
- Rayner, K. (1998). Eye movements in reading and information processing : 20 years of research. *Psychological Bulletin*, 124(3), 372-422. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.124.3.372>
- Recarte, M., & Nunes, L. (2000). Effects of Verbal and Spatial–Imagery Tasks on Eye Fixations While Driving. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 6. <https://doi.org/10.1037/1076-898X.6.1.31>
- Reichle, E. D., Reineberg, A. E., & Schooler, J. W. (2010). Eye movements during mindless reading. *Psychological Science*, 21(9), 1300-1310. <https://doi.org/10.1177/0956797610378686>
- Reimer, B., Mehler, B., Coughlin, J. F., Godfrey, K. M., & Tan, C. (2009). An on-road assessment of the impact of cognitive workload on physiological arousal in young adult drivers. *Proceedings of*

- the 1st International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*, 115–118. <https://doi.org/10.1145/1620509.1620531>
- Reimer, B., Mehler, B., Wang, Y., & Coughlin, J. F. (2012). A Field Study on the Impact of Variations in Short-Term Memory Demands on Drivers' Visual Attention and Driving Performance Across Three Age Groups. *Human Factors*, 54(3), 454-468. <https://doi.org/10.1177/0018720812437274>
- Rockwell, T. H. (1988). Spare Visual Capacity in Driving-Revisited : New Empirical Results for an Old Idea. *Vision in Vehicles II*, 317-324.
- Rothkopf, C. A., Ballard, D. H., & Hayhoe, M. M. (2007). Task and context determine where you look. *Journal of Vision*, 7(14), 16.1-20. <https://doi.org/10.1167/7.14.16>
- Rudin-Brown, C. M., & Parker, H. A. (2004). Behavioural adaptation to adaptive cruise control (ACC) : Implications for preventive strategies. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 7(2), 59-76. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2004.02.001>
- Rudin-Brown, C., Young, K., Patten, C., Lenné, M., & Ceci, R. (2013). Driver distraction in an unusual environment : Effects of text-messaging in tunnels. *Accident; analysis and prevention*, 50, 122-129. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2012.04.002>
- SAE International. (2016). *Taxonomy and Definitions for Terms Related to On-Road Motor Vehicle Automated Driving Systems* (Technical Report J3016_201609). SAE International.
- Salvucci, D. D. (2006). Modeling Driver Behavior in a Cognitive Architecture. *Human Factors*, 48(2), 362-380. <https://doi.org/10.1518/001872006777724417>
- Salvucci, D. D., & Gray, R. (2004). A Two-Point Visual Control Model of Steering. *Perception*, 33(10), 1233-1248. <https://doi.org/10.1068/p5343>
- Salvucci, D. D., Markley, D., Zuber, M., & Brumby, D. P. (2007). iPod distraction : Effects of portable music-player use on driver performance. *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 243–250. <https://doi.org/10.1145/1240624.1240665>

- Samuel, S., Borowsky, A., Zilberstein, S., & Fisher, D. L. (2016). Minimum Time to Situation Awareness in Scenarios Involving Transfer of Control from an Automated Driving Suite. *Transportation Research Record*, 2602(1), 115-120. <https://doi.org/10.3141/2602-14>
- Scharfe, M. S. L., Zeeb, K., & Russwinkel, N. (2020). The Impact of Situational Complexity and Familiarity on Takeover Quality in Uncritical Highly Automated Driving Scenarios. *Information*, 11(2), 115. <https://doi.org/10.3390/info11020115>
- Schmidt, E., Schrauf, M., Simon, M., Fritzsche, M., Buchner, A., & Kincses, W. (2009). Drivers' misjudgement of vigilance state during prolonged monotonous daytime driving. *Accident; analysis and prevention*. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2009.06.007>
- Schnebelen, D., Charron, C., & Mars, F. (2020). Estimating the out-of-the-loop phenomenon from visual strategies during highly automated driving. *Accident Analysis & Prevention*, 148, 105776. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2020.105776>
- Schnebelen, D., Lappi, O., Mole, C., Pekkanen, J., & Mars, F. (2019). Looking at the Road When Driving Around Bends : Influence of Vehicle Automation and Speed. *Frontiers in Psychology*, 10, 1699. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2019.01699>
- Schömig, N., Hargutt, V., Neukum, A., Petermann-Stock, I., & Othersen, I. (2015). The Interaction Between Highly Automated Driving and the Development of Drowsiness. *Procedia Manufacturing*, 3, 6652-6659. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.11.005>
- Schooler, J. (2002). Re-representing consciousness : Dissociations between experience and meta-consciousness. *Trends in cognitive sciences*, 6, 339-344. [https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(02\)01949-6](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(02)01949-6)
- Schooler, J. W., Reichle, E. D., & Halpern, D. V. (2004). Zoning Out while Reading : Evidence for Dissociations between Experience and Metacognition. In *Thinking and seeing : Visual metacognition in adults and children* (p. 203-226). MIT Press.

- Schooler, J. W., 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>
- Scialfa, C. T., Borkenhagen, D., Lyon, J., Deschênes, M., Horswill, M., & Wetton, M. (2012). The effects of driving experience on responses to a static hazard perception test. *Accident Analysis & Prevention*, 45, 547-553. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2011.09.005>
- Seli, P., Risko, E., & Smilek, D. (2016). On the Necessity of Distinguishing Between Unintentional and Intentional Mind Wandering. *Psychological Science*, 27. <https://doi.org/10.1177/0956797616634068>
- Shen, S., & Neyens, D. M. (2017). Assessing drivers' response during automated driver support system failures with non-driving tasks. *Journal of Safety Research*, 61, 149-155. <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2017.02.009>
- Shi, E., & Frey, A. T. (2021). Non-Driving-Related Tasks During Level 3 Automated Driving Phases—Measuring What Users Will Be Likely to Do. *Technology, Mind, and Behavior*, 2(2). <https://doi.org/10.1037/tmb0000006>
- Singh, I. L., Molloy, R., & Parasuraman, R. (1993). Automation-induced « complacency » : Development of the Complacency-Potential Rating Scale. *The International Journal of Aviation Psychology*, 3(2), 111-122. https://doi.org/10.1207/s15327108ijap0302_2
- Sivak, M. (1996). The information that drivers use : Is it indeed 90% visual? *Perception*, 25(9), 1081-1089. <https://doi.org/10.1068/p251081>
- Skipper, J. H., & Wierwille, W. W. (1986). Drowsy Driver Detection Using Discriminant Analysis. *Human Factors*, 28(5), 527-540. <https://doi.org/10.1177/001872088602800503>
- 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., Brown, K. S., Tipper, C., Giesbrecht, B., Franklin, M. S., Mrazek, M. D., Carlson, J. M., & Schooler, J. W. (2011). Pupillometric Evidence for the Decoupling of Attention from Perceptual Input during Offline Thought. *PLOS ONE*, *6*(3), e18298.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0018298>
- 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. M., Baracaia, S. F., Lowe, M., & Obonsawin, M. (2003). Task unrelated thought whilst encoding information. *Consciousness and Cognition*, *12*(3), 452-484.
[https://doi.org/10.1016/S1053-8100\(03\)00018-7](https://doi.org/10.1016/S1053-8100(03)00018-7)
- Smallwood, J., Obonsawin, M., & Heim, D. (2003). Task unrelated thought : The role of distributed processing. *Consciousness and Cognition*, *12*(2), 169-189. [https://doi.org/10.1016/s1053-8100\(02\)00003-x](https://doi.org/10.1016/s1053-8100(02)00003-x)
- Smallwood, J., Obonsawin, M., & Reid, H. (2002). The Effects of Block Duration and Task Demands on the Experience of Task Unrelated Thought. *Imagination, Cognition and Personality*, *22*(1), 13-31. <https://doi.org/10.2190/TBML-N8JN-W5YB-4L9R>
- Smallwood, J., O'Connor, R. C., Sudbery, M. V., & Obonsawin, M. (2007). Mind-wandering and dysphoria. *Cognition and Emotion*, *21*(4), 816-842.
<https://doi.org/10.1080/02699930600911531>
- Smallwood, J., & Schooler, J. (2006). The Restless Mind. *Psychological bulletin*, *132*, 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*(1), 487-518.
<https://doi.org/10.1146/annurev-psych-010814-015331>

- Son, J., Reimer, B., Mehler, B., Pohlmeier, A. E., Godfrey, K. M., Orszulak, J., Long, J., Kim, M. H., Lee, Y. T., & Coughlin, J. F. (2010). Age and cross-cultural comparison of drivers' cognitive workload and performance in simulated urban driving. *International Journal of Automotive Technology*, *11*(4), 533-539. <https://doi.org/10.1007/s12239-010-0065-6>
- Stanton, N. A., Young, M., & McCaulder, B. (1997). Drive-by-wire : The case of driver workload and reclaiming control with adaptive cruise control. *Safety Science*, *27*(2), 149-159. [https://doi.org/10.1016/S0925-7535\(97\)00054-4](https://doi.org/10.1016/S0925-7535(97)00054-4)
- Stanton, N., Young, M., Walker, G., Turner, H., & Randle, S. (2001). Automating the Driver's Control Tasks. *International Journal of Cognitive Ergonomics*, *5*. https://doi.org/10.1207/S15327566IJCE0503_5
- Stavrinos, D., Jones, J. L., Garner, A. A., Griffin, R., Franklin, C. A., Ball, D., Welburn, S. C., Ball, K. K., Sisiopiku, V. P., & Fine, P. R. (2013). Impact of distracted driving on safety and traffic flow. *Accident; Analysis and Prevention*, *61*, 63-70. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2013.02.003>
- Strand, N., Nilsson, J., Karlsson, I. C. M., & Nilsson, L. (2014). Semi-automated versus highly automated driving in critical situations caused by automation failures. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, *27*, 218-228. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2014.04.005>
- Strayer, D. L., & Johnston, W. A. (2001). Driven to Distraction : Dual-Task Studies of Simulated Driving and Conversing on a Cellular Telephone. *Psychological Science*, *12*(6), 462-466. <https://doi.org/10.1111/1467-9280.00386>
- Summala, H., Nieminen, T., & Punto, M. (1996). MAINTAINING LANE POSITION WITH PERIPHERAL VISION DURING IN-VEHICLE TASKS. *Human Factors*, *38*(3). <https://trid.trb.org/view/469734>
- Tatler, B. W., Wade, N. J., Kwan, H., Findlay, J. M., & Velichkovsky, B. M. (2010). Yarbus, eye movements, and vision. *i-Perception*, *1*(1). <https://doi.org/10.1068/i0382>
- Taylor, R. M. (2011). Situational Awareness Rating Technique (Sart) : The Development of a Tool for Aircrew Systems Design. In *Situational Awareness*. Routledge.

- Teasdale, J. D., Proctor, L., Lloyd, C. A., & Baddeley, A. D. (1993). Working memory and stimulus-independent thought : Effects of memory load and presentation rate. *European Journal of Cognitive Psychology*, 5(4), 417-433. <https://doi.org/10.1080/09541449308520128>
- Teasdale, J. D., Segal, Z., & Williams, J. M. (1995). How does cognitive therapy prevent depressive relapse and why should attentional control (mindfulness) training help? *Behaviour Research and Therapy*, 33(1), 25-39. [https://doi.org/10.1016/0005-7967\(94\)e0011-7](https://doi.org/10.1016/0005-7967(94)e0011-7)
- Thiffault, P., & Bergeron, J. (2003). Fatigue and individual differences in monotonous simulated driving. *Personality and Individual Differences*, 34, 159-176. [https://doi.org/10.1016/S0191-8869\(02\)00119-8](https://doi.org/10.1016/S0191-8869(02)00119-8)
- Tientrakool, P., Ho, Y.-C., & Maxemchuk, N. F. (2011). Highway Capacity Benefits from Using Vehicle-to-Vehicle Communication and Sensors for Collision Avoidance. *2011 IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall)*, 1-5. <https://doi.org/10.1109/VETEFC.2011.6093130>
- Tong, M. H., Zohar, O., & Hayhoe, M. M. (2017). Control of gaze while walking : Task structure, reward, and uncertainty. *Journal of Vision*, 17(1), 28. <https://doi.org/10.1167/17.1.28>
- Tsugawa, S., Yatabe, T., Hirose, T., & Matsumoto, S. (1979). An automobile with artificial intelligence. *Proceedings of the 6th international joint conference on Artificial intelligence - Volume 2*, 893-895.
- Veltman, J. A., & Gaillard, A. W. K. (1998). Physiological workload reactions to increasing levels of task difficulty. *Ergonomics*, 41(5), 656-669. <https://doi.org/10.1080/001401398186829>
- Vicente, J., Laguna, P., Bartra, A., & Bailón, R. (2016). Drowsiness detection using heart rate variability. *Medical & Biological Engineering & Computing*, 54(6), 927-937. <https://doi.org/10.1007/s11517-015-1448-7>
- Victor, T. (2005). *Keeping Eye and Mind on the Road*. <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:uu:diva-6241>

- Vogelpohl, T., Kühn, M., Hummel, T., & Vollrath, M. (2019). Asleep at the automated wheel- Sleepiness and fatigue during highly automated driving. *Accident; Analysis and Prevention*, 126, 70-84. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2018.03.013>
- Wade, N. (2020). Looking at Buswell's pictures. *Journal of Eye Movement Research*, 13. <https://doi.org/10.16910/jemr.13.2.4>
- Walker, F., Verwey, W., & Martens, M. (2018). Gaze Behaviour as a Measure of Trust in Automated Vehicles. *Proceedings of the 6th Humanist Conference, The Hague, Netherlands*.
- Wang, Y., Reimer, B., Dobres, J., & Mehler, B. (2014). The sensitivity of different methodologies for characterizing drivers' gaze concentration under increased cognitive demand. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 26, 227-237. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2014.08.003>
- Wann, J. P., & Swapp, D. K. (2000). Why you should look where you are going. *Nature Neuroscience*, 3(7), 647-648. <https://doi.org/10.1038/76602>
- Ward, N. J. (2000). Automation of task processes : An example of intelligent transportation systems. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, 10(4), 395-408. [https://doi.org/10.1002/1520-6564\(200023\)10:4<395::AID-HFM3>3.0.CO;2-3](https://doi.org/10.1002/1520-6564(200023)10:4<395::AID-HFM3>3.0.CO;2-3)
- Waymo. (s. d.). *Waymo Story*. Waymo. Consulté 26 avril 2022, à l'adresse <https://waymo.com/company/>
- White, H., Large, D. R., Salanitri, D., Burnett, G., Lawson, A., & Box, E. (2019). Rebuilding drivers' situation awareness during take-over requests in level 3 automated cars. *Contemporary Ergonomics and Human Factors*, 9.
- Wickens, C. (2002). Multiple resources and performance prediction. *Theoretical Issues in Ergonomic Science*, 3, 159-177. <https://doi.org/10.1080/14639220210123806>
- Wickens, C. D., & Kessel, C. (1979). The Effects of Participatory Mode and Task Workload on the Detection of Dynamic System Failures. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 9(1), 24-34. <https://doi.org/10.1109/TSMC.1979.4310070>

- Wickens, C., & Kessel, C. (1981). Failure Detection in Dynamic Systems. *Human Detection and Diagnosis of System Failures*, 155-169. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-9230-3_11
- Wierwille, W. W., & Ellsworth, L. A. (1994). Evaluation of driver drowsiness by trained raters. *Accident Analysis & Prevention*, 26(5), 571-581. [https://doi.org/10.1016/0001-4575\(94\)90019-1](https://doi.org/10.1016/0001-4575(94)90019-1)
- Wilkie, R. M., Kountouriotis, G. K., Merat, N., & Wann, J. P. (2010). Using vision to control locomotion : Looking where you want to go. *Experimental Brain Research*, 204(4), 539-547. <https://doi.org/10.1007/s00221-010-2321-4>
- Wright, T. J., Samuel, S., Borowsky, A., Zilberstein, S., & Fisher, D. L. (2016). Experienced drivers are quicker to achieve situation awareness than inexperienced drivers in situations of transfer of control within a Level 3 autonomous environment. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 60(1), 270-273. <https://doi.org/10.1177/1541931213601062>
- Wu, Y., Kihara, K., Takeda, Y., Sato, T., Akamatsu, M., & Kitazaki, S. (2020). The Relationship Between Drowsiness Level and Takeover Performance in Automated Driving. *HCI*. https://doi.org/10.1007/978-3-030-50537-0_11
- Yan, W., Wong, S. C., Li, Y. C., Sze, N. N., & Yan, X. (2015). Young driver distraction by text messaging : A comparison of the effects of reading and typing text messages in Chinese versus English. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 31, 87-98. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2015.03.010>
- Yang, L., Babayi Semiromi, M., Auger, D., Dmitruk, A., Brighton, J., & Zhao, Y. (2020). *The implication of non-driving activities on situation awareness and take-over performance in level 3 automation*. 5075-5080. <https://doi.org/10.1109/IECON43393.2020.9254533>
- Yanko, M. R., & 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>

- Yannis, G., Laiou, A., Papantoniou, P., & Christoforou, C. (2014). Impact of texting on young drivers' behavior and safety on urban and rural roads through a simulation experiment. *Journal of Safety Research*, 49, 25-31. <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2014.02.008>
- Yarbus, A. L. (1967). Eye Movements During Perception of Complex Objects. In *Eye Movements and Vision* (p. 171-211). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4899-5379-7_8
- Yousfi, E. (2018). *Conscience de la situation et performance de conduite lors de la reprise en main en conduite automobile déléguée*. [Phdthesis, Université Paris 8].
<https://octaviana.fr/document/2018PA080098>.
- Zeeb, K., Buchner, A., & Schrauf, M. (2015). What determines the take-over time? An integrated model approach of driver take-over after automated driving. *Accident Analysis & Prevention*, 78, 212-221. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2015.02.023>
- Zeeb, K., Buchner, A., & Schrauf, M. (2016). Is take-over time all that matters? The impact of visual-cognitive load on driver take-over quality after conditionally automated driving. *Accident Analysis & Prevention*, 92, 230-239. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2016.04.002>
- Zhang, B., de Winter, J., Varotto, S., Happee, R., & Martens, M. (2019). Determinants of take-over time from automated driving : A meta-analysis of 129 studies. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 64, 285-307. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2019.04.020>
- Zhang, T., Yang, J., Liang, N., Pitts, B. J., Prakah-Asante, K. O., Curry, R., Duerstock, B. S., Wachs, J. P., & Yu, D. (2020). Physiological Measurements of Situation Awareness : A Systematic Review. *Human Factors*, 0018720820969071. <https://doi.org/10.1177/0018720820969071>

Titre : Étude de l'état attentionnel des conducteurs en conduite automatisée à partir des stratégies visuelles

Mots clés : stratégies visuelles, conduite automatisée, sortie de boucle, reprise en main, vagabondage de la pensée

Résumé : Ce travail a porté sur l'évaluation de l'état attentionnel de conducteurs à bord d'un véhicule hautement automatisé. Un accent particulier a été mis sur l'analyse des stratégies visuelles du conducteur. Les deux premières expérimentations ont porté sur le lien entre distraction, stratégies visuelles et qualité de la reprise en main. Pour ce faire, les conducteurs ont réalisé des activités non liées à la conduite pendant une phase de conduite autonome et ont dû faire face à une demande de reprise en main non planifiée dans une situation d'évitement d'obstacle. Les résultats montrent qu'il existe un effet de la localisation du regard au moment de la demande de reprise en main mais également du niveau de l'élaboration de la

conscience de la situation sur la qualité de la reprise en main. La dernière expérimentation s'est intéressée à l'effet de différentes modalités d'automatisation sur l'inattention du conducteur, prenant la forme d'un vagabondage de la pensée. L'évolution du vagabondage au fil du temps a été estimée en modélisant les stratégies visuelles des conducteurs. Les résultats montrent que le vagabondage augmente très fortement pour atteindre des niveaux élevés très rapidement puis fluctue autour d'une tendance stable. Ces résultats sont discutés dans la perspective du développement des outils d'évaluation de l'état du conducteur à bord des véhicules autonomes.

Title : Study of driver's attentional state in automated driving based on visual strategies

Keywords : visual strategies, automated driving, out-of-the-loop, takeover, mindwandering

Abstract : This work concerned the assessment of drivers' attentional state in highly automated vehicle. A specific attention had been placed on the analysis of driver's visual strategies. The first two experiments dealt on the link between distraction, visual strategies and takeover quality. To that end, drivers had to realize non-driving activities during automated driving and had to deal with a non-planned takeover in obstacle avoidance situation. Results showed that there was an effect of the gaze location at the time of the takeover request but also an effect of the development of situational awareness on the

takeover quality. The last experiment looked at the effect of different automation modes on driver inattention in the form of mindwandering. The evolution of mindwandering over time has been estimated by modeling the driver's visual strategies. Results showed that mindwandering increased strongly to reach high levels very quickly and then fluctuated around a stable trend. This results are discussed in the context of the development of driver monitoring systems for autonomous vehicle.